

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



TRABAJO DE GRADUACIÓN

“DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO HBV EN LA CUENCA DEL RÍO PAZ Y SU USO EN EL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR INUNDACIONES”.

PRESENTADO POR:

FELIPE ALFREDO ROSA HERNÁNDEZ.

JOSÉ RUBÉN VELÁSQUEZ URIBE.

PARA OPTAR AL GRADO DE:

INGENIERO CIVIL

DOCENTE DIRECTOR:

ING. RAÚL ERNESTO MARTÍNEZ BERMÚDEZ

MAYO 2013

SANTA ANA

EL SALVADOR

CENTRO AMÉRICA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



TRABAJO DE GRADUACIÓN

“DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO HBV EN LA CUENCA DEL RÍO PAZ Y SU USO EN EL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR INUNDACIONES”.

PRESENTADO POR:

FELIPE ALFREDO ROSA HERNÁNDEZ.
JOSÉ RUBÉN VELÁSQUEZ URIBE.

PARA OPTAR AL GRADO DE:

INGENIERO CIVIL

DOCENTE DIRECTOR:

ING. RAÚL ERNESTO MARTÍNEZ BERMÚDEZ

ASESORES:

ING. MSc. JORGE ANTONIO CASTANEDA CERÓN
ING. MSc. ROBERTO ADOLFO CERÓN PINEDA

SANTA ANA, 30 DE MAYO DE 2013.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

VICERRECTORA ACADÉMICA:

MAESTRA ANA MARÍA GLOWER DE ALVARADO

SECRETARIA GENERAL:

DRA. ANA LETICIA ZAVALA DE AMAYA

FISCAL GENERAL:

LCDO. FRANCISCO CRUZ LETONA

FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE

DECANO:

LCDO. RAÚL ERNESTO AZCÚNAGA LÓPEZ

VICEDECANO:

ING. WILLIAM VIRGILIO ZAMORA GIRÓN

SECRETARIO DE LA FACULTAD:

LCDO. VICTOR HUGO MERINO QUEZADA

JEFA DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA:

ING. MSc. SORAYA LISSETTE BARRERA DE GARCÍA

DOCENTE DIRECTOR:

ING. RAÚL ERNESTO MARTÍNEZ BERMÚDEZ

AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS GENERALES:

Gracias a Dios Todopoderoso por poner en el camino a personas e instituciones excepcionales que han colaborado de una u otra manera en el desarrollo de este trabajo de grado, que Dios los Bendiga y los proteja por siempre.

A la Ing. Soraya Lissette Barrera de García, Jefe del Departamento de Ingeniería de la Facultad Multidisciplinaria de Occidente (UES FMO), por su apoyo al desarrollo de la actividad experimental de esta investigación en El Salvador y Guatemala.

Al Ing. Raúl Ernesto Martínez Bermúdez, Docente Director, por todo su aporte técnico y científico en el desarrollo de este trabajo de grado.

Al Ing. Max Adalberto Hernández, Coordinador General de la carrera de Ingeniería Civil de la FMO, por sus conocimientos compartidos a lo largo de nuestra formación académica y profesional.

A los Ingenieros y Msc. Jorge Antonio Castaneda Cerón y Roberto Adolfo Cerón Pineda Asesores Externos del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador (MARN), por compartir sus conocimientos técnicos, científicos y profesionales a los largo el desarrollo de este trabajo de grado.

Al Ing. Msc. José Mauricio Martínez García, Coordinador del área de Hidrología del MARN, al Tec. Elizander Valle, Ing. Rafael Henríquez e Ing. Miguel Alvarenga del área de Hidrología del DGOA, al Ing. Luis Chipagua y al Tec. Víctor Calero del Observatorio Ambiental/Servicio Hidrológico Nacional, y a la Inga. Msc. Adriana Erazo Chica del Área de Investigación Hidrológica del MARN, por su apoyo técnico al desarrollo de esta investigación.

A los Ing. Agr. Msc. José Mauricio Tejada, Ing. Agr. Jairo Sánchez, e Ing. Agr. Salomón Rivas, por todo el apoyo técnico y científico en la determinación experimental de la Infiltración, Conductividad Hidráulica, y Capacidad de Campo. Y al Ing. Agr. Imendia Flores por su aporte técnico científico en la determinación de la Textura de suelos.

A José Mejía, Douglas Aquino, Aldo Mojica, Edwin Escalante y Miguel Ángel Artero por colaborar en el desarrollo de las pruebas de campo en El Salvador y Guatemala.

Agradecimientos especiales a todas las instituciones que aportaron su valiosa ayuda para la realización de esta investigación, entre las cuales se pueden mencionar: La Universidad de El Salvador (UES), al Departamento de Recursos Naturales de la Facultad de Ciencias Agronómicas y al Departamento de Ingeniería y Arquitectura de la Facultad Multidisciplinaria de Occidente, al Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales y La Dirección General del Observatorio Ambiental y sus diferentes áreas (Hidrología, Meteorología y Geología), a las delegaciones de la Policía Nacional Civil de los municipios de Ahuachapán, Chalchuapa, El Coco, San Sebastián Salitrillo, y Tacuba en El Salvador y la Comisaria 21 del Municipio de Jutiapa en Guatemala, así mismo la Delegación de la Frontera las Chinamas de la Policía Binacional y personal de aduana.

Felipe Alfredo Rosa Hernández

José Rubén Velásquez Uribe

Agradezco a la Santísima Trinidad Dios Padre, Dios Hijo y Dios Espíritu Santo por regalarme el don de la vida, la sabiduría y fortaleza para alcanzar este triunfo, agradezco también a mi Madre La Santísima Virgen María por regalarme su protección y cuidado.

A mi Hijo Alejandro y mi Esposa Carmencita, por ser la razón de mi vida y apoyarme en todo momento, infinitas gracias por su apoyo y oraciones ya que sin ustedes hubiese sido difícil alcanzar esta meta, los amo con todo mi corazón.

A mi Papá Facundo Rosa por apoyarme en cada momento de mi vida, a mi Mamá Juana Francisca Hernández por sus consejos y oraciones, a mis hermanos Claudia, Yesenia y Oliverio por ayudarme y creer en mí, a mis Sobrinos Jeymi, Alessandra, Lupita, Enrique y Anderson, a Erika y Monchito. A mis suegros Salvador Figueroa y Transito del Carmen Madrid por apoyarme y creer en que lograría este triunfo, a mis cuñados Miguel, Marta, Salvador, Saúl y Lupita, a Jenifer, Eli, Idania, Fernandito, Gaby, Emely y Bryan.

A mis Hermanos de la Comunidad Carismática Católica San Miguel Arcángel por sus oraciones y consejos, a mis hermanos y hermanas del Ministerio de Alabanza Cesar, Miguel, Emmanuel, Oscar, Walter y Oscarito, a la familia Magaña especialmente a mi hermana María Enma Viuda de Magaña y hermana Irma Cuellar, a mis padrinos Pedro González y Rosa María Arévalo de González, al Hermano Fredy y familia, gracias por sus oraciones.

A mi compañero de Tesis Rubén Uribe por creer en que se puede lograr todo lo que te propongas en la vida si pones tu confianza en Dios. A la familia Velásquez Uribe por apoyarnos en todos los momentos difíciles, gracias Niña Angélica, Damaris, Ely, Yuri Madlen, Alejandrita y Carlitos.

A mis amigos William Alberto, Xavier, a mi comadre María Elena, Irma, Olivia Jeaneth y a mi gran amigo Rudy Ernesto Alegría y familia, a Osvaldo Artero gracias por su amistad y confianza.

A la Universidad de El Salvador por regalarme todos los conocimientos técnicos necesarios para iniciar una nueva etapa en mi vida. Y a todos aquellos, que de alguna forma u otra han colaborado de mil maneras en mi formación académica, les doy MUCHAS GRACIAS.

Felipe Alfredo Rosa Hernández

Al Dios Altísimo y Sublime; mi Dios Eterno y Todopoderoso por mostrarme su amor incondicional y darme las fuerzas para seguir adelante en todo momento, a Él sea la Gloria por los siglos de los siglos.

A mi abuelo José Uribe González (Q.D.D.G.) por enseñarme el buen camino, la perseverancia y por ser el mejor ejemplo para mí; a mi abuela Gloria Angélica Álvarez Vda. de Uribe por ser mi apoyo en todo momento, por darme amor, ánimos y por su valiosa ayuda sin reservas.

A mi Madre Elina Uribe Álvarez por darme su amor y ayuda en todo tiempo, por dar su mejor esfuerzo por ayudarme a salir adelante, y a mi Padre Rubén Velásquez por animarme a seguir hacia adelante.

A mis hermanas: Madlen, Damaris, Yuri y Ely por ser las mejores del mundo y por comprenderme y apoyarme siempre.

A mis Pastores Oscar García y Martha de García (mis padres espirituales), por animarme aun en los peores momentos, por aconsejarme en el amor de Dios y enseñarme la fidelidad a Dios y responsabilidad en todo lo que emprenda.

A Nelly Cornejo gracias por comprenderme, y ayudarme a sonreír y ver los obstáculos con optimismo.

A mis más que amigos de la iglesia y universidad: David Martínez, Ángel Trejo, Edwin Escalante, Enrique Magaña, Nancy Nieves, Xiomara Calderón, Antonio Antillón, y Juan Carlos Álvarez, por mostrarme su amistad y apoyo sincero siempre.

A los Ingenieros David y Patricia Aguilar, por creer en mí, enseñarme y ayudarme en la recta final.

A mi amigo y compañero de Tesis, Felipe Rosa: gracias por tu apoyo, por creer que lo lograríamos y por tu amistad.

José Rubén Velásquez Uribe.

ÍNDICE GENERAL.

INTRODUCCIÓN.....	xxxiii
CAPITULO I: GENERALIDADES.....	36
1.1 ANTECEDENTES.....	37
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	41
1.3 OBJETIVOS.....	42
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	42
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	42
1.4 ALCANCES GLOBALES.....	43
1.5 JUSTIFICACIONES	43
1.6 LIMITACIONES.....	44
CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA	46
2.1 INTRODUCCIÓN.....	47
2.2 CICLO HIDROLÓGICO	47
2.3 BALANCE HÍDRICO.....	49
2.4 MEDICIÓN DE CAUDALES POR EL MÉTODO ÁREA VELOCIDAD.....	50
2.5 CURVA DE CALIBRACIÓN DE CAUDALES EN UNA SECCIÓN	52
2.6 MODELOS MATEMÁTICOS.....	55
2.7 MÉTODO DE MONTE CARLO	59
2.7.1 HISTORIA DEL MÉTODO MONTE CARLO.....	60
2.7.2 ALGORITMO DE SIMULACIÓN DE VARIABLES A TRAVÉS DEL METODO DE MONTE CARLO.....	60
2.8 MODELO HYDROLOGISKA BYRÅNS VATTENBALANS (HBV)	61
2.8.1 HISTORIA Y CLASIFICACIÓN DEL MODELO HBV	62
2.8.2 APLICACIONES DEL MODELO HBV	63
2.8.3 REQUERIMIENTO DE DATOS.....	63

2.8.3.1	DATOS HIDROMETEOROLOGICOS.....	64
2.8.3.2	CONDICIONES INICIALES	65
2.8.4	ALGORITMO DE FUNCIONAMIENTO DEL MODELO HBV	65
2.8.4.1	RUTINA DE PRECIPITACION (NIEVE)	69
2.8.4.2	RUTINA DE HUMEDAD DEL SUELO	71
2.8.4.3	RUTINA DE RESPUESTA.....	74
2.8.4.4	RUTINA DE TRANSFORMACIÓN.....	77
2.8.5	CALIBRACION DEL MODELO HBV	79
2.8.5.1	EL PROCESO DE CALIBRACIÓN.....	79
2.8.5.2	PROCESO DE EVALUACION DE RESULTADOS	90
2.8.6	PRONOSTICO HIDROLOGICO CON EL MODELO HBV.....	92
2.9	DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE PARÁMETROS FÍSICOS DEL SUELO DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA	93
2.9.1	INFILTRACIÓN.....	93
2.9.1.1	SUSTENTACIÓN TEÓRICA.....	94
2.9.1.2	EQUIPO A UTILIZAR	97
2.9.1.3	METODOLOGÍA DE LA PRUEBA	98
2.9.2	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA.....	99
2.9.2.1	DEFINICIÓN	99
2.9.2.2	LEY DE DARCY	100
2.9.2.3	PERMEÁMETRO DE GUELPH	101
2.9.2.4	METODOLOGÍA DE LA PRUEBA	103
2.9.3	TEXTURA.....	104
2.9.3.1	DEFINICIÓN	104
2.9.3.2	SUSTENTACIÓN TEÓRICA.....	105
2.9.3.3	MÉTODO DEL HIDRÓMETRO DE BOUYOUCOS.....	106
2.9.3.4	METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA TEXTURA DE UN SUELO.....	107

2.9.4	CAPACIDAD DE CAMPO.....	109
2.9.4.1	DEFINICIÓN	110
2.9.4.2	SUSTENTACIÓN TEÓRICA.....	110
2.9.4.3	EQUIPO A UTILIZAR	111
2.9.4.4	METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD DE CAMPO DE UN SUELO. 113	
2.9.4.5	MÉTODO COMPARATIVO DE CAPACIDAD DE CAMPO MEDIANTE TEXTURA 115	
2.10	GEOLOGÍA DE EL SALVADOR.....	117
2.10.1	HISTORIA DE LA GEOLOGÍA EN EL SALVADOR.....	117
2.10.2	PRINCIPALES FORMACIONES GEOLÓGICAS DE EL SALVADOR	118
2.10.3	CLASIFICACIÓN DE SUELOS EN EL SALVADOR.....	120
2.11	RED HIDROMÉTRICA DEL SERVICIO HIDROLÓGICO DE EL SALVADOR	122
2.11.1	HISTORIA DE LA RED HIDROMÉTRICA DE EL SALVADOR.....	122
2.11.2	COMPONENTES DE LA RED HIDROMÉTRICA DE EL SALVADOR	124
2.11.3	FUNCIONAMIENTO DE LA RED HIDROMÉTRICA DE EL SALVADOR	126
2.11.4	ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS.....	126
2.12	SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA POR INUNDACIONES (SATs).....	127
2.12.1	GENERALIDADES Y OBJETIVOS DE LOS SATs.....	127
2.12.2	CLASIFICACIÓN DE LOS SATs	128
2.12.3	COMPONENTES BÁSICOS DE LOS SATs.....	129
2.12.4	RED DE OBSERVADORES LOCALES (ROL).....	130
2.12.4.1	COMPONENTES DE LA ROL.....	130
2.12.4.2	PAPEL DE LA ROL	131
2.12.5	PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN	132
2.12.6	UMBRALES DE ANÁLISIS DE ALERTA.....	133
2.12.6.1	MONITOREO Y PREAVISO.....	133

2.12.6.2	AVISO.....	134
2.12.6.3	ALERTA Y EMERGENCIA.....	134
2.13	LAS INUNDACIONES EN EL SALVADOR.....	134
2.13.1	CAUSAS DE LAS INUNDACIONES	134
2.13.2	CLASIFICACIÓN DE LAS INUNDACIONES.....	135
2.13.3	MEDIDAS DE DEFENSA ANTE LAS INUNDACIONES.....	136
2.13.4	VARIABLES QUE INTERVIENEN EN DESASTRES POR INUNDACIONES.....	137
2.13.4.1	MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS	137
2.13.4.2	COMPORTAMIENTO DE LAS LLUVIAS	138
2.13.4.3	EL SUELO.....	138
2.13.4.4	VEGETACIÓN.....	139
CAPITULO 3: CUENCA DEL RÍO PAZ		140
3.1	INTRODUCCIÓN.....	141
3.2	GENERALIDADES DE LA CUENCA	141
3.3	PARÁMETROS FÍSICOS DE LA CUENCA.....	146
3.4	GEOLOGÍA DE LA CUENCA.....	147
3.4.1	TIPOS DE SUELOS EXISTENTES EN LA CUENCA.....	148
3.5	USO Y COBERTURA DE SUELOS	151
3.6	CLIMA EN LA CUENCA DEL RÍO PAZ.....	152
3.7	INUNDACIONES EN LA PARTE BAJA DE LA CUENCA DEL RÍO PAZ.....	154
3.8	MANEJO DE LA CUENCA DEL RÍO PAZ	158
3.9	RED HIDROMÉTRICA DE LA CUENCA DEL RÍO PAZ	159
3.10	SAT DE LA CUENCA DEL RÍO PAZ.....	160
3.10.1	TIEMPO DE TRANSITO.....	161
3.10.2	PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN	162
3.11	UMBRALES DE ANÁLISIS DE ALERTA.....	163

CAPITULO 4: DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE PARÁMETROS FÍSICOS DEL SUELO DE LA CUENCA DEL RÍO PAZ.....	168
4.1 INTRODUCCIÓN.....	169
4.2 METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE PUNTOS PARA DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE PARÁMETROS.....	169
4.3 PROCESO DE REALIZACIÓN DE TRABAJO DE CAMPO.....	171
4.3.1 FASE 1: EL SALVADOR	172
4.3.2 FASE 2: GUATEMALA	173
4.4 DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE PARÁMETROS	173
4.4.1 INFILTRACIÓN.....	174
4.4.2 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA.....	184
4.4.3 CAPACIDAD DE CAMPO.....	193
4.4.4 TEXTURA.....	200
4.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS.	209
4.5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE INFILTRACION Y CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA.....	209
4.5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA CAPACIDAD DE CAMPO Y TEXTURAS..	212
4.6 ANÁLISIS DE APLICABILIDAD DE PARAMETROS EXPERIMENTALES AL MODELO HBV	214
4.7 PARÁMETROS DEL MODELO HBV NO DETERMINADOS EN CAMPO	215
CAPITULO 5: PROCESO DE CALIBRACIÓN DEL MODELO HBV EN LA CUENCA DEL RÍO PAZ.	217
5.1 INTRODUCCIÓN.....	218
5.2 SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA	218
5.2.1 DELIMITACION DE LA CUENCA DEL RIO PAZ.....	219
5.2.1.1 DELIMITACION DE ESCENARIO CON 15 SUBCUENCAS.....	219
5.2.1.2 DELIMITACION PARA CALIBRACION CON 2 SUBCUENCAS.....	226

5.2.2	DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS PARA ESCENARIOS 228	
5.3	INCORPORACION DE ESTACIONES EN LA CUENCA	230
5.3.1	CODIFICACION DE ESTACIONES	231
5.4	PRECIPITACIÓN.....	234
5.4.1	DATOS HISTÓRICOS DE LLUVIA HORARIA.....	235
5.4.2	DATOS HISTÓRICOS DE LLUVIA DIARIA	236
5.4.3	RELLENO DE DATOS HORARIOS A PARTIR DE DATOS DIARIOS.....	237
5.4.3.1	CORRELACION DE ESTACIONES DE LLUVIA PARA RELLENO DE DATOS.....	239
5.4.3.2	DETERMINACION DE PORCENTAJES DE LLUVIA ACUMULADA	243
5.4.3.3	DISTRIBUCION ESPACIAL DE LA LLUVIA	246
5.5	DETERMINACION DE PESOS DE APORTACION	257
5.5.1	PROMEDIOS ANUALES DE LLUVIA EN LA CUENCA	257
5.5.2	DETERMINACION DE PESOS DE APORTACION.....	260
5.5.2.1	METODO DE ISOYETAS.....	260
5.5.2.2	METODO DEL POLIGONO DE THIESSEN.....	264
5.6	CALCULO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL	274
5.7	CAUDALES OBSERVADOR EN LAS ESTACIONES HIDROMETRICAS DE LA CUENCA 279	
5.7.1	REGISTRO DE NIVELES HORARIOS.....	279
5.7.2	CURVAS DE GASTO	280
5.7.3	CALCULO DE CAUDALES OBSERVADOS	281
5.8	CORRELACION DE ESTACIONES.....	284
5.9	ETAPA PRELIMINAR A LA CALIBRACION DEL MODELO HBV	295
5.9.1	CREACION DEL DISTRITO DE CALIBRACION	295
5.9.1.1	DISTRITO PARA CALIBRACION CON 2 SUBCUENCAS	296
5.9.1.2	DISTRITO PARA CALIBRACION CON 15 SUBCUENCAS.....	297

5.9.2	CREACION DE SUBCUENCAS	298
5.9.3	CARACTERISTICAS	300
5.9.3.1	INGRESO DE PARAMETROS DE CALIBRACION	300
5.9.3.2	CREACION DE ZONAS	301
5.9.4	INGRESO DE ESTACIONES.....	303
5.9.4.1	ESTACIONES DE LLUVIA	303
5.9.4.2	ESTACIONES DE EVAPOTRANSPIRACION.....	304
5.9.4.3	ESTACIONES DE CAUDAL	305
5.9.4.4	CORRELACION ENTRE ESTACIONES Y DISTRIBUCION DE PESOS	305
5.9.5	INGRESO DE DATOS.....	307
5.9.6	DEFINICION DE CONDICIONES INICIALES	308
5.9.6.1	CONDICIONES INICIALES	308
5.9.6.2	VARIABLES DE ESTADO INICIAL.....	310
5.10	CALIBRACIÓN DEL MODELO HBV	312
5.10.1	CALIBRACIÓN DE DISTRITO CON 2 SUBCUENCAS	314
5.10.1.1	CALIBRACION	314
5.10.1.2	AJUSTE DE PARAMETROS (METODO DE MONTECARLO)	316
5.10.1.3	INSPECCIÓN VISUAL Y COMPARACIÓN DE HIDROGRAMA SIMULADO Y OBSERVADO	317
5.10.1.4	CALCULO DE LA VARIANZA Y DIFERENCIA ACUMULADA	319
5.10.1.5	VALIDACION DE LA CALIBRACIÓN	319
5.10.2	CALIBRACIÓN DE DISTRITO CON 15 SUBCUENCAS.....	321
5.10.3	ANALISIS DE RESULTADOS DE LA CALIBRACION.....	327
CAPITULO 6: IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO HBV CALIBRADO AL SAT DE LA CUENCA DEL RÍO PAZ		329
6.1	INTRODUCCIÓN.....	330
6.2	PRONOSTICO DE CRECIDAS	330

6.2.1	CONDICIONES PARA REALIZAR PRONÓSTICO.....	331
6.2.2	DATOS DE ENTRADA.....	331
6.2.3	RESULTADOS DEL PRONÓSTICO.....	332
6.2.4	EJEMPLO DE PRONOSTICO A CORTO PLAZO.....	333
6.2.4.1	CREACION DE REGIONES DE PRONÓSTICO	334
6.2.4.2	PREPARACION DE DATOS PARA PRONÓSTICO	335
6.2.4.3	REALIZACION DEL PRONÓSTICO	340
6.2.4.4	EVALUACION Y COMPARACION DE RESULTADOS DEL PRONÓSTICO	341
6.3	IMPLEMENTACION DEL MODELO HBV A LA CUENCA DEL RÍO PAZ.....	344
6.3.1	DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO.....	345
6.3.2	ACTUALIZACIÓN DE UMBRALES DE LOS PUNTOS DE CONTROL	346
6.3.3	COMPARACION DE LOS RESULTADOS DEL MODELO CON EL SISTEMA ACTUAL	349
6.4	PROPUESTA DE PROTOCOLO DE FUNCIONAMIENTO DEL SAT EN BASE A LA IMPLEMENTACION DEL MODELO HBV.....	350
6.4.1	ACTORES INVOLUCRADOS EN EL PROTOCOLO.....	351
6.4.2	CONDICIONES DE USO.....	351
6.4.3	ACTUALIZACION DEL MODELO	352
6.4.3.1	ACTUALIZACION DE ESTACIONES.....	352
6.4.3.2	REAJUSTE DE PARAMETROS.....	352
6.4.4	REALIZACION DEL PRONÓSTICO METEOROLOGICO.....	353
6.4.4.1	DATOS DE PRECIPITACION	353
6.4.4.2	DATOS DE TEMPERATURA	354
6.4.5	REALIZACION DE PRONOSTICO HIDROLOGICO	354
6.4.6	ANALISIS DE RESULTADOS Y EMISION DE ALERTA.....	355
6.4.6.1	ANALISIS DE RESULTADOS	355
6.4.6.2	MAPAS SEMAFORO	358

CAPITULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	360
CONCLUSIONES	361
RECOMENDACIONES.....	364
BIBLIOGRAFÍA	367
ANEXOS	373
ANEXO 1: MAPA PEDOLOGICO DE EL SALVADOR.....	374
ANEXO 2: DATOS DE CAMPO DE PRUEBA DE INFILTRACION.....	376
ANEXO 3: DATOS DE CAMPO DE PRUEBA DE CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA.....	385
ANEXO 4: CALCULO DE TEXTURAS DE SUELO.....	394

ÍNDICE DE FIGURAS.

CAPITULO 1:

Figura No. 1.1: Sistemas de Alerta Temprana por Inundaciones de El Salvador.....	37
--	----

CAPITULO 2:

Figura No. 2.1: Ciclo Hidrológico del agua.....	48
Figura No. 2.2: Esquema de Balance Hídrico.	50
Figura No. 2.3: Sección Transversal para el Método Área Velocidad.....	52
Figura No. 2.4: Cálculo de la Curva de Calibración de caudales.	52
Figura No. 2.5: Curva de Calibración.....	54
Figura No. 2.6: Hidrograma.....	55
Figura No. 2.7: Clasificación de los Modelos Hidrológicos.....	57
Figura No. 2.8 Tanque Evaporímetro Clase A.....	64
Figura No. 2.9: Algoritmo de Funcionamiento del Modelo HBV.	67
Figura No. 2.10: Rutinas del Modelo HBV.....	68
Figura No. 2.11: Rutina de Humedad del suelo Modelo HBV.....	71
Figura No. 2.12: Depósito Superior e inferior de la Rutina de Respuesta.....	75
Figura No. 2.13: Representación gráfica de la función de transformación.....	78
Figura No. 2.14: Efecto de Fc en el volumen de escurrimiento.....	83
Figura No. 2.15: Efecto de β en el volumen de escurrimiento.	84
Figura No. 2.16: Efectos de coeficientes de Recesión en el Hidrograma Calculado.....	85
Figura No. 2.17: Efectos de los parámetros UZL en el Hidrograma Calculado.	86
Figura No. 2.18: Efecto de K4 en el Hidrograma Calculado.....	87
Figura No. 2.19: Efectos de la Percolación en el Hidrograma Calculado.	88
Figura No. 2.20: Efecto de Parámetro maxbas en el Hidrograma Calculado.	89
Figura No. 2.21: Ajuste de Hidrograma Calculado y Observado.	90
Figura No. 2.22: Cilindros Infiltrómetros.	98
Figura No. 2.23: Permeámetro de Guelph	102
Figura No. 2.24: Triángulo textural de Bouyoucos o Triángulo de Texturas del suelo.....	107
Figura No. 2.25: Membrana y Olla de Presión.	112
Figura No. 2.26: Mapa de ubicación de Estaciones.....	125

CAPITULO 3:

Figura No. 3.1: Río Paz Frontera Las Chinamas, sobre puente el Jobo.....	143
Figura No. 3.2: Río Paz Guatemala	145
Figura No. 3.3: Río Paz Guatemala. (Coordenadas 14°16'21.15"N 90° 0'14.57"O)	145
Figura No. 3.4: Cauces del Río Paz Zona Baja de la Cuenca.....	146
Figura No. 3.5: Río Paz cerca de frontera La Hachadura	155
Figura No. 3.6: Zonas Inundables de la cuenca del Río Paz, El Salvador.	157
Figura No. 3.7: Estación Telemétrica El Jobo, Frontera Las Chinamas.	159
Figura No. 3.8: Nivel de desbordamiento DT-12E Estación La Hachadura.....	167

CAPITULO 4:

Figura No. 4.1: Puntos de Análisis.....	171
Figura No. 4.2: Formato para prueba de Infiltración	178
Figura No. 4.3: Portada de la hoja de Cálculo para determinar la Infiltración del agua en el suelo.....	179
Figura No. 4.4: Registro y resultados de la prueba de Infiltración de La Geo, Ahuachapán.	180
Figura No. 4.5: Aplicación de logaritmos y cálculo de parámetros de la Infiltración en La Geo, Ahuachapán.....	180
Figura No. 4.6: Parámetros de las Ecuaciones de la prueba de Infiltración de La Geo, Ahuachapán.....	181
Figura No. 4.7: Gráfico de Infiltración y Lámina de Agua Acumulada de la Geo, Ahuachapán.....	181
Figura No. 4.8: Análisis de la prueba de infiltración e Infiltración Básica de la Geo, Ahuachapán.....	182
Figura No. 4.9: Coeficientes de las Familias de Infiltración USADA 1979.....	183
Figura No. 4.10: Formato para prueba de Conductividad Hidráulica	189
Figura No. 4.11: Portada de la hoja de Cálculo para determinar la Conductividad Hidráulica en un suelo.....	190
Figura No. 4.12: Hoja de Cálculo para determinar la Conductividad Hidráulica en la Geo Ahuachapán.....	191

Figura No. 4.13: Cálculo de la Conductividad Hidráulica Kfs en la Geo Ahuachapán.	192
Figura No. 4.14: Evaluación del Kfs en la Geo Ahuachapán respecto a los Kfs de la FAO 1963.	193
Figura No. 4.15: Excavación para extracción de muestras de suelo.....	194
Figura No. 4.16: Muestras de suelo obtenida en campo	194
Figura No. 4.17: Colocación de muestras de suelo tamizado	195
Figura No. 4.18: Muestras de suelo saturadas.....	196
Figura No. 4.19: Muestras de suelo sometidas a presión.....	196
Figura No. 4.20: Tubo de salida de Olla de Presión.....	197
Figura No. 4.21: Pesado de Muestras sometidas a presión	197
Figura No. 4.22: Muestras de suelo secadas al horno.....	198
Figura No. 4.23: Instrumentación de laboratorio utilizada en la determinación de textura de suelos.....	200
Figura No. 4.24: Triangulo textural de Bouyoucos La Geo Ahuachapán.....	207

CAPITULO 5:

Figura No. 5.1 Captura de Pantalla del ingreso del modelo digital de elevaciones (DEM)	220
Figura No. 5.2 Esquema de ubicación de Puntos de control para generación de subcuencas del Río Paz.....	223
Figura No. 5.3: Precipitación Final en Txt de la Estación Santa Ana año 2005.....	254
Figura No. 5.4: Ingreso de estaciones para generación de mapa de Isoyetas.....	262
Figura No. 5.5: Generación de Isoyetas para la cuenca del Río Paz	262
Figura No. 5.6: Mapa de Isoyetas de la Cuenca del Río Paz.....	263
Figura No. 5.7: Ingreso de estaciones y subcuencas a Arcgis	265
Figura No. 5.8: Herramienta de creación de Polígonos de Thiessen.....	265
Figura No. 5.9: Determinación de Polígonos Thiessen.....	266
Figura No. 5.10: Pantalla principal del software del Modelo HBV.....	296
Figura No. 5.11: Creación del distrito con 2 subcuencas.....	297
Figura No. 5.12: Creación del distrito con 15 subcuencas	298
Figura No. 5.13: Pestaña de la configuración de Subcuencas.....	299
Figura No. 5.14: Topología de la cuenca del Río Paz para escenario con 15 subcuencas	299

Figura No. 5.15: Ingreso de Parámetros de Calibración del Modelo HBV	301
Figura No. 5.16: Ingreso de Estaciones de Lluvia al modelo HBV	304
Figura No. 5.17: Ingreso de Estaciones de Evapotranspiración	305
Figura No. 5.18: Ingreso de Datos al Modelo HBV.....	307
Figura No. 5.19: Edición del Estado Inicial.....	308
Figura No. 5.20: Hidrograma para calibración de subcuenca El Jobo escenario de 2 Subcuencas.....	318
Figura No. 5.21 Hidrograma para calibración de subcuenca Hachadura escenario de 2 Subcuencas.....	318
Figura No. 5.22: Hidrograma para validación de subcuenca Hachadura escenario de 2 Subcuencas.....	320
Figura No. 5.23: Hidrograma para calibración de subcuenca El Jobo, escenario de 15 Subcuencas.....	325
Figura No. 5.24: Hidrograma para calibración de subcuenca Hachadura, escenario de 2 Subcuencas.....	326
Figura No. 5.25: Hidrograma para validación de subcuenca Hachadura, escenario de 15 Subcuencas.....	327

CAPITULO 6:

Figura No. 6.1: Ventana de creación de Regiones de Pronóstico	334
Figura No. 6.2: Pantalla de Ingreso de datos para pronostico	340
Figura No. 6.3: Corrida del Modelo HBV en Modalidad de Pronostico a Corto Plazo.....	341
Figura No. 6.4: Resultados del Pronóstico de caudales Subcuenca El Jobo	342
Figura No. 6.5: Resultados del Pronóstico de caudales Subcuenca Hachadura	342
Figura No. 6.6: Sección transversal en punto de control de la estación telemétrica El Jobo	346
Figura No. 6.7: Sección transversal en punto de control de la estación telemétrica La Hachadura	347
Figura No. 6.8: Comparación de secciones El Jobo años 2002 y 2012	348
Figura No. 6. 9: Comparación de secciones El Jobo años 2002 y 2012.....	349
Figura No. 6.10: Hoja de Pronóstico Hidrológico	355

ÍNDICE DE TABLAS.

CAPITULO 2:

Tabla No. 2.1: Parámetros de la Rutina de Precipitación (Nieve).	70
Tabla No. 2.2: Parámetros de la Rutina de Humedad del suelo.....	74
Tabla No. 2.3: Parámetros de la Rutina de Respuesta.....	77
Tabla No. 2.4: Parámetros de Función de Transformación.	78
Tabla No. 2.5: Familias de Infiltración USDA 1979	96
Tabla No. 2.6: Valores de Infiltración Básica según textura.	97
Tabla No. 2.7: Evaluación del Kfs según FAO 1963.....	103
Tabla No. 2.8: Punto de Marchitez Permanente, Capacidad de Campo y Capacidad de Agua Disponible para suelo de varias Texturas.....	116
Tabla No. 2.9: Capacidad de Campo, Punto de Marchitez Permanente y Agua Disponible para profundidad del suelo de 100 cm.....	116

CAPITULO 3:

Tabla No. 3.1: Formaciones Geológicas en la cuenca del Río Paz en territorio Salvadoreño	148
Tabla No. 3.2: Clasificación de suelos en la cuenca del Río Paz en territorio Salvadoreño	150
Tabla No. 3.3: Clasificación de suelos en la cuenca del Río Paz en territorio Guatemalteco	150
Tabla No. 3.4: Clasificación de Köpen para zonas climáticas de la Cuenca del Río Paz..	153
Tabla No. 3.5: Tiempos de Transito para diferentes tipos de crecidas en la Cuenca de Río Paz.....	162
Tabla No. 3.6: Umbrales de análisis de Alerta en estaciones telemétricas de la cuenca. .	166

CAPITULO 4:

Tabla No. 4.1: Coordenadas de los puntos de Análisis.....	171
Tabla No. 4.2: Proceso de Campo para determinar la Infiltración del agua en el suelo. .	177
Tabla No. 4.3: Resultados de la Prueba de Infiltración	184

Tabla No. 4.4: Proceso a seguir en Campo para determinar la Conductividad Hidráulica del agua en el suelo.	188
Tabla No. 4.5: Resultados de la prueba de Conductividad Hidráulica	193
Tabla No. 4.6: Resultados de Capacidad de Campo, Punto de Marchitez y agua disponible	199
Tabla No. 4.7: Proceso para la determinación de la textura de suelos.	204
Tabla No. 4.8: Proceso para la determinación de Excedente de temperaturas.....	205
Tabla No. 4.9: Determinación de la lectura corregida.....	206
Tabla No. 4.10: Lecturas tomadas del hidrómetro de Bouyoucos y Temperatura.....	208
Tabla No. 4.11: Resultados de prueba de textura de suelos	208
Tabla No. 4.12: Infiltración en la cuenca del Río Paz.....	210
Tabla No. 4.13: Cálculo de FC por Tabla de USDA a una profundidad de 100 cm	213
Tabla No. 4.14: Comparación de FC y determinación de porcentajes de variación.....	214
Tabla No. 4.15: Lista de Parámetros de calibración dl modelo HBV en cuenca del Río Paz	216

CAPITULO 5:

Tabla No. 5.1: Subcuencas de la Cuenca del Río Paz ubicadas por país.	224
Tabla No. 5.2: Puntos de ubicación de estaciones El Jobo y La Hachadura	226
Tabla No. 5.3: Parámetros Morfométricos para escenario con 2 subcuencas	228
Tabla No. 5.4: Parámetros Morfométricos para escenario con 15 Subcuencas.	229
Tabla No. 5.5: Código de letras en los departamentos de El Salvador para estaciones de lluvia.....	232
Tabla No. 5.6: Valor Numérico del código de letras para departamentos de El Salvador	232
Tabla No. 5.7: Estaciones de Precipitación utilizadas en el modelo HBV.	233
Tabla No. 5.8: Estaciones de Caudal utilizadas en el modelo HBV.....	233
Tabla No. 5.9: Estaciones de Evapotranspiración Potencial utilizadas en el modelo HBV.	234
Tabla No. 5.10: Registro de Lluvia Horaria en Estaciones Telemétricas	235
Tabla No. 5.11: Registro de Lluvia Diaria en las Estaciones Convencionales.....	236
Tabla No. 5.12: Distribución Temporal de Lluvia en El Salvador	238

Tabla No. 5.13: Determinación de Lluvia Diaria a partir de Lluvia Horaria para estaciones telemétricas.....	240
Tabla No. 5.14: Análisis Estadísticos de la desviación estándar de datos diarios de la estación Santa Ana	242
Tabla No. 5.15: Determinación de Porcentaje de lluvia horaria para un día de análisis..	244
Tabla No. 5.16: Porcentajes promedios para cada hora de los 10 días de análisis de Estación de Santa Ana.....	245
Tabla No. 5.17: Distribución de Porcentajes de Lluvia para un año de datos faltantes en Santa Ana	247
Tabla No. 5.18: Lluvia diaria de la estación Santa Ana UNICO del año 2005	248
Tabla No. 5.19: Ingreso de Datos diarios al registro horario del año de datos faltantes	249
Tabla No. 5.20: Multiplicación de los datos diarios por el Factor de Corrección.....	250
Tabla No. 5.21: Multiplicación de Datos Diarios por lo Porcentajes Horarios de Santa Ana	251
Tabla No. 5.22: Relleno de datos faltantes de la estación Santa Ana año 2005.....	252
Tabla No. 5.23: Precipitación Final para la Estación de Santa Ana año 2005	253
Tabla No. 5.24: Distribución Temporal horaria de la Lluvia en la cuenca del Río Paz.....	255
Tabla No. 5.25: Comparación de la Distribución de lluvia en la cuenca del río Paz Vrs la distribución de la lluvia en El Salvador	256
Tabla No. 5.26: Promedio Anual de Estaciones Telemétricas de la Cuenca Río Paz.....	259
Tabla No. 5.27: Promedio Anual de Estaciones Convencional de la Cuenca del Río Paz..	259
Tabla No. 5.28: Estaciones Usadas en la calibración	260
Tabla No. 5.29: PMA para calibración de escenario con 2 Subcuencas	263
Tabla No. 5.30: PMA para calibración de escenario con 15 subcuencas	264
Tabla No. 5.31: Sustitución de estaciones Convencionales/Telemétricas.....	269
Tabla No. 5.32: Pesos de estaciones Subcuenca EL JOBO	269
Tabla No. 5.33: Pesos de estaciones Subcuenca LA HACHADURA	270
Tabla No. 5.34: Pesos de estación Subcuenca Quezada.....	270
Tabla No. 5.35: Pesos de estación Subcuenca Paz Guatemala	270
Tabla No. 5.36: Pesos de estación Subcuenca El Chingo	270
Tabla No. 5.37: Pesos de estación Subcuenca Tres Ceibas.....	271
Tabla No. 5.38: Pesos de estación Subcuenca Pampe	271
Tabla No. 5.39: Pesos de estación Subcuenca Agua Caliente.....	271

Tabla No. 5.40: Pesos de estación Subcuenca Pulula	271
Tabla No. 5.41: Pesos de estación Subcuenca El Jobo	272
Tabla No. 5.42: Pesos de estación Subcuenca Los Hervideros.....	272
Tabla No. 5.43: Pesos de estación Subcuenca Guayapa	272
Tabla No. 5.44: Pesos de estación Subcuenca Ashuquema	272
Tabla No. 5.45: Pesos de estación Subcuenca Piedra de Toro.....	273
Tabla No. 5.46: Pesos de estación Subcuenca Sunza	273
Tabla No. 5.47: Pesos de estación Subcuenca San Pedro	273
Tabla No. 5.48: Pesos de estación Subcuenca Hachadura	273
Tabla No. 5.49: Registro de Temperaturas Promedios de El Salvador.....	275
Tabla No. 5.50: Registro de Humedades Relativas de El Salvador	276
Tabla No. 5.51: Temperatura Media Mensual de Ahuachapán.....	277
Tabla No. 5.52: Cálculo de ETP de la Estación Ahuachapán	278
Tabla No. 5.53: Valores de ETP que se ingresaron al Modelo HBV.....	279
Tabla No. 5.54: Registro de Niveles del Jobo y LA Hachadura.....	280
Tabla No. 5.55: Curvas de Gasto de la Estación El Jobo.....	280
Tabla No. 5.56: Curvas de Gasto de la Estación La Hachadura.....	281
Tabla No. 5.57: Cálculo de Caudales Observados mediante Curvas de Gasto del Jobo 2009 - 2010	282
Tabla No. 5.58: Caudales Promedio, Máximos y Mínimos de la estación El Jobo y La Hachadura	284
Tabla No. 5.59: Cálculo de lluvia diaria a partir de la lluvia horaria.....	286
Tabla No. 5.60: Registro de lluvia diaria de estación Ahuachapán SM, año 2012.....	287
Tabla No. 5.61: Lluvia acumulada de las estaciones El Jobo (T)- Ahuachapán (C)	288
Tabla No. 5.62: Correlación entre estaciones de lluvia	294
Tabla No. 5.63: Tipos de Zonas usadas para calibración	302
Tabla No. 5.64: Correlaciones finales entre estaciones de lluvia.....	306
Tabla No. 5.65: Resultados de las variables de estado inicial Subcuenca El Jobo	310
Tabla No. 5.66: Resultados de las variables de estado inicial Subcuenca Hachadura	310
Tabla No. 5.67: Resultados de las variables de estado inicial escenario de 15 subcuencas	311
Tabla No. 5.68: Subcuencas calibradas	313
Tabla No. 5.69: Parámetros por defecto usados en la calibración del Modelo HBV.....	314

Tabla No. 5.70: Capacidad de campo por subcuencas (El Jobo).....	315
Tabla No. 5.71: Capacidad de campo por subcuencas (Hachadura).....	316
Tabla No. 5.72: Parámetros finales de calibración escenario de 2 Subcuencas.....	317
Tabla No. 5.73: Valores de Varianza y diferencia acumulada en calibración con escenario de 2 subcuencas.....	319
Tabla No. 5.74: Valores de Varianza y diferencia acumulada en validación con escenario de 2 subcuencas.....	320
Tabla No. 5.75: Parámetros finales de calibración escenario de 15 Subcuencas parte 1	322
Tabla No. 5.76: Parámetros finales de calibración escenario de 15 Subcuencas parte 2	323
Tabla No. 5.77: Valores de Varianza y diferencia acumulada escenario de 15 subcuencas	324
Tabla No. 5.78: Valores de Varianza y diferencia acumulada en validación con escenario de 15 subcuencas	326

CAPITULO 6:

Tabla No. 6.1: Datos de Precipitación para subcuenca El Jobo.....	336
Tabla No. 6.2: Datos de Precipitación para subcuenca El Jobo.....	337
Tabla No. 6. 3: Valores promedio de Temperatura registrados en la Cuenca del Río Paz para el mes de octubre de varios años	338
Tabla No. 6.4: Temperatura de un día promedio en octubre.....	339
Tabla No. 6.5: Ingreso de información complementaria para generación de Pronóstico ..	356

ÍNDICE DE ECUACIONES.

CAPITULO 2:

Ecuación No. 2.1: Ecuación del Balance Hídrico	49
Ecuación No. 2.2: Caudal Total por el Método Área Velocidad	51
Ecuación No. 2.3: Ecuación general de la curva de calibración.....	53
Ecuación No. 2.4: Curva de calibración ajustada.	53
Ecuación No. 2.5: Mínimos Cuadrados de curva de calibración	53
Ecuación No. 2.6: Comportamiento de la Rutina de Humedad del suelo.....	72
Ecuación No. 2.7: Ecuación de la Evapotranspiración Real.....	72
Ecuación No. 2.8: Caudal de salida del depósito inferior	76
Ecuación No. 2.9: Ecuación del cálculo de la Diferencia Acumulada.	91
Ecuación No. 2.10: Ecuación de cálculo de la varianza.....	91
Ecuación No. 2.11: Ecuación general de la Infiltración	94
Ecuación No. 2.12: Ecuación de la tasa de Infiltración	94
Ecuación No. 2.13: Ecuación empírica de Infiltración	95
Ecuación No. 2.14: Ecuación de Infiltración acumulada	95
Ecuación No. 2.15: Integración de ecuación de infiltración acumulada	95
Ecuación No. 2.16: Ley de Darcy	101
Ecuación No. 2.17: Calculo de excedente de temperatura	108
Ecuación No. 2.18: Cálculo de lectura corregida.....	108
Ecuación No. 2.19: Calculo de porcentaje de Limo + Arcilla	109
Ecuación No. 2.20: Calculo de porcentaje de Arcilla.....	109
Ecuación No. 2.21: Calculo de porcentaje de Limo	109
Ecuación No. 2.22: Calculo de porcentaje de Arena	109
Ecuación No. 2.23: Porcentaje de Humedad Gravimétrica del Suelo	114
Ecuación No. 2.24: Densidad Aparente	114
Ecuación No. 2.25: Porcentaje de Humedad Volumétrica	114
Ecuación No. 2.26: Relación entre Humedad Gravimétrica y Volumétrica.....	115
Ecuación No. 2.27: Lámina de agua para Fc y PMP.....	115
Ecuación No. 2.28: Agua disponible.....	115

ÍNDICE DE GRAFICOS.

CAPITULO 4:

Grafico No. 4.1: Tasas de Infiltración en la cuenca del Río Paz	211
Grafico No. 4.2: Conductividad Hidráulica en la Cuenca del Río Paz.....	212
Grafico No. 4.3: Comparación de FC de Tabla USDA Vrs FC de Laboratorio.....	213

CAPITULO 5:

Grafico No. 5.1: Correlación de la Estación Santa Ana Vrs Estación Santa Ana UNICO...	241
Grafico No. 5.2: Distribución temporal de la lluvia para un día de análisis de la Estación Santa Ana	246
Grafico No. 5.3: Porcentajes promedios Acumulados de Santa Ana.....	246
Grafico No. 5.4: Comparación de Distribución de la lluvia acumulada en la cuenca del Río Paz Vrs la Distribución de la lluvia acumulada en El Salvador.....	257
Grafico No. 5.5: Precipitación Promedio Anual por estaciones para generación de Mapa de Isoyetas.....	261
Grafico No. 5.6: Niveles de la Estación El Jobo para el año 2009	283
Grafico No. 5.7: Caudales de la Estación El Jobo para el año 2009	283
Grafico No. 5.8: Grafico de Correlación de las Estaciones El Jobo y Ahuachapán SM.....	289
Grafico No. 5.9: Comparativo de Datos Acumulados Diarios de las estaciones El Jobo y Ahuachapán SM año 2012	291
Grafico No.5.10: Comparación de lluvia diaria de las estaciones El Jobo y Ahuachapán SM año 2012	291

CAPITULO 6:

Grafico No. 6.1: Comparación de Caudales Resultantes de pronóstico para Subcuenca El Jobo	343
Grafico No. 6. 2: Comparación de Caudales Resultantes de pronóstico para Subcuenca Hachadura	344
Grafico No. 6.3: Grafico de Análisis de Niveles esperados El Jobo y Hachadura	357

ÍNDICE DE MAPAS.

CAPITULO 3:

Mapa No. 3.1: Cuenca del Río Paz.....	142
Mapa No. 3.2: Planicies de Inundación en la zona baja de Ahuachapán.....	156
Mapa No. 3.3: Mapa de susceptibilidad de Inundaciones en El Salvador.	165

CAPITULO 5:

Mapa No. 5.1 Cuenca del Río Paz.....	221
Mapa No. 5.2: Subcuencas del Río Paz escenario con 15 subcuencas.....	225
Mapa No. 5.3: Subcuencas del Río Paz escenario con 2 subcuencas	227
Mapa No. 5.4: Determinación de Polígonos Thiessen para escenario con 2 Subcuencas...	267
Mapa No. 5.5: Determinación de Polígonos Thiessen para escenario con 15 Subcuencas	268

CAPITULO 6:

Mapa No. 6.1: Mapa Semáforo de la Cuenca Baja del Río Paz.....	359
--	-----

SIGLAS.

DEM	Modelo Digital de Elevaciones
DGOA	Dirección General del Observatorio Ambiental
HBV	Hydrologiska Byråns Vattenbalans
IHMS	Instituto Sueco de Meteorología e Hidrología
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología
MARN	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
ONG	Organización No Gubernamental
PLAMDARH	Plan Maestro de Desarrollo y Aprovechamiento de los Recursos Hídricos Región B
PNC	Policía Nacional Civil
ROL	Red de Observadores Locales
SAT	Sistema de Alerta Temprana por Inundaciones
SIG	Sistema de Información Geográfica
SNET	Servicio Nacional de Estudios Territoriales
UES	Universidad de El Salvador
USAID	Agencia Estadounidense Para el Desarrollo Internacional
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos

SIMBOLOGIA.

α, b, c	Constantes para cada Curva de Gasto
ALFA	Coefficiente usado para el ajuste de los picos más altos en el Hidrograma
BETA	Coefficiente empírico que controla la contribución a la rutina de respuesta
c	Constante de transformación de m^3/s a mm sobre toda la cuenca.
Cflux	Valor de Flujo capilar de la zona alta hacia la rutina de humedad del suelo
D	Lamina de infiltración
DD	Día de análisis
Ea	Evapotranspiración real o actual
Epot	Evapotranspiración potencial
ETP/D	Evapotranspiración Potencial Diaria
FC	Capacidad de Campo
h	Lectura de Mira de la Curva de Gasto

HH	Hora de análisis
HR	Humedad Relativa en %
I	Capacidad de Infiltración
K	Conductividad Hidráulica
K ₀ ,K ₁ ,K ₂ ,K ₃ ,K ₄	Coeficientes de Recesión
LP	Límite de Evapotranspiración
MAXBAS	Tiempo de Respuesta de la Cuenca
MM	Mes de análisis
n	Número total de días
P	Precipitación Lluvia
P _{calt}	Facto de corrección Coeficiente empírico
P _{corr}	Facto de corrección Coeficiente empírico
PER	Coeficiente de Percolación
PMP	Punto de Marchitez Permanente
Q	Caudal M ³ /s
Q ₁ ,Q ₂ ,Q ₃ ,Q ₄	Componentes de escorrentía
Q _C	Caudal Simulado (m ³ /s)
Q _R	Caudal Observado (m ³ /s)
r _{fcf}	Factor de corrección de caída de lluvia
RMM	Radiación Solar Extraterrestre (mm de Agua Evaporada)
RSM	Radiación Solar Incidente
S	% de Brillo del Sol
SLZ	Contenido del depósito inferior
SM	Humedad del Suelo
t	Tiempo
TEMP	Temperatura Media Mensual °C
UZL	Contenido del depósito superior
YY	Año de análisis
ΔP	Contribución de la precipitación
ΔQ	Contribución a la rutina de Respuesta
ΔSM	Cambio el almacenamiento de Humedad del suelo

INTRODUCCIÓN

El Salvador es un país que en los últimos años se ha visto afectado por las inundaciones, las se originan por la influencia de varios factores que actúan directa o indirectamente sobre el territorio, entre estos: la modificación del uso de suelos, los cambios climáticos, las altas precipitaciones y otros fenómenos afines.

El manejo de los recursos naturales es de gran importancia, y debido a esto se han creado organizaciones como el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN); uno de los esfuerzos que realiza esta institución es a través de la Dirección General del Observatorio Ambiental DGOA (anteriormente SNET), donde se monitorean continuamente las disciplinas científicas de vulcanología, oceanografía, meteorología, hidrología, entre otras; en el caso de la hidrología se sigue un monitoreo constante del comportamiento y estado de las cuencas hidrográficas en el país, y se ha trabajado en pro de la implementación de nuevas técnicas y tecnologías para desarrollar con eficiencia su labor de vigilancia al respecto de las inundaciones y el manejo de los Sistemas de Alerta Temprana.

Se constituyó un gran paso con la conformación de la red hidrométrica y el posterior establecimiento de los Sistemas de Alerta Temprana por Inundaciones (SATs), y finalmente mediante la inclusión de herramientas que contribuyen al desarrollo de su labor de vigilancia, tal es el caso de la implementación de Modelos Hidrológicos para el monitoreo de las cuencas, como es el modelo HYDROLOGISKA BYRÅNS VATTENBALANS (HBV), el cual se ha calibrado en las cuencas de los Ríos Jiboa y Grande de San Miguel.

Particularmente se puede mencionar la cuenca Binacional del Río Paz, la cual es una de las más grandes e importantes de El Salvador y Guatemala, que se ha visto afectada por las inundaciones que se generan en la parte baja de la misma; debido a esto se ha implementado un SAT por inundaciones en El Salvador, el cual ha producido buenos resultados, sin embargo se ha iniciado la labor de mejorar dicho SAT, a través de esta investigación denominada: “DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO HBV EN LA CUENCA DEL RÍO PAZ Y SU USO EN EL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR INUNDACIONES”.

Tal investigación es el proceso de implementación del Modelo HBV como herramienta de Pronóstico dentro del SAT, debido a esto se incluye una serie temática que abarca los conceptos, y teorías fundamentales que rigen la investigación, así mismo la información general de El Salvador y Guatemala y la concerniente a la cuenca del Río Paz, además se

presenta el proceso de determinación de parámetros en campo para algunos parámetros del modelo en la cuenca, la calibración horaria del modelo, el uso del Modelo HBV como herramienta de pronóstico de crecidas a corto plazo y el uso del mismo dentro del Sistema de Alerta Temprana por Inundaciones y la propuesta de un protocolo de funcionamiento del SAT mediante la implementación Modelo HBV.

CAPITULO I: GENERALIDADES.

1.1 ANTECEDENTES

Los Sistemas de Alerta Temprana por Inundaciones (SAT) son sistemas o procedimientos que han sido puestos en práctica para contribuir a la prevención de desastres provocados por inundaciones, cuyo objetivo es advertir de manera anticipada riesgos potenciales con el fin de proteger la vida y la propiedad de los pobladores. Actualmente se tienen en funcionamiento catorce Sistemas de Alerta Temprana en El Salvador y seis que están en construcción, ver Figura No. 1.1



Figura No. 1.1: Sistemas de Alerta Temprana por Inundaciones de El Salvador.
Fuente: SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA CUENCA DEL RIO LEMPA, MARN 2011.

Inicialmente, los primeros sistemas implementados fueron los siguientes:

- Sistema de Pronóstico y Alerta Temprana de la Cuenca del Río Lempa.
- Sistema de Alerta Temprana de la Cuenca del Río Grande de San Miguel.
- Sistema de Alerta Temprana de la Cuenca del Río Jiboa.
- Sistema de Alerta Temprana de la Cuenca del Río Goascorán.

- Sistema de Alerta Temprana de la Cuenca del Río Paz.¹

Actualmente se implementan los sistemas que se registran a continuación:

1. Río Paz
2. Río Jiboa
3. Río Lempa
4. Río Grande San Miguel
5. Río Goascorán
6. Ahuachapán Norte
7. Ahuachapán Sur
8. Sonsonate
9. Metapán
10. Citalá
11. Santa Isabel Ishuatan
12. Área Metropolitana de San Salvador
13. La Libertad
14. Estero de Jaltepeque²

Además se tienen en construcción los siguientes sistemas:

15. Zacatecoluca (Ayuda Obrera Suiza – AOS).
16. AMSS (Municipios de Ilopango, San Martín, Ciudad Delgado, Apopa, Tonacatepeque).
17. Cojutepeque (Cruz Roja Española).
18. Río Huiza (Programa Nacional de Reducción de Riesgos PNRR)
19. Río Titihuapa (PNRR)
20. Río Acahuapa (PNRR)

Los SATs están basados en una recopilación de datos hidrometeorológicos, los cuales son analizados para distintas áreas pertenecientes a las cuencas hidrográficas que presentan

¹ José Mauricio Martínez García. (2010). *Red de Observadores Locales: Una Componente de los Sistemas de Alerta Temprana por Inundaciones*. San Salvador: SNET

² Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2011). *SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA CUENCA DEL RÍO LEMPA*. San Salvador. DGOA.

vulnerabilidad hacia las inundaciones, estos no solamente involucran a las estaciones de monitoreo, sino el desarrollo de herramientas de análisis de amenazas y vulnerabilidades ante eventos hidrometeorológicos.

En ese sentido se han implementado diversos modelos de análisis hidrometeorológicos para el mejoramiento de los SAT, uno de ellos es el caso del modelo Hydrologiska Byråns Vattenbalans (HBV), que a la fecha se ha implementado en los SAT de las cuencas de los ríos Jiboa y Grande de San Miguel.

La Calibración del Modelo HBV, tiene como objetivo fortalecer el sistema de alerta temprana (SAT); con la finalidad de analizar las variaciones en el caudal en tiempo real, realizar pronósticos Hidrológicos a corto y largo plazo basados en pronósticos Meteorológicos, mejorando así la eficiencia del Sistema. Básicamente los datos de lluvia que reciben las estaciones telemétricas se analizan con el fin de correr el modelo continuamente y tener una respuesta más rápida ante los posibles incrementos de caudal.

El modelo HBV es un sistema computarizado para el cálculo hidrológico, desarrollado en Suecia por el Instituto Hidráulico Sueco (SMHI) en 1971; Se empezó a utilizar operacionalmente a mediados de los años 70; básicamente es un modelo de balance hídrico, determinístico conceptual, basado en subcuencas, con requerimientos moderados de información; que describe los principales procesos de ciclo hidrológico. Este modelo se usa comúnmente para el cálculo continuo de caudales y para el pronóstico hidrológico; asimismo es una importante herramienta de análisis que permite la generación de caudales, con base a datos de entrada de lluvia, evapotranspiración y datos geomorfológicos propios de la cuenca de análisis.

La estructura flexible del sistema HBV permite que el modelo haga las subdivisiones necesarias con respecto a diferentes zonas de clima, uso del suelo, densidad de la red hidrometeorológica, etc.; lo que ha permitido aplicarlo en estudios de prefactibilidad, abastecimiento de agua, hidroeléctricos, de irrigación, de seguridad de presas, escenarios de cambio de uso de suelo, etc. y dado que puede ser calibrado con resolución temporal

horaria, puede utilizarse para los sistemas de pronóstico y alerta temprana por inundaciones³.

Aplicaciones operacionales con el modelo HBV son conocidas en más de 40 países alrededor del mundo, en El Salvador la experiencia en su uso y aplicación data desde el año 2007, según el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

Por otra parte la problemática de inundaciones en áreas urbanas y rurales ha estado presente en El Salvador desde hace ya muchos años. Históricamente se tiene conocimiento de eventos hidrometeorológicos severos que han afectado gran parte del territorio nacional o la totalidad del mismo. Entre estos eventos se tienen: El Huracán en 1934, así mismo, en 1974 el Huracán Fifi que produjo grandes inundaciones, el Huracán Mitch en 1998, en el 2005 fue el Huracán Stan, en el 2009 una baja presión combinada con el Huracán IDA, la tormenta tropical Agatha en el 2010, y recientemente la Depresión Tropical 12-E (DT-12E) en Octubre de 2011; Todos estos eventos han dejado en evidencia lo vulnerable que es el país ante las inundaciones causadas por este tipo de fenómenos.

Entre las regiones afectadas por las inundaciones en el país, se encuentra la cuenca del Río Paz, donde se han realizado esfuerzos para contribuir en el manejo de esta problemática; entre los cuales se pueden mencionar el estudio “Análisis hidrológicos en cuenca del Río Paz para mejora de SAT de la cuenca” elaborado por el MARN⁴; en este análisis se realiza una actualización de relación de niveles y tiempo de tránsito entre las estaciones hidrométricas pertenecientes a la cuenca, también se realizó un análisis de los registros de lluvia que produjeron crecidas y la actualización de umbrales de análisis de alerta; todo esto con el fin de fortalecer el SAT de la cuenca, sin modificar el sistema de pronóstico (Nivel Observado - Nivel Pronosticado), sin embargo no se ha incluido en el Sistema de pronóstico de crecidas, la modelación hidrológica hasta esta fecha.

³ Jorge Antonio Castaneda Cerón. (2010). *Calibración del modelo Hydrologiska Byråns Vattenbalans (HBV) en la cuenca del Río Jiboa como herramienta para el Sistema de Alerta Temprana por Inundaciones*. Guatemala: ERIS-USAC

⁴ Ing. Adriana María Erazo Chica. (Abril 2004). ANÁLISIS HIDROLÓGICOS EN CUENCA DEL RIO PAZ PARA MEJORA DE SAT DE LA CUENCA, SERVICIO HIDROLÓGICO NACIONAL - ÁREA INVESTIGACIÓN HIDROLÓGICA.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La implementación de los catorce SATs en El Salvador, ha sido de gran utilidad para los análisis hidrometeorológicos que permiten realizar pronósticos de crecidas, emisión de avisos y alertas a las comunidades y comités de emergencia, ante las inundaciones que se generan en dichas zonas.

En la cuenca del Río Paz, se implementa un SAT por inundaciones, del cual se han obtenido buenos resultados, debido a que el análisis que se realiza es del tipo Nivel Observado - Nivel Pronosticado. Este tipo de pronóstico posee un alto grado de certeza pero un tiempo corto para la reacción en caso de alerta; y es susceptible a fallas en las estaciones telemétricas.

De allí que la implementación del SAT no debe involucrar solamente a las estaciones de Monitoreo, sino el desarrollo de herramientas de análisis de las amenazas y vulnerabilidades ante eventos hidrometeorológicos que se adecuen a las necesidades del SAT de la cuenca; a la fecha todavía no se cuenta con un modelo de análisis adecuado a dichas necesidades, por ende se afectan significativamente los tiempos de respuesta ante inundaciones; lo cual podría ser perjudicial para la población de la parte baja de la cuenca, debido a la posible generación de pérdidas materiales causadas por las inundaciones.

Una herramienta que se ha utilizado para el fortalecimiento de los SATs, es el Modelo HBV, el cual ha sido implementado en las cuencas de los ríos Jiboa y Grande San Miguel. Sin embargo para la calibración del modelo en ambas cuencas no se han realizado pruebas de campo para la determinación de los parámetros utilizados por el modelo HBV, afectando los resultados obtenidos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar los parámetros principales para la calibración del modelo HBV en la cuenca del Río Paz y su uso en el Sistema de Alerta Temprana por inundaciones.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer un listado de los parámetros medibles que se necesitan para realizar la calibración del modelo HBV.
- Calcular a través de pruebas en campo y laboratorio, los valores de los parámetros de capacidad de campo, infiltración, textura del suelo y conductividad hidráulica, a ser utilizados en la calibración del modelo HBV.
- Determinar los valores de lluvia media en la cuenca a partir de los registros de precipitación disponibles.
- Calcular caudales para el Río Paz con base en Curvas de Gasto en las estaciones El Jobo y La Hachadura.
- Actualizar los umbrales en los puntos de control para el Sistema Alerta Temprana por Inundaciones dentro de la cuenca del Río Paz.
- Proponer un protocolo de funcionamiento del Sistema de Alerta Temprana por Inundaciones mediante el uso del Modelo HBV como herramienta de Pronóstico.

1.4 ALCANCES GLOBALES

Con la Determinación de los Parámetros para la calibración del modelo HBV en la Cuenca del Río Paz y su uso en el Sistema de Alerta Temprana por Inundaciones, se pretende:

- Realizar una investigación científica con el fin de determinar los parámetros que se necesitan para calibrar el Modelo HBV, mostrando la aplicación del Modelo, como una herramienta novedosa, útil, objetiva y confiable que podrá ser usada en el Sistema de Alerta Temprana por Inundaciones de la Cuenca del Río Paz.
- Calibrar el modelo HBV a nivel horario con las estaciones hidrométricas El Jobo y La Hachadura que transmiten información en tiempo real, para mejorar el tiempo de la respuesta del Servicio Hidrológico ante los eventos hidrometeorológicos en esta cuenca.
- Validar la calibración horaria del modelo HBV cuando los Caudales Máximos Simulados se ajusten a los Caudales Observados en la cuenca del Río Paz.
- Proponer un protocolo de comunicación y funcionamiento del Sistema de Alerta Temprana por Inundaciones de la Cuenca del Río Paz, mediante la aplicación del modelo HBV calibrado, en el pronóstico de caudales.

1.5 JUSTIFICACIONES

En los últimos diez años se han registrado Depresiones Tropicales, Tormentas y Huracanes, los cuales causaron daños considerables a los habitantes de El Salvador; ante esta problemática, se ha iniciado la labor de mejorar los SATs con los que cuenta actualmente el MARN, a través de herramientas tecnológicas que mejoren el tiempo de reacción ante una inundación.

Una de las cuencas donde se generan inundaciones ante estos fenómenos naturales, es la cuenca del Río Paz; en ese sentido se pretende mejorar el SAT de dicha de cuenca, a través de la determinación de los parámetros para la calibración del modelo HBV, con el propósito de estudiar el comportamiento de la cuenca y de esta manera prevenir desastres provenientes de inundaciones por las variaciones en el caudal de la cuenca mencionada.

La estructura del modelo HBV permite simular caudales con resoluciones diarias y horarias, lo que convierte este modelo en una herramienta útil para el fortalecimiento del Sistema de Alerta Temprana por Inundación (SAT) ante las inundaciones que se generen en la cuenca en la parte baja del Río Paz.

Hasta la fecha el MARN utiliza la información de los niveles de las estaciones telemétricas: La Hachadura y El Jobo, que se encuentran ubicadas en la ribera del Río Paz, como parte fundamental del SAT por Inundaciones en la cuenca. En los años 2005, 2010 y 2011 a causa de las lluvias que afectaron la zona, se evidencio que las crecidas generadas destruyeron los sensores de presión de estas estaciones, lo que causo la interrupción en el flujo de transmisión de datos al centro de monitoreo, por lo cual se perdió la eficiencia del SAT por inundaciones, de este hecho radica la importancia de contar un modelo que realice la simulación hidrológica como una alternativa para que el SAT no pierda su eficiencia, cuando este tipo de situación ocurra. Por tal razón es preciso el uso del Modelo HBV como una herramienta de pronóstico de caudales, para una reacción adecuada del SAT, y de esta forma dar cumplimiento a los objetivos fundamentales para los cuales fue implementado el SAT de dicha cuenca.

1.6 LIMITACIONES

- La cuenca hidrográfica del Río Paz es una cuenca binacional compartida, donde el 65% del área total le corresponde a Guatemala y el 35% le corresponde a El Salvador, lo cual implica que para esta investigación se debe de tomar en cuenta la información meteorológica, hidrológica y geomorfológica de

Guatemala que no se dispone en su totalidad para utilizarla en la calibración del modelo HBV.

- La distribución de las estaciones de precipitación dentro de la cuenca no es la ideal ya que se tienen más estaciones en El Salvador que en Guatemala.
- Solo se cuenta con dos estaciones Hidrométricas telemétricas a lo largo del Cauce principal del Río Paz para dividir las Subcuencas, por lo que en algunos casos se tendrá que suponer estaciones Hidrométricas ficticias para realizar la calibración y por ende esto puede inferir en los resultados del modelo HBV.

CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA

2.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se incluyen una investigación bibliográfica de todos aquellos principios, teorías, conceptos y metodologías, que servirán para sustentar el tema ***“Determinación de parámetros para la calibración del modelo HBV en la cuenca del Río Paz y su uso en el Sistema de Alerta Temprana por Inundaciones”***. En ese sentido se hace referencia a la teoría básica de temas en la rama de la Hidrología tales como: el Ciclo Hidrológico, El balance Hídrico, la Medición de Caudales aplicando el método Área Velocidad y la Curva de Calibración de Caudales; luego se desarrolla la teoría general de la Modelación hidrológica y del Modelo HBV como parte fundamental de esta investigación. También se incluye un apartado sobre la determinación en campo y laboratorio de los parámetros de Infiltración de agua, Conductividad Hidráulica, Capacidad de Campo y la Textura de suelos; finalmente se hace referencia a aspectos más generales de El Salvador desde el punto de vista geológico y de monitoreo hidrológico, entre ellos la Geología, La Red Hidrométrica, Los Sistemas de Alerta Temprana por Inundaciones SATs y las Inundaciones en El Salvador.

2.2 CICLO HIDROLÓGICO

El Ciclo Hidrológico está compuesto por una serie de procesos continuos e interdependientes, de movimiento y transferencia de agua en la tierra, el océano, cuerpos de agua y en la atmósfera.

En un ciclo se sabe que no existe un punto de partida ni de llegada, sin embargo para explicar el Ciclo Hidrológico, se puede iniciar por la Evaporación del agua que se produce en el océano, lagos, embalses, y todo tipo de cuerpos de agua, y la evapotranspiración de las plantas, la cual es una combinación del agua que se pierde por la evaporación en el suelo y la transpiración de las plantas. La Evaporación y evapotranspiración, son producidas por la energía suministrada del sol y las condiciones climáticas, de esta manera el agua cambia del estado líquido al gaseoso dentro del ciclo.

El agua en forma de vapor asciende hacia la atmósfera, y en este ascenso, pierde calor y se produce el proceso de Condensación del agua, donde se crean pequeñas gotas de agua, y estas crean nubes, y en su circulación se van uniendo entre ellas, creando gotas más grandes, las cuales por su peso, se precipitan en forma de lluvia, nieve o granizo.

Parte de esta Precipitación es Interceptada por la vegetación, otra parte cae sobre el suelo y dependiendo de las condiciones de cobertura de suelo, tipo de suelo y la pendiente del terreno, esta agua se puede encharcar, escurrir superficialmente o infiltrarse.

El agua que escurre superficialmente drena hacia los cuerpos de agua y finalmente hacia al mar. Una parte del agua que se infiltra es retenida por el suelo, cuya capacidad de retención depende en gran medida de su textura y estructura; otra parte del agua infiltrada se convierte también en escorrentía superficial al ser saturada la capacidad de almacenamiento suelo; otra parte se convierte en flujo subsuperficial, y por último otra parte se percola hacia capas inferiores produciendo la recarga de aguas subterráneas. El agua que se infiltra, viaja lentamente y llega a alimentar a ríos y manantiales, y finalmente al mar⁵. Ver Figura No. 2.1

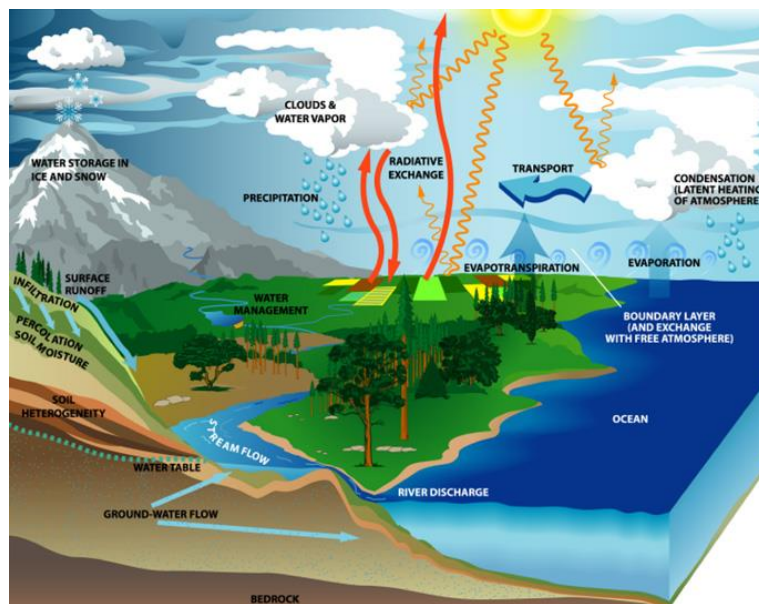


Figura No. 2.1: Ciclo Hidrológico del agua.

Fuente: <http://images.tutorvista.com/content/feed/tvcs/WaterCycle-optimized.jpg>

⁵ Servicio Nacional de Estudios Territoriales (2005). *BALANCE HÍDRICO INTEGRADO Y DINÁMICO EN EL SALVADOR, COMPONENTE EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS*. San Salvador. SNET

2.3 BALANCE HÍDRICO

El principio básico del ciclo hidrológico se fundamenta en que en todo ciclo cerrado la masa no se crea ni se destruye, simplemente se transforma; por lo tanto el modelo del Balance Hídrico se basa en la ecuación de la conservación de la masa, de esto se tiene la ecuación siguiente:

$$\text{ENTRADAS} - \text{SALIDAS} = \text{CAMBIO DE ALMACENAMIENTO}$$

Ecuación No. 2.1: Ecuación del Balance Hídrico

Es decir el modelo del Balance Hídrico es la suma algebraica de las entradas y salidas de agua en el suelo. El ingreso y el gasto de agua en el suelo constituyen elementos esenciales del Balance Hídrico, generalmente considera como componentes principales de Entradas:

- Las Precipitaciones Atmosféricas.
- El Abastecimiento subterráneo.
- Importaciones de agua
- Escorrentía superficial de otras cuencas.
- Aguas subterráneas de otras cuencas.

Como componentes principales de Salida:

- Evaporación.
- Transpiración.
- Escurrimiento superficial hacia otras cuencas.
- Exportaciones de agua.
- Aguas subterráneas hacia otras cuencas.
- Infiltración.

Y como componentes principales de Cambio de Almacenamiento:

- Almacenamiento de aguas subterráneas.

- Almacenamiento por cambio de humedad en el suelo⁶.

De manera resumida los componentes del balance hídrico se representan en la imagen que se muestra a continuación: Ver Figura No. 2.2

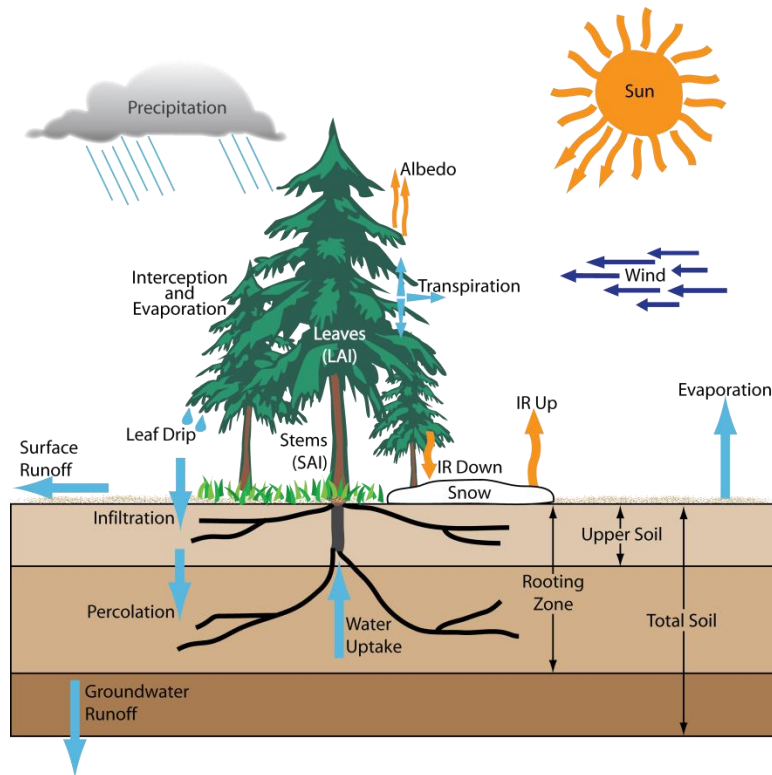


Figura No. 2.2: Esquema de Balance Hídrico.
Fuente: http://regclim.coas.oregonstate.edu/wp-content/uploads/BATS_highres.png

2.4 MEDICIÓN DE CAUDALES POR EL MÉTODO ÁREA VELOCIDAD

Uno de los métodos más utilizados en la medición de caudales medianos y grandes en una corriente de agua es el método Área por Velocidad. Este método consiste en medir en un área transversal de la corriente del agua, determinar las velocidades del flujo con las cuales posteriormente se puede obtener el caudal.

El proceso a seguir en la aplicación de este método es el siguiente:

⁶ Germán Monsalve Sáenz (1999). *Hidrología en la Ingeniería*. Bogotá (2ª. Edición): ALFA OMEGA.

- a. Se divide la sección transversal del río en un cierto número de verticales para el levantamiento del perfil de las velocidades.
- b. Se determina en cada vertical el perfil de las velocidades por medio de un aparato llamado molinete.
- c. Se mide la velocidad media en cada perfil.
- d. El caudal será la sumatoria del producto de cada velocidad media por su área de influencia⁷.

En este método se aplica la ecuación de Continuidad, el caudal en una sección transversal de área A , está dado por $Q = \iint V \cdot dA$, donde la integral se aproxima sumando los caudales incrementales calculados para cada medición i , que varía desde 1 hasta n , del vector velocidad V_i y profundidad D_i , las dimensiones representan valores promedios a lo largo del ancho ΔW_i del cauce, y finalmente el caudal se calcula así:

$$Q = \sum_{i=1}^n V_i D_i \Delta W_i$$

Ecuación No. 2.2: Caudal Total por el Método Área Velocidad

Dónde:

Q = Caudal

i = Cada medición

n = último número de mediciones

V_i = Vector de Velocidad

D_i = Profundidad

ΔW_i = Ancho del cauce

⁷J.M. de Azevedo Neto (1976). *Manual de hidráulica* (6ta Edición). México, D.F. : HARLA

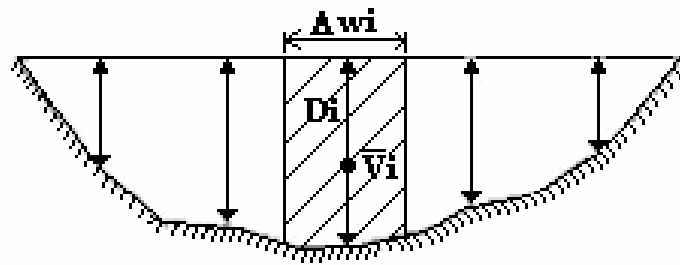


Figura No. 2.3: Sección Transversal para el Método Área Velocidad
 Fuente: Aforo en un cauce natural. Obtenido de la página http://mct.dgf.uchile.cl/AREAS/Guia_Aforo.pdf

2.5 CURVA DE CALIBRACIÓN DE CAUDALES EN UNA SECCIÓN

La curva de calibración de una sección se genera a partir de aforar durante varias épocas del año una sección ver Figura No. 2.4. Esto permite transformar los niveles de agua, que son leídos en una mira, en caudales. Las curvas se construyen a partir de los aforos hechos durante un periodo largo de tiempo, de manera que se tengan los niveles bajos y altos del río.

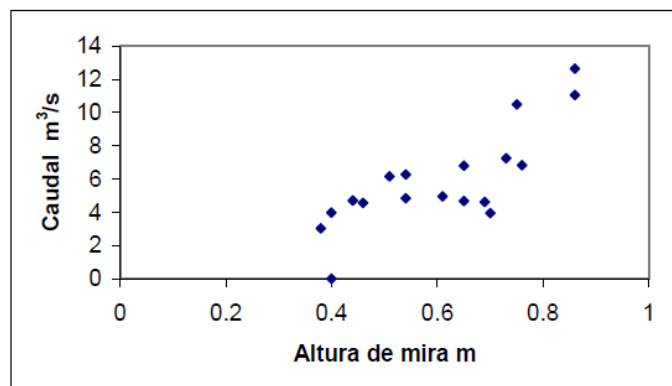


Figura No. 2.4: Cálculo de la Curva de Calibración de caudales.
 Fuente: Capítulo 7: análisis de caudales. Obtenida de la página [http://www.ingenieroambiental.com/4018/hidrologia%20-%20caudales\(2\)\(2\).pdf](http://www.ingenieroambiental.com/4018/hidrologia%20-%20caudales(2)(2).pdf)

Una vez se tiene el perfil de la sección, se inicia la medición los caudales en el río para varios niveles de agua, utilizando el molinete. Con la anotación del caudal correspondiente a nivel de agua, se construye una curva de calibración, que básicamente relaciona el nivel del agua en un determinado momento de la sección, con su caudal respectivo.

La curva de calibración normalmente debería de estar representada por una ecuación del tipo:

$$Q = ah^n$$

Ecuación No. 2.3: Ecuación general de la curva de calibración.

Dónde:

Q: Caudal, m³/seg

h: lectura de mira, m

a y n: constantes para cada sección.

Sin embargo, debido al hecho que el cero de la regla de mira no resulta siempre exactamente en el cual el caudal o descarga es igual a cero, la curva de calibración puede tener, después del ajuste con los datos de campo, la siguiente ecuación:

$$Q = a(h \pm b)^n$$

Ecuación No. 2.4: Curva de calibración ajustada.

Dónde:

Q: Caudal, m³/seg

h: lectura de mira, m

a, b y n: constantes para cada sección.

El valor de b es igual al nivel del cero de la mira sumando o restando el nivel río para una descarga igual a cero, que puede o no coincidir con el fondo del río. Con los datos del nivel y caudal determinados, las constantes a, b y n pueden ser calculadas por medio de los mínimos cuadrados, dado que⁸:

$$\log Q = \log a + n \log(h \pm b)$$

Ecuación No. 2.5: Mínimos Cuadrados de curva de calibración

⁸J.M. de Azevedo Neto (1976). *Manual de hidráulica* (6ta Edición). México, D.F. : HARLA

Para encontrar los valores respectivos de a y n de la Ecuación No. 2.5, se hace variar el valor de b . A demás se encuentra el respectivo coeficiente de correlación que resulta del método de los mínimos cuadrados para los datos registrados de nivel h y caudal Q que está relacionada con la ecuación que se ha determinado. El valor de b que maximice el valor del coeficiente de correlación, se definirá como el valor que se ajusta a la curva de calibración resultante, y además sus respectivos valores de a y n , definidos por la ecuación anterior.

Una vez que se ha obtenido la Ecuación No. 2.4, la curva de calibración se representa de la forma mostrada Figura No. 2.5, Ver Figura No. 2.5.

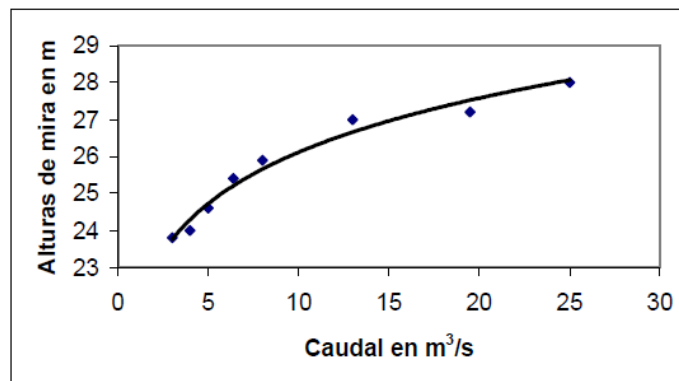


Figura No. 2.5: Curva de Calibración.

Fuente: Capítulo 7: análisis de caudales. Obtenida de la página [http://www.ingenieroambiental.com/4018/hidrologia%20-%20caudales\(2\)\(2\).pdf](http://www.ingenieroambiental.com/4018/hidrologia%20-%20caudales(2)(2).pdf)

Por medio de esta curva de calibración, se obtienen los hidrogramas o gráficas de variaciones del caudal contra el tiempo en una sección determinada, que tienen la forma mostrada en la Figura No. 2.6, y que son de gran importancia en el análisis hidrológico de un cauce.

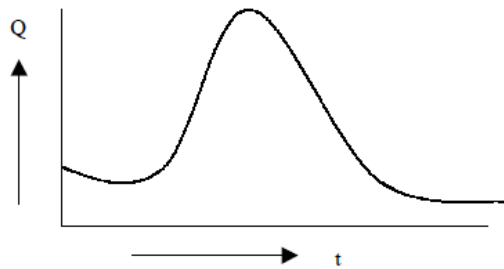


Figura No. 2.6: Hidrograma.

Fuente: Capítulo 7: análisis de caudales. Obtenida de la página [http://www.ingenieroambiental.com/4018/hidrologia%20-%20caudales\(2\)\(2\).pdf](http://www.ingenieroambiental.com/4018/hidrologia%20-%20caudales(2)(2).pdf)

2.6 MODELOS MATEMÁTICOS

De acuerdo con Krone (1980), mediante los modelos se representa algún aspecto de la realidad, la cual se trata de influir, controlar o entender con más precisión. El objetivo fundamental de la Modelación Hidrológica es estudiar un sistema y predecir su salida; un Modelo Hidrológico es una simplificación de un conjunto de fenómenos que ocurren durante el Ciclo Hidrológico, donde sus entradas y salidas son variables hidrológicas medibles enlazadas a través de un conjunto de ecuaciones que interactúan entre sí, y conectan las entradas y salidas del sistema.

La modelación Hidrológica tiene sus inicios a mediados del siglo XIX, inicialmente fue concebida para ser aplicada a resolución de problemas hidráulicos en las áreas de alcantarillado urbano, sistemas de drenaje y embalses; fue hasta el siglo XX que aparece el primer intento de aproximación racional al problema de la predicción de la escorrentía a partir del caudal denominado “El método racional”.

Avances significativos se han obtenido con el pasar de los años, entre estos el Método de las Isócronas 1920 y el Método del Hidrograma Unitario 1930, entre otros; sin embargo fue hasta 1950 que tuvo su auge la Modelación Hidrológica, por medio de la modificación del método del Hidrograma Unitario mediante el uso de transformadas de Laplace y Fourier se da origen a lo que hoy en día se conoce como los modelos conceptuales.

Durante las décadas posteriores aparecen necesidades que obligan a continuar el proceso evolutivo de la modelación hidrológica, tanto así que, en 1970 aparecen nuevos modelos para simular otros procesos como la erosión de los suelos o la difusión de contaminantes. Sin embargo, el avance más significativo conseguido durante esta década es la aparición de los modelos de pronóstico en tiempo real.

Todos los modelos hidrológicos son aproximaciones de la realidad, que consideran variables que son medibles de alguna manera, un modelo hidrológico desarrolla la metodología de estructuración de dichas variables y su enlace por medio de ecuaciones que conectan entradas y salidas, que por lo general pueden expresarse en función del tiempo.

La Modelación hidrológica se trata de proponer modelos basados en representaciones conceptuales de los procesos físicos del flujo de agua que tienen lugar en toda la cuenca. Este tipo de modelos permiten simular el ciclo hidrológico natural en cualquier punto del territorio a partir de datos meteorológicos, de las características físicas de las cuencas y de los datos de las estaciones de aforo.

Generalmente los modelos hidrológicos suelen ser clasificados obedeciendo a: la aleatoriedad de las variables involucradas (*tipo de presentación del ciclo hidrológico en el modelo*), el espacio (*forma de presentación de los fenómenos que ocurren en la cuenca*) y el tiempo (*periodo o extensión temporal*); básicamente los modelos hidrológicos pueden ser de dos tipos: Determinísticos o Estocásticos (Ver Figura No. 2.10).

Existen numerosas clasificaciones sin embargo todas obedecen a los parámetros ya mencionados:

CLASIFICACION DE MODELOS HIDROLOGICOS



Figura No. 2.7: Clasificación de los Modelos Hidrológicos

Fuente: Integrated Hydrological Modeling System HBV/IHMS

a) **MODELOS DETERMINÍSTICOS:** Un modelo determinístico no produce aleatoriedad, por lo que estimará la respuesta hidrológica en base a datos de entrada mediante una representación matemática abstracta o una ecuación basada físicamente, dando como resultado un valor numérico concreto; esto significa que una entrada produce una misma salida; este tipo de modelos suelen utilizarse como modelos de pronóstico. En otras palabras, un modelo determinístico se construye para una condición de certeza supuesta, y el modelo asume que solo hay un resultado posible (el cual es conocido) para cada acción o curso alternativo. Estos se subdividen en:

- **Modelos Teóricos:** Los modelos teóricos se basan en una propuesta o teoría de entendimiento del fenómeno en estudio. Sin embargo, algunos fenómenos que ocurren en las cuencas, no han sido estudiados con suficiente detalle. Puesto que estos modelos se basan en teorías, el resultado será correcto siempre y cuando las teorías lo sean, dentro de las condiciones propuestas.
- **Modelos Conceptuales:** en general, un modelo conceptual es una representación externa, que facilita la comprensión de los fenómenos del ciclo hidrológico, estas representaciones externas pueden materializarse

tanto en la forma de formulaciones matemáticas, analogías o en aparatos; es decir, son una representación simplificada de objetos, fenómenos o situaciones reales; con frecuencia se describe con diagramas que muestran los procesos.

- **Modelos Empíricos:** Son modelos que se basan en aproximaciones empíricas producto de la observación o experimentación. Dentro del enfoque empírico puede considerarse que la especificación de un modelo debería de basarse en la observación de la forma de la relación entre una variable de respuesta y los factores que la afectan.
- **Modelos Distribuidos:** se caracterizan por considerar los procesos internos del modelo tomando en consideración las coordenadas espaciales del sistema y de las funciones hidrológicas. Es decir, considera que los procesos hidrológicos ocurren en varios puntos del espacio y define las variables del modelo como funciones de las dimensiones espaciales.
- **Modelos Discretos:** Dividen la cuenca en celdas homogéneas, asumiendo la variabilidad espacial de las variables de entrada y salida, y los parámetros considerados; estos se basan en resolución de ecuaciones diferenciales que gobiernan los distintos procesos estudiados.
- **Modelos Basados en Mayas:** en este tipo de modelos las cuencas se subdividen en grillas o rejillas (figuras regulares), donde los parámetros se estiman para cada subdivisión, además entre cada grilla se establecen una interconexión por otros parámetros y variables del modelo.
- **Modelos basados en Subcuencas:** estos modelos trabajan las cuencas creando subdivisiones (subcuencas individuales o figuras irregulares) y sumando sus efectos para generar un resultado final.

- **Modelos de No distribución:** También llamados Agregados; consideran la cuenca en forma global. Las variables de entrada y los parámetros considerados son promediados en el espacio obteniendo un valor real medio sobre la cuenca para cada intervalo temporal considerado.

b) **MODELOS ESTOCÁSTICOS:** La modelación a través de los modelos Estocásticos involucra la aleatoriedad, lo cual significa que sus salidas son parcialmente aleatorias; este tipo de modelos son utilizados para hacer predicciones, existe una variación aleatoria grande por lo que el modelo se vuelve complicado y difícil de aplicar en situaciones prácticas. Dentro de la subclasificación se pueden mencionar: los Probabilísticos y los de Series de Tiempo. Los modelos estocásticos contienen elementos aleatorios distribuidos dentro sí; de tal manera que predicen el valor previsto o una cantidad en términos de probabilidad de ocurrencia.

2.7 MÉTODO DE MONTE CARLO

La simulación es de gran importancia en la actualidad, diversas aplicaciones científicas en distintos campos están asociadas a ella, algunos ejemplos de aplicaciones de simulaciones son: Los modelos a escala, los túneles de viento, los canales de agua, las emergencias o catástrofes, aplicaciones de aeronáutica, hidráulica, hidrología y medicina, entre otras. Se podría decir que simular tiene como objetivo duplicar características y comportamientos propios de un sistema real; un método de simulación deberá permitir: Introducir nuevas variables, hacer variar sus valores, y finalmente debe permitir analizar las consecuencias de estas modificaciones.

El método de Montecarlo permite resolver problemas matemáticos mediante la simulación de variables aleatorias. *Este Método es una técnica numérica para calcular probabilidades y otras cantidades relacionadas, utilizando secuencias de números aleatorios*⁹. La simulación a través de este método es una técnica que combina conceptos estadísticos (muestreo

⁹JJ. Gómez-Cadenas(2005), *El Método de Monte Carlo Curso De Estadística TAE*

aleatorio) con la capacidad que tienen los ordenadores para generar números pseudo-aleatorios y automatizar cálculos, permitiendo el análisis de los resultados obtenidos.

2.7.1 HISTORIA DEL MÉTODO MONTE CARLO

Las ideas básicas del Método se plasmaron en la década de 1930 por Enrico Fermi y Stanislaw Ulam, pero su primera difusión como herramienta de investigación se realizó durante la fabricación de la bomba atómica en Estados Unidos (Los Álamos en 1947).

En años posteriores, la simulación de Monte Carlo (MC) se ha venido aplicando a una infinidad de ámbitos como alternativa a los modelos matemáticos exactos o incluso como único medio de estimar soluciones para problemas complejos. Así, en la actualidad es posible encontrar modelos que hacen uso de simulación MC en las áreas de informática, empresarial, económica, industrial e incluso social. En otras palabras, la simulación de Monte Carlo está presente en todos aquellos ámbitos en los que el comportamiento aleatorio o probabilístico desempeña un papel fundamental, el nombre de Monte Carlo proviene de la famosa ciudad de Mónaco.

2.7.2 ALGORITMO DE SIMULACIÓN DE VARIABLES A TRAVÉS DEL METODO DE MONTE CARLO

La simulación de Monte Carlo es una técnica cuantitativa que hace uso de la estadística y los ordenadores para imitar, mediante modelos matemáticos, el comportamiento aleatorio de sistemas reales no dinámicos.

Una simulación mediante el método Montecarlo consiste básicamente en:

- a. Definir el dominio de valores de la variable aleatoria.
- b. Generar muestreos de la variable aleatoria según cierta densidad de probabilidad especificada.

- c. Realizar cálculos deterministas usando los valores de variable aleatoria resultantes del muestreo.
- d. Agregar los resultados de los cálculos individuales al resultado final.¹⁰

La clave de la simulación consiste en crear un modelo matemático del sistema, proceso o actividad que se quiere analizar, identificando aquellas variables (inputs del modelo) cuyo comportamiento aleatorio determina el comportamiento global del sistema. Una vez identificadas dichas variables aleatorias, se lleva a cabo un experimento que consiste en *generar muestras aleatorias con ayuda del ordenador para dichas variables, y analizar el comportamiento del sistema ante los valores generados*. Tras repetir n veces este proceso, se dispondrá de n observaciones sobre el comportamiento del sistema, lo cual será de utilidad para entender el funcionamiento del mismo. Cabe destacar que el análisis será más preciso, cuando mayor sea el número de veces que se repita el proceso que se lleva a cabo.

2.8 MODELO HYDROLOGISKA BYRÅNS VATTENBALANS (HBV)

El Modelo Hidrológico HYDROLOGISKA BYRÅNS VATTENBALANS (HBV), es un algoritmo de simulación por ordenador basado en la teoría del Ciclo Hidrológico, el Modelo HBV fue creado por el SMHI (Instituto Sueco de Meteorología e Hidrología), con el propósito de ser implementado en estudios de generación de energía hidroeléctrica, el objetivo era crear un modelo hidrológico conceptual con las demandas razonables de instalaciones informáticas y datos de calibración. La idea central del modelo está basada en la generación de caudales en resoluciones temporales convenientes, producto de la calibración del mismo mediante el uso de parámetros propios de cada zona de estudio; a través del establecimiento de un balance hídrico.

El sistema de modelización incluye numerosas opciones de representación gráfica. Se pueden aplicar varios métodos de verificación de los datos antes de la calibración, simulación o preparación de pronósticos. Los resultados incluyen la precipitación, el caudal

¹⁰Maikel Fuentes Rodríguez y Gabriel J. Gil Pérez (8 de Enero de 2010) *Método de Monte Carlo*.

registrado y el calculado, las diferencias acumuladas entre el caudal registrado y el calculado, la humedad del suelo calculada, la acumulación de nieve, el deshielo de la nieve, y la evaporación, así como análisis estadísticos de los resultados.

2.8.1 HISTORIA Y CLASIFICACIÓN DEL MODELO HBV

El Modelo HBV fue desarrollado originalmente por el Instituto Sueco de Meteorología e Hidrología en 1971, por el profesor Sten Bergstrom, con la idea de que éste pudiera ser usado principalmente en escenarios de producción de energía hidroeléctrica, en estudios de factibilidad y abastecimiento, y en la implementación a diversos problemas relacionados con los recursos hídricos; su objetivo fundamental fue crear una herramienta de pronóstico de caudales que utilizara equipo e información moderada y que fuese de fácil comprensión y aplicación.

Desde entonces a la fecha ha sufrido cambios, sin embargo se han mantenido los datos de entrada conservando su simplicidad; el modelo se ha empleado para unas 75 cuencas y para unas 80 zonas de captación en Suecia; además se ha difundido su uso en cerca de 50 países alrededor del mundo en diferentes aplicaciones operacionales y científicas, abarcando aun los sistemas de alerta y emergencia por inundaciones.

Con el pasar del tiempo el HBV ha demostrado ser flexible y robusto para dar solución a problemas de recursos hídricos en diferentes áreas; la estructura flexible del sistema de HVB/IHMS permite la creación de sub-divisiones con respecto a zonas climáticas diversas, cobertura vegetal, tipo y uso del suelo, la densidad de la red hidrometeorológica perteneciente a cada cuenca, etc.

Dentro de la clasificación de los modelos hidrológicos (Ver Figura No. 2.7), el Modelo HBV se considera del tipo Determinístico Conceptual Distribuido en subcuencas, el cual puede ser utilizado para pronóstico de avenidas máximas. Recientemente el modelo se ha utilizado como herramienta de mejora de los sistemas de alerta Temprana por inundaciones en al menos dos cuencas de importancia en El Salvador (Río Jiboa y Río Grande de San Miguel);

el objetivo fundamental de esta acción es fortalecer el SAT mediante la modelación de las cuencas.

2.8.2 APLICACIONES DEL MODELO HBV

El HBV es un modelo computarizado para cuencas que convierte los datos de las precipitaciones, la evaporación potencial y el deshielo de las nevadas, en valores de caudal afluente, mediante simulación de los procesos hidrológicos naturales. Existe una diversidad bastante amplia de aplicaciones del Modelo HBV, entre las cuales se pueden mencionar: Estudios de prefactibilidad, Abastecimiento de Agua, Generación Hidroeléctrica, Seguridad de presas, Irrigación, y Cambios de clima. Puntualmente el modelo sirve como una herramienta muy útil en las simulaciones de recarga de agua subterránea, humedad del suelo, pronóstico a corto plazo y cálculo de crecidas, convirtiéndose así en una herramienta útil en el manejo de cuencas.

Operacionalmente el HBV se usa a través del software IHMS/HBV el cual es un programa de ordenador que incluye las rutinas del modelo, y ha sido desarrollado para plataformas PC mediante el uso del Sistema Operativo Windows XP™.

2.8.3 REQUERIMIENTO DE DATOS

El Modelo, en su estructura de funcionamiento requiere de datos de entrada indispensables para su aplicación y calibración, entre estos se pueden mencionar: Los datos hidrometeorológicos y las condiciones iniciales.

Los datos hidrometeorológicos están constituidos por la Precipitación, datos de Evapotranspiración Potencial, Datos o mediciones de caudales observados y datos de temperatura cuando aplique. Generalmente requiere un mínimo de 6 años de registros simultáneos del flujo y las condiciones meteorológicas para el funcionamiento adecuado del modelo.

Además se requiere el ingreso de las condiciones iniciales y de datos geomorfológicos de la cuenca de análisis; a continuación se describen estos datos aplicados a situaciones de Sistemas de Alerta Temprana por Inundaciones (SATs).

2.8.3.1 DATOS HIDROMETEOROLOGICOS

- a. Precipitación (p): El modelo permite resoluciones temporales diarias y horarias según el tipo de aplicación para la cual se necesite calibrar, para el caso particular de los SATs, resulta conveniente utilizar una resolución temporal horaria, por lo que los valores de precipitación se requieren en mm/h, dichos datos son provenientes de las estaciones telemétricas ubicadas en las cuencas; a su vez se puede hacer uso de estaciones convencionales que poseen registros diarios los cuales se pueden distribuir de manera horaria a través de metodologías complejas.
- b. Evapotranspiración Potencial (ETP): El ingreso de evapotranspiración potencial como dato de calibración se hace con resolución mensual (mm/mes), esto es debido a que estos datos no presentan variación como los datos de precipitaciones, por tal razón la utilización de datos diarios de evapotranspiración potencial no mejorara los resultados de la modelación. Estos datos se pueden obtener de Métodos instrumentales (Tanques de Evaporación y evaporímetros Ver Figura No. 2.8), Métodos teóricos (Balances Hídricos) y Formulas Empíricas (Hargreaves, Meyer, Penman,) donde se hace uso de mediciones de temperatura, radiación solar, porcentaje de Brillo del sol, entre otros para realizar el cálculo de la ETP.



Figura No. 2.8 Tanque Evaporímetro Clase A

Fuente: <http://asignatura.us.es/pfitotecnia/textosC/imagenes/Fig31.jpg>

- c. Caudales Observados (q): Para realizar la calibración se necesitan datos de caudales observados en resolución diaria u horaria según sea el caso, estos serán ingresados al modelo en m^3/s ; para la obtención de los valores de caudal se toman los datos de nivel registrado por las estaciones telemétricas y haciendo uso de curvas de calibración (ver sección 2.5 Curva de calibración de caudales en una sección), estos niveles se convierten a caudales.

2.8.3.2 CONDICIONES INICIALES

Para el funcionamiento del modelo se requieren de condiciones iniciales de humedad de suelo y contenido de agua en sus diferentes rutinas de funcionamiento, estas condiciones iniciales son establecidas por defecto al iniciar la modelación y estas a su vez influyen en el resultado al inicio de la modelación. Este apartado se explicara a detalle posteriormente en la sección 2.8.5 Referente a la calibración del Modelo HBV.

2.8.4 ALGORITMO DE FUNCIONAMIENTO DEL MODELO HBV

La estructura de funcionamiento del modelo HBV está conformada por una serie de leyes físicas y métodos simplificados de análisis, encadenadas matemáticamente, que simulan el proceso de precipitación - escorrentía en cuencas, mediante sus tres rutinas principales que guardan un orden de operación secuencial, iniciando por la Rutina de Humedad del Suelo, La Rutina de Respuesta y finalmente la Rutina de Transformación. Es importante mencionar que en su estructura, el modelo posee una **Rutina de Precipitación (Nieve)** que no es aplicable en su totalidad en zonas tropicales como El Salvador ya que fue diseñada originalmente para climas nórdicos, sin embargo esta rutina posee en su estructura algunos parámetros que son aplicables a las precipitaciones, por tal razón se abordara dicha rutina con énfasis en los parámetros aplicables a esta investigación; no obstante se estudiaran a detalle la Rutina de Humedad del Suelo, la Rutina de Respuesta y la Rutina de Transformación.

La estructura del modelo HBV de precipitación escorrentía, es un sistema de reservorios o depósitos ordenados en vertical que forman un modelo de cascada lineal (Ver figura 2.8). En esta figura se muestran los tres depósitos ordenados colinealmente, de estos los dos inferiores poseen drenajes laterales ligados a un conducto de salida. Inicialmente el depósito superior (Soil Routine o Rutina de humedad del suelo) alcanza diversos niveles producto de la precipitación sea esta nieve o lluvia (Rainfall and Snowmelt) representado por las flechas de la parte superior del esquema en dirección descendente, luego la flecha mostrada en la parte derecha del esquema la cual está en dirección ascendente representa la evapotranspiración del suelo (evapotranspiration), este primer depósito tiene dos funciones principales: Almacenamiento de humedad superficial y Distribución de lluvia al segundo depósito.

- a. **Almacenamiento de humedad superficial:** Esta primera función es la retención o almacenamiento de humedad superficial según la capacidad que posee el suelo de la cuenca.
- b. **Distribución de lluvia al segundo depósito:** la segunda función es la contribución a la recarga del segundo depósito. (Recharge)

A continuación se muestra el algoritmo de funcionamiento del modelo HBV en el cual se describen algunos parámetros incluidos en el mismo:

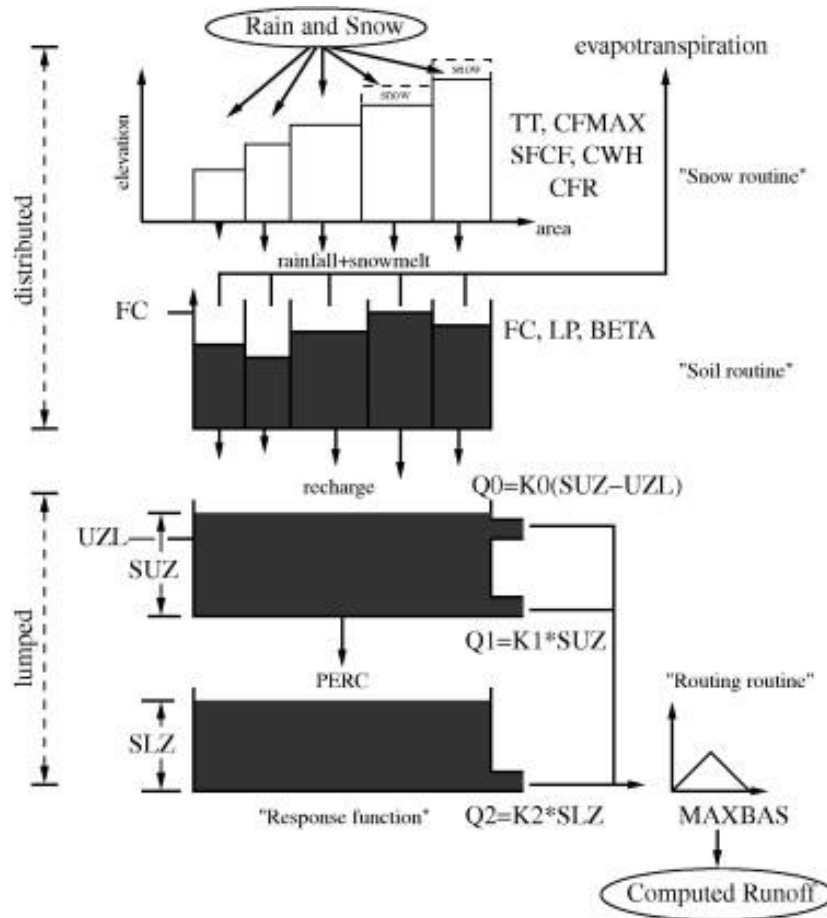


Figura No. 2.9: Algoritmo de Funcionamiento del Modelo HBV.

Fuente: <http://pars.els-cdn.com/content/image1-s2.0-S0022169410003422-gr1.jpg>

El Segundo y Tercer depósito (SUZ y SLZ) simbolizan la **Rutina de Respuesta (Routing Routine)**, la cual se encarga de simular los diferentes niveles de escurrimiento, por medio de coeficientes de recesión K que modifican la velocidad de salida del fluido, físicamente representan el tamaño de los diferentes orificios de salida a distintas alturas medidas desde el fondo de ambos depósitos, simulando el escurrimiento rápido proveniente del drenaje de estratos superiores incluyendo aun la escorrentía superficial de la cuenca a través del segundo depósito, y el escurrimiento lento a través del depósito inferior que representa el drenaje de lagos y estratos profundos de la corteza terrestre los cuales conforman el caudal base de un río.

Finalmente la **Rutina de Transformación (Response Function)**, se representa en la figura mediante el conducto inferior y un Hidrograma triangular de salida, dicha rutina se encarga

de la generación de los hidrogramas calculados que son el producto final del modelo previo a la calibración.

De manera resumida, los componentes típicos de este modelo HBV son la **Rutina de Precipitación (Nieve)**; la **Rutina de Humedad del Suelo** (que es el principal componente en el cálculo de la escorrentía), la **Rutina de Respuesta** (Función de respuesta o del origen de la escorrentía), y la **Rutina de Transformación**. Esquemáticamente se representa así:

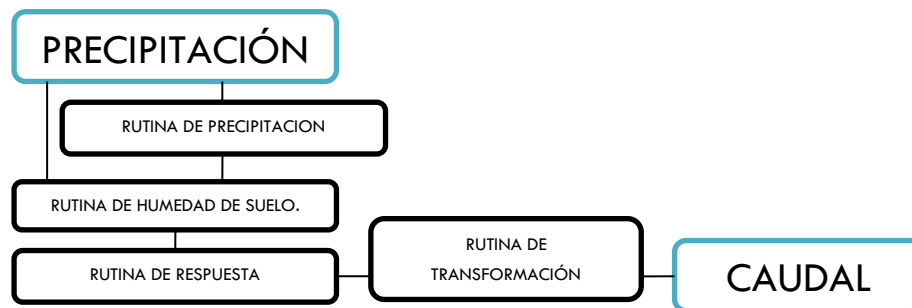


Figura No. 2.10: Rutinas del Modelo HBV.

Fuente: Integrated Hydrological Modelling System SMHI/HBV Manual Version 5.10

Dado que en su esquema de funcionamiento el modelo incluye varias rutinas de operación y estas a su vez están asociadas a parámetros particulares, se hace necesario mencionar que todos los valores de los parámetros corresponden a un paso de tiempo de 1 día, si un paso de tiempo más corto se utiliza, los valores de los parámetros automáticamente se convierten al paso de tiempo elegido. Los parámetros se estiman mediante un procedimiento de calibración o mediante pruebas en campo/laboratorio.

El funcionamiento de cada una de las rutinas que conforman la estructura del Modelo HBV se estudiará por separado, explicando de manera detallada cada una de ellas y estableciendo un listado de todos los parámetros del modelo que aparecen incluidos en cada Rutina; además se incluye en este apartado, los parámetros de la sub rutina de Lagos.

2.8.4.1 RUTINA DE PRECIPITACION (NIEVE)

La rutina de Precipitación (Nieve) es la responsable de la simulación de los efectos de las condiciones climáticas asociadas a zonas con acumulación y el deshielo de nieve. Entre los efectos considerados están: los derretimientos de glaciares, las nevadas, el congelamiento de cuerpos de agua, etc. Se ha incluido el listado de parámetros de la Rutina de Precipitación (Nieve) con la finalidad de esclarecer que no se utilizaran en el modelo aplicable a condiciones climáticas sin nevadas, por lo tanto los valores no serán incluidos en el proceso de calibración. Sin embargo se han listado debido a que algunos de los parámetros de generación de volumen son parte de esta rutina, y aplican a la corrección de precipitaciones.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
pcorr	Factor de corrección general de la precipitación, todos los valores de precipitación de entrada serán multiplicados por este factor.
pcalt	Factor de corrección de Elevación para la precipitación. Los valores de precipitación serán multiplicados por $(1 + h * pcalt)$, donde h es la diferencia de altitud (cientos de metros) entre la elevación de la zona actual y la elevación de la estación de la precipitación (o la media ponderada de varias Estaciones).
pcaltl	La elevación más alta para el cual se utiliza el parámetro de pcalt. Si el valor es cero, pcalt se utilizará para todas las altitudes. Si no es cero, pcalt se sustituye por el parámetro pcaltgl (para las zonas de glaciares) o pcaltup (para otras zonas) para altitudes mayores que pcaltl.
pcaltup	Factor de corrección por elevación para la precipitación, utilizado para alturas superiores a los pcaltl para las zonas sin glaciares.
pcaltgl	Factor de corrección por elevación para la precipitación que se usara para las zonas de glaciares (por encima de pcaltl)
tcalt	Lapso de Temperatura ($^{\circ}$ C/100 m).
rfcf	Factor de corrección de caída de lluvia. Los valores de lluvia caída se multiplicarán por este factor.

sfcf	Factor de corrección de caída de la nieve. Los valores de las nevadas se multiplicarán por este factor.
fosfcf	Factor fosfcf que se multiplicará por sfcf para las zonas boscosas (aplicable si existe nieve en la zona).
cfmax	Factor de derretimiento de la nieve. La unidad es mm / ° C y el día.
focfmax	Factor que se multiplicará por cfmax para las zonas de bosque boscosas. (Aplicable si existe nieve en la zona).
tt	Umbral de temperatura (° C) por debajo del cual la precipitación se supone que es la nieve.
dtm	Valor que se añade a tt para dar el umbral de temperatura de deshielo (° C). Es a menudo cero.
ttint	La longitud total de un intervalo de temperatura en el que la parte de precipitación que se considera que es nieve, El punto medio del intervalo se define por tt.
tfti	Igual que ttint pero para calibraciones de edad.
gmelt	Factor de fusión de los glaciares (mm / ° C y día).
cfr	Factor de recongelación en la rutina de nieve.
whc	Capacidad de retención de agua en nieve (máximo de wc / sp).
sfdistfo	Distribución de la caída de nieve en las zonas forestales si se utiliza el parámetro sclass.
sfdistfi	Igual que sfdistfo pero válida para las zonas sin bosque.
sclass	Número de clases de nieve. Cada zona se subdivide en un número de subzonas utilizados para la distribución de nieve, caen de acuerdo con la sfdistfo parámetros y sfdistfi.
cola	Si este parámetro > 0 sin corrección de la zona del lago para las zonas inundadas se utilizará.

Tabla No. 2.1: Parámetros de la Rutina de Precipitación (Nieve).

Fuente: Integrated Hydrological Modelling System SMHI/HBV Manual Version 5.10

2.8.4.2 RUTINA DE HUMEDAD DEL SUELO

Dentro de las rutinas que conforman el modelo, la Rutina de Humedad del Suelo es la responsable de la formación, el control de la escorrentía y la contribución a la Rutina de Respuesta. La Rutina de Humedad del Suelo está basada principalmente en los tres parámetros β , LP, y FC, como se observa en la Figura No. 2.11:

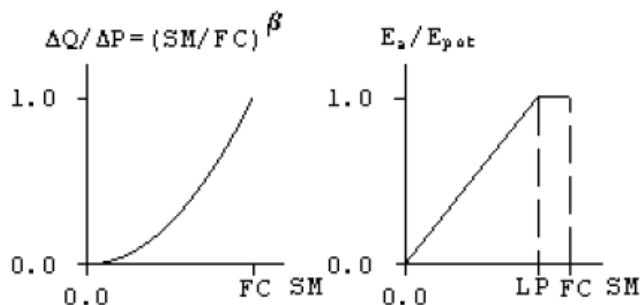


Figura No. 2.11: Rutina de Humedad del suelo Modelo HBV.

Fuente: Integrated Hydrological Modelling System SMHI/HBV Manual Version 5.10

Dónde:

SM: Soil Moisture Storage (*Almacenamiento de Humedad del Suelo*)

FC: Field Capacity (*Capacidad de Campo*)

LP: Limit for potential evapotranspiration (*Limite para la Evapotranspiración Potencial*)

ΔP : Contribution from rainfall or Snowmelt (*Contribución de la Precipitación o las nevadas*)

ΔQ : Contribution to the response Function (*Precipitación Efectiva*)

β : Empirical Coeficient (*Coeficiente Empírico*)

E_{pot} : Potential Evapotranspiration (*Evapotranspiración Potencial*)

E_a : Computed actual evapotraspiration (*Evapotranspiración Actual*)

Las dos partes fundamentales de esta Rutina la conforman la contribución al aumento en la humedad del suelo (ΔSM) y la contribución a la Rutina de Respuesta (ΔQ), según se muestra en la Figura No. 2.11 (figura izquierda) a medida que cae la lluvia ΔSM aumenta hasta alcanzar su valor máximo FC, al igual que ΔQ ; en este momento el suelo pierde su capacidad de almacenamiento llegando a su punto de saturación provocando que la

precipitación recibida se transforme en escorrentía superficial. De lo anterior se puede decir que si el suelo está seco la contribución de la lluvia a la escorrentía es menor que cuando el suelo posee algún grado de humedad.

La relación entre ΔSM y ΔQ , viene dada por la Ecuación No. 2.6.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta P} = \left(\frac{Sm}{Fc}\right)^\beta$$

Ecuación No. 2.6: Comportamiento de la Rutina de Humedad del suelo

Dónde:

ΔQ : Contribución a la rutina de Respuesta

ΔP : Contribución de la precipitación

Sm : Humedad del suelo

Fc : Capacidad de Campo

β : Coeficiente empírico

En la expresión anterior β es un coeficiente empírico que controla la contribución a la Rutina de Respuesta ($\Delta Q/\Delta P$) o el incremento de la humedad del suelo en el almacenamiento ($1 - \Delta Q/\Delta P$) por cada milímetro de lluvia. La relación $\Delta Q/\Delta P$ también es llamada coeficiente de escorrentía.

En esta Rutina también se incluye el efecto de la Evapotranspiración, la cual está en función del grado de humedad del suelo y viene dada por la Ecuación No. 2.7.

$$Ea = Epot * \frac{Sm}{Lp * Fc}$$

Ecuación No. 2.7: Ecuación de la Evapotranspiración Real.

Dónde:

Ea : Evapotranspiración real o actual

$Epot$: Evapotranspiración potencial

Lp : Limite de Evapotranspiración

Sm : Humedad del Suelo

Fc : Capacidad de campo

Partiendo de la Ecuación anterior, se puede observar que el producto $Lp*Fc$ es el valor sobre el cual la evapotranspiración real logra su valor potencial. Haciendo referencia a la Figura No. 2.11 (parte derecha) y la Ecuación No. 2.7, se dice que la evapotranspiración real es cero cuando el suelo está perfectamente seco y llega a su valor máximo cuando el contenido de humedad del suelo alcanza el límite de evapotranspiración potencial cuando se cumple que $Ea/Epot=1$.

El parámetro LP (Limite para la evapotranspiración Potencial) está dado como una fracción de FC, LP es el valor de la humedad del suelo sobre el cual la evapotranspiración alcanza su valor potencial y FC (Field Capacity) es el valor máximo que alcanza la humedad del suelo en el almacenamiento (en mm) del modelo, también llamado Capacidad de Campo.

Esta rutina consta de los parámetros que se listan a continuación:

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
fc	Capacidad de campo (mm).
lp	Límite para la evaporación potencial. Debe ser 1,0 o menos.
Beta (β)	Exponente en la fórmula para el drenaje del suelo.
etf	Factor de temperatura de evaporación. La evapotranspiración potencial se ajustará de acuerdo con la fórmula: $E = Eo (1 + etf t \partial t)$ Donde ∂t es la desviación de la temperatura del valor normal. Este parámetro sólo se puede usar si el valor normal de la temperatura (ctemp locmean) está disponible. Por lo tanto este parámetro debe ser cero (o <0) en la primera corrida después de lo cual los valores normales se puede calcular.
cflux	Caudal máximo capilar de la caja de respuesta superior a la zona de humedad del suelo (mm / día).
ecorr	Factor de corrección General de la evapotranspiración potencial. Este parámetro no afecta a la evaporación si el método de tipo Thornthwaite es elegido por el uso del parámetro athorn.
cevpfo	Factor de corrección para la evapotranspiración potencial en las zonas forestales.

ecalt	Factor de corrección de elevación para la evapotranspiración. Los valores de evaporación se multiplicará por $(1 - h * ecalt)$, donde h es la diferencia de altitud (cientos de metros) entre elevación zona actual y la elevación de la estación de evaporación (o media ponderada de varias estaciones).
athorn	Si este parámetro es > 0 una versión simplificada de la fórmula Thornthwaites se utiliza para calcular la evaporación potencial.
stf	Parámetro que se utiliza para activar un conjunto de factores estacionales por los cuales será multiplicado el parámetro athorn. El parámetro puede tener el valor 0, 1 o 2.
soilstep	Si este parámetro = 1 todas las zonas de suelo se consideran como una zona y sólo un cómputo del suelo se realiza en cada paso de tiempo para ahorrar tiempo de cálculo.

Tabla No. 2.2: Parámetros de la Rutina de Humedad del suelo.

Fuente: Integrated Hydrological Modelling System SMHI/HBV Manual Version 5.10

2.8.4.3 RUTINA DE RESPUESTA

Para entender el comportamiento de la Rutina de Respuesta es necesario retomar lo planteado en el numeral anterior, donde se dijo que ΔQ , es la contribución de la Rutina de Humedad del Suelo a la Rutina de Respuesta. Dicha contribución se da cuando el suelo alcanza el máximo nivel de humedad (FC), cuando esto sucede el suelo ya no es capaz de retener más humedad y adquiere un comportamiento similar al de una superficie impermeable, es entonces que parte del agua almacenada es filtrada a estratos inferiores y un buen porcentaje de la lluvia recibida es transformada en escorrentía.

Cuando el agua retenida en la capa superficial, es filtrada a capas inferiores, y se producen dos efectos en el direccionamiento de la misma, parte del agua es conducida verticalmente por efecto de la gravedad hacia estratos inferiores, a este fenómeno se le conoce como Infiltración; otra parte del agua drena lateralmente por drenajes subsuperficiales horizontalmente, a este fenómeno se le llama Conductividad Hidráulica. Esta circulación subterránea es la responsable del mantenimiento del caudal base de los ríos

en época de verano, si se el drenaje se da en capas más superficiales entonces la circulación tendrá incidencia en la variabilidad del flujo en época lluviosa.

Este proceso el modelo HBV lo realiza a través de dos recipientes dispuestos colinealmente, un depósito superior no lineal y uno inferior lineal (Ver Figura 2.9 parte inferior). Estos son los que influyen en que el escurrimiento sea rápido y lento dentro de los componentes del Hidrograma producto de la calibración del modelo.

- a) **Depósito Superior No Lineal:** este depósito representa los niveles de escurrimiento a niveles más superficiales tal como se mencionó en párrafo anterior, de manera que los coeficientes K_0 , K_1 , K_2 y K_3 son los que representan o indican la variación de la velocidad del flujo a diferentes alturas UZL en este depósito (Ver figura No. 2.12). Estos coeficientes K a demás representan las diferentes pendientes en el Hidrograma calibrado.

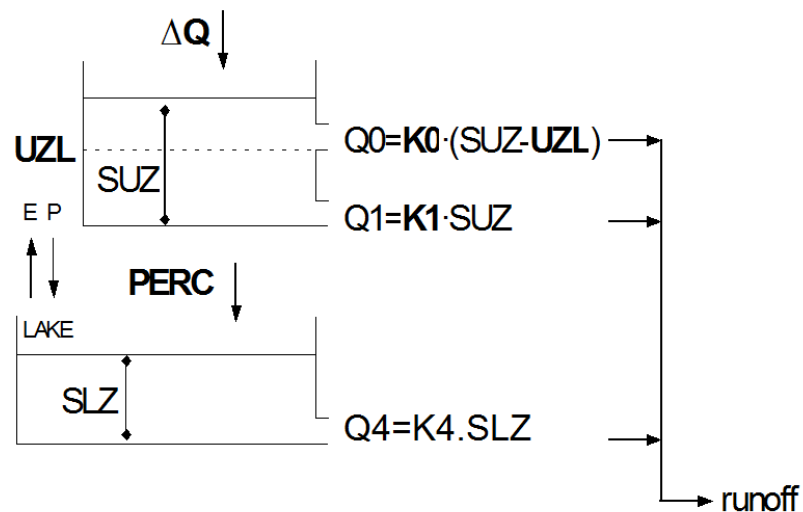


Figura No. 2.12: Depósito Superior e inferior de la Rutina de Respuesta

Fuente: Lectures on hydrological modelling 6: The HBV model, Chongyu Xu and Jan Seibert, Oslo University

Del depósito de la Rutina de Humedad del Suelo se filtrara fluido hacia este depósito y mientras haya agua en el depósito superior, esta se percolará al depósito inferior según el parámetro de $PERC$ (Ver figura No. 2.12). Sin embargo la percolación no es suficiente para vaciar el depósito superior, y la

descarga generada tendrá una contribución directa desde el depósito superior, que representa el drenaje a través de más canales superficiales.

- b) **Depósito Inferior Lineal:** Este depósito representa el almacenamiento de las aguas subterráneas de la cuenca que contribuyen al flujo base.

El caudal de salida del depósito inferior se describe por medio de la Ecuación No. 2.8:

$$Q4 = K4 * SLZ$$

Ecuación No. 2.8: Caudal de salida del depósito inferior

Dónde:

Q4: Caudal de salida del depósito inferior

K4: Coeficiente de recesión del depósito inferior

SLZ: Contenido del depósito inferior

A continuación se muestran los parámetros correspondientes a la rutina de respuesta:

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
k0	Coeficiente de recesión superior a la casilla de respuesta superior. (día-1) primer coeficiente de recesión.
uzl0	Límite de drenaje de salida inferior de la recesión k0 (mm).
k1	Segundo coeficiente de recesión para el cuadro de respuesta superior. (día-1)
uzl1	Límite de drenaje de salida inferior para coeficiente de recesión k1 (mm).
k2	Tercer coeficiente de recesión para el cuadro de respuesta superior. (día-1)
uzl2	Límite de drenaje de salida inferior para coeficiente de recesión k2 (mm).
k3	Coeficiente inferior de recesión para el cuadro de respuesta superior. (día-1)

k4	Coeficiente de Recesión de flujo base. (día-1)
perc	Capacidad de Percolación (mm / día) desde la parte superior a la caja de menor respuesta.
khq	Coeficiente de recesión para la caja superior, cuando la descarga de agua es igual a hq. Cuando se utiliza este parámetro ($khq > 0$) los parámetros K0-K3 no se utilizarán. En este caso la salida se calcula de acuerdo con la fórmula $Q = k * UZ^{(\alpha+1)}$. El factor k es calculado por el programa de modo que el coeficiente de recesión para la Sede será igual al khq (unidad: día-1).
hq	Ver KHQ (unidad: mm / día)
alfa (α)	Ver KHQ
recstep	Número de pasos de cálculo interno en esta rutina durante un día. Si $recstep > 998$ un número adecuado de pasos se calcula por el programa en función del flujo de salida desde el cuadro de respuesta. / 999 /. El valor por defecto también se establece en 999 si el parámetro $khq > 0$, de lo contrario el valor por defecto es 1.
resparea	Si este parámetro > 0 el parámetro perc (capacidad de percolación) se reduce por $(sm / fc)^{\beta}$.

Tabla No. 2.3: Parámetros de la Rutina de Respuesta.

Fuente: Integrated Hydrological Modelling System SMHI/HBV Manual Version 5.10

2.8.4.4 RUTINA DE TRANSFORMACIÓN

La escorrentía generada a partir de la rutina de respuesta se convierte a través de una Rutina de Transformación, con el fin de obtener la forma correcta del Hidrograma en la salida de la cuenca. La función de transformación es una técnica de filtro simple, con una distribución triangular de los pesos lo que significa que para cada valor de tiempo existe un valor de escurrimiento registrado. Ver Figura No. 2.13 que se muestra a continuación.

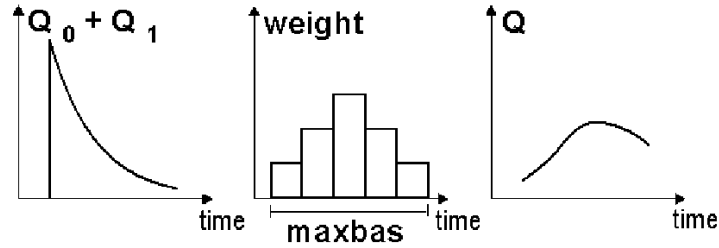


Figura No. 2.13: Representación gráfica de la función de transformación.

Fuente: Integrated Hydrological Modelling System SMHI/HBV Manual Version 5.10

El parámetro MAXBAS que se muestra en la figura anterior a través del cual el modelo controla el tiempo de respuesta que tarda la cuenca en generar la escorrentía producida por la lluvia, puede ser variado desde 12, 24, 48, 72 horas según lo requiera el trabajo de calibración.

En la tabla que se muestra a continuación se presentan los parámetros incluidos en la función de transformación:

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
maxbas	Rapidez de respuesta de la cuenca o Número de días en la rutina de la transformación. maxbas no se limita a valores enteros. El programa modelara de forma automática y se asegurará de que los maxbas base de tiempo no serán más cortos que el paso de tiempo elegido. maxbas = un paso de tiempo.
maxbaz	Rapidez de respuesta de la cuenca o Número de días en la rutina de la transformación. maxbaz = 0 significa que no hay transformación de la escorrentía se hace dentro de un maxbaz sub-cuenca no se restringe a valores enteros. Sustituye a maxbas para nuevas aplicaciones.

Tabla No. 2.4: Parámetros de Función de Transformación.

Fuente: Integrated Hydrological Modelling System SMHI/HBV Manual Version 5.10

2.8.5 CALIBRACION DEL MODELO HBV

Es la etapa del proceso de modelación que obliga a que el funcionamiento del Modelo Matemático reproduzca en mayor o menor grado la historia del sistema real. Es por ello que esta etapa de la modelación es donde se procederá al ajuste de los parámetros incluidos en el modelo y a la comparación de los resultados obtenidos mediante la modelación y los obtenidos por el sistema de monitoreo hidrológico de la cuenca.

2.8.5.1 EL PROCESO DE CALIBRACIÓN

a) **CREACIÓN DEL DISTRITO DE TRABAJO:** el modelo permite la creación de distritos de trabajo (cuenca de análisis) que será utilizado en el proceso de calibración; en cada distritos se incluye la creación o establecimiento de las subcuencas a utilizarse, cabe mencionar que la creación de subcuencas deberá realizarse de acuerdo a la distribución de las estaciones de medición de caudales que se tienen a disposición para participar en la modelación. Adicionalmente, en esta etapa se ingresa al modelo los datos geomorfológicos promedio de las subcuencas, entre los que se pueden mencionar: Área, Tipo de cobertura, Elevación, Puntos de control, entre otros.

b) **INGRESO DE LOS DATOS DE ENTRADA AL MODELO:** Una vez creado el Distrito de trabajo se procede a la importación de datos que el modelo necesita para su funcionamiento, entre estos se incluye la precipitación, la evapotranspiración potencial y los caudales observados en las estaciones hidrometeorológicas de la subcuenca, (Ver sección 2.8.3).

En esta fase se definen el número y el tipo de estaciones a utilizar en la modelación además se analizan los datos disponibles para ser ingresados, se verifican datos faltantes, se establecen estaciones de reemplazo, y finalmente se definen los periodos de datos a usarse para la calibración; es importante mencionar que teniendo ya definidas las series de datos a usar, se procede al cálculo de los pesos ponderados de lluvia en cada subcuenca, estos son calculados a partir de aplicación del método del Polígono de Thiessen cuando se

posee una buena distribución de las estaciones; si esto no se cumple debe usarse un método alternativo como es el caso del Método de las Isoyetas.

c) ESTABLECIMIENTO DE LOS PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN: para el establecimiento del listado de parámetros a utilizar dentro de la calibración, primero debe definirse claramente la zona para el cual se requiere calibrar el modelo y la información disponible de la cuenca analizada. Dado que algunos parámetros aplicables pueden ser determinados experimentalmente, deberá establecerse una metodología de selección de dichos parámetros, luego debe listarse aquellos parámetros que no se pueden determinar experimentalmente.

d) DEFINICIÓN DE LOS PERIODOS DE ANÁLISIS ESTADO INICIAL, CALIBRACION Y VALIDACION: la primera parte de esta etapa es el establecimiento del estado inicial, el cual servirá de base para la calibración inicial del modelo. Este estado es generado por el establecimiento del contenido de la humedad del suelo y de los almacenamientos en los depósitos en la Rutina de Respuesta. Dicha acción se realiza en la Ficha *Computation*, seleccionando *Edit State*, dicho estado inicial se creara a partir de la fecha 0001-10-01:00, luego deberá simular el modelo por un periodo de una año, esto con el propósito de crear los estados iniciales ya mencionados; este estado servirá de base para la calibración del modelo.

Luego de establecer el estado inicial según los datos disponibles se establecen dos periodos de calibración en donde se deben utilizar dos tercios de los datos disponibles para calibración y un tercio para la validación de calibración.

e) AJUSTE DE LOS PARAMETROS EN LA SIMULACION: esta es la parte más importante de la calibración y para ello deberá adoptarse una metodología adecuada para realizarla. Tomando en cuenta que la calibración se ejecuta en su mayor parte manualmente con la finalidad de obtener un ajuste adecuado del Hidrograma calculado y el Hidrograma real, es necesario seguir una secuencia lógica para lograr dicho objetivo.

Para el caso particular en el cual se tengan valores de parámetros determinados de manera experimental, estos se deben de mantener fijos en el proceso de calibración, permitiendo así, que aquellos parámetros restantes puedan seguir una metodología de ajuste que permita obtener los resultados deseados en la calibración.

Esta metodología consiste en establecer un orden de modificación de los parámetros que se desean calibrar, para ello se presenta a continuación, el listado de parámetros en orden creciente, de los cuales se explicara a detalle la relación que guardan entre si y el efecto que producen en el Hidrograma calculado:

1. Parámetros de ajuste de volumen de agua.
2. Parámetros de ajuste de la Humedad del suelo
3. Parámetros de ajuste de la forma del Hidrograma.

1. **Parámetros de ajuste de volumen de agua.** Para iniciar el proceso de calibración es recomendable partir del ajuste de los parámetros que modifican el volumen de agua en la modelación versus los volúmenes de agua reales, este volumen es afectado principalmente por las variaciones de los parámetros: P_{corr} , P_{calt} y r_{fcf} los cuales se explicaran a continuación. La manera de verificar este ajuste es a través de la curva de diferencia acumulada de agua, la cual es calculada por el modelo cada vez que se corre.

- **P_{corr} :** Factor de corrección de precipitación, el valor de la precipitación media es multiplicado por este factor para incrementarlo o disminuirlo según sea el caso. Normalmente este parámetro no debe ser calibrado sin embargo su valor deberá estar cercano al 1.0, deberá modificarse cuando las series utilizadas no son homogéneas, su rango varía entre (0.5 – 1.5).
- **P_{calt} :** Factor de corrección de Elevación para la precipitación. Los valores de precipitación serán multiplicados por $(1 + h * p_{calt})$, donde h es la diferencia de altitud (cientos de metros) entre la elevación de la zona actual y la elevación de la estación de la precipitación (o la media ponderada de varias Estaciones). Este factor por defecto es 0.1 pero puede ser ajustado para llegar a un mejor ajuste del volumen de agua.
- **r_{fcf} :** Factor de corrección de caída de lluvia. Los valores de lluvia caída se multiplicarán por este factor. Por defecto este valor es 1.0, pero cuando no se tiene series homogéneas se puede ajustar en un rango de 0.9 a 1.3.

2. **Parámetros de ajuste de la Humedad del Suelo:** los parámetros que ajustan la humedad el suelo son F_c , β , L_p y c_{flux} , estos parámetros son reflejados en la curva de humedad del suelo S_m , además deben de calibrarse en periodos principalmente observando las descargas de verano y otoño, ya que estos parámetros afectan también el volumen total, así por ejemplo cuando F_c es demasiado alto, se puede ver como los niveles de humedad del suelo aumentan durante el flujo base de primavera, esto es visto mediante pequeñas jorobas en la curva de S_m . A continuación se explican los parámetros que afectan la Humedad del suelo.

- **F_c :** Capacidad de campo, se define como la cantidad máxima de agua que almacena un suelo ante la fuerza de gravedad cuyo rango de variación se encuentra entre los 100 a los 1500 mm; la rutina de humedad del suelo se considera como una caja con capacidad F_c que debe ser llenado antes de que existan escurrimientos.

Mediante la Figura No. 2.14 puede observarse que, una disminución F_c supone un aumento considerable en el volumen de agua reflejada en la curva de diferencia acumulada de lluvia. Los efectos de F_c se observan más claramente en los primeros meses del periodo de lluvia debido a que el suelo posee niveles bajos de humedad y fácilmente puede absorber la lluvia recibida, sin embargo a medida que avanza el invierno la humedad del suelo alcanza su máximo nivel y el suelo está saturado y no admitir más almacenamiento provocando que toda la lluvia recibida sea transformada en escurrimiento. Si el suelo posee valores pequeños de F_c aun con las primeras lluvias se producirán escurrimientos, pero si los valores son mayores, indica que la lluvia necesaria para que se produzcan escurrimientos deberá ser mayor.

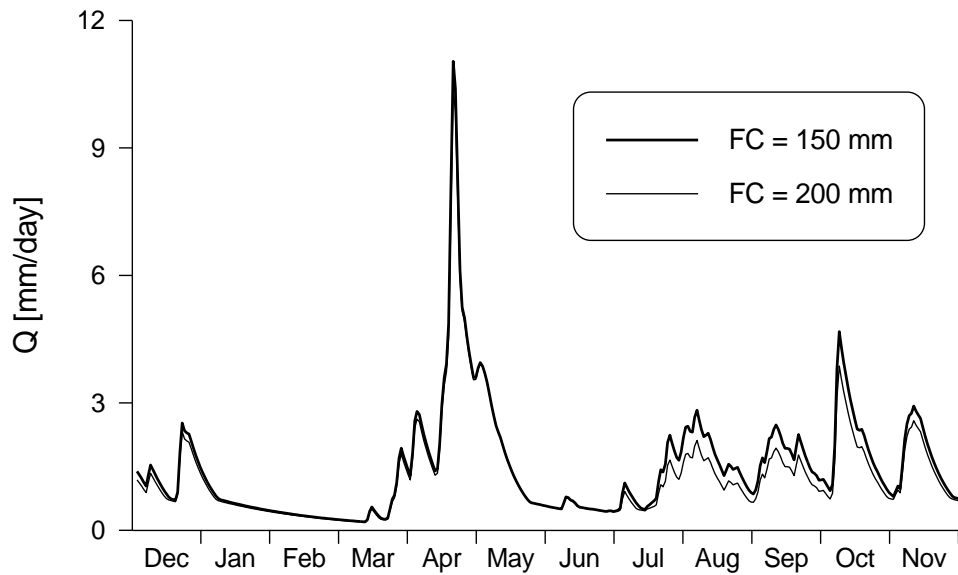


Figura No. 2.14: Efecto de Fc en el volumen de escurrimiento.

Fuente: Lectures on hydrological modelling 6: The HBV model, Chongyu Xu and Jan Seibert, Oslo University

- Beta (β): Parámetro adimensional que varía en un rango de (1-4); es el exponente que controla la contribución a la función de respuesta y el aumento del almacenamiento de la humedad del suelo. Como puede observarse en la Figura No. 2.15 valores mayores de β generan disminuciones en el caudal escurrido y por ende en el volumen de agua registrado.

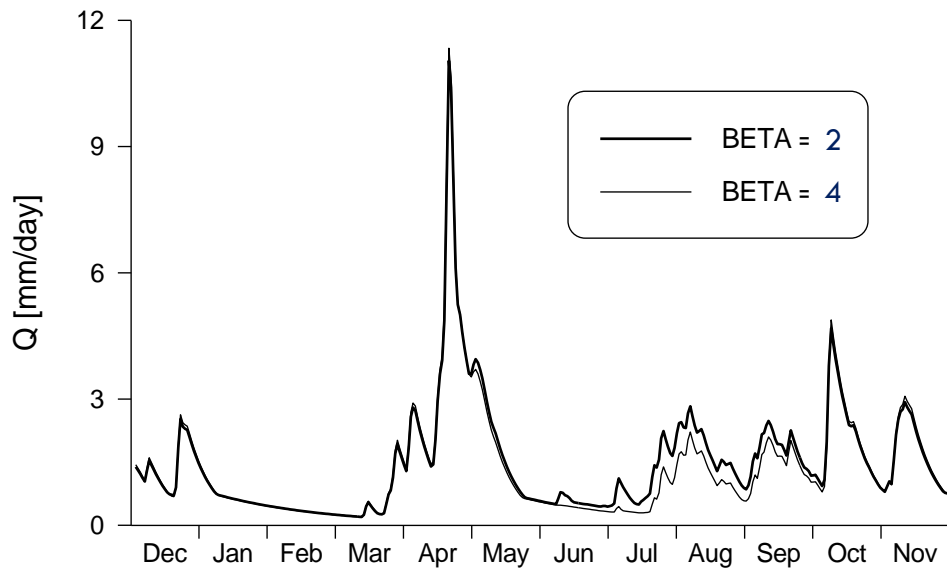


Figura No. 2.15: Efecto de β en el volumen de escurrimiento.

Fuente: Lectures on hydrological modelling 6: The HBV model, Chongyu Xu and Jan Seibert, Oslo University

- L_p : Límite para la Evapotranspiración potencial, es el valor de humedad del suelo por encima del cual la evapotranspiración alcanza su valor potencial expresada en mm y posee un rango de variación de 0 a 1.0.

Una disminución de L_p representa una disminución del volumen de lluvia acumulada, esto debido a que el proceso de evaporación es más rápido y por lo tanto genera un menor escurrimiento calculado. Generalmente esta disminución de L_p se manifiesta como pequeñas disminuciones en picos y recesión del Hidrograma a lo largo de todo el año.
- $cflux$: también es un parámetro que ajusta la humedad del suelo y describe el flujo capilar desde la caja de respuesta superior en la zona de saturación. El valor por defecto es de 0.5 y tiene un rango de 0 a 2.

3. **Parámetros de ajuste de la forma del Hidrograma:** Una vez que los volúmenes están ajustados se procede a la siguiente etapa de la calibración, la cual consiste en la modificación de los parámetros que influyen en la forma del Hidrograma. Entre estos se encuentran los Coeficientes de Recesión (K_0, K_1, K_2, K_3), los límites de drenajes de salida inferior (uzl_0, uzl_1, uzl_2), el Coeficiente de recesión del flujo base (K_4), la Percolación ($Perc$) y finalmente la rapidez de respuesta de la cuenca

(Maxbas). A continuación se explicara el significado y la influencia de dichos parámetros en la forma del Hidrograma.

- **Coefficientes de Recesión (K0, K1, K2, K3):** Tal como se mencionó en la sección 2.8.4.3 de este documento, los Coeficientes de recesión controlan ciertos sectores de la curva del Hidrograma, el coeficiente K0 controla la zona de los picos, es decir las pendientes altas, K1 y K2 Modifican la parte media de la curva y finalmente K3 modifica las zonas bajas del Hidrograma (ver Figura No. 2.16).

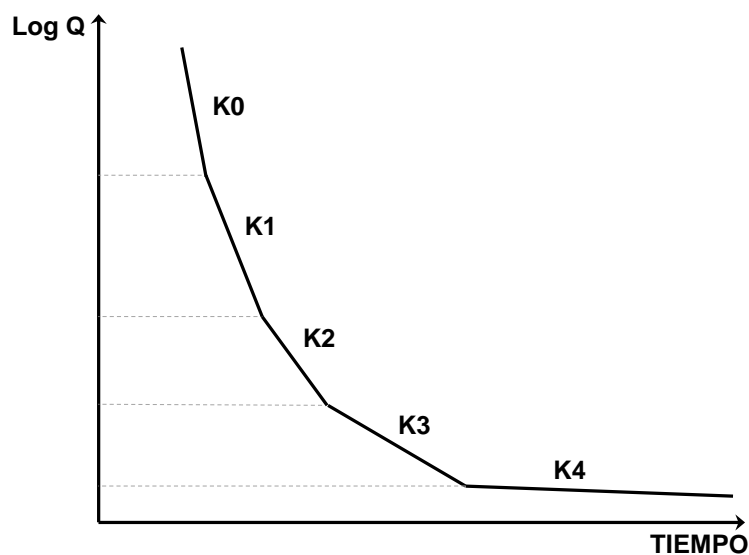


Figura No. 2.16: Efectos de coeficientes de Recesión en el Hidrograma Calculado.

Francisco Ibarra y Julio Quiñones (1996). *Aplicación del Modelo HBV (Sistema MIKE 11) para la calibración de cuencas hidrográficas en El Salvador*, pág. 59. Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, San Salvador.

Estos coeficientes varían en un rango de 0 a 1.0 y se debe de cumplir que $K0 \geq K1 \geq K2 \geq K3$.

- **Límites de drenajes de salida inferior (UZL0, UZL1, UZL2):** Estos límites están representados por los tres parámetros UZL0, UZL1 y el UZL2.

El límite UZL0 representa la variación en el drenaje más rápido del modelo en el depósito superior, un incremento de UZL0 representa una mayor retención de agua en el depósito, de manera que se aumenta el tiempo de

funcionamiento del drenaje más rápido del modelo ocasionando una compresión en las curvas del Hidrograma generando un baja en los picos (Ver Figura No. 2.17).

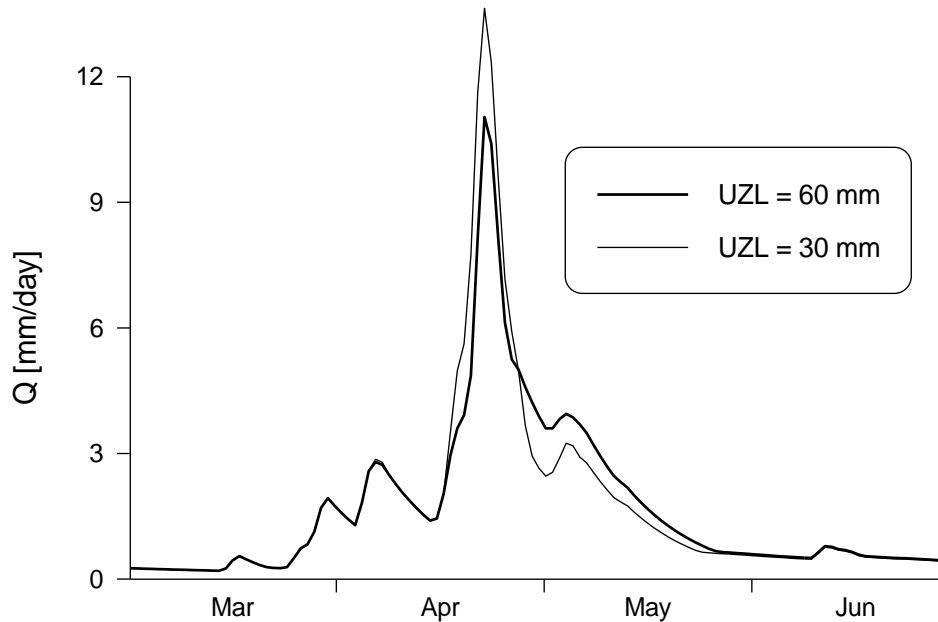


Figura No. 2.17: Efectos de los parámetros UZL en el Hidrograma Calculado.

Fuente: Lectures on hydrological modelling 6: The HBV model, Chongyu Xu and Jan Seibert, Oslo University

El limite UZL1 produce un efecto similar al UZL0, de manera más suave debido a que representa el drenaje con velocidades intermedias en el depósito superior de la rutina de respuesta.

Por otra parte el efecto de UZL2 se refiere al drenaje lento en el depósito superior y que opera en sentido inverso al UZL0, ya que incrementar el valor de UZL2 produce un aumento en el pico y una disminución en la parte baja del Hidrograma.

- **Coefficiente de recesión del flujo base (K4):** Es el encargado de controlar el escurrimiento en la zona baja de la Rutina de Respuesta (Deposito Inferior) a la escorrentía total, de manera que cuanto mayor sea su valor tendrá mayor rapidez el fluido (mayor pendiente). (ver figura No. 2.18).

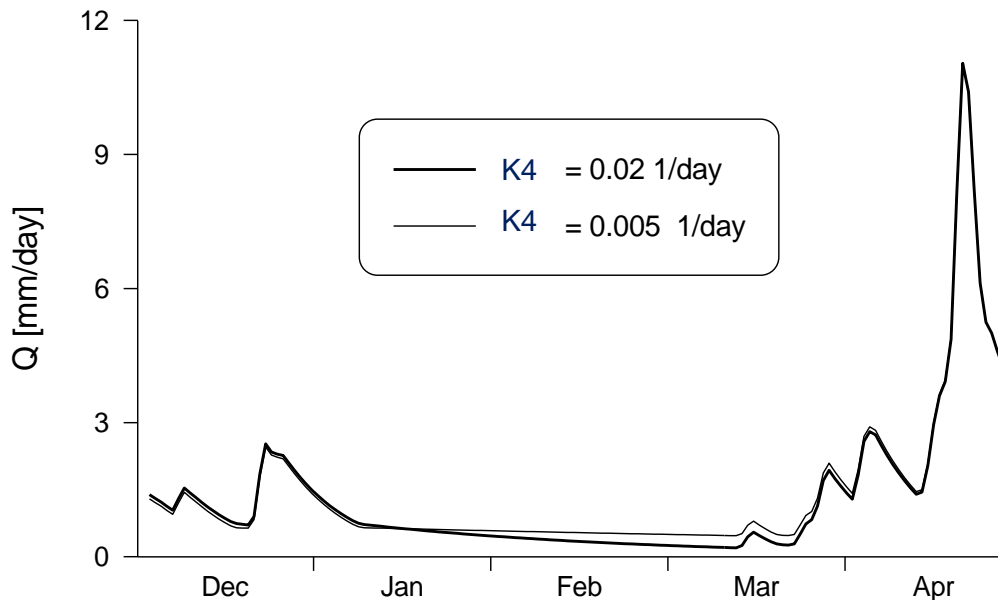


Figura No. 2.18: Efecto de K4 en el Hidrograma Calculado.

Fuente: Lectures on hydrological modelling 6: The HBV model, Chongyu Xu and Jan Seibert, Oslo University

Este coeficiente posee una gran incidencia en la formación del flujo base, un aumento de su valor incrementa la pendiente de la zona baja del Hidrograma y a su vez provoca incremento sustancial del volumen de agua tal como se muestra en la Figura No. 2.18, este incremento es provocado por la acción directa de la lluvia y por el aporte del flujo subterráneo en épocas secas y lluviosas.

- Percolación (Perc):** Percolación es el parámetro que permite el almacenamiento de agua en el depósito inferior. Valores altos de este parámetro indican que una gran cantidad de agua se retiene en el segundo depósito de la rutina de respuesta y a su vez indica que existe poca retención en el depósito superior; una caída brusca de los caudales calculados en época lluviosa son efectos provocados por estos valores altos en el Hidrograma según se puede observar en la Figura No. 2.19 que se presenta a continuación.

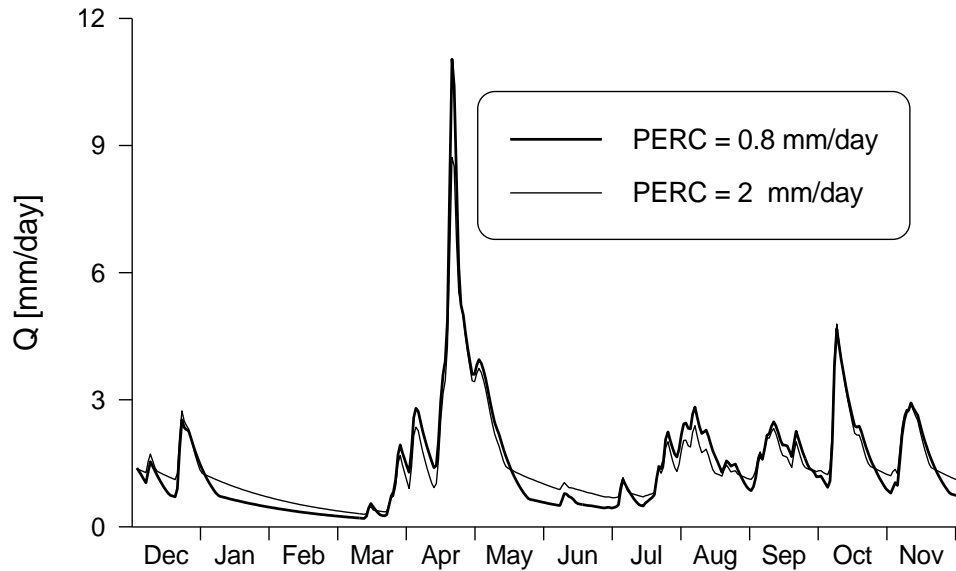


Figura No. 2.19: Efectos de la Percolación en el Hidrograma Calculado.

Fuente: Lectures on hydrological modelling 6: The HBV model, Chongyu Xu and Jan Seibert, Oslo University

Como parte de los efectos de este parámetro, se puede observar que los valores altos de Perc representan una fuerte alimentación al depósito inferior, lo cual posibilita escurrir la mayor cantidad de agua y ser regulado por K_4 , y esto a la vez produce un aumento notorio del caudal base que se prolonga durante el periodo seco.

- **Maxbas:** Este parámetro no incide en la variación del volumen de agua, ya que su incidencia radica en la modificación de la frecuencia del Hidrograma para adaptarlo al tiempo de respuesta de la cuenca. En las cuencas, el tiempo de respuesta es aquel tiempo que tarda el escurrimiento en ser registrado por una estación hidrométrica desde su punto de partida en el interior de la cuenca hasta el sitio donde se ubica la estación. Gráficamente los efectos en la variación de maxbas se pueden observar en la figura No. 2.20.

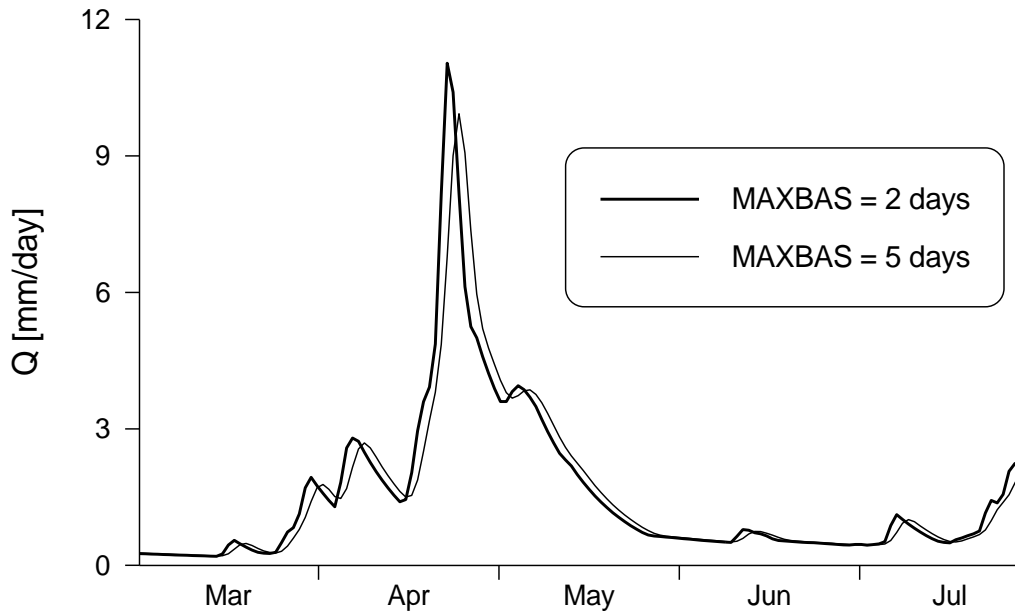


Figura No. 2.20: Efecto de Parámetro maxbas en el Hidrograma Calculado.

Fuente: Lectures on hydrological modelling 6: The HBV model, Chongyu Xu and Jan Seibert, Oslo University

En resumen este parámetro es la herramienta que se utiliza para ajustar el Hidrograma calculado con el Hidrograma registrado por las estaciones. En versiones recientes del Modelo HBV se utiliza el parámetro maxbaz, el cual realiza la misma función de maxbas usado en versiones más antiguas.

f) APLICACIÓN DEL METODO MONTECARLO EN LA CALIBRACION DEL MODELO HBV: En el proceso de ajuste de parámetros a calibrar, resulta conveniente utilizar una técnica adecuada y ordenada de ajuste, para ello es necesario el empleo del Método de Monte Carlo, el cual fue propuesto como parte de esta investigación (Ver Sección 2.7 Método de Monte Carlo), esta Metodología propone la variación de un único parámetro en la modelación manteniendo fijos los restantes, con la finalidad de que sea ajustado adecuadamente.

Tomando en cuenta que el proceso de calibración debe ser en una subcuenca a la vez, y que deben ser calibrados los parámetros de acuerdo al literal anterior, iniciando con los parámetros que modifican el volumen de agua y luego los parámetros de forma del Hidrograma, este Método de Monte Carlo debe aplicarse respetando lo antes dicho, de manera que debe calibrarse una subcuenca para iniciar la siguiente y así obtener resultados satisfactorios.

2.8.5.2 PROCESO DE EVALUACION DE RESULTADOS

El proceso de evaluación de resultados consiste en la revisión de tres aspectos importantes que indican que la calibración es adecuada, el primer aspecto es la Inspección Visual de los hidrogramas calculados y observados (reales), el segundo aspecto es el cálculo y grafica de la Diferencia acumulada entre los hidrogramas, y por último se debe verificar el cálculo de la Varianza (R^2); estos tres aspectos o criterios se desarrollaran de manera más amplia a continuación.

- a. **INSPECCIÓN VISUAL:** la inspección visual es un aspecto muy importante debido a que debe observarse que la tendencia entre el Hidrograma observado y el Hidrograma calculado por el modelo sea la misma, o que en su defecto sea lo más ajustado posible. Esto se ilustra en la Figura No. 2.21 presentada a continuación.

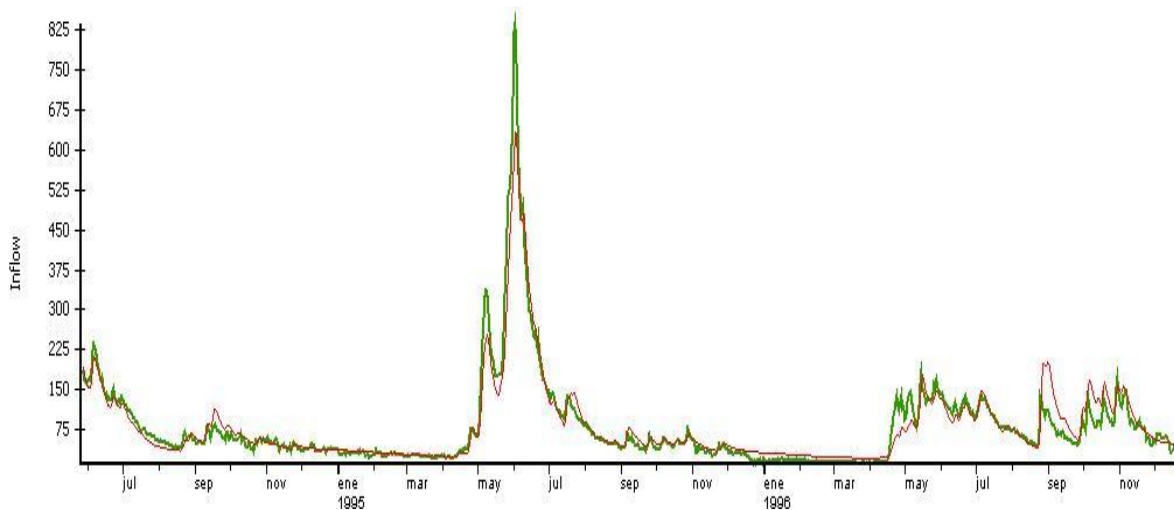


Figura No. 2.21: Ajuste de Hidrograma Calculado y Observado.

Fuente: Integrated Hydrological Modelling System SMHI/HBV Manual Version 5.10

Como se puede observar en la Figura No. 2.21, existe un ajuste adecuado entre ambas curvas producto de una calibración adecuada, siendo así que el Hidrograma calculado (color rojo) y observado (color verde) se comportan de manera similar.

- b. **CÁLCULO Y GRAFICA DE LA DIFERENCIA ACUMULADA (Accdiff):** Obtener un gráfico con un buen ajuste es importante, sin embargo aparte de la inspección visual

debe realizarse dentro de la evaluación de resultados, el cálculo y gráfico de la diferencia acumulada entre los hidrogramas calculado y observado.

Para realizar este cálculo se hará uso de la ecuación No. 2.9:

$$Diferencia\ Acumulada = \sum_{i=1}^n (Q_c - Q_R) * C * t$$

Ecuación No. 2.9: Ecuación del cálculo de la Diferencia Acumulada.

Dónde:

- Q_c: Caudal Simulado (m³/s)
- Q_R: Caudal Observado (m³/s)
- n: Número total de días
- C: constante de transformación de m³/s a mm sobre toda la cuenca.
- t: Tiempo

Este proceso de cálculo resulta demasiado complejo si se hace manualmente, debido a la cantidad de datos que se deben usar al aplicar Ecuación No. 2.9, es por ello que este cálculo es realizado por el modelo cada vez que este se corre, y luego es graficado automáticamente y presentado sobre la gráfica de los hidrogramas.

La importancia de este cálculo y la generación de la gráfica de diferencia acumulada, radica en la obtención de valores cercanos a cero, lo que significa que los volúmenes reales comparados con los calculados son similares en todo el periodo de calibración.

- c. **EL CÁLCULO DE LA VARIANZA (R²):** Otro aspecto muy importante en el proceso de verificación de resultados, es el cálculo de la varianza, la cual es calculada por el Modelo HBV a través de la ecuación 2.10.

$$R^2 = \frac{\sum (QR - QR_{mean})^2 - \sum (QC - QR)^2}{\sum (QR - QR_{mean})^2}$$

Ecuación No. 2.10: Ecuación de cálculo de la varianza.

Dónde:

Q_c = Caudal Simulado (m^3/s)

Q_R = Caudal Observado (m^3/s)

Q_{Rmean} = Caudal Promedio real (m^3/s)

Un modelo perfecto produciría un R^2 igual a 1. Sin embargo, normalmente el R^2 termina en algún punto entre 0,8 y 0,95. Naturalmente, esto es sólo el caso cuando hay buenos datos de entrada de calidad. Este criterio de eficacia fue presentado por Nash y Sutcliffe (1970) y se utiliza en el modelado hidrológico. A veces se confunde con el grado de determinación, r^2 , que es el cuadrado del coeficiente de correlación.¹¹

2.8.6 PRONOSTICO HIDROLOGICO CON EL MODELO HBV

El Modelo HBV posee dentro de sus herramientas, la generación de pronóstico de crecidas, lo cual resulta muy útil en diferentes situaciones de aplicación; este pronóstico puede ser calculado a corto y largo plazo. Para ello se hace necesario que el modelo este calibrado hasta los últimos días antes de realizar el pronóstico.

El pronóstico a Corto plazo (*Short Forecast*) es aquel que se hace para unos pocos días, se puede realizar mediante el establecimiento de un pronóstico de precipitaciones y temperaturas, las cuales deben ingresarse al modelo en la pestaña Computation, esto permitirá que el modelo simule la ocurrencia de estas precipitaciones y pronostique el escurrimiento que se puede registrar en la red hidrométrica de la cuenca para tal periodo de análisis.

Además del pronóstico a corto plazo, el modelo permite la generación de un pronóstico a largo plazo (*Long Forecast*); a diferencia del pronóstico a corto plazo, para la generación de este se usan las series históricas de precipitación (y temperatura cuando aplique) que se ingresaron al modelo para su calibración; es importante que se tenga un buen registro y

¹¹ SMHI (2006). *INTEGRATED HYDROLOGICAL MODELLING SYSTEM Manual v 5.1*, Pág. 76. Suecia. SMHI

una cantidad adecuada de datos para la obtención de un buen pronóstico, se recomienda que el registro sea de 10 a 20 años para que el resultado sea bueno. Como salida en este tipo de pronóstico es una tabla de resumen que contiene los datos de caudal Mínimo, Máximo y Promedio, además de estos valores se obtienen las probabilidades de 25%, 50% y 75% de ser igualados o excedidos correspondientes a dicho periodo de análisis.

2.9 DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE PARÁMETROS FÍSICOS DEL SUELO DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA

Las propiedades físicas de un suelo de una cuenca hidrográfica, junto con las propiedades químicas, biológicas y mineralógicas, determinan, entre otras, la productividad del suelo, prácticas de cultivo, fertilización, riego y drenaje, y esto es muy importante para la Ingeniería Agronómica; pero desde el punto de vista Hidrogeológico, estas propiedades físicas de una cuenca hidrográfica están relacionadas con algunas variables del Ciclo Hidrológico del agua en el suelo, entre ellas está la infiltración, la percolación, la escorrentía superficial y la escorrentía subterránea. A continuación se presenta el significado, y el proceso de determinación de algunos de los parámetros físicos del suelo, como lo son la Infiltración del agua, la Textura, la Conductividad Hidráulica y la Capacidad de Campo.

2.9.1 INFILTRACIÓN

La Infiltración del agua en el suelo tiene un rol muy importante en el proceso de generación de escorrentía, como una respuesta a una precipitación que se recibe en una cuenca hidrográfica, esto dependerá de la magnitud e intensidad de la lluvia, que pueden causar caudales diferentes. También la infiltración forma parte del estudio de la recarga de acuíferos. La Infiltración depende de muchos factores, por lo que obtener una estimación precisa y confiable es muy difícil así como obtener una relación de cada uno de los parámetros que la condicionan.

El término infiltración se refiere a la entrada del agua hacia al interior del suelo, siendo la única fuente de humedad para mantener el crecimiento de la vegetación y el suministro de agua subterránea a los pozos y arroyos, teniendo generalmente una dirección vertical.¹²

2.9.1.1 SUSTENTACIÓN TEÓRICA

Según el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) 1994, se entiende por capacidad de infiltración, velocidad de infiltración o tasa de infiltración, al volumen de agua que pasa por el suelo por unidad de área en unidad de tiempo:

$$I = \frac{V}{AT}$$

Ecuación No. 2.11: Ecuación general de la Infiltración

Dónde:

I: Capacidad de Infiltración

V: Velocidad de infiltración

AT: Unidad de Área por Unidad de Tiempo

Y tiene las dimensiones de (L/T) , o desde el punto de vista del riego, como una lámina por unidad de tiempo.

$$I = \frac{D}{T}$$

Ecuación No. 2.12: Ecuación de la tasa de Infiltración

Dónde:

I: Capacidad de Infiltración

D: Lamina de infiltración

T: Unidad de Tiempo

¹² Ing. Agrónomo José Mauricio Tejada Master en Ingeniería en Regadíos (Junio de 2004). *Infiltración del agua en el suelo*. El Salvador: Universidad de El Salvador Facultad de Ciencias Agronómicas departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente.

En 1932 Kostiacov, fue el primero en proponer el uso de una ecuación empírica que hasta hoy es de amplio uso para analizar los resultados experimentales que se obtienen de las pruebas de campo, la ecuación es la siguiente:

$$I = K * T^n$$

Ecuación No. 2.13: Ecuación empírica de Infiltración

Dónde:

I: Velocidad de infiltración (L/T)

T: Tiempo (min.)

K: Constante que representa la velocidad de Infiltración para T=1

n: pendiente de la curva de velocidad de infiltración con respecto al tiempo.

La infiltración acumulada o lámina acumulada se obtiene integrando la ecuación de infiltración respecto al tiempo:

$$D = \int_0^t I dT$$

Ecuación No. 2.14: Ecuación de Infiltración acumulada

Integrando se obtiene:

$$D = C * T^m$$

Ecuación No. 2.15: Integración de ecuación de infiltración acumulada

Dónde:

D: Lamina acumulada (cm.)

C: Lamina en el perfil cuando T = 1

m: pendiente de la curva de Lámina vrs tiempo.

La USDA, presenta una clasificación de suelos en familias de infiltración, proporcionando los parámetros de la ecuación de lámina acumulada y una estimación de valores de lámina acumulada y velocidad de infiltración según el tiempo, Ver Tabla No. 2.5.

FAMILIA INFILTRACIÓN		COEFICIENTES ***				TEXTURA DEL SUELO ESPERADA
		USDA		Calculados		
pulg/h	(mm/h)	a = C	b = m	K	n	
0.05	1.27	0.5334	0.618	19.78	-0.38	ARCILLOSA (C)
0.10	2.57	0.6198	0.661	24.58	-0.34	
0.15	3.81	0.7110	0.683	29.14	-0.32	
0.20	5.08	0.7772	0.699	32.60	-0.30	ARCILLO ARENOSA (CA)
0.25	6.35	0.8534	0.711	36.41	-0.29	
0.30	7.62	0.9246	0.720	39.94	-0.28	
0.35	8.89	0.9957	0.729	43.55	-0.27	FRANCO ARCILLOSA (FC)
0.40	10.16	1.0640	0.736	46.99	-0.26	
0.45	11.43	1.1300	0.742	50.31	-0.26	
0.50	12.70	1.1960	0.748	53.68	-0.25	FRANCO (F)
0.60	15.24	1.3210	0.757	60.00	-0.24	
0.70	17.78	1.4430	0.766	66.32	-0.23	
0.80	20.32	1.5600	0.773	72.35	-0.23	
0.90	22.86	1.6740	0.779	78.24	-0.22	
1.00	25.40	1.7860	0.785	84.12	-0.22	FRANCO ARENOSO (FA)
1.50	38.10	2.2840	0.799	109.49	-0.20	
2.00	50.80	2.7530	0.808	133.47	-0.19	ARENOSO (A)

Tabla No. 2.5: Familias de Infiltración USDA 1979

Fuente: Ing. Agrónomo José Mauricio Tejada Master en Ingeniería en Regadíos (Junio de 2004). *Infiltración del gua en el suelo*. El Salvador: Universidad de El Salvador Facultad de Ciencias Agronómicas Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente.

La selección de familia depende además del suelo, del método de riego. Esta selección se puede hacer por medio de pruebas de campo. Los valores de infiltración acumulada medidos se comparan con los de la familia de infiltración propuestos por la USDA, escogiendo aquellos que se ajusten más a los valores medidos.

Para la medición de la velocidad de infiltración se utilizan muchos métodos, entre ellos se pueden mencionar: los surcos infiltrómetros, el método por aspersion y el método predilecto el del anillo o cilindro infiltrómetro. Todos estos métodos se basan en la inundación y estancamiento de agua en la superficie y medidas de entrada y salida de agua por surcos o zanjas.

El tiempo aproximado que la prueba requiere es de por lo menos entre 1 a 4 horas y depende de los propósitos y de clase de información que se quiere obtener, es importante mencionar que el tiempo que dura la prueba, debe ser el necesario para que se pueda llegar a una velocidad constante de infiltración que se denomina INFILTRACIÓN BÁSICA,

que también es conocida como Capacidad de infiltración final o como infiltración estable de equilibrio.

La tasa de infiltración es diferente según el tipo de suelo y las condiciones del lugar, más sin embargo se presentan valores aproximados que pueden servir de referencia general, como las familias de infiltración dadas por USDA (CEDEX, 2002), que se presentan en la Tabla No. 2.6

Textura	Infiltración Básica (cm./h)
Franco arenoso	2 a 3
Arenosos Franco	1 a 2
Franco limosos y Arcillosos	0.5 a 1
Limo arcillosos y Arcillosos pesados	0.2 a 0.5

Tabla No. 2.6: Valores de Infiltración Básica según textura.

Fuente: Ing. Agrónomo José Mauricio Tejada Master en Ingeniería en Regadíos (Junio de 2004). *Infiltración del gua en el suelo*. El Salvador: Universidad de El Salvador Facultad de Ciencias Agronómicas departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente.

2.9.1.2 EQUIPO A UTILIZAR

El equipo que se utiliza para determinar la Infiltración aplicando el método de los anillos consta de:

- Cilindros Infiltrómetros: un cilindro interno y uno externo donde, el cilindro interno tiene 35 cm de largo y un diámetro de 30 cm, y el cilindro externo tiene 35 cm de largo y un diámetro de 40 cm, ambos cilindros son concéntricos y están hechos de acero (Ver Figura No. 2.22).
- Tapadera de Acero: debido a que los cilindros son instalados a presión en el suelo, se necesita de una tapadera acerada la cual se sujeta con tuercas a los cilindros externos e interno.
- Mazo forrado con hule: el cual sirve para golpear la tapadera de acero y de esa manera hincar en el suelo ambos cilindros.
- Lámina de Plástico: se necesita también una lámina de plástico la cual sirve para evitar la infiltración en cilindro interno antes de que inicie la prueba de campo.

- Flotador: otra parte fundamental del equipo de los cilindros Infiltrómetros, es el flotador, el cual lleva en su interior una regla graduada en centímetros y milímetros donde se mide la lámina de agua que se está infiltrando en función del tiempo.
- Cronometro: se utiliza un cronómetro para registrar el tiempo de duración de la prueba de infiltración.



Figura No. 2.22: Cilindros Infiltrómetros.

Fuente: Propia

2.9.1.3 METODOLOGÍA DE LA PRUEBA

- Primero se debe seleccionar el sitio para la instalación del equipo, este sitio debe ser un lugar libre de fisuras, piedras, materia orgánica, y que sea representativo del tipo de suelo que se desea estudiar.
- Se procede a marcar el cilindro para introducirlo y para que las medidas siguientes siempre se hagan en el mismo lugar.
- Luego se instalan ambos cilindros, introduciéndose 10 cm por debajo del suelo el cual debe estar nivelado, esto se hace con la ayuda de una tapadera acerada la cual se sujeta con tuercas a los cilindros externos e interno y se golpea con el mazo.
- Colocar la lámina de plástico dentro del cilindro interior para protección contra el golpe de agua.

- Una vez instalados los cilindros se debe llenar el cilindro exterior con agua hasta una altura de 25 cm mantener a la misma altura durante todo el tiempo de observación.
- Luego llenar el cilindro interior con agua hasta una altura de 25 cm mantener a la misma altura durante todo el tiempo de observación
- Quitar el plástico del cilindro interior.
- Hacer la medida inicial rápidamente después de echar agua al cilindro interno.
- Registrar la medida y el tiempo correspondiente.
- Hacer las medidas siguientes a intervalos periódicos que pueden ser de 1, 2, 5 a 10 minutos al comenzar la prueba y luego de la primera hora se puede alargar estos intervalos cada 30 a 60 minutos y registrar los datos, estos intervalos se encuentra en la hoja de campo.
- Se mantiene el nivel de agua de 7 – 12 cm. durante la prueba entera. Cuando se agrega agua se asegura que el nivel se registre antes y después de llenar. Por diferencias en niveles se puede calcular el total de agua infiltrada a cualquier tiempo.

2.9.2 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

La conductividad hidráulica al igual que la infiltración tiene mucha utilidad en el campo de la ingeniería, en ese sentido la conductividad se aplica para calcular sistemas de riego, determinar aportes al agua subterránea, regular infiltraciones en canales, lagunas artificiales y reservorios, también sirve para medir la percolación en rellenos sanitarios, probar la efectividad de capas impermeables en obras de retención de líquidos, entre otras aplicaciones.

2.9.2.1 DEFINICIÓN

La Conductividad Hidráulica o permeabilidad es una medida de la capacidad del suelo para conducir el flujo de agua a través de sus poros en condiciones de saturación.

Matemáticamente, se define como el factor de proporcionalidad de la ley de Darcy aplicada al flujo del agua cuando el gradiente hidráulico es la unidad¹³.

Para conocer la clase de drenaje interno, para planificar tipo y cantidad de riego, así como el cálculo de drenajes es importante la determinación de Kfs (*Conductividad Hidráulica*). Esta determinación en campo puede llevarse a cabo utilizando un permeámetro bajo la superficie del suelo, en la zona no saturada.

2.9.2.2 LEY DE DARCY

El estudio más importante y que es el punto de partida para estudiar la Conductividad Hidráulica, fue realizado por el Ing. Henry Darcy en 1856, el cual consistió en realizar un estudio a la Red de Abastecimiento de la ciudad de Aguijón, Francia; el Ing. Darcy además tenía que diseñar filtros de arena para purificar el agua, así, se interesó por los factores que influían en el flujo de agua a través de los materiales arenosos, y presentó el resultado de sus trabajos como un apéndice a su informe de la red de distribución. Ese pequeño apéndice es la base de todos los estudios físicos y matemáticos que se conocen hoy en día sobre el flujo del agua subterránea.

Para realizar este estudio el Ing. Darcy utilizó un permeámetro de Carga Constante, parecidos a los que se utilizan hoy en día; básicamente un permeámetro es un recipiente de sección constante por el que se hace circular agua conectando a uno de sus extremos con un depósito elevado de nivel constante. En el otro extremo se regula el caudal de salida mediante un grifo que en cada experimento mantiene el caudal también constante y finalmente se mide la altura de la columna de agua en varios puntos.

El Ing. Darcy ocupó la siguiente ecuación $Q = cte. \times Sección \times \Delta h/\Delta l$ y encontró que el caudal que atravesaba el permeámetro, era linealmente proporcional a la sección y al gradiente hidráulico, además encontró que utilizando otra arena (más gruesa o fina, o mezcla de arena gruesa con fina, etc.) y jugando de nuevo con todas las variables se volvía

¹³ Dra. Lourdes Flores Delgadillo y Tec. Jorge René Alcalá Martínez (n.d.). *Manual de Procedimientos Analíticos: Laboratorio de Física de Suelos*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Departamento de Edafología.

a cumplir la ecuación, además observó que la constante de proporcionalidad lineal era otra y distinta; el Ing. Darcy concluyo, que esa constante era propia y característica de cada arena y la llamo **Permeabilidad K**.

Actualmente la Ley de Darcy se expresa de la siguiente forma:

$$q = -K \left(\frac{dh}{dl} \right)$$

Ecuación No. 2.16: Ley de Darcy

Dónde:

q: es el caudal que circula por m² de sección es decir Q/sección.

K: Conductividad Hidráulica (conocida como "Permeabilidad").

dh/dl: gradiente hidráulico expresado en incrementos infinitesimales (el signo menos se debe a que el caudal es una magnitud vectorial, cuya dirección es hacia los Δh decrecientes; es decir, que Δh o dh es negativo y, por tanto, el caudal será positivo).

2.9.2.3 PERMEÁMETRO DE GUELPH

El permeámetro de Guelph fue desarrollado por la Universidad de Guelph Reynolds. en 1985, consta básicamente de dos tubos, uno que actúa como depósito de agua y otro de menores dimensiones que se pone en contacto con el suelo y lleva acoplado un sistema que permite mantener la carga hidráulica constante (tubo Mariotte).

El método consiste en excavar un agujero cilíndrico de radio y profundidad constante, en el cual se realizan ensayos de infiltración manteniendo la altura del agua constante dentro del agujero, lo que permite obtener Kfs (Conductividad Hidráulica) a partir de la relación entre el caudal infiltrado y el nivel de agua en el agujero. Para mantener el nivel constante, se utiliza el principio de Mariotte, y el equipo más utilizado para esto es el Permeámetro de Guelph.

El permeámetro de Guelph que actualmente se utiliza para determinar la Conductividad Hidráulica, consta de dos reservorios con válvula de conexión, un tubo de Mariotte, una salida inferior, una regleta superior, sellos de vacíos y un trípode o soporte. (Ver figura No. 2.23)



Figura No. 2.23: Permeámetro de Guelph

Fuente: Propia

Cuando se ha determinado el valor de K_{fs} , se puede evaluar este parámetro en base a la Tabla de Evaluación de la FAO de 1963 que se presenta a continuación:

CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA		EVALUACIÓN
cm/hora	m/día	
0.8	0.2	Muy lenta
0.8 – 2.0	0.2 – 0.5	Lenta
2.0 – 6.0	0.5 – 1.4	Moderada
6.0 – 8.0	1.4 – 1.9	Moderadamente rápida
8.0 – 12.5	1.9 – 3.0	Rápida
12.5	3	Muy rápida

Tabla No. 2.7: Evaluación del Kfs según FAO 1963.

Fuente: Programa para el cálculo de la Conductividad Hidráulica "Kfs" Utilizando el Permeámetro de Guelph: Ing. Agrónomo José Mauricio Tejada Master en Ingeniería en Regadíos (Junio de 2012).

2.9.2.4 METODOLOGÍA DE LA PRUEBA

El proceso que se implementa en campo para realizar esta prueba es el siguiente:

- Realizar una evaluación del sitio respecto a la topografía del terreno y apariencia general del suelo para seleccionar las localidades representativas del suelo en estudio.
- Preparar un agujero de aproximadamente 6 cm de diámetro y una profundidad de 30 a 40 cm.
- Remover alguna capa de suelo que impida el flujo natural del agua utilizando un cepillo de sellos. Esto se realiza si el suelo se encuentra en condiciones húmedas.
- Ensamblar el trípode, conectando los brazos trípodes y sujetos a la vez a una cadena para una mayor rigidez del trípode.
- Conectar el tubo de aire inferior al tubo de aire medio en la base del reservorio, usando el tubo de aire de acoplamiento.
- Instalar el tubo principal a través del trípode apoyando el soporte en él, y hacerlo llegar hasta el fondo del pozo.
- Llenar los reservorios, cerciorándose de tener la válvula abierta y el tubo de Mariotte abajo.

- Cerrar los sellos de vacío. Levantar lentamente el tubo de Mariotte hasta el nivel deseado (que sea bajo 10 cm.).
- Cuando la carga en el pozo se haya estabilizado empezar a medir los niveles de los reservorios a través del tiempo.

2.9.3 TEXTURA

Uno de los parámetros físicos del suelo que permite evaluar las condiciones del tamaño de las partículas y su incidencia en el comportamiento hidráulico es la textura del suelo, el cual es un parámetro de gran importancia.

2.9.3.1 DEFINICIÓN

El termino suelo se refiere al material exterior, poco compacto, de la superficie de la tierra, uno de sus principales componentes es la fracción mineral, la cual proviene del material parental y es producto de la desintegración de las rocas provocado por el intemperismo físico, químico y bioquímico. La fracción mineral del suelo está constituida por partículas diferentes tamaños expresadas en porcentajes los cuales representan **la textura del suelo**.

La textura afecta el número y tamaño de los poros y, por lo tanto, el espacio poroso de cada suelo. La humedad, la aireación y consecuentemente la actividad de los microorganismos en el suelo, están en función de la textura¹⁴.

¹⁴ María Valdés y Nora Medina Jaritz (2005). Ecología Microbiana del Suelo: Compendio Practico. Consultado el día Miércoles 05 de Mayo de 2012 de la pagina <http://www.publicaciones.ipn.mx/WPS/WCM/CONNECT/A3217800425C01408C1EBF5A5EBC1AE/13893BCD.PDF?MOD=AJPERES>

2.9.3.2 SUSTENTACIÓN TEÓRICA

La textura es la cantidad relativa expresada en porcentaje de arena, limo y arcilla contenida en una porción de suelo. Este término se refiere a las diferentes proporciones de separados en la fracción mineral del suelo, denominándose de la siguiente manera:

- Arenas (a): Si sus tamaños son de 2.00 a 0.05 mm de diámetro.
- Limos (L): Si sus tamaños son de 0.05 a 0.002 mm de diámetro.
- Arcillas (C): Si sus tamaños son menores de 0.002 mm de diámetro.

De acuerdo con el separado que domine en el suelo, éste recibe un nombre especial; así, por ejemplo si predomina la arena, el suelo se denomina arenoso o liviano; si predomina la arcilla se denomina arcilloso; si predomina el limo se denomina limoso, si hay una mezcla adecuada de los tres separados se le denomina franco o mediano¹⁵. A la porción relativa de arena, limo y arcilla, expresada en porcentaje, se le conoce como **Textura del Suelo**.

Para determinar la Textura de un suelo se implementan varios métodos de laboratorio, entre ellos el Método del Hidrómetro de Bouyoucos el cual es *un método para determinar el contenido de arcilla, limo y arena de un suelo, sin separarlos. La muestra se dispersa en una máquina batidora haciendo uso de un agente dispersante, la suspensión se vierte en un cilindro largo y dentro se coloca un hidrómetro de diseño especial. Éste, por el principio de Arquímedes, tenderá a sumergirse en mayor proporción cuando menor sea la densidad media de la suspensión*¹⁶.

¹⁵ Autor Desconocido (n.d.). *Análisis de Laboratorio: Estudio de Suelo*. Consultado el día Miércoles 02 de Mayo de 2012 de la pagina http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/marquezronald/wp-content/uploads/An_341lisis-Laboratorio.pdf

¹⁶ Autor Desconocido (n.d.). *Método del Hidrómetro de Bouyoucos*. Consultado el día Miércoles 02 de Mayo de 2012 de la pagina http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/marquezronald/wp-content/uploads/An_341lisis-Laboratorio.pdf

2.9.3.3 MÉTODO DEL HIDRÓMETRO DE BOUYOUCOS

El método del Hidrómetro de Bouyoucos, fue calibrado por Bouyoucos en 1962, quien determinó que luego de transcurrido un intervalo de 40 segundos la arena (diámetro mayor a 0.05 mm) se deposita y no interfiere en la determinación de la cantidad de limo más arcilla en suspensión, por diferencia se obtiene la cantidad de arena.

Cuando se deja transcurrir el tiempo (4 minutos) suficiente para que el limo (mayor de 0.002 mm) se sedimente, se puede determinar el porcentaje de arcilla leyendo directamente sobre la escala del hidrómetro y con dicho dato se calcula la cantidad de limo. La arcilla muy fina se determina después de un período de 1 y 2 horas de sedimentación.

En la escala del hidrómetro de Bouyoucos se lee la profundidad mediante la cual se determina la densidad (gr/l) de la suspensión. Luego, a partir de la profundidad y tiempo de sedimentación, se calculan los porcentajes para la determinación de la textura del suelo estudiado. A fin de facilitar los cálculos se han confeccionado nomogramas. (Ver Figura 2.24)

El nomograma utilizado en este método es el Triángulo Textural de Bouyoucos o Triángulo de Texturas del suelo, (Ver Figura No. 2.24). En este monograma se representan los porcentajes de arena, limo y arcilla, que son los parámetros fundamentales de este método para determinar la textura de un suelo.

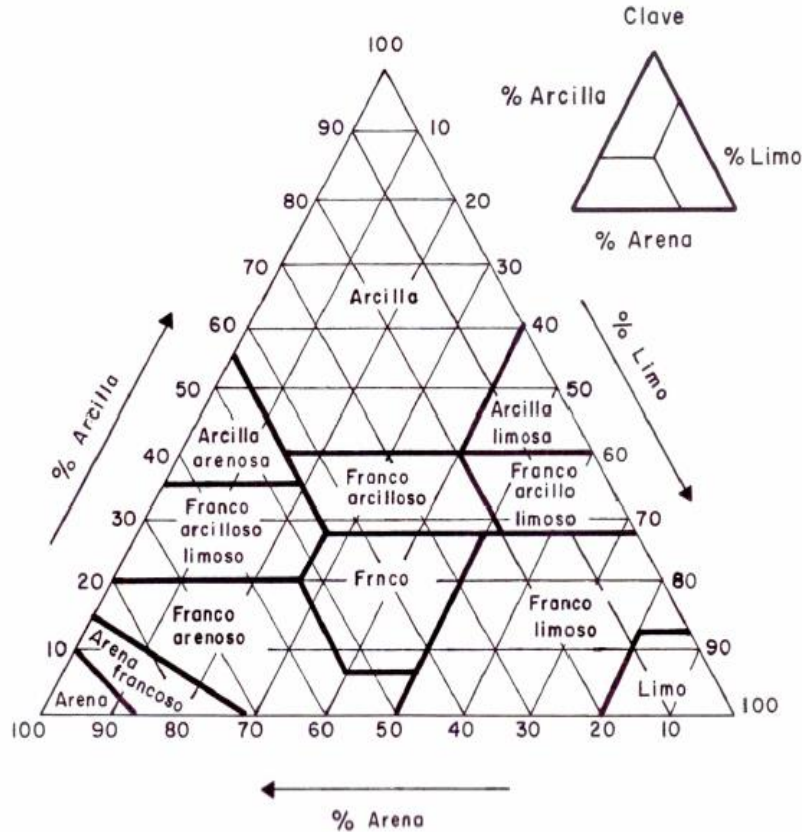


Figura No. 2.24: Triángulo textural de Bouyoucos o Triángulo de Texturas del suelo.

Fuente: Luis E. Rivera Martínez, Megh R. Goyal y Manuel Crespo Ruiz (n.d.). Capítulo dos: Métodos para medir la Humedad en el suelo, página 11.

Conocer la Textura de un suelo es importante desde el punto de vista hidrogeológico ya que conociendo la textura se pueden determinar otros parámetros físicos del suelo como lo es la Capacidad de Campo de un Suelo, El Punto de Marchitez Permanente, entre otros.

2.9.3.4 METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA TEXTURA DE UN SUELO

Básicamente la Metodología para determinar la Textura de un suelo se divide en dos procesos, el primero es la extracción de la Muestra de suelo en campo y el segundo la determinación del tipo de Textura de ese suelo en Laboratorio.

Para realizar la extracción de la Muestra de suelo en campo, se debe de ubicar un sitio o lugar representativo donde se extraerá la muestra, luego se hace un agujero no muy

profundo en el suelo empleando herramientas adecuadas, esto con el propósito que al momento de tomar la muestra, se tome partículas del suelo en condiciones naturales (aproximadamente 5 lb) el cual se deposita en bolsas etiquetadas que posteriormente se transportan al laboratorio.

En el laboratorio, la textura del suelo se determina aplicando el Método del Hidrómetro de Bouyoucos, el cual se realiza de acuerdo al siguiente proceso: Primeramente se agrega a la muestra de 50 gr de suelo el agente dispersante (100 ml de Hexametáfosfato de Sodio al 5% preparado previamente dependiendo de la cantidad de arena encontrada preliminarmente) para separar las partículas de arena, limo y arcilla; y se deja reposar durante 15 minutos. Luego se agita cinco minutos manualmente y se deja reposar 15 minutos. Finalmente se licua por un periodo de 5 min y se deja reposar 15 min nuevamente antes del vertido en la probeta de 1000 ml. Con un agitador se mezcla hasta lograr la homogeneidad en la suspensión, luego se da inicio a las lecturas con el hidrómetro en los periodos de tiempo ya establecidos.

A cada lectura del densímetro de bouyoucos efectuada se debe tomar la temperatura de la suspensión, Luego estos resultados se utilizan en las siguientes expresiones:

Primeramente se calcula el excedente de temperatura asumiendo una temperatura base de 20 °C aplicable a zonas tropicales como El Salvador, así:

$$\textit{Excedente Temp} = \textit{Lectura de Temperatura} - 20\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Ecuación No. 2.17: Calculo de excedente de temperatura

Luego se aplica la siguiente fórmula para el cálculo de la lectura corregida:

$$\textit{Lectura Corr} = (\textit{Excedente Temp} * 0.5) + \textit{Lectura de Hidrometro} - \textit{Lectura de Blanco}$$

Ecuación No. 2.18: Cálculo de lectura corregida

Dónde:

Lectura de Blanco = 6.1 gr/l (valor constante)

Posteriormente se calculan los porcentajes de Arena, Limo y Arcilla aplicando las siguientes ecuaciones:

$$\%(\text{Limo} + \text{Arcilla}) = \text{Lectura Corregida}(40 \text{ seg}) * (100/50)$$

Ecuación No. 2.19: Calculo de porcentaje de Limo + Arcilla

$$\% \text{Arcilla} = \text{Lectura Corregida}(4 \text{ min}) * (100/50)$$

Ecuación No. 2.20: Calculo de porcentaje de Arcilla

$$\% \text{Limo} = \%(\text{Limo} + \text{Arcilla}) - \% \text{Arcilla}$$

Ecuación No. 2.21: Calculo de porcentaje de Limo

$$\text{Arena} = 100 - \%(\text{Limo} + \text{Arcilla})$$

Ecuación No. 2.22: Calculo de porcentaje de Arena

Los resultados de las ecuaciones 2.20 a la 2.22, se introducen en el triángulo textural (Ver Figura No. 2.24) para determinar el tipo de textura del suelo.

2.9.4 CAPACIDAD DE CAMPO

Capacidad de campo, se define como la cantidad máxima de agua que almacena un suelo ante la fuerza de gravedad, dicha capacidad, desde el punto de vista hidrogeológico es el punto de partida para la generación de escorrentía, de allí la importancia de la capacidad de campo para el desarrollo de esta investigación.

2.9.4.1 DEFINICIÓN

En el suelo existen diferentes contenidos de humedad dependiendo de los niveles de saturación por agua. Así por ejemplo, cuando se aplica agua por riego o lluvia el suelo puede llegar a saturarse completamente, cuando esto ocurre se habla de Punto de Máxima Saturación (PMS) la tensión de adsorción tiende a Cero atmósfera, es decir, el suelo se encharca y corre libremente a través de la porosidad total del mismo.

Después del riego (2 o 3 días), el agua libre deja de circular y queda retenida mayormente en los meso y microporos con tensiones de adsorción de 0.333 atmósferas de presión ($1/3$ atm), el contenido de humedad en este momento se denomina **Capacidad de Campo (Fc)**.

Al pasar varias semanas o meses sin aplicar agua (lluvia o riego), el suelo pierde humedad, aumentando la tensión de adsorción hasta valores mayores o iguales a 15 atmósferas, la mayor parte del agua se encuentra retenida en los microporos y difícilmente es disponible para las plantas, haciendo que se marchiten y si no se aplica un riego la misma puede morir, el contenido de humedad en este punto se denomina **Punto de Marchitez Permanente (PMP)**.

2.9.4.2 SUSTENTACIÓN TEÓRICA

El concepto de Capacidad de Campo se introdujo por Israelsen y West, 1922, para designar el contenido en humedad de un suelo sometido a drenaje libre (después de un riego intenso o fuertes lluvias) durante 48 horas.

El agua en el suelo está retenida por distintas fuerzas que determinan su potencial hídrico, expresado en unidades de presión. Este potencial hídrico, en un suelo insaturado, se compone de:

- Potencial matricial (retención por capilaridad)
- Potencial osmótico (retención por los iones en solución)

- Potencial gravitacional (ejercido por la fuerza de la gravedad)¹⁷.

La capacidad de campo se ha relacionado con la retención de humedad a un determinado potencial matricial, a menudo de 0.33 bar (33 kPa) en suelos de textura fina y de 0.1 bar (10 kPa) en suelos de textura gruesa.

El Método para determinar la Capacidad de Campo es a través del *Método de la Olla de Presión*, el cual se basa en medir la relación entre la tensión y el contenido de humedad del suelo, y consiste en aplicar aire a presiones variables en 1/3 atm y 15 atm a muestras de suelo previamente saturadas. La finalidad del método es obtener la reserva posible de agua para las plantas y la lámina de riego, mediante su ecuación.

2.9.4.3 EQUIPO A UTILIZAR

Para determinar la Capacidad de Campo se utilizan dos procesos uno en campo donde se extrae la muestra del suelo y el otro en laboratorio donde la muestra extraída en campo es sometida a través del Método de la Olla de Presión.

Para extraer la muestra en campo se utiliza una herramienta manual y el procedimiento es igual al usado para la textura de suelos abordado en la sección 2.10.3.4 de este capítulo.

El equipo que se utiliza en laboratorio son las Ollas de presión con sus respectivos platos de porcelana para cada presión, estas Ollas son cerradas herméticamente, las cuales reciben presión de aire o un gas inerte (N) desde un compresor. De esta manera, aplicando una presión se simula la condición de succión a la cual se ve sometida el agua en el suelo. Se utilizan platos de presión, los cuales están compuestos por un plato de cerámica poroso, cuya cara inferior está cubierta por un delgado diafragma de neopreno, con una red interna entre el plato y el diafragma que permite el flujo de agua. Además cuenta con un

¹⁷ Dra. Lourdes Flores Delgadillo y Tec. Jorge René Alcalá Martínez (n.d.). *Manual de Procedimientos Analíticos: Laboratorio de Física de Suelos*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Departamento de Edafología.

tubo interno que comunica este conducto con un tubo de flujo externo que conecta la olla con la atmósfera¹⁸. Ver Figura No. 2.25.



Figura No. 2.25: Membrana y Olla de Presión.

Fuente: Propia

También se hace uso de los Anillos de caucho, los cuales sirven para proteger los platos de porcelana en cada presión. Se hará uso de una Estufa, la cual servirá para secar las muestras de suelo a una temperatura de 110 °C. Se utilizará una Balanza de precisión 0.1 g para pesar las muestras de suelo y las diferentes taras metálicas. Se ocupará una Espátula para extraer las porciones de suelo que serán depositadas en las diferentes taras.

Se hará uso de Taras, las cuales servirán para contener una cantidad de suelo que será sometido a las ollas de presión y luego a la estufa, cabe mencionar que estas taras son metálicas para soportar las altas temperaturas a la que estará expuesta en la estufa. Y algo importante que no debe de faltar son los depósitos que contienen el agua destilada para saturar la muestra de suelo a analizar en laboratorio.

¹⁸ Autor Desconocido (n.d). *ANÁLISIS DE LABORATORIO: Estudio de Suelo*. Consultado el día Miércoles 02 de Mayo de 2012 de la pagina http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/marquezronald/wp-content/uploads/An_3411isis-Laboratorio.pdf

2.9.4.4 METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD DE CAMPO DE UN SUELO.

El proceso a seguir para determinar la Capacidad de Campo de un suelo, como ya se mencionó se da en dos etapas, una en campo y la otra en laboratorio; la etapa de campo consta simplemente de la extracción de la muestra de suelo, la cual se obtiene haciendo un agujero no muy profundo en el suelo y luego una porción representativa del suelo se deposita en una bolsa plástica (un aproximado de 5 lb de suelo), el suelo no necesita mantener las propiedades de humedad en el sitio ya que la muestra en laboratorio será sometido a saturación. Luego se procede a la etapa de laboratorio.

El proceso a seguir en laboratorio de una manera muy general en la determinación de la Capacidad de Campo de un suelo es el siguiente:

- Ordenar en sentido de las agujas del reloj, los anillos de caucho en cada plato de porcelana (1/3 atm y 15 atm).
- Agregar simultáneamente en cada plato, unos 25 g de muestra de suelo dentro del anillo de caucho de tal manera que una misma muestra coincida en las dos tensiones de presión.
- Saturar completamente con agua destilada cada plato y dejar reposar durante 24 horas, eliminar el agua de los platos e introducirlos en las respectivas ollas de presión y dejarlo por 24 horas. Para el plato de 1/3 atm el manómetro debe estar graduado a 0.33 bares y para 15 atm a 15 bares.
- Sacar las muestras de las ollas de presión, pasarlas a las taras de aluminio y se pesan en la balanza para obtener el peso húmedo.
- Secar la muestra en la estufa a 110 °C a peso constante.
- Se pesan nuevamente la muestra con la tara en la balanza y se obtiene el peso seco¹⁹.

Luego para determinar la Capacidad de Campo y El Punto de Marchitez Permanente en porcentajes de humedad Gravimétrica (θ_g), se utiliza la siguiente expresión²⁰:

¹⁹ Autor Desconocido (n.d). *ANÁLISIS DE LABORATORIO: Estudio de Suelo*. Consultado el día Miércoles 02 de Mayo de 2012 de la pagina http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/marquezronald/wp-content/uploads/An_341lisis-Laboratorio.pdf

$$\theta_g(\%) = \frac{\text{Masa de Agua}}{\text{Masa de Suelo Seco}} * 100\%$$

Ecuación No. 2.23: Porcentaje de Humedad Gravimétrica del Suelo

Dónde:

θ_g = Porcentaje de Humedad Gravimétrica (Para Fc y PMP)

Masa de agua = Masa Húmedo – Masa Seco

Masa de suelo seco = Masa Seco – Tara

Luego, resulta conveniente que el valor de Fc este expresado en términos de lámina de agua (mm) y no en porcentaje, por lo tanto es necesario convertirlo mediante el proceso siguiente:

- Primero se determinara la densidad aparente (d_a) que se define como el cociente de la Masa Seca entre el volumen total, generalmente expresada en (gr/cm³), así:

$$d_a = \frac{M_s}{V_t}$$

Ecuación No. 2.24: Densidad Aparente

- Posteriormente se calcula la Humedad Volumétrica (θ_v) que por definición es la relación existente entre el volumen de agua (V_a) y el volumen total de suelo (V_t) lo que puede expresarse de la siguiente forma:

$$\theta_v(\%) = \frac{\text{Volumen de Agua}}{\text{Volumen total de suelo}} * 100\%$$

Ecuación No. 2.25: Porcentaje de Humedad Volumétrica

Donde θ_v y θ_g están relacionadas a través de la Ecuación No. 2.26:

²⁰ Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. RELACION AGUA-SUELO-PLANTAS. Consultado 11 de Octubre de 2012 de la Página: http://www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_hidr/Tema14.pdf

$$\theta_v = \theta_g \cdot d_a$$

Ecuación No. 2.26: Relación entre Humedad Gravimétrica y Volumétrica

- Finalmente el contenido de agua puede ser expresado en términos de lámina de agua (mm), es decir un volumen por unidad de superficie, a través de la siguiente ecuación:

$$h = \frac{\theta_v \cdot p}{100}$$

Ecuación No. 2.27: Lámina de agua para Fc y PMP

Dónde:

h = Lámina de agua (mm)

θ_v = Humedad Volumétrica (%)

P = Profundidad del suelo expresada en (mm) generalmente son 1000mm.

1/100 = Factor para convertir el porcentaje en unidad.

Calculo del porcentaje de agua disponible:

$$\text{Agua Disponible} = h_{FC} - h_{PMP}$$

Ecuación No. 2.28: Agua disponible

2.9.4.5 MÉTODO COMPARATIVO DE CAPACIDAD DE CAMPO MEDIANTE TEXTURA

En el caso de que no se cuente con el equipo de laboratorio para determinar la Capacidad de Campo aplicando el Método de las Ollas de Presión, ésta se puede calcular simplemente identificando la textura del suelo manualmente, y en base a ella se puede obtener la Capacidad de Campo (Fc), y el Punto de Marchitez Permanente (PMP) de un suelo, a través de tablas o nomogramas de uso general, donde se toma en cuenta la textura del suelo; una de esas tablas es la que propone el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos USDA, Ver Tabla No 2.8.

Textura	Punto de Marchitez (agua por pie de profundidad)			Capacidad de Campo (agua por pie de profundidad)			Capacidad de Agua Disponible (agua por pie de profundidad)		
	(%)	(pulg)	(mm)	(%)	(pulg)	(mm)	(%)	(pulg)	(mm)
Arena Media	1.7	0.3	7.62	6.8	1.2	30.48	5.1	0.9	22.86
Arena Fina	2.3	0.4	10.16	8.5	1.5	38.1	6.2	1.1	27.94
Franco Arenoso	3.4	0.6	15.24	11.3	2	50.8	7.9	1.4	35.56
Franco Arenoso Fino	4.5	0.8	20.32	14.7	2.6	66.04	10.2	1.8	45.72
Franco	6.8	1.2	30.48	18.1	3.2	81.28	11.3	2	50.8
Franco Limoso	7.9	1.4	35.56	19.8	3.5	88.9	11.9	2.1	53.34
Franco Arcilloso	10.2	1.8	45.72	21.5	3.8	96.52	11.3	2	50.8
Arcilloso	14.7	2.6	66.04	22.6	4	101.6	7.9	1.4	35.56

Tabla No. 2.8: Punto de Marchitez Permanente, Capacidad de Campo y Capacidad de Agua Disponible para suelo de varias Texturas.

Fuente: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos USDA

Además se tiene que para diferentes texturas a una profundidad de 1000 mm la Capacidad de Campo del suelo se puede determinar a través de la Tabla 2.9

Textura	Punto de Marchitez (agua por pie de profundidad)		Capacidad de Campo (agua por pie de profundidad)		Capacidad de Agua Disponible (agua por pie de profundidad)	
	(pulg)	(mm)	(pulg)	(mm)	(pulg)	(mm)
Arena Media	0.98	25.00	3.94	100.00	2.95	75.00
Arena Fina	1.31	33.33	4.92	125.00	3.61	91.67
Franco Arenoso	1.97	50.00	6.56	166.67	4.59	116.67
Franco Arenoso Fino	2.62	66.67	8.53	216.67	5.91	150.00
Franco	3.94	100.00	10.50	266.67	6.56	166.67
Franco Limoso	4.59	116.67	11.48	291.67	6.89	175.00
Franco Arcilloso	5.91	150.00	12.47	316.67	6.56	166.67
Arcilloso	8.53	216.67	13.12	333.33	4.59	116.67

Tabla No. 2.9: Capacidad de Campo, Punto de Marchitez Permanente y Agua Disponible para profundidad del suelo de 100 cm.

Fuente: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos USDA

Es importante mencionar que en el caso de que se determine la Capacidad de Campo por método de laboratorio, este valor debe prevalecer sobre el determinado por métodos indirectos debido al grado de incerteza de esta estimación, y en el caso de que se pueda determinar la textura del suelo por laboratorio, se puede realizar una comparación de la Capacidad de Campo determinada por laboratorio con la obtenida por tablas por medio de la textura de suelo. Esta comparación puede servir para comparar ambas Capacidades de Campo y a la vez obtener una mejor aproximación a dicho parámetro físico de un suelo o si se duda de los resultados obtenidos.

2.10 GEOLOGÍA DE EL SALVADOR

La Geología es la ciencia que se ocupa del estudio de la Tierra y en especial de su superficie y zonas no muy profundas de su corteza²¹. En otras palabras la geología es la ciencia natural que estudia la tierra en todos sus diversos aspectos, indagando las causas de su estado actual, fenómenos naturales que en ella ocurren, materiales que la integran, reacciones químicas que los han originado, etc.; la geología estudia también los minerales, las rocas, los fósiles, los procesos geológicos modernos, etc. , y es importante recalcar que la geología no es una ciencia puramente descriptiva, sino que también es de aplicación práctica, tanto en ingeniería como la industria y en la agricultura.

2.10.1 HISTORIA DE LA GEOLOGÍA EN EL SALVADOR

La historia de la Geología en El Salvador se remonta a las diferentes eras geocronológicas que ha tenido la tierra, *se estima que la tierra tiene aproximadamente más de 5 mil millones de años y que la geología de Centroamérica incluyendo El Salvador se remonta al cretácico superior, es decir a las eras Cuaternarias o Neozoica, la era Terciaria o Cenozoica y la era Secundaria o Mesozoica, la Geología salvadoreña se inicia a finales de la era Secundaria o Mesozoica, en el Cretáceo Medio a Superior con la formación de las rocas sedimentarias marinas localizadas en el extremo Noroeste del país, o sea, en el Norte de los departamentos de Santa Ana y Chalatenango. Estas rocas sedimentarias tienen aproximadamente de 70 a 80 millones de años, lo cual desde el punto de vista de la geología, indica que el país es relativamente joven. El resto del territorio es esencialmente volcánico, formado por los productos eyectados por los volcanes nacionales. La edad geológica que les corresponde a las rocas volcánicas va desde el inicio de la era Terciaria para las más antiguas, hasta las formaciones más recientes que pertenecen a la Cuaternario, que es la era actual.*²²

²¹ José María Artero García (1975). *La Vida en nuestro Planeta*. España (1ª Edición): EVEREST, S. A.

²² Carlos E. Aguilar (1978). *Apuntes de Geología General*. UES Facultad de Ciencias Agronómicas Departamento de Suelos. San Salvador.

2.10.2 PRINCIPALES FORMACIONES GEOLÓGICAS DE EL SALVADOR

De acuerdo al departamento geológico del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales los elementos geológicos más importantes de El Salvador son: Formaciones Sedimentarias, Formaciones Volcánicas y las Formaciones Intrusivas.

Las Formaciones Sedimentarias se encuentran en la parte Noroeste cerca de Metapán, donde existen rocas sedimentarias marinas, y cubren un área aproximada de 200 km². Se trata de una sucesión litológica que lleva de rocas clásticas por una serie de calizas a otra serie de rocas clásticas; Fuera de estas series marinas, en el país solamente se conocen rocas sedimentarias lacustres y fluviales que tienen extensiones muy limitadas. Se trata de productos piroclásticos redepositados de menor importancia y algunos depósitos de diatomita y lignito de carácter calcáreo. Estos sedimentos lacustres y fluviales cuentan con intercalaciones de productos piroclásticos, lo que indica que son contemporáneos con la actividad volcánica joven²³.

Las Formaciones Volcánicas, representan la mayor parte del territorio nacional y está cubierta por rocas de origen volcánico de carácter riolítico hasta basáltico.

También existen en El Salvador Formaciones Volcánicas que se deben a vulcanismo individual, donde es fácil localizar el centro de actividad. Se distinguen dos zonas volcánicas de este tipo: Una al Sur de las montañas norteñas con una faja de volcanes individuales que atraviesa toda la República. A esta faja pertenecen, por ejemplo, el Volcán de Guazapa y el Volcán Cacahuatique. Éstos se caracterizan por su alto grado de erosión; sus productos efusivos son lavas de carácter predominantemente, basálticos y tobas de diferente grado de consolidación. La otra zona de volcanes individuales existe más al Sur y corre paralela a la anterior; a esta faja pertenecen más de 50 volcanes, tales como: Laguna Verde, Santa Ana, Izalco, San Salvador, San Vicente, Tecapa, San Miguel y Conchagua; algunos de ellos todavía se encuentran activos²⁴.

²³ Autor Desconocido (n.d). *Geología de El Salvador*. San Salvador. Consultado el día Jueves 31 de Mayo de 2012 de la página <http://www.snet.gob.sv/ver/geologia/geologia+de+el+salvador/>

²⁴ Autor Desconocido (n.d). *Geología de El Salvador*. San Salvador. Consultado el día Jueves 31 de Mayo de 2012 de la página <http://www.snet.gob.sv/ver/geologia/geologia+de+el+salvador/>

Las Formaciones Intrusivas se encuentran en las montañas Norteñas, cerca de Metapán y Chalatenango, se conocen rocas intrusivas de carácter granítico y diorítico. Donde éstas últimas están en contacto con las series sedimentarias marinas se nota un metamorfismo de contacto el cual puede ser observado en las capas calcáreas. Al Sur, desde San Miguel hasta San Isidro, se encuentran afloramientos de carácter muy ácido. Lo característico de estos afloramientos es que corren paralelos a las fajas volcánicas y están conectados a yacimientos metalíferos subvolcánicos que se encuentran bajo las cubiertas basalto-andesíticas²⁵.

La Estratigráfica de El Salvador desde la superficie hacia el fondo, es la siguiente:

- Aluvión (Reciente): Compuesto por gravas, arenas y arcillas a lo largo de los ríos y en depresiones locales y se encuentra en gran escala en las planicies costeras al Suroeste y Sureste del país.
- Estratos de San Salvador: Se encuentran en la cadena volcánica joven que atraviesa la parte Sur del país y están compuestos por corrientes de lava, cúpulas de lava, tobas fundidas, tobas, pómez, escoria y cenizas volcánicas; extrusivos de los volcanes individuales.
- Estratos de Cuscatlán: Se encuentran en la cadena volcánica vieja que atraviesa la parte Norte del país y están compuestos por corrientes de lava, aglomerados, tobas, escorias y cenizas volcánicas endurecidas y tobas fundidas con intercalaciones de sedimentos lacustres y fluviales; extrusivos de los volcanes individuales.
- Estratos de la Cordillera del Bálsamo: pertenecen a la era del Plioceno y están compuestos por productos volcánicos en los cuales abundan los aglomerados con intercalaciones de tobas volcánicas endurecidas y corrientes de lava basáltica-andesítica con un espesor aproximado de 500 m.

²⁵ Autor Desconocido (n.d). *Geología de El Salvador*. San Salvador. Consultado el día Jueves 31 de Mayo de 2012 de la página <http://www.snet.gob.sv/ver/geologia/geologia+de+el+salvador/>

- Estratos de Chalatenango: pertenecen al periodo Mioceno Superior y está conformado por rocas volcánicas ácidas de carácter riolítico dacítico; prevalecen las tobas muy endurecidas de colores claros; el espesor de esta serie es aproximadamente mayor de 500 m.
- Estratos de Morazán: pertenecen a la era Mioceno y están compuestos por rocas extrusivas, básicas intermedias; ácidas, piroclásticas, tobas fundidas, riolitas y epiclásticas volcánicas.
- Estratos de Metapán: pertenecen a la era Mioceno Inferior hasta Cretácico Inferior, al Mioceno Inferior pertenecen areniscas finas de color rojo violeta, con bancos de conglomerados cuarcíticos; hacia abajo se encuentran conglomerados rojos de caliza con capas de areniscas. Y a la era Cretácico Inferior son las areniscas rojas de granos finos, con cemento arcilloso y estratificaciones finas; hacia abajo hay conglomerados de cuarzo que en su parte inferior generalmente están silificados y metamorfizados.

2.10.3 CLASIFICACIÓN DE SUELOS EN EL SALVADOR

Uno de los estudios que se realizó a mediados de la década pasada ha sido el Balance Hídrico del año 2005 por el Servicio Nacional de Estudios Territoriales SNET, en este documento se efectuó un estudio sobre la clasificación de suelos en El Salvador, en el que se definió los siguientes tipos de suelos con sus respectivos porcentajes de área: (Ver Mapa Anexo No. 1)

- Agua (2.43 %)
- Alfisoles, algunos Molisoles (21.53 %)
- Alfisoles, Molisoles (5.50 %)
- Alfisoles, Ultisoles (12.46 %)
- Área Urbana (0.36 %)
- Entisoles, Inceptisoles (2.91 %)

- Entisoles, Inceptisoles, Alfisoles (13.22 %)
- Entisoles, Inceptisoles, Molisoles (6.92 %)
- Entisoles, Vertisoles (3.34 %)
- Inceptisoles (4.54 %)
- Inceptisoles, Alfisoles, Molisoles (7.13 %)
- Inceptisoles, Entisoles (6.77 %)
- Inceptisoles, Ultisoles, Alfisoles (3.39 %)
- No Clasificado (0.66 %)
- Vertisoles, Alfisoles, Inceptisoles (8.84 %) ²⁶

A continuación se detallan algunas de las características de los diferentes órdenes de suelos:

- **Alfisoles:** son suelos minerales maduros, bien desarrollados, con un horizonte superficial de color claro o de color oscuro y un subsuelo de acumulación de arcilla aluvial; el drenaje interno en estos suelos varía de pobre, moderado a bien drenados.
- **Molisoles:** Los Molisoles son básicamente suelos negros o pardos, ricos en humus, que se han desarrollado a partir de sedimentos minerales. Otras propiedades que caracterizan a los Molisoles son: la estructura granular o migajosa moderada y fuerte que facilita el movimiento del agua y aire; el drenaje interno del suelo es de muy pobre a bien drenado.
- **Ultisoles:** Son suelos de zonas húmedas templadas a tropicales sobre antiguas superficies intensamente meteorizadas. Este tipo de suelo se desarrollan de rocas básicas, intermedias y ácidas, de sedimentos aluviales, coluviales y fluviales. Presentan un drenaje interno natural de imperfecto a bien drenado. Los Ultisoles son suelos profundos a muy profundos, con texturas superficiales franco arcillosa y arcillosa, textura del subsuelo de arcillosa a muy arcillosa.

²⁶Servicio Nacional de Estudios Territoriales (2005). *BALANCE HÍDRICO INTEGRADO Y DINÁMICO EN EL SALVADOR, COMPONENTE EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS*. San Salvador. SNET

- Entisoles: Son suelos minerales de formación reciente que tienen poca o ninguna evidencia de desarrollo de horizontes genéticos, la mayoría de este tipo de suelo no poseen el horizonte superficial con algún nivel de desarrollo, pero cuando se encuentra tiene colores claros u oscuros, la profundidad varía de profundos a muy superficiales. El drenaje interno varía de excesivo, moderadamente bueno, bueno, pobre a muy pobre.
- Inceptisoles: Son suelos minerales de desarrollo incipiente, con débil desarrollo de horizontes. Muestran horizontes alterados que han sufrido pérdida de bases, hierro y aluminio pero conservan considerables reservas de minerales meteorizables. El drenaje natural interno de estos varía de muy pobre a bien drenados la textura superficial varía de arena franca hasta arcillosa, de franco arcilloso a arcilloso.
- Vertisoles: Son suelos minerales de desarrollo reciente, con horizonte superficial de poco espesor, muy arcillosos, que durante la estación seca se contraen y presentan grietas anchas y profundas y durante la estación lluviosa se expanden. El drenaje natural es de imperfecto a moderado, pobre y muy pobre. Las superficies, son de muy profundos a moderadamente profundos²⁷.

2.11 RED HIDROMÉTRICA DEL SERVICIO HIDROLÓGICO DE EL SALVADOR

2.11.1 HISTORIA DE LA RED HIDROMÉTRICA DE EL SALVADOR

La Red Hidrométrica de El Salvador en la década de los 70's, contaba con 70 estaciones hidrométricas que servían con el objetivo común de contribuir al manejo del recurso hídrico, principalmente destinado a usos agrícolas; el monitoreo de dichas estaciones era realizado por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), a través de la Dirección General de Recursos Renovables (DGRNR); sin embargo a raíz del conflicto armado suscitado en el país durante la década de los 80's la mayoría de las estaciones fueron parcial o totalmente

²⁷Servicio Nacional de Estudios Territoriales (2005). *BALANCE HÍDRICO INTEGRADO Y DINÁMICO EN EL SALVADOR, COMPONENTE EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS*. San Salvador. SNET

destruidas, y otras abandonadas y puestas en desuso; al finalizar la guerra civil se contaba solamente con 10 estaciones.

No obstante entre los años 1992 a 1997 gracias al proyecto de Apoyo a los Servicios Hidrometeorológicos financiado por la Agencia Finlandesa para el Desarrollo (FINNIDA), préstamos del Banco Interamericano de Desarrollo al Gobierno de El Salvador (BID-GOES) y el Programa Ambiental de El Salvador (PAES), se iniciaron labores de rehabilitación de la Red Hidrométrica de El Salvador con 21 estaciones Meteorológicas y 10 estaciones Hidrométricas.

Luego en el año de 1998, debido a los daños provocados a la infraestructura, la agricultura y ganadería por el Huracán Mitch en el país, la Agencia Estadounidense Para el Desarrollo Internacional (USAID) financió a través del proyecto de Reconstrucción Post - Huracanes, la instalación del Sistema de Pronóstico Hidrológico y alerta del Río Lempa, y el sistema de alerta del Río Grande de San Miguel; básicamente el programa abarco la donación de estaciones telemétricas capaces de registrar la lluvia y niveles de los ríos, además se implementó un modelo hidrológico a corto plazo en la cuenca del río Lempa; esto dio origen a la creación del Centro de Pronóstico Hidrológico el cual a su vez fue manejado por Servicio Hidrológico y Meteorológico Nacional (SHMN) del MAG.

Para el inicio del segundo milenio (año 2000) se contaba con 15 estaciones telemétricas de las cuales se recibía información; posteriormente debido a los terremotos suscitados en territorio Salvadoreño en Enero y Febrero de 2001, Estados Unidos a través de la USAID amplía la cobertura del programa de apoyo para el país, y se realiza la donación de más estaciones telemétricas; dicha donación constituyo un avance significativo para el país, a tal grado que dio apertura al tema de la implementación de los Sistemas de Alerta Temprana por Inundaciones (SATs), y con esto en Octubre de 2001 se crea el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) como una dependencia del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador (MARN).

Finalmente para el periodo de 2002 a 2003 con la ayuda de los programas de Reconstrucción Post Mitch, Central América Mitigation Initiative (CAMI) y Reconstrucción Post-Terremoto (ERP), nuevamente la USAID financió y construyó con el apoyo del United States Geological Survey (USGS) más estaciones con transmisión telemétrica entre estas: 2

estaciones en la cuenca del Río Paz, y 1 en la cuenca del río Goascorán, completando así la Red Hidrométrica de El Salvador.

2.11.2 COMPONENTES DE LA RED HIDROMÉTRICA DE EL SALVADOR

La Red Hidrométrica de El Salvador, conformada por estaciones Automáticas, Telemétricas y Convencionales, actualmente cuenta con 79 estaciones hidrometeorológicas distribuidas en el territorio y pertenecientes a las distintas cuencas. A continuación se muestra un mapa con la ubicación de las estaciones que componen la red con información actualizada a Septiembre de 2012(Ver figura 2.26).

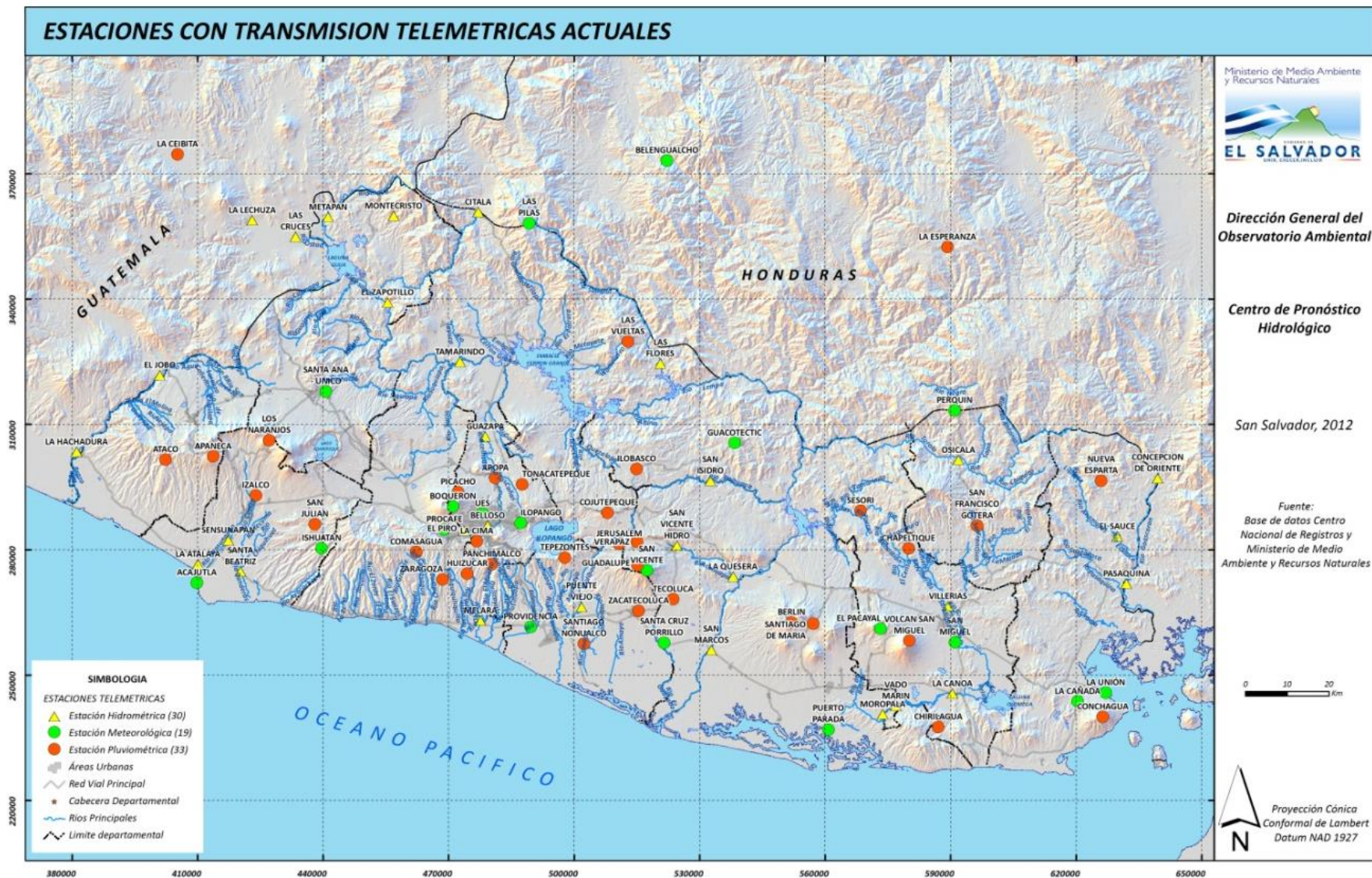


Figura No. 2.26: Mapa de ubicación de Estaciones
Fuente: Dirección General del Observatorio Ambiental – DGOA/MARN.

2.11.3 FUNCIONAMIENTO DE LA RED HIDROMÉTRICA DE EL SALVADOR

Según el MARN, la Red de Monitoreo Hidrológico que actualmente funciona en El Salvador, tiene varias finalidades, entre estas contribuir a: a) Los Sistemas de Alerta Temprana para control de inundaciones y manejo de embalses, b) al Ordenamiento y Desarrollo Territorial, c) Establecer Balances Hídricos y Gestión Integrada de los Recursos, d) Para el Desarrollo productivo: carreteras, puentes, riego, agua potable, generación hidroeléctrica, y finalmente, e) Monitorear el Impacto en los recursos hídricos a sequías y cambio climático²⁸.

El funcionamiento de la Red hidrométrica y la labor de monitoreo de la Dirección general del Observatorio Ambiental (DGOA, Antes SNET) en el área Hidrológica, se ve reflejado principalmente en el monitoreo de la cantidad y calidad del agua de las distintas regiones del país, la DGOA se encarga de realizar este monitoreo de manera continua en los principales cauces de las regiones hidrográficas; de manera resumida dicho monitoreo consiste en:

- a) La realización de aforos mensuales, bimensuales o trimestrales en sitios puntuales de las distintas cuencas, especialmente en puntos donde se encuentran las estaciones hidrométricas.
- b) La Recopilación de los datos de niveles medidos y grabados en las estaciones hidrométricas automáticas.
- c) Recepción y manejo de los datos de niveles medidos en las estaciones hidrométricas de transmisión telemétrica, vía satélite y en tiempo real.

2.11.4 ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS

Las estaciones Hidrometeorológicas se clasifican de la siguiente manera:

²⁸ Autor: SNET, consultado el día Martes 03 de Abril de 2012
<http://www.snet.gob.sv/ver/hidrologia/monitoreo+hidrologico/>

- a. Telemétricas: Son estaciones del tipo automático que envían la información registrada cada 10 o 15 minutos a un satélite y es recibida en el Centro de Pronóstico Hidrológico del MARN a través de una antena de recepción satelital.
- b. Automáticas: Cada estación Hidrométrica automática posee una computadora que registra en su memoria cada 15 minutos, los datos de nivel medidos por un sistema de flotador o un sensor de presión. Dicha información se colecta mensualmente y se transforma en información de caudales horarios, caudales promedios diarios, caudales promedio mensuales y caudales máximos instantáneos.
- c. Convencionales: este tipo de estación cuenta con un sistema especialmente diseñado para recolectar datos de lluvia y algunas otras mediciones útiles; su uso está limitado por la tecnología que utilizan pues está quedando en desuso.

2.12 SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA POR INUNDACIONES (SATs)

2.12.1 GENERALIDADES Y OBJETIVOS DE LOS SATs

Según el Glosario de la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (EIRD), la Alerta Temprana es *“el conjunto de capacidades necesarias para generar y difundir información de alerta que sea oportuna y significativa, con el fin de permitir que las personas, las comunidades y las organizaciones amenazadas se preparen y actúen de forma apropiada y con suficiente tiempo de anticipación para reducir la posibilidad de que se produzcan pérdidas o daños”*.²⁹ En esencia la finalidad de los SATs es desarrollar acciones que permitan reducir las pérdidas materiales y de vidas humanas vulnerables a las distintas amenazas.

²⁹ Plan de Acción VII en El Salvador de Ayuda Obrera Suiza (AOS), Oxfam Solidaridad de Bélgica y Cruz Roja Española (Abril 2011). *Lineamientos Generales para el Diseño Participativo y Operación de Sistemas Comunitarios de Alerta Temprana ante deslizamientos provocados por lluvias en El Salvador*

2.12.2 CLASIFICACIÓN DE LOS SATs

Existen varios tipos de Sistemas de Alerta Temprana (SATs), entre los cuales se pueden mencionar: los SAT por Inundaciones, por deslizamientos, por Tsunami, etc. Sin embargo cada uno de estos tiene como objetivo fundamental, alertar a los posibles afectados por los diversos fenómenos de manera que puedan reaccionar adecuadamente y con suficiente anticipación, y así reducir pérdidas o daños; sin embargo por la naturaleza del tema de investigación, se dará enfoque a los Sistemas de Alerta Temprana por Inundaciones, para ello en cada uno de los numerales siguientes de esta sección se describirán los componentes de estos, y su relación con el monitoreo hidrológico que el MARN se realiza en El Salvador.

En el Salvador los Sistemas de Alerta Temprana por Inundaciones, los cuales están orientados a las emergencias por este tipo de fenómenos, son utilizados en veinte regiones del país (Ver Figura No. 1.1); los cuales se clasifican según el tipo de pronóstico que se utiliza en su estructura de funcionamiento, sin embargo el diseño de cada SAT está basado principalmente en: a) el comportamiento de la cuenca (tamaño y forma del drenaje entre otros parámetros), b) Tipo de evento (temporal o precipitación convectiva) y c) Características socio-organizativas de los actores locales. A continuación se presenta una breve descripción de dicha clasificación:

- a) **Sistema de Pronóstico Precipitación – Escorrentía:** Sistema que existe solamente en la cuenca Trinacional del Río Lempa, este tipo de pronóstico se basa en la utilización de un modelo hidrológico y en el procesamiento de la información de las estaciones hidrométricas responsables de la recolección ubicadas en distintos puntos distribuidos en la cuenca. El Modelo utilizado es el National Weather Service River Forecast System (NWSRFS) de NOAA. Esta combinación es capaz de pronosticar tres días a futuro los niveles esperados del río en 14 puntos de la cuenca, además de generar pronóstico a corto plazo de caudales para las centrales Hidroeléctricas que operan en la cuenca, y mapas de inundación en diversas zonas del bajo Lempa basados en dicho pronóstico.

- b) **Sistema de Pronóstico Nivel- Nivel:** Basado en ecuaciones de correlación entre los niveles registrados en las estaciones de la cuenca aguas arriba y aguas abajo,

incluyendo además el desarrollo de curvas de tiempo de tránsito con base en la velocidad de creciente y la humedad precedente, además los umbrales de alerta aguas arriba que determinan la probabilidad de generación de inundaciones aguas abajo. Como parte del sistema de pronóstico se incluye el levantamiento de información referente a las distintas comunidades en riesgo por inundación, con las cuales se tiene comunicación constante. Como ejemplo de cuencas donde se utiliza este tipo de pronóstico se tienen: Las cuencas de los ríos Paz, Goascorán, Jiboa, y Grande de San Miguel. Estos dos últimos cuentan con calibración de modelo hidrológico HYDROLOGISKA BYRÅNS VATTENBALANS (HBV) como un valor agregado al SAT que permite mejorar los resultados que se obtienen del mismo.

- c) **Sistemas de Pronóstico en cuencas de Respuesta Rápida:** Este sistema tiene como característica fundamental el uso de estaciones de lluvia y al menos una estación telemétrica, considerando que el tiempo de respuesta es corto se necesita un rápido flujo de información y un buen sistema de comunicación con la Red de Observadores Locales (ROL); el tema de la ROL se discutirá más adelante en la sección denominada Red de Observadores Locales en este capítulo. Algunas zonas donde se utiliza este tipo de pronóstico son: El estero de Jaltepeque, la Micro región Ahuachapán Sur y el área urbana de San Salvador.

2.12.3 COMPONENTES BÁSICOS DE LOS SATs

De manera general un SAT deberá incluir al menos: a) conocimiento y mapeo de amenazas, b) Monitoreo y pronóstico de eventos inminentes, c) Proceso y difusión de alertas comprensibles a las autoridades políticas y población, d) Adopción de medidas apropiadas y oportunas en respuesta a tales alertas³⁰.

Basado en los lineamientos anteriores, los SATs por inundaciones en El Salvador según MARN, están compuestos por la Red de Monitoreo de Estaciones Hidrometeorológicas,

³⁰ Plan de Acción VII en El Salvador de Ayuda Obrera Suiza (AOS), Oxfam Solidaridad de Bélgica y Cruz Roja Española (Abril 2011). *Lineamientos Generales para el Diseño Participativo y Operación de Sistemas Comunitarios de Alerta Temprana ante deslizamientos provocados por lluvias en El Salvador*

software y modelos hidrológicos aplicables, el análisis hidrológico y científico de la información recolectada, el flujo de información entre las organizaciones responsables, y finalmente un fuerte sistema de comunicaciones entre el Centro de Pronóstico Hidrológico y la Red de Observadores Locales (ROL) de cada SAT.

2.12.4 RED DE OBSERVADORES LOCALES (ROL)

La Red de Observadores Locales (ROL), que nace como una componente social de los SATs por inundaciones, tiene como finalidad convertirse en el apoyo del área de monitoreo hidrológico en campo; principalmente está constituida por un grupo de personas que ejercen liderazgo en las diversas comunidades que se encuentran vulnerables a los fenómenos meteorológicos, aunque de manera más amplia, este concepto abarca a un grupo de instituciones tales como: La Policía Nacional Civil (PNC), escuelas, Organizaciones No Gubernamentales (ONG's), Destacamentos Militares, Fuerza Naval y a las diversas Municipalidades. La ROL es responsable del monitoreo constante a nivel local de las distintas zonas, también es responsable de la comunicación efectiva entre el Centro de Pronóstico Hidrológico (CPH) del MARN y los miembros de las comunidades.

2.12.4.1 COMPONENTES DE LA ROL

El componente principal de La Red de Observadores Locales es cada uno de los líderes o voluntarios de las diversas comunidades en riesgo, así también la misma comunidad y demás involucrados, los cuales como ya se mencionó, complementan al SAT. La información que se recolecta en las estaciones Hidrométricas y el análisis científico son importantes, sin embargo la labor de la ROL abarca el monitoreo constante, y brinda información que por su naturaleza complementa el análisis científico, y mejora el pronóstico. En resumen la labor de complementación que realiza la ROL es de vital importancia para cada SAT en particular.

La conformación de cada ROL está íntimamente ligada a las capacidades de la población de cada zona de riesgo, el nivel educativo, el nivel de organización comunitaria, municipal y de cada organismo de apoyo; todos trabajando bajo un objetivo común, poniendo en práctica sus conocimientos y habilidades; de manera que no es posible que exista un único ROL para las diferentes necesidades que presenta cada SAT. Además cada miembro de la ROL es seleccionado de manera que cumpla con el perfil adecuado para el cargo a desempeñar, entre estas características se pueden mencionar: Liderazgo, Responsabilidad, Honestidad, Imparcialidad y Disponibilidad.

2.12.4.2 PAPEL DE LA ROL

La ROL es el nexo de unión del conocimiento científico con el popular en los SATs; de allí que su importancia radica en varios puntos, como ya se mencionó, la comunicación es uno de los más importantes, y el flujo de información proveniente de la observación continua, ya que son los contactos directos con los pobladores de las diferentes zonas de riesgos por inundación y el MARN.

Se cita el párrafo que resume la labor de cada ROL³¹, “La gestión del riesgo es un proceso dinámico e integral por medio del cual un grupo humano toma conciencia del riesgo que enfrenta, lo analiza, lo entiende, considera las opciones y prioridades en términos de su reducción, considera los recursos disponibles para enfrentarlo, diseña las estrategias e instrumentos necesarios para afrontarlo, negocia su aplicación y toma la decisión de hacerlo.”

De allí que las funciones de la ROL se enfocan principalmente en: a) la toma de datos de los niveles del río y datos de lluvia dependiendo del tipo de equipo utilizado y la época, b) el reconocimiento y el reporte de amenazas y riesgos potenciales en las distintas zonas a raíz de los cambios hidrometeorológicos y c) el establecimiento de la comunicación con el ente científico responsable en caso de eventos de gran magnitud.

³¹Ing. Msc en Recursos Hidráulicos José Mauricio Martínez García. (2010) *RED DE OBSERVADORES LOCALES: UNA COMPONENTE DE LOS SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA POR INUNDACIONES*. San Salvador: SNET.

Cada una de estas personas deberá, al menos saber leer y escribir debido a que le corresponde registrar la observación que realiza, ser residente permanente en las distintas comunidades y estar verdaderamente interesado en la observación y dispuesto a recibir capacitación para mejorar su desempeño como parte del SAT.

2.12.5 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN

Es importante destacar que debe existir un protocolo de comunicación adecuado a las necesidades de cada SAT en particular, dicho protocolo por definición es una serie de pasos que definen la eficiencia y calidad de la comunicación, favorecen el intercambio de datos y mandatos entre los actores o partes involucradas. Cada protocolo de comunicación está diseñado de tal forma que permita la localización e identificación de los distintos actores, la entrega oportuna de datos, órdenes y avisos, y finalmente permita agilizar y asegurar el intercambio bilateral de la información.

Concretamente existen tres tipos de actores clasificados en base al tipo de información que manejan sin establecer jerarquía:

- a) Los Actores Primarios (Técnicos de Monitoreo): que según su definición son los encargados de activar o desactivar la red de comunicación y están en todo momento encargados de observar y registrar los cambios en las condiciones Hidrometeorológicas; estos son los técnicos de monitoreo.

- b) Los Actores Secundarios (La Red de Observadores Locales ROL): los cuales son responsables de la complementación de la información por medio de datos de campo más no son responsables del análisis y procesamiento de la información.

- c) Los Actores Terciarios (Instituciones de Apoyo y ayuda): representan a todas aquellas instituciones que reciben en primera instancia la información, entre estas se pueden mencionar Policía Nacional Civil, Dirección General de Protección Civil (entidad encargada de actuar en la evacuación y reubicación de la población de la

gente afectada en albergues, quien emite el aviso de alerta a nivel nacional³²), ONG's, etc. Y en algunos casos los medios de comunicación tales como Radio y Televisión.

2.12.6 UMBRALES DE ANÁLISIS DE ALERTA

Los umbrales o niveles de alerta son el punto de partida para que el Sistema de Alerta Temprana por Inundaciones active las distintas etapas; básicamente existen tres umbrales de alerta, los cuales están asociados a los niveles de los cauces principales de las diferentes zonas de las cuencas, la lluvia pronosticada y la lluvia real; estas condicionantes marcan la diferencia en la forma de operación del Centro de Pronóstico e infieren en la comunicación establecida entre este, la ROL y demás involucrados en las emergencias.

Cabe mencionar que el cambio entre las distintas etapas es de carácter interno del CPH; de tal manera que se incrementan o disminuyen las actividades que realizan los técnicos responsables del monitoreo, por esta razón cada técnico deberá estar bien informado de los diferentes cambios de etapa. En orden creciente de peligrosidad, los umbrales o etapas de alerta inician por el Monitoreo y Preaviso, Aviso, Alerta y Emergencia.

A continuación se hará una descripción de cada una de las etapas de alerta.

2.12.6.1 MONITOREO Y PREAVISO

Permanentemente existe un sistema de monitoreo y vigilancia en cada zona de las distintas cuencas, con atención especial a las zonas donde existe susceptibilidad a inundaciones en el territorio perteneciente a la cuenca, aunque no ocurran eventos extremos que alteren significativamente los niveles de los Ríos.

³² Ing. Roberto Cerón, (2012). *Sistemas de Alerta Temprana por Inundaciones en El Salvador*. San Salvador: DGOA.

2.12.6.2 AVISO

Se declara etapa de aviso cuando existe alta probabilidad de que algún fenómeno atmosférico o evento extremo produzca una considerable cantidad de lluvia en el área, en un determinado período de tiempo, lo que produciría incremento de caudales y un rápido aumento de los niveles en los ríos.

2.12.6.3 ALERTA Y EMERGENCIA

Esta etapa se da cuando los eventos y fenómenos atmosféricos severos afectan el país de una forma directa y persistente el riesgo de ocasionar daños e inundaciones. Esto significa que los fenómenos meteorológicos acá considerados poseen una duración mucho mayor que los considerados en las etapas anteriores.

2.13 LAS INUNDACIONES EN EL SALVADOR

2.13.1 CAUSAS DE LAS INUNDACIONES

Las inundaciones en El Salvador se han registrado desde hace muchos años atrás, la influencia de fenómenos climáticos es un factor importante en el tema de las inundaciones, adicional a esto diversos factores como la erosión y sedimentación, las altas precipitaciones, el cambio climático, los cambios en la vegetación y el uso de los suelos, el crecimiento descontrolado de los asentamientos poblacionales, la deforestación, y otros problemas son las causas de las inundaciones. A nivel nacional las áreas más afectadas por inundaciones son las ubicadas en la parte sur del país en cada una de las zonas occidental, central y oriental del país, entre estas destacan: Ahuachapán, Sonsonate, La Libertad, La Paz, San Vicente, Usulután, San Miguel y La Unión.

2.13.2 CLASIFICACIÓN DE LAS INUNDACIONES

Las Inundaciones pueden ser clasificadas en tres tipos, según información publicada por el MARN en su documento denominado “RED DE OBSERVADORES LOCALES: UNA COMPONENTE DE LOS SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA POR INUNDACIONES”; dicha clasificación se muestra a continuación acompañada de una breve descripción y algunos ejemplos de las cuencas donde se producen este tipo de inundaciones:

- a) **Inundaciones en la parte baja o planicies de las cuencas de ríos medianos y grandes:** Este tipo de inundaciones suelen producirse en partes bajas de las cuencas en las planicies, debido a las lluvias con duraciones entre 3 a 5 días o más, normalmente de tipo intermitente por efecto del paso de Huracanes y otros fenómenos Meteorológicos de similar naturaleza. Particularmente las inundaciones en partes bajas, guardan relación con el tamaño de la cuenca puesto que se producen en aquellas de tamaño mediano y grande. En el Salvador se pueden mencionar como ejemplo de este tipo de fenómenos las cuencas de los ríos Lempa, Paz, Jiboa y Goascorán.

- b) **Inundaciones en cuencas de respuestas rápidas:** ocasionadas en cuencas normalmente provenientes de volcanes y cordilleras que desembocan hacia el Océano Pacífico, se producen bajo la acción de lluvias intensas con un periodo de duración corto, usualmente entre 2 a 3 horas. Como ejemplo de este tipo de inundaciones se pueden resaltar las que ocurren en las cuencas de los ríos: Cara Sucia - San Pedro en el Departamento de Ahuachapán, río Grande de Sonsonate, Estero de Jaltepeque en La Paz y Bahía de Jiquilisco en Usulután entre otros.

- c) **Inundaciones en Cuencas Urbanas:** Al igual que las inundaciones en cuencas de respuestas rápidas, la inundación en cuencas urbanas tiene como factor común el hecho de que estas son provocadas por precipitaciones altamente convectivas y de corta duración, agregando algunas otras problemáticas que caracterizan

muchas ciudades del país: Los desechos sólidos, deficiencias en los drenajes y alcantarillados o la falta de los mismos, etc. La expansión casi descontrolada de las ciudades, el cambio del uso del suelo, el cambio climático, el mal manejo de cuencas, y la poca planificación y control de los asentamientos poblacionales ha provocado que exista un crecimiento significativo de esta problemática. Como ejemplo se menciona el área Metropolitana de San Salvador.

2.13.3 MEDIDAS DE DEFENSA ANTE LAS INUNDACIONES

Diferentes medidas ante inundaciones han sido puestas en práctica a lo largo y ancho de las zonas de inundación en El Salvador, obras de mitigación de riesgos y obras de protección, entre otras, son construidas con el fin de brindar seguridad a las poblaciones en zonas de riesgo debido a este tipo de fenómenos. En algunos casos las obras de mitigación suelen ofrecer buenos resultados, si se diseñan adecuadamente y se les brinda el mantenimiento adecuado; sin embargo en un buen porcentaje de los casos esto no se hace, y finalmente fallan ya sea porque su vida útil ha terminado, por un mal proceso constructivo o porque sobrepasan su capacidad de diseño, sufriendo daños permanentes e irreparables que hacen que dicha obra colapse. Una de las obras comúnmente utilizadas en el país son los muros de protección en las riberas de los ríos y quebradas, estos suelen construirse de concreto, mampostería de piedra, mampostería de bloque con acero de refuerzo, muros tipo gaviones entre otros. Todo esto con el propósito de evitar desbordamientos de ríos y quebradas, deslizamientos de tierra y otros materiales, y así evitar pérdidas materiales y humanas.

Por otra parte debido a que las inundaciones se han vuelto frecuentes en los últimos años, surgió la necesidad de nuevas medidas de protección y alerta que no solamente involucren obras de protección y resguardo, si no que incluyan entre las medidas, el factor humano de organización y apoyo, de allí que los Sistemas de Alerta Temprana se constituyeron para enfrentar las inundaciones y alertar adecuadamente a los pobladores de zonas de riesgo.

2.13.4 VARIABLES QUE INTERVIENEN EN DESASTRES POR INUNDACIONES

Dentro de un posible y complejo listado de desastres que intervienen en las inundaciones se pueden mencionar el manejo de las cuencas hidrográficas, el comportamiento de las lluvias, el suelo y la vegetación entre otras. Cada una de ellas está íntimamente relacionada, de manera que se pueden establecer ciertas dependencias claramente establecidas.

A continuación se abordara cada una de las principales variables involucradas en la generación de las inundaciones.

2.13.4.1 MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

En El Salvador el manejo de cuencas hidrográficas toma iniciativa a finales de la década de los 60's, a partir de ese periodo se han venido desarrollando iniciativas y planes de manejo orientados a la prevención de la deforestación, las mejoras en la calidad de vida de la población, el desarrollo rural y prácticas de protección de recursos; durante las décadas subsiguientes esta iniciativa ha continuado mediante la participación de diversas organizaciones mundiales tales como: PNUD, OEA, SIECA, y FAO entre otras. Al igual que el surgimiento de la Red Hidrométrica, se vio altamente influenciado por el paso de Huracán Mitch en 1998; el manejo de las diversas cuencas y el surgimiento de planes de manejo de cuencas en el país se ha visto influenciado por este fenómeno dando surgimiento a planes de manejo que se están implementando en las diferentes zonas.

Cada plan de manejo de cuencas se ha orientado principalmente a las zonas afectadas por fenómenos hidrológicos denominadas comúnmente zonas de riesgo (usualmente las zonas bajas de las cuencas), y entre sus finalidades aparte de la gestión del territorio, está la prevención de desastres principalmente provocados por inundaciones. Sin embargo un plan de manejo abarca otras áreas entre las que se pueden mencionar: componentes ambientales, sociodemográficos y productivos, la contaminación, los vertidos en áreas urbanas e industriales y el procesamiento de productos agrícolas, entre otros.

A la fecha aún existen zonas con riesgo por inundación donde no se han implementado iniciativas de este tipo, esto representa una clara desventaja.

2.13.4.2 COMPORTAMIENTO DE LAS LLUVIAS

En el país se distinguen dos temporadas climáticas, estas son la época seca de Noviembre a Abril y la época lluviosa de Mayo a Octubre con sus respectivas transiciones, se han registrado históricamente que los meses más lluviosos son de Junio a Octubre, sin embargo como se ha mencionado anteriormente en este documento, esta tendencia ha venido cambiando debido a la influencia de diversos fenómenos climáticos ocurridos en época de invierno, cada uno ha presentado características y/o anomalías según los datos históricos lo cual ha producido efectos en distintas zonas. Sistemas atmosféricos como ondas tropicales, bajas presiones y vaguadas, así como por la influencia o acercamiento de la zona de convergencia intertropical, que afectan al país especialmente en los últimos meses de la época lluviosa (Septiembre y Octubre), han generado temporales de varios días consecutivos; como ejemplo reciente de este tipo de fenómenos se menciona la Depresión Tropical DT 12-E la cual tuvo influencia sobre el país en Octubre de 2011 y genero niveles de inundación nunca antes registrados en la zona occidental del país específicamente en la cuenca del Río Paz.

2.13.4.3 EL SUELO

Uno de los factores principales de generación de inundaciones es el cambio del uso del suelo, el cambio en la tenencia de tierras y el crecimiento descontrolado de las poblaciones, produciendo un desequilibrio territorial, debido a que estas modificaciones aumentan significativamente la probabilidad de generar escorrentía superficial.

El Salvador posee: alrededor del 13 % del total del territorio, está conformado por planicies costeras, el 49% por áreas montañosas, y el 38 % consiste en zonas de relieve bajos, pequeñas lomas y valles. Entonces los accidentes Topográficos también juegan un

papel importante en la generación de las inundaciones, la formación de planicies de inundación provee del medio idóneo para el desbordamiento de ríos, sobre todo en las partes bajas de las cuencas donde la recarga hídrica es de menor proporción.

2.13.4.4 VEGETACIÓN

Finalmente existe un aumento significativo de las zonas que se han deforestado o modificado el tipo de cultivos, aumentando así la probabilidad de generar escorrentía y aumentar la erosión de suelos. Se estima que en el año 1990 cerca de 59 millones de toneladas métricas de suelo se perdían anualmente por erosión dentro del 75 % del territorio del país (Perdomo lino, 1990). Entre las causas de esta degradación, se encuentran procesos naturales como la erosión propia de los relieves jóvenes y de los materiales poco consolidados, y la ocurrencia de lluvias torrenciales con gran poder erosivo, acelerados por factores antrópicos como la excesiva explotación de la cobertura forestal, las inadecuadas prácticas agrícolas utilizadas por una agricultura de subsistencia que se desarrolla sobre un elevado porcentaje de las laderas del país y la utilización de suelos con vegetación no acorde a su vocación potencial.³³

³³Servicio Nacional de Estudios Territoriales (2005). *BALANCE HÍDRICO INTEGRADO Y DINÁMICO EN EL SALVADOR, COMPONENTE EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS*. San Salvador. SNET

CAPITULO 3: CUENCA DEL RÍO PAZ

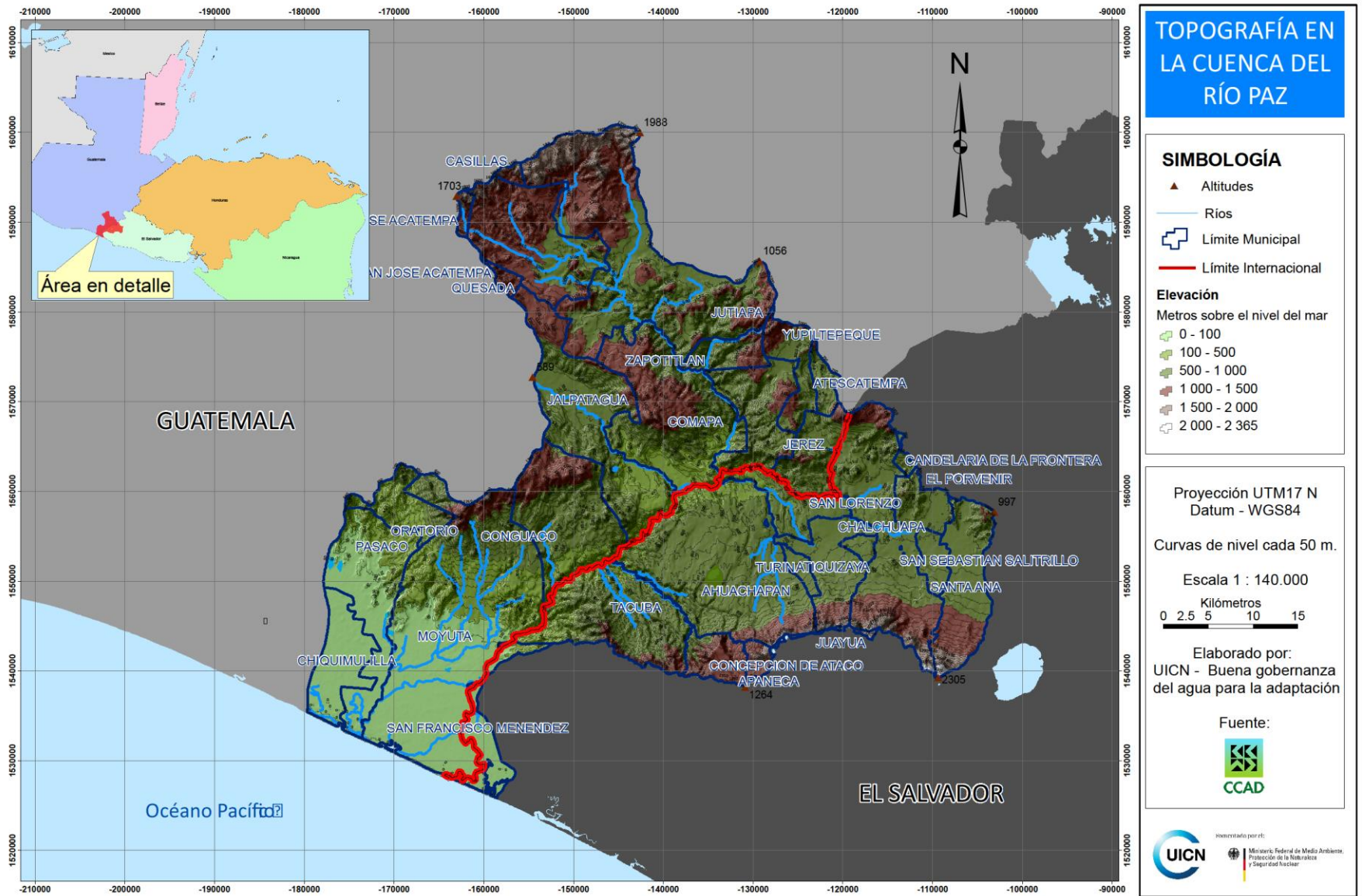
3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se realiza una recopilación de la información disponible para el análisis de la situación actual de la cuenca del Río Paz, considerando todas las generalidades de la misma, sus parámetros físicos, la geología y uso de suelos, condiciones atmosféricas, la generación de inundaciones en la parte baja de la cuenca, la red hidrometeorológica existente y se finalizara describiendo el Sistema de Alerta Temprana que funciona en la cuenca y los umbrales de alerta para situaciones de riesgo por inundaciones.

3.2 GENERALIDADES DE LA CUENCA

La cuenca binacional del Río Paz está integrada por las zonas fronterizas occidental y oriental pertenecientes a los países de El Salvador y Guatemala respectivamente, cuyo cauce principal sirve de frontera entre ambos países, la cuenca posee una extensión territorial de aproximadamente 2647.6 kilómetros cuadrados³⁴, que abarcan la zona occidental de El Salvador y parte de la zona Sur Oriental de Guatemala; está localizada entre las coordenadas 13°50' y 14°30' latitud norte y 89°35' y 90°10' longitud oeste. Del total de la extensión territorial que posee la cuenca, un 65 % corresponde a Guatemala (1,722 km²) y apenas un 35% a El Salvador (925.6 km²) conformado por el departamento de Ahuachapán y una pequeña parte del departamento de Santa Ana y Sonsonate. (Ver Mapa No. 3.1)

³⁴ Melibea Gallo y Eduardo Rodríguez (Diciembre 2010), *HUMEDALES Y MEDIOS DE VIDA EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO PAZ*, Proyecto: Gestión integrada de recursos hídricos y medios de vida en el río Paz El Salvador – Guatemala



Dentro de las zonas de la cuenca pertenecientes a El Salvador se encuentran los municipios de: Santa Ana, Candelaria de la Frontera, El Porvenir, San Sebastián Salitrillo, Chalchuapa, Atiquizaya, Turín, Ahuachapán, Juayúa, Concepción de Ataco, Apaneca, Tacuba, San Francisco Menéndez, etc. Mientras que en la zona perteneciente a Guatemala se pueden mencionar: Casillas, Jutiapa, Yupiltepeque, San José Atescatempa, Quezada, Jerez, Comapa, Atescatempa, Zapotitlan, Jalpatagua, Conguaco, Oratorio, Moyuta, Pasaco y Chiquimulilla, entre otros.

El nombre de la cuenca corresponde al río principal que drena la misma, y que a su vez sirve de frontera entre ambas naciones (Ver Mapa No. 3.1 y Figura No. 3.1); este nace en el departamento de Jutiapa, en Guatemala; en la parte alta de la cuenca, con una elevación cercana a los 1700 msnm.



Figura No. 3.1: Río Paz Frontera Las Chinamas, sobre puente el Jobo.
Fuente: Propia.

En el territorio salvadoreño la cuenca del Río Paz es drenada principalmente por el Río Pampe, cuya longitud desde su origen hasta su desembocadura en el Río Paz es de 40 km. El Río Paz posee un orden 7 y una longitud total de 134 km hasta la desembocadura en el Océano pacífico en la zona sur del Departamento de Ahuachapán, sin embargo no es el único que desemboca al mar, ya que del lado de Guatemala también existen puntos de

desembocadura provenientes de otros afluentes que pertenecen a la cuenca; hasta la estación hidrométrica La Hachadura el río posee una longitud de 82.6 Km.

La Cuenca del Río Paz posee como límites al norte; la cuenca alta del Río Lempa, al noreste con el parte aguas del Río Lempa y con las cabeceras de la cuenca de los ríos San Pedro y Sensunapán, por el este el complejo de cuencas que descargan en la Barra de Santiago y por el sur el Océano Pacífico, por el oeste y noroeste con la cuenca del Río Los Esclavos y al sur con el parte aguas de las cuencas de pequeños ríos que desembocan en Océano Pacífico. A lo largo de su cauce principal recibe la contribución de diversos ríos en territorio salvadoreño y guatemalteco entre los que se pueden enunciar:

- a) **Por El Salvador:** El Río Pampe como principal tributario de la cuenca alta en territorio Salvadoreño. Aguas abajo de la antigua estación hidrométrica San Lorenzo y en el tramo hasta la estación hidrométrica El Jobo, desembocan los siguientes Ríos: Río Escalante, Río Frío, Río Los Pozos y Río Tahuapa. A partir de la estación el Jobo hasta la estación La Hachadura y descendiendo de la Cadena Volcánica, los ríos afluentes son: El Molino, Tacuba, Ashuquema, Sunza y Zanjón Aguacate. La parte baja de la cuenca es drenada por el Río La Danta y sus afluentes.

- b) **Por Guatemala:** Río Pululá, Tempisque, Río San Pedro, Chingo o Jerez, y el cauce Principal Río Paz (Ver Figura No. 3.2 y 3.3) que se origina en el departamento de Jutiapa, entre otros.



Figura No. 3.2: Río Paz Guatemala
Fuente: Propia

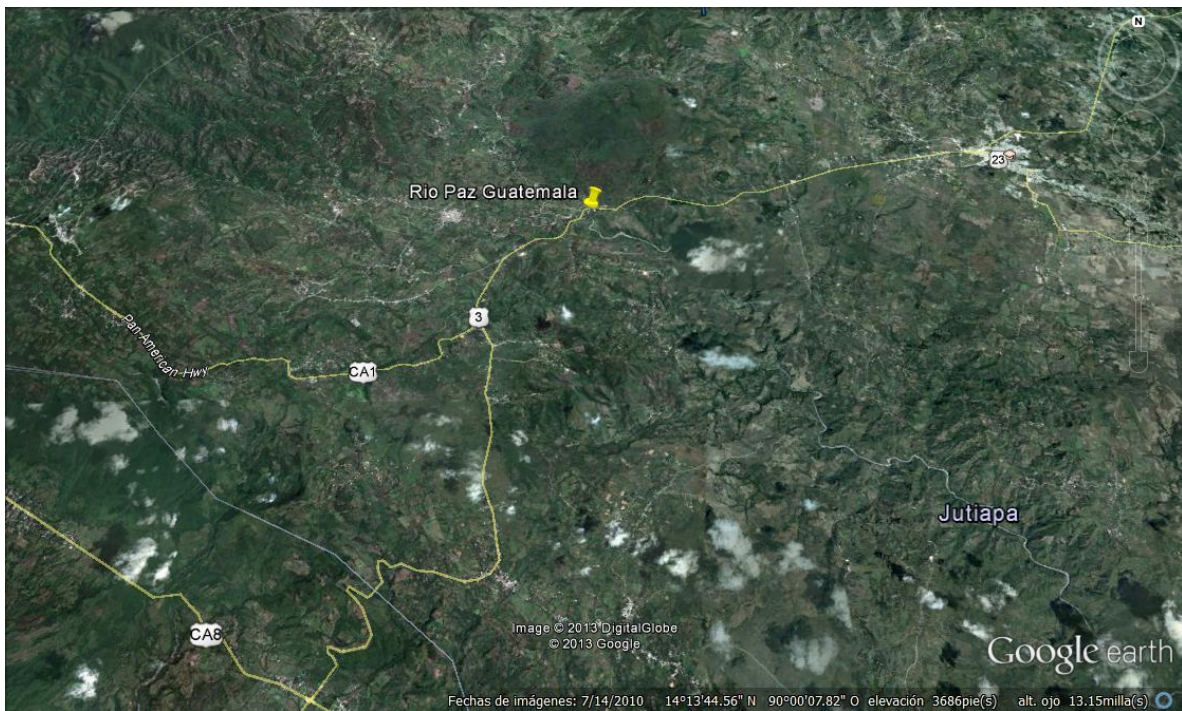


Figura No. 3.3: Río Paz Guatemala. (Coordenadas 14°16'21.15"N 90° 0'14.57"O)
Fuente: Google Earth.

3.3 PARÁMETROS FÍSICOS DE LA CUENCA

La cuenca del Río Paz es del tipo exorreica, y posee una elevación media de 900 msnm, tiene varios puntos de salida del escurrimiento hacia el mar (océano pacifico) en la zona baja de la misma, esto se debe a que la cuenca media y alta poseen cauces definidos con secciones normalmente en forma de V o trapezoidales y pendientes entre el 40 al 73%, sin embargo en la cuenca baja el cauce presenta variabilidad dependiendo de la magnitud del flujo que transporta, pueden identificarse al menos cuatro cauces: (Ver Figura No. 3.4)

1. El Cauce nuevo o Nuevo Paz (Cauce Actual)
2. Cauce Antiguo (Cauce Viejo)
3. El Zanjón el Aguacate
4. El Zanjón El Chino (La Danta)

Nuevo Cauce del Rio Paz



Figura No. 3.4: Cauces del Río Paz Zona Baja de la Cuenca.

Fuente: MARN, Cuenca Baja del Río Paz y zonas inundables, Febrero 2012.

Dentro de la clasificación de las cuencas en territorio Salvadoreño establecida por el MARN, la cuenca del Paz se clasifica como una del tipo de Río Mediano a Grande con probabilidades de inundación, producto del efecto de los fenómenos con duraciones entre tres a cinco días, tal como se menciona en el Capítulo 2, sección 2.14.2 de este documento en el literal a).

La escorrentía superficial presenta un comportamiento particular en cada zona de drenaje, presentando así, para la parte alta una escorrentía mínima y un alto grado de infiltración; la parte media por lo general presenta un gran potencial de escorrentía y mínima infiltración; la parte baja o planicies de inundación presentan un alto grado de infiltración y mínima escorrentía, pero debido a las bajas pendientes la susceptibilidad a inundación es alto³⁵.

La mayoría de los estudios e investigaciones realizadas hablan de las modificaciones que ha experimentado la cuenca con el pasar de los años, por la influencia de diversos fenómenos climáticos que han impactado la zona, entre estos se hace referencia al huracán Camille en 1964 y Fifi en 1974, catalogados como los más destructivos de la historia de esta cuenca. Debido a esto el cauce principal se modificó significativamente, ampliando un canal usado para riego formándose lo que se conoce como NUEVO PAZ (Ver Figura No. 3.4) en la región de Guatemala; este brazo del río permanece seco, salvo en época de ocurrencia de inundaciones.

3.4 GEOLOGÍA DE LA CUENCA

La geología de la cuenca del lado Salvadoreño está conformada por las formaciones: San Salvador, Cuscatlán, Bálsamo, Chalatenango y Morazán. Según estudios realizados a la geología de la cuenca, se estima que existe un 93% del área de la cuenca perteneciente a El Salvador cubierta por rocas volcánicas correspondientes a eras terciaria y cuaternaria, quedando un restante 7% constituido por depósitos de sedimentos aluvionales cuaternarios; al clasificar por edades desde la más joven a la más antigua, las rocas encontradas se agrupan en las formaciones ya mencionadas.

³⁵ Ing. Roberto Cerón (2012) *SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA POR INUNDACIONES EN EL SALVADOR*, Centro de Pronostico hidrológico. SNET.

A continuación se presenta la Tabla No. 3.1 con las principales zonas pertenecientes a estas clasificaciones según las formaciones existentes en la cuenca del Río Paz:

FORMACIÓN	UBICACIÓN
San Salvador	Planicie de Omoa (Noreste de Chalchuapa), Pequeñas áreas al Norte de Ahuachapán, San Lorenzo y riberas del Río Paz.
Cuscatlán	Localizada en la región norte de la cuenca en zonas inmediatas al cerro Chingo en el Departamento de Santa Ana, zona Fronteriza con Guatemala.
Bálsamo	Ubicada al Suroeste de la región extendiéndose sobre el Río Paz.
Chalatenango	Ladera Sureste del Cerro Chingo
Morazán	Ladera Sureste del Cerro Chingo

Tabla No. 3.1: Formaciones Geológicas en la cuenca del Río Paz en territorio Salvadoreño

Fuente: Plan Maestro de Desarrollo y Aprovechamiento de los Recursos Hídricos Región B (PLAMDARH), 1982

Por otra parte la geología perteneciente al lado Guatemalteco se estima con un 40% de rocas de edad cuaternaria (arenas, gravas, pómez y depósitos laháridos) y rocas volcánicas, rocas terciarias distribuidas en un 59% correspondientes al mió-plioceno y un 1% correspondientes al cretácico, carbonatos, neocormiano-companionanos de la formación Coban Ixcoy.

3.4.1 TIPOS DE SUELOS EXISTENTES EN LA CUENCA

Existen al menos dos clasificaciones de los suelos pertenecientes a la cuenca del Río Paz según PLAMDARH 1981:

- a) Clasificación Salvadoreña.
- b) Clasificación del Ministerio de Agricultura de Guatemala.

Para cada una de las clasificaciones encontradas se presentara una tabla resumen de tipos de suelos pertenecientes a la cuenca, describiendo el uso potencial de cada uno:

a) Clasificación Salvadoreña.

No.	TIPO DE SUELO	USO POTENCIAL	% AREA
1	Regosoles y Aluviales	Tierras Aptas para Agricultura, adecuadas para riego con un muy alto potencial agrícola.	3.4
2	Aluviales y Grumosoles. Entisoles y vertisoles.	Potencial Agrícola Moderado con adecuado control de drenaje, con ayuda de riego es capaz de producir altos rendimientos.	2.5
3	Andosoles y Regosoles, Inceptisoles y entisoles	La mayoría de estos suelos son adecuados para cultivos intensivos, potencial agrícola Alto y muy alto.	11.0
4	Regosoles, Latosoles arcillo rojizo y Andosoles	Fases alomadas y Montañas accidentadas, Tierras no aptas para cultivos intensivos, con potencial alto a muy alto para cultivos adaptados.	5.5
5	Latosoles Arcillo Rojizos. Alfisoles	Tierras con pendientes moderadas apropiadas para cultivos anuales adaptados, las tierras con pendientes más altas son adecuadas para cultivos permanentes tales como café. Potencial Agrícola moderado a alto.	29.9
6	Latosoles Arcillo Rojizos. Andosoles y Litosoles	Potencial Agrícola bajo a moderadamente alto, usualmente las más aptas para cafetales pastos y bosques.	14.5
7	Litosoles Regosoles. Etnisoles y grupos líticos	Aptos para forestales, con potencial agrícola moderadamente bajo.	0.9
8	Latosoles Arcillo Rojizos y Litosoles. Alfisoles y grupos líticos	Potencial Agrícola bajo a muy bajo, no aptas para cultivarse. Fase pedregosa superficial de ondulada a montañosa muy accidentada.	15.6
9	Grumosoles, Litosoles	Áreas apropiadas para pasto natural Potencial	15.9

	y Latosoles arcillo rojizos. Vertisoles y Alfisoles	agrícola bajo a muy bajo.	
10	Pantanos, Playas costeras y suelos aluviales	Vegetación predominante de Mangle, potencial agrícola limitado.	0.8

Tabla No. 3.2: Clasificación de suelos en la cuenca del Río Paz en territorio Salvadoreño

Fuente: Plan Maestro de Desarrollo y Aprovechamiento de los Recursos Hídricos Región B (PLAMDARH), 1982

b) Clasificación del Ministerio de Agricultura de Guatemala.

No.	TIPO DE SUELO	USO POTENCIAL	% AREA
1	Suelos de altiplanicie central	Se estima en un 94.6% del suelo del lado Guatemalteco de la cuenca, con topografía bastante inclinada, apto para pastos y bosques, suele cultivarse maíz en gran parte de estas zonas.	94.6
2	Suelos del Litoral Pacifico	Representa aproximadamente un 1.7% de área, estos son en su mayoría suelos fértiles, productivos y fáciles de manejar y solo una pequeña parte de estos se considera mal drenada.	1.7
3	Clases Misceláneas de terrenos	Representan áreas donde no predomina ninguna clase particular de suelo, siendo este un 3.7% restante del total del área perteneciente a la cuenca por parte de Guatemala.	3.7

Tabla No. 3.3: Clasificación de suelos en la cuenca del Río Paz en territorio Guatemalteco

Fuente: Plan Maestro de Desarrollo y Aprovechamiento de los Recursos Hídricos Región B (PLAMDARH), 1982

3.5 USO Y COBERTURA DE SUELOS

En casi todo el territorio de la cuenca el cultivo principal lo constituyen los granos básicos, hortalizas, café, y pastizales desarrollados sobre áreas de ladera y secciones pequeñas de los valles interiores en forma combinada con bosques ralos. Como resultado de la práctica agrícola tradicional, existen muchos sectores de la cuenca, afectados por fuertes procesos erosivos; para 1981 según el Plan Maestro de Desarrollo y Aprovechamiento de los Recursos Hídricos Región B (PLAMDARH) los suelos de la cuenca estaban en un proceso de erosión medio.

En la parte alta de la cuenca, se localizan masas forestales remanentes, constituidas principalmente por especies latifoliadas, mientras que el principal cultivo permanente de la zona es el café bajo sombra. En la parte media de la cuenca existen sectores de bosque abierto, en forma combinada con pastos, en las cuales se realiza ganadería de tipo extensivo. Otras áreas de la cuenca media están dedicadas a la producción de caña de azúcar.³⁶

La cuenca baja del río Paz ha estado sometida a diversos procesos de modificación del uso del suelo y de la estructura de tenencia de la tierra, que precisan de un abordaje más profundo para entender la relación de éstos con la degradación ambiental y la mayor vulnerabilidad a los riesgos evidenciada en los últimos años³⁷.

Según el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), la cuenca del Río Paz presenta una degradación moderada, considerando que existe cierto grado de protección vegetal en las partes medias y altas (aproximadamente 29,931 ha. cubiertas de vegetación, especialmente café con sombra), pero desequilibrada por el uso de la tierra en

³⁶ Melibea Gallo y Eduardo Rodríguez (Diciembre 2010), *HUMEDALES Y MEDIOS DE VIDA EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO PAZ*, Proyecto: Gestión integrada de recursos hídricos y medios de vida en el río Paz El Salvador – Guatemala

³⁷ Ileana Gómez con colaboración de Margarita García (2002), *FORMAS DE GESTIÓN Y USO DE RECURSOS EN LA CUENCA DEL RÍO PAZ EN EL SALVADOR*, Programa Salvadoreño de Investigación Sobre Desarrollo y Medio Ambiente

cultivos anuales en las partes medias (caña de azúcar). El riesgo a las inundaciones y sequías es de moderado a alto.³⁸

3.6 CLIMA EN LA CUENCA DEL RÍO PAZ

En la zona perteneciente a la cuenca (El Salvador – Guatemala) se experimentan únicamente dos estaciones; la estación Lluviosa que abarca el periodo de Mayo a Octubre y la estación Seca en los meses de Noviembre a Abril, de estas dos estaciones destaca la estación Lluviosa dado que es altamente influenciada por la presencia de diversos fenómenos climáticos que según registros históricos la mayoría ocurren en los meses de Septiembre y Octubre.

Los registros que se tienen de fenómenos climáticos que han afectado la cuenca datan desde 1923, finalizando en 2011 con la Depresión Tropical 12E (DT-12E), estos han demostrado que la zona es altamente influenciada por este tipo de fenómenos, altas precipitaciones, inundaciones, y desprendimientos son efectos de esta influencia.

Según la clasificación de Köpen, la cuenca del Río Paz puede subdividirse en cuatro zonas, que varían en altura desde los 0 msnm hasta los 2700 msnm, con variaciones de temperatura según la altura. Para describir a detalle esta clasificación se incluye la Tabla No. 3.4, la cual presenta la zona climática según esta clasificación acompañada de una breve descripción de esta y algunos ejemplos de zonas conocidas pertenecientes a la cuenca del Río Paz que poseen estas características en El Salvador y Guatemala.

³⁸ Melibea Gallo y Eduardo Rodríguez (Diciembre 2010), *HUMEDALES Y MEDIOS DE VIDA EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO PAZ*, Proyecto: Gestión integrada de recursos hídricos y medios de vida en el río Paz El Salvador – Guatemala

ZONA CLIMÁTICA	DESCRIPCIÓN	ZONA DE EL SALVADOR	ZONA DE GUATEMALA
Zona Costera (sabana tropical caliente o tierra caliente)	Con un rango de alturas que varía entre los 0 a los 800 msnm y temperaturas entre los 24 a 28°C; esta zona comprende un 75% del total del área perteneciente a la cuenca.	Ahuachapán, Chalchuapa, Atiquizaya, San Francisco Menéndez y toda la franja costera de la zona sur de Ahuachapán por El Salvador.	Chiquimulilla, Moyuta, Pasaco, Oratorio, Conguaco, Jalpatagua, Valle Nuevo, entre otras.
Sabana Tropical calurosa (o tierra templada)	Entre los 800 a los 1200 msnm. Temperaturas entre los 20 a 22°C, constituyen la parte media alta de la cuenca tanto en El Salvador como en Guatemala.	La parte alta de las Montañas de Tacuba, La Sierra de Apaneca, parte baja de Ilimatepec Santa Ana, entre otras.	Jalpatagua, Comapa, Zapotitlan, etc.
Clima Tropical en Tierra Templada	Entre los 1200 a los 1800 msnm y rango de temperaturas desde los 16 a los 20°C, con posibles heladas en los meses de Diciembre, Enero y Febrero.	Concepción de Ataco, Apaneca, Los Naranjos, Ilimatepec Santa Ana, Cerro Chingo, etc.	Cerro las Flores, Sarruy y el Cerro Chingo, Casillas, Atescatempa, Quesada, Zapotitlan, Comapa, y Jutiapa entre otros.
Clima Tropical en Tierra Fría	Entre los 1800 a los 2700 msnm, y entre los 10 a 16°C de rango de Temperatura, se estima que es un 1% del total del área de la cuenca en ambos países.	Cono del Volcán de Santa Ana y zona montañosa de Juayua que sirve de divisoria a la cuenca.	Montañas en Jutiapa que sirven de divisoria a la cuenca, entre otras.

Tabla No. 3.4: Clasificación de Köpen para zonas climáticas de la Cuenca del Río Paz

Fuente: Plan Maestro de Desarrollo y Aprovechamiento de los Recursos Hídricos Región B (PLAMDARH) y Balance Hídrico Integrado y Dinámico de El Salvador

2005

3.7 INUNDACIONES EN LA PARTE BAJA DE LA CUENCA DEL RÍO PAZ

Existen varias problemáticas alrededor de las inundaciones en la parte baja de la cuenca del Río Paz; según diversos estudios que se han venido realizando en la cuenca, la situación actual de los recursos hídricos es resultado de un fuerte proceso de deterioro ambiental, la ausencia de procesos de educación y concienciación ambiental, y finalmente la extrema pobreza de la población que habita en las zonas pertenecientes a la misma influenciados por diversos fenómenos climáticos propios de la zona.

El Río Paz es caudaloso; y según estudiosos de la cuenca permite posibilidades de aprovechamiento como fuente potencial de generación de energía hidroeléctrica o de agua para riego, no obstante los caudales de las crecidas constituyen serios problemas de inundación principalmente para las partes bajas de la cuenca debido a las razones antes expuestas.

Desde una perspectiva más amplia, las inundaciones generadas en la parte baja de la cuenca engloban una serie de problemáticas que involucran tanto a los gobiernos de ambas repúblicas, autoridades locales, y aun a los mismos pobladores de la cuenca. Existe un manejo desorganizado del cauce, fundamentado en la derivación del cauce con la finalidad de extraer agua para riego principalmente en la parte media y baja; se sabe de algunos agricultores y productores de caña y algunos ganaderos que han desviado el cauce del río para regar cultivos y pastizales, limitando el uso del agua en zonas bajas para pobladores y también para los ecosistemas. Además algunas zonas en las subcuencas presentan problemas de sedimentación y erosión producto de la deforestación y del cambio de uso en los suelos de la cuenca. Dicha erosión está íntimamente relacionada a procesos de deforestación en territorio de Guatemala y la parte media de la cuenca en El Salvador. Sin embargo en la parte alta de la cuenca en El Salvador, los suelos poseen grandes extensiones de café y bosques favoreciendo la recarga hídrica, y en la zona media cultivos de caña de azúcar.

Otro factor importante a considerar en la problemática hidrológica en la cuenca baja del Río Paz, está dado por la explotación de arena o piedra como materiales de construcción (Ver Figura No. 3.6), generando consecuencias en el comportamiento hidrológico del río en la parte baja provocando daños y pérdidas en toda la región. La extracción de arena y

material pétreo para obras públicas o comercio de materiales se desarrolla con poco o ningún control en distintos puntos del cauce, se citan como ejemplo los puntos cerca de las comunidades de La Hachadura en El Salvador y El Salamar y Los Naranjos en Guatemala.

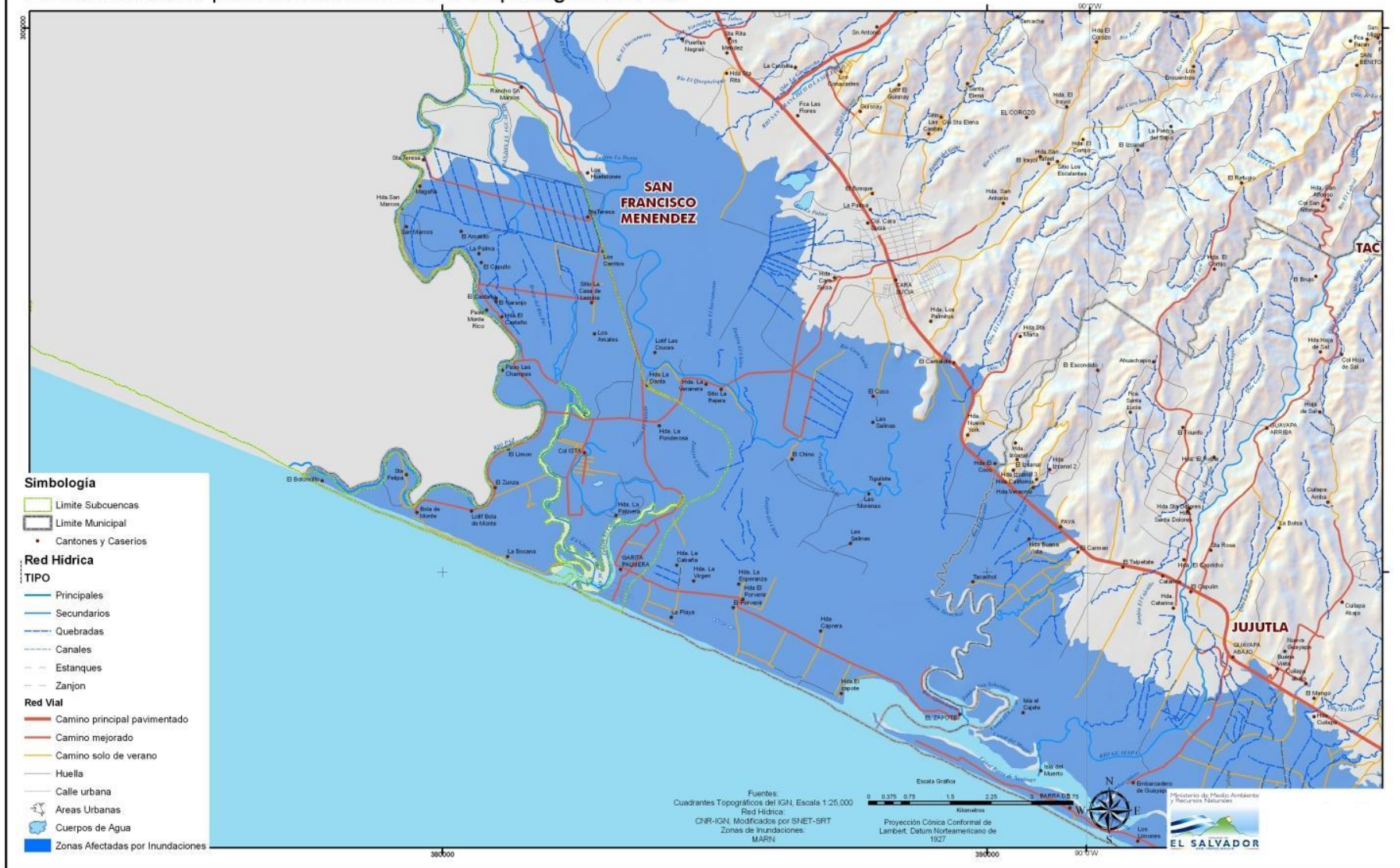


Figura No. 3.5: Río Paz cerca de frontera La Hachadura

Fuente: Propia

Cuando la cuenca se ve influenciada por las lluvias producto de fenómenos climáticos propios de la época, el río incrementa su caudal y suele ocupar sus múltiples cauces en desuso y recupera sus zonas de inundación (Ver Mapa No. 3.2); Y como ya se menciona *La escorrentía superficial presenta un comportamiento particular en cada zona de drenaje, siendo así que, la parte baja o planicies de inundación presentan un alto grado de infiltración y mínima escorrentía, pero debido a las bajas pendientes la susceptibilidad a inundación es alta.*

Zonas Afectadas por Inundaciones. Parte baja Region Río Paz



Mapa No. 3.2: Planicies de Inundación en la zona baja de Ahuachapán
Fuente: MARN 2012.

Entre las comunidades afectadas por inundaciones se pueden mencionar: Comunidad de Bola de Monte, Brisas del Mar, Colonia ISTA, El Botoncillo, El Limón, El Tamarindo, Garita Palmera, San Francisco Menéndez en El Salvador; Champas La Ceiba, Champas Monte Rico, Garita Chapina, La Barrona, La Blanca, Las Barritas, Monte Rico y Nuevo Amanecer en Guatemala (Ver Figura No. 3.6).

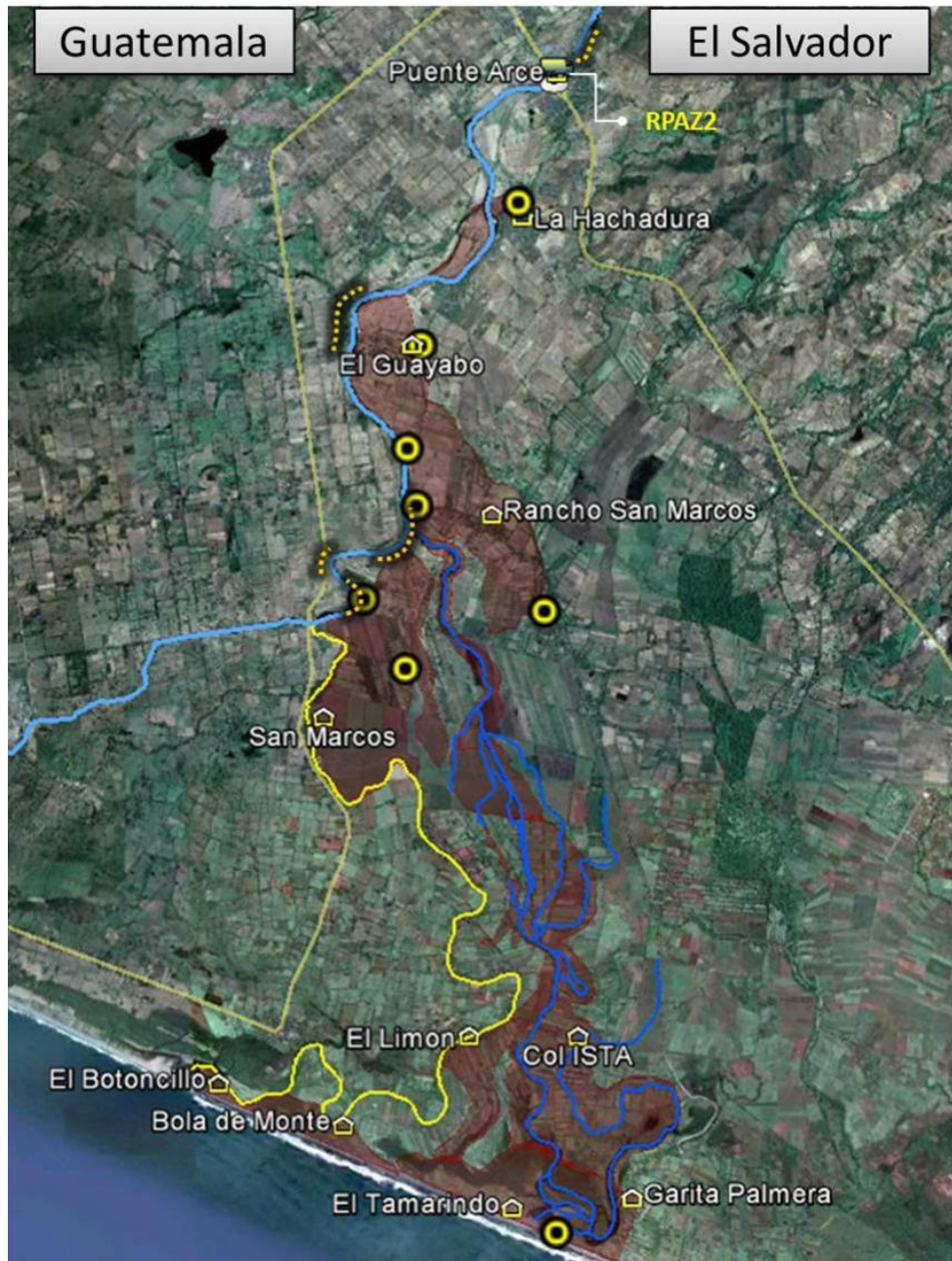


Figura No. 3.6: Zonas Inundables de la cuenca del Río Paz, El Salvador.
Fuente: MARN, Cuenca Baja del Río Paz y zonas inundables, Febrero 2012.

3.8 MANEJO DE LA CUENCA DEL RÍO PAZ

El manejo de cuencas en El Salvador es un tema de vital importancia, que ha tenido diversidad de alcances, entre los que se incluyen: proyectos de desarrollo rural, planificación territorial y conservación de recursos hídricos, cuya finalidad es asegurar la conservación del agua y mejorar la calidad de vida de la población; no obstante existen limitantes asociadas al manejo de cuencas relacionadas a la poca comprensión de la complejidad de los múltiples cambios que se dan en los territorios. Algunos avances en este ámbito los constituyen: La creación de la Ley de Riego y Avenamiento (1970) y la Ley Forestal (1973) como instrumentos importantes para la promoción de programas y proyectos de reforestación, conservación de suelo y ordenación de cuencas, los cuales garantizaban una intervención más directa del Estado sobre estos procesos. Finalmente La Ley del Medio Ambiente (1997) define que el MARN es la institucionalidad encargada de promover el manejo integrado de cuencas hidrográficas (Art. 48 LMA)

Puntualmente esta necesidad de comprender el proceso de cambio ha generado avances significativos en diversas zonas del país, siendo así que la Cuenca Binacional del Río Paz no es la excepción. Diversos estudios, investigaciones y planes por parte de varias instituciones, entre estas PNUD, FAO, MAG, MARN, y otras, se han realizado con el fin de contribuir al manejo adecuado de la cuenca del Río Paz.

Esta cuenca al igual que otras zonas de Centroamérica que son compartidas entre dos o más naciones son muy importantes para el desarrollo de las mismas en cuanto a sostenibilidad social y ambiental, por tal razón se desarrollan Planes de Manejo enfocados como una medida para responder a la vulnerabilidad ambiental de la cuenca afectada por fenómenos naturales. Dentro del plan de manejo, el desarrollo sostenible de la parte alta y media de la cuenca se considera de vital importancia para la **prevención de desastres, sobre todo en la zona baja, donde se ubican asentamientos de población altamente vulnerables** (OEA, 1998).

En consonancia al Plan de Manejo de la Cuenca del Río Paz surge el Sistema de Alerta Temprana por Inundaciones (SAT) debido a la necesidad de prevenir desastres generados por inundaciones en la cuenca baja del Paz, esto ha permitido que la institución responsable

de la implementación de los SATs, realice en unión con otras instituciones diversos estudios para entender el comportamiento de la cuenca, y contribuir a su manejo.

3.9 RED HIDROMÉTRICA DE LA CUENCA DEL RÍO PAZ

Tal como se abordó en el capítulo anterior la Red Hidrométrica de El Salvador fue creada para contribuir a fines agrícolas, sin embargo en la actualidad su enfoque esta principalmente destinado a la implementación de los Sistemas de Alerta Temprana por Inundaciones en las distintas cuencas del país.

En el caso específico de la cuenca del Río Paz; la red de estaciones comprende un total de 5 estaciones, de las cuales solamente 2 son telemétricas; El Jobo ($14^{\circ} 01.028'$ Latitud Norte y $89^{\circ} 54.437'$ Longitud Oeste, Ver Figura No. 3.7) y La Hachadura ($13^{\circ} 51'34.3''$ Latitud Norte y $90^{\circ} 05'17.1''$ Longitud Oeste) ubicadas en la ribera del Río Paz. Estas son las encargadas de verificar en periodos constantes la lluvia registrada y los niveles del río en estos dos puntos. Este periodo es usualmente de 15 min realizando transmisiones vía satélite, sin embargo en casos necesarios puede ser de 5 o 10 min; estos ocurren cuando los niveles del río varían significativamente en época lluviosa.



Figura No. 3.7: Estación Telemétrica El Jobo, Frontera Las Chinamas.
Fuente: Propia.

A lo largo y ancho de la cuenca se pueden encontrar Estaciones Automáticas que también forman parte de la red, las cuales miden la cantidad de lluvia que cae sobre el territorio cercano a estas; entre las estaciones se tienen: Las Estaciones de Apaneca, Ataco y Los Naranjos. Al igual que las estaciones telemétricas operan en intervalos de 15 min en época seca con transmisión horaria y cada 5 o 10 min en época lluviosa. Por otro lado la región de la cuenca cuenta con estaciones Convencionales con registros diarios desde hace varias décadas entre estas se pueden mencionar: Ahuachapán, Ataco El molino, Salcoatitan, Candelaria de la Frontera entre otras.

Además del sistema de estaciones, la cuenca se monitorea con un sistema de radares meteorológicos e imágenes satelitales; estos radares proveen de la información necesaria sobre la intensidad y desplazamiento de la lluvia cada 5 min en un 50% del área total de la cuenca; y las imágenes de satélite que se generan cada 30 min detallan la información de la cobertura de nubes y su desplazamiento sobre la zona.

3.10 SAT DE LA CUENCA DEL RÍO PAZ

Los Sistemas de Alerta Temprana que operan en las distintas cuencas de El Salvador han sido desarrollados e implementados a través del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), dado que existe la necesidad de responder adecuadamente ante situaciones de riesgo por inundaciones en zonas con alta vulnerabilidad, como lo son las partes bajas de las cuencas en casi todo el país. Tal como se abordó en el capítulo número dos de este documento, es responsabilidad de cada SAT, alertar de manera oportuna a los pobladores que habitan en zonas de riesgo, con la finalidad de que estos puedan actuar adecuadamente en situaciones de amenaza y así reducir daños y pérdidas.

Cada SAT en el país se ubica dentro de la clasificación establecida por el MARN, en el caso particular del SAT de la cuenca del Río Paz, obedeciendo a dicha clasificación se puede establecer que es del tipo **Nivel – Nivel** (*Nivel Observado – Nivel Pronosticado*), el cual está enfocado en la observación de los niveles registrados en la estación El Jobo, mediante los cuales se puede pronosticar el nivel que se registrará en la estación La Hachadura conociendo el tiempo de tránsito en el cual viaja la onda; este tiempo es el

máximo que tardará en llegar el nivel crítico registrado aguas arriba para registrarse aguas abajo. Según observaciones hechas por el MARN, este tipo de pronóstico es capaz de generar buenos resultados, dejando como inconveniente que el tiempo es relativamente corto para una reacción adecuada de los involucrados en las emergencias.

Para finales del año 2003 e inicios del 2004 se realizó un análisis hidrológico en la cuenca del Río Paz con el objetivo de fortalecer el SAT, dicho estudio fue iniciativa del Servicio Hidrológico Nacional; se abarcó entre otras cosas: La actualización de relación de niveles, el establecimiento de tiempos de tránsito entre las estaciones, y se analizó cualitativamente los registros de lluvia que produjeron crecidas en el río durante años anteriores, se realizó además una validación de umbrales de alerta, se analizaron los volúmenes de escurrimiento en cada estación de registro mediante la influencia de eventos ocurridos en los años 2002 y 2003, y finalmente en base a los eventos analizados, se concluyó que: *el volumen en La Hachadura es considerablemente mayor respecto al del Jobo (en el rango de 73% a 158% mayor), por lo que se deduce que en la parte media de la cuenca existe un gran aporte de escurrimiento,*³⁹ Adicionando que existe la necesidad de mejorar la transmisión de la información registrada en las estaciones pertenecientes a la cuenca.

3.10.1 TIEMPO DE TRANSITO

Uno de los problemas identificados por la DGOA en el tipo de pronóstico utilizado en la cuenca del Río Paz, está relacionado al tiempo de transito calculado entre las estaciones telemétricas: “este tiempo de transito que se obtiene, es el tiempo con el que se cuenta para aviso a la población en zonas susceptibles a inundación, específicamente a comunidades ubicadas en la parte baja de la cuenca y en las riberas del Río Paz” (Ver Figura 3.6).⁴⁰

³⁹ Ing. Adriana María Erazo Chica. (Abril 2004). ANALISIS HIDROLÓGICOS EN CUENCA DEL RIO PAZ PARA MEJORA DE SAT DE LA CUENCA, SERVICIO HIDROLOGICO NACIONAL - AREA INVESTIGACIÓN HIDROLOGICA.

⁴⁰ Ing. Roberto Cerón, (2012). *EVALUACIÓN DEL SAT DURANTE LA DEPRESIÓN TROPICAL 12*. San Salvador: DGOA.

Según la experiencia de la DGOA, se estima que el tiempo de respuesta puede variar entre 5 a 8 horas dependiendo el tipo de cuenca, el cual se considera suficiente para el manejo adecuado de la emergencia, generando así resultados satisfactorios estimados a un 95-98% de certeza, sin embargo para el Análisis Hidrológico presentado por el MARN entre 2003 y 2004 se pudo ver que los tiempos de tránsito para la Cuenca del Río Paz varían de acuerdo al tipo de crecida según se muestra en la Tabla No. 3.5

NIVEL DE CRECIDA	NIVEL EN EL JOBO	TIEMPO DE TRÁNSITO (horas)	VELOCIDAD DE CRECIDA (m/s)
Baja	Menor de 2 metros	6:00	1.58
Media	Entre 2 y 3 metros	3:53	2.44
Alta	Mayor de 3 metros	2:43	3.48
Promedio	2.38 metros	4.19	2.20

Tabla No. 3.5: Tiempos de Tránsito para diferentes tipos de crecidas en la Cuenca de Río Paz

Fuente: ANALISIS HIDROLÓGICOS EN CUENCA DEL RIO PAZ PARA MEJORA DE SAT DE LA CUENCA, SERVICIO HIDROLOGICO NACIONAL - AREA INVESTIGACIÓN HIDROLOGICA. MARN

De allí que se pueden realizar mejoras a este tipo de pronóstico mediante el uso de estaciones telemétricas aguas arriba lo cual daría más tiempo de respuesta pero podría reducir la certeza del pronóstico.

Sin embargo según el documento denominado “SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR INUNDACIONES EXPERIENCIA EN EL SALVADOR – SNET”, los sistemas de pronóstico se pueden mejorar mediante el aumento de las capacidades científicas y el uso de herramientas tecnológicas del MARN, a tal grado que mediante modelación hidrológica se pueda pronosticar la lluvia y determinar el nivel a futuro del cauce. Esto significa que el sistema de pronóstico pasaría a ser del tipo Precipitación – Escorrentía, aumentando el tiempo de respuesta y la incerteza de los resultados.

3.10.2 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN

Este tema se abordó en el capítulo No 2 de este documento, no obstante resulta necesario realizar una descripción breve del Protocolo de comunicación de la cuenca, y sus actores principales en situaciones de emergencia por inundaciones. La cuenca posee un robusto

protocolo de comunicación que involucra tanto a los técnicos de monitoreo del MARN, la Red de Observadores Locales (ROL) y las instituciones de apoyo. La ROL del SAT, cuenta con 21 observadores locales, distribuidos en las comunidades que frecuentemente se ven afectadas por inundaciones (mayormente poblaciones de la parte baja de la cuenca), en su mayoría son personas que lideran las distintas comunidades los cuales se responsabilizan del manejo y transmisión de la información recolectada hacia el Centro de Monitoreo.

Entre los involucrados en la ROL del SAT se tienen:

- Alcaldía de San Francisco Menéndez
- Bola de Monte
- Caserío El Refugio Cantón San Benito
- Comunidad Rancho San Marcos
- San Francisco Menéndez – Cara Sucia
- CEMINN-Ahuachapán
- Fuerza Naval-Hachadura
- Rio Paz Vicepresidente de ARAPEN (Junta de Agua Hachadura)
- El Guayabo⁴¹

3.11 UMBRALES DE ANÁLISIS DE ALERTA

Como ya se mencionó, existen niveles identificados en los puntos donde se ubican las estaciones Hidrométricas pertenecientes a la cuenca, que son los que dictan las diferentes etapas de alerta. A través de la conformación de la Red de monitoreo local y del levantamiento de información en campo, las comunidades ubicadas en zonas susceptibles a inundación han sido clasificadas de acuerdo a la frecuencia de sufrir inundaciones en ROJO (anual), AMARILLO (2 a 5 años) y VERDE (5 y más) Ver Mapa No. 3.3. Adicionalmente al estado de monitoreo que se tenga en el Centro de Pronóstico, el aviso también dependerá del tipo de evento.⁴²

⁴¹ MARN (Febrero 2012), *CUENCA BAJA DEL RIO PAZ Y ZONAS INUNDABLES*, DGOA.

⁴² Ing Ana Deysi López e Ing José Roberto Cerón, (Marzo 2008), *SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR INUNDACIONES EN EL RIO GRANDE DE SAN MIGUEL EL SALVADOR* - Servicio Hidrológico Nacional

Es importante destacar que existen los denominados “MAPAS SEMÁFORO” basados en la descripción presentada en el párrafo anterior, en estos mapas se presentan las áreas pertenecientes a las cuencas que poseen susceptibilidad a inundaciones, los que a su vez están basados en el comportamiento de las crecidas en la parte baja de la cuenca y la configuración topográfica de la zona; luego del último evento ocurrido (Depresión Tropical DT12-E), el MARN publicó el documento denominado “DESCRIPCIÓN Y CRONOLOGÍA DE LA DEPRESIÓN TROPICAL 12E Y SISTEMA DEPRESIONARIO SOBRE EL SALVADOR” de fecha 30 de Octubre de 2011, donde se incluye información actualizada sobre las áreas de inundación en El Salvador presentada en el Mapa No. 3.3, estimando que se inundó un 10% del territorio nacional lo cual equivale a unos 2000 km², tal como se muestra en la siguiente figura (Ver Mapa No. 3.3).



Mapa No. 3.3: Mapa de susceptibilidad de Inundaciones en El Salvador.
Fuente: Propia

Al observar el Mapa No. 3.3 se pueden identificar tres niveles de susceptibilidad que van desde Moderada, Alta, hasta Muy Alta, donde claramente se puede asociar la zona Sur del Departamento de Ahuachapán con la influencia de la DT-12E ocurrida del 10 al 19 de Octubre del año 2011, cabe destacar que este año es el segundo año con registro más alto de lluvia.

En posteriores documentos elaborados por el MARN relacionados con las inundaciones generadas en El Salvador y particularmente en la cuenca del Río Paz, se publicó la tabla actualizada de umbrales de Alerta por Inundaciones, la cual se muestra a continuación.

ESTACIÓN	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3
	MONITOREO Y PREAVISO	AVISO	ALERTA Y EMERGENCIA
	0-75%	75-90%	90-100%
El Jobo	0.00 - 3.70	3.70 - 4.50	4.50 – 5.00
La Hachadura	0.00 - 3.60	3.60 - 4.40	4.40 – 5.00

Tabla No. 3.6: Umbrales de análisis de Alerta en estaciones telemétricas de la cuenca.

Fuente: Ing. Roberto Cerón, (Centro de Pronóstico Hidrológico – Servicio Nacional de Estudios Territoriales) – Actualización 2012.

En la Tabla No. 3.6 se pueden observar claramente las tres etapas del SAT, y los umbrales de análisis de alerta de las dos estaciones pertenecientes a la cuenca, los colores representados se utilizan para establecer una diferencia entre las probabilidades de generación de inundaciones en la parte baja de la cuenca.

El color verde asociado a la etapa de Monitoreo y Preaviso generalmente se mantiene durante el verano o mientras el invierno inicia y se mantiene en condiciones normales, el color amarillo asociado a la etapa de Aviso, se activa cuando se esperan lluvias con intensidades altas o existe la probabilidad de que algún fenómeno afecte al territorio, y finalmente el color rojo asociado a la alerta y emergencia, se activa cuando se han registrado niveles cercanos a los umbrales de alerta medidos en años anteriores y que se conoce que han ocasionado inundaciones en las comunidades de la zona baja de la cuenca.

En el caso particular de la DT-12E suscitada en octubre de 2011, se declaró en estado de emergencia cuando se registraron niveles entre los 4.50 a 5.00 metros en la estación El Jobo, pese a esto el Río Paz experimentó una crecida extraordinaria de 6.5 metros, entre el 11 y el 12 de Octubre, alcanzando el nivel de la calzada del puente José Manuel Arce, en la frontera La Hachadura y provocando daños en el mismo. Esto generó inundaciones en

sitos como: Bola de Monte, Colonia ISTA, Rancho San Marcos, y comunidades ubicadas aguas abajo del Puente Arce. Posteriormente, el nivel del río Paz superó en dos ocasiones el nivel de desborde de 5 metros registrado en años anteriores: la primera en la mañana del 17 y la segunda la mañana del 19 de octubre, afectando nuevamente dichas comunidades (Ver Figura No. 3.8).⁴³



Figura No. 3.8: Nivel de desbordamiento DT-12E Estación La Hachadura
 Fuente: MARN, Cuenca Baja del Río Paz y zonas inundables, Febrero 2012.

⁴³ Ing. Roberto Cerón, (2012) *EVALUACIÓN DEL SAT DURANTE LA DEPRESIÓN TROPICAL 12E, SNET*

***CAPITULO 4: DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL
DE PARÁMETROS FÍSICOS DEL SUELO DE LA
CUENCA DEL RÍO PAZ.***

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se hace una descripción general del proceso que se siguió para determinar experimentalmente los parámetros físicos del suelo de la cuenca del río Paz, desde la Metodología que se siguió para elegir los sitios de análisis, el proceso que se siguió en campo, la determinación experimental de la Capacidad de Campo, la Infiltración, la Conductividad Hidráulica y la Textura del suelo, se realizó un análisis de los resultados obtenidos, además se hizo un análisis de la aplicabilidad del modelo HBV con estos parámetros determinados experimentalmente en las subcuenca de la cuenca del río Paz y por último se presenta un pequeño enfoque de aquellos parámetros del modelo HBV que se utilizaran en la calibración del modelo pero que no se han determinado experimentalmente.

4.2 METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE PUNTOS PARA DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE PARÁMETROS.

La cuenca del Río Paz como ya se ha mencionado en los capítulos anteriores, es una cuenca Binacional que comparten los países de Guatemala y El Salvador; de allí que para analizar los parámetros físicos del suelo que conciernen a esta investigación, entre estos: la Infiltración y Conductividad Hidráulica, la Capacidad de Campo y la Textura del suelo, se hace necesario delimitar adecuadamente el proceso de análisis para cubrir las zonas más importantes a considerar en el estudio, incluyendo zonas tanto de El Salvador como de Guatemala, considerando que la cuenca es muy extensa, que además posee una amplia variedad de características geológicas, diferentes coberturas y tipos de uso del suelo.

El punto de partida para esta delimitación son las distintas formaciones geológicas encontradas dentro del área de estudio destacando que ya han sido delimitadas por otras investigaciones realizadas en la cuenca; esto será tomado como base para determinar los puntos de ubicación de las pruebas a realizar y en base a esos tipos suelos se podrá determinar el comportamiento hidrológico de los suelos ante las precipitaciones que se generan en la zona y en el resto de la cuenca donde se encuentren características similares.

Inicialmente se ha tomado como base la caracterización geológica de la cuenca del río Paz y el análisis cualitativo y cuantitativo de la geología descrito en el documento denominado **Plan Maestro de Desarrollo y Aprovechamiento de los Recursos Hídricos (PLAMDARH): “Recursos y Demandas Potenciales de la Región B”**, el cual fue realizado en 1981 por la Dirección Ejecutiva de Proyectos de El Salvador; de manera resumida en este documento se determinó que la geología de la cuenca del río Paz presenta seis formaciones geológicas de la era Terciaria y Cuaternaria tanto en El Salvador como en Guatemala, esas formaciones Geológicas son las siguientes:

- Formación San Salvador.
- Formación Cuscatlán.
- Formación Bálsamo.
- Formación Chalatenango.
- Formación Morazán.
- Y Formación Cobán Ixcov

Estas formaciones geológicas de la cuenca son el punto de partida para definir la preselección de los puntos donde se realizaron las pruebas de campo; dado que la cuenca del río Paz en el territorio de El Salvador tiene un mayor contraste de formaciones geológicas, que la parte de Guatemala, este indicador de variabilidad incidió en la cantidad de pruebas que se tuvieron que realizar en la parte salvadoreña y en territorio guatemalteco. En ese sentido se dispuso realizar análisis en Siete sitios en la parte de El Salvador y un sitio en la parte de Guatemala; en El Salvador se analizaron los municipios de Ahuachapán, Apaneca, Tacuba, Atiquizaya, San Sebastián Salitrillo, Chalchuapa y San Francisco Menéndez; y en el caso de Guatemala se analizó la parte alta de la cuenca del río Paz, y para ello se seleccionó el Municipio de Jutiapa; de cada punto seleccionado se muestran las coordenadas de ubicación y un mapa donde se observan los 8 puntos visitados. (Ver Figura No. 4.1 y Tabla No. 4.1).

No	PUNTOS DE ANALISIS	LATITUD	LONGITUD
1	La Geotérmica, Ahuachapán	13°54'56.66"N	89°48'59.35"O
2	Cantón San Juan de Dios, Juayúa	13°52'57.84"N	89°46'18.11"O
3	Cantón El Nispero, Tacuba	13°51'49.60"N	89°54'33.93"O
4	Caserío El Copinol, Atiquizaya	13°59'00.79"N	89°46'16.77"O
5	Cantón San José, Chalchuapa	13°58'38.61"N	89°38'50.05"O
6	Cantón El Paste, Cerro Chingo, Chalchuapa	14°06'49.19"N	89°42'22.86"O
7	Hachadura, San Francisco Menéndez	13°50'54.18"N	90°05'32.15"O
8	Jutiapa, Guatemala	14°21'04.65"N	89°58'13.35"O

Tabla No. 4.1: Coordenadas de los puntos de Análisis.

Fuente: Propia



Figura No. 4.1: Puntos de Análisis.

Fuente: Fuente Propia.

4.3 PROCESO DE REALIZACIÓN DE TRABAJO DE CAMPO

El Proceso de realización del trabajo de campo fue ejecutado por etapas entre las que pueden destacar, la realizada en El Salvador y la realizada en Guatemala. Cada una de

estas será detallada a continuación respetando un orden cronológico en el cual se dio cada etapa.

4.3.1 FASE 1: EL SALVADOR

La fase 1: El Salvador, se realizó en dos etapas, en la Primera etapa se abarco un 75% del total del trabajo a realizarse en esta parte de la cuenca, esta se ejecutó en tres días consecutivos de trabajo de campo iniciando el 23 de abril y finalizando el 25 del mismo mes del año 2012; en los diferentes municipios donde se realizarían las pruebas de campo incluyendo cada municipio visitado.

El primer día de campo fue el lunes 23 de abril de 2012 donde se visitó por la mañana el municipio de Ahuachapán específicamente el territorio la Planta Geotérmica Los Ausoles conocida como La Geo, y por la tarde se visitó el Cantón San Juan de Dios que está ubicado entre los municipios de Juayúa y Apaneca.

El segundo día de campo fue el Martes 24 de Abril de 2012 donde se visitó por la mañana el Cantón El Nispero, específicamente la Cooperativa del Beneficio Las Colinas del Municipio de Tacuba, y por la Tarde se visitó el Cantón Lomas de Alarcon, caserío El Copinol del Municipio de Atiquizaya.

Finalmente, el tercer día de campo fue el Miércoles 25 de Abril de 2012 donde por la mañana se visitó la Finca Casa Blanca del cantón San José en el Municipio de Chalchuapa, y por la tarde se visitó la Finca Altamira Cantón El Paste Municipio de Chalchuapa específicamente al pie del volcán binacional El Chingo.

La Segunda Etapa abarco un 12.5% del total de trabajo a realizar en territorio Salvadoreño, y solamente fue un día de trabajo de campo, esta etapa se llevó acabo el día Viernes 13 de Julio de 2012, donde se visitó El cantón La Hachadura del Municipio San Francisco Menéndez, el lugar que se eligió fue cerca de la ribera del río Paz. (Ver figura 4.1)

4.3.2 FASE 2: GUATEMALA

La Fase 2 fue realizada en Guatemala constituyendo así el 12.5% restante del trabajo de campo realizado en la cuenca. Este fue concretado el día 23 de Octubre de 2012 en una jornada única en la que fue visitada la parte alta de la cuenca; específicamente el lugar denominado Cantón María Montaña, Municipio de Jutiapa, Guatemala. (Ver Figura 4.1) y de esta manera se finalizó el trabajo de campo realizado en esta investigación.

Es importante aclarar que en la Fase 2 a realizarse en Guatemala se contemplaron inicialmente las partes alta, media y baja de la cuenca, sin embargo esta fase no se pudo completar en su totalidad debido a que no se contó con los recursos suficientes para realizarse.

4.4 DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE PARÁMETROS

Para la determinación experimental de los parámetros, se siguieron dos procesos:

- a) Proceso de campo, donde se incluye la recolección las muestras de suelo y la realización de las pruebas de Infiltración y la Conductividad Hidráulica.
- b) Proceso de laboratorio, donde se determinó el valor de la Textura y la Capacidad de Campo de las muestras recolectadas a través de métodos científicos de laboratorio según el tipo de prueba.

Basado en el parrafo anterior se iniciara la descripcion del proceso realizado para la recoleccion de muestras para analisis de laboratorio y la realizacion de las pruebas de Infiltracion y Conductividad Hidraulica; posteriormente se abordara en orden similar las pruebas realizadas en laboratorio, las cuales son: Capacidad de Campo y Textura de Suelos.

4.4.1 INFILTRACIÓN

El proceso de determinación de la tasa de infiltración del agua en el suelo involucra dos etapas de trabajo: una como trabajo de campo y la otra como trabajo de gabinete. A continuación se abordara cada una de estas etapas.

a) Trabajo de Campo:

El trabajo en campo se realizó a través de método los Anillos Infiltrómetros (conocidos también como los Cilindros Infiltrómetros) descrito en el capítulo dos de esta investigación, los cuales son dos cilindros concéntricos de acero inoxidable, que tienen la misma altura pero su diámetro es distinto; el cilindro de diámetro mayor tiene un diámetro de 55 cm, y el cilindro menor tiene un diámetro de 30 cm, y la altura de ambos cilindros es de 25 cm. El proceso que se siguió en campo se resume en la siguiente tabla, (Ver Tabla 4.2)

IMAGEN	DESCRIPCION
	<p>Primeramente se seleccionó el sitio y dentro de los criterios de selección del sitio se tomó en cuenta que: Cada sitio seleccionado tuviera acceso a abundante agua, que fuera un suelo sin alteraciones y que además no se encontraran rocas superficiales ya que de ser así los cilindros Infiltrómetros no se podían instalar.</p>
	<p>Se colocaron los Cilindros Infiltrómetros sobre el suelo, verificando que el suelo se encontrara en condiciones naturales sin ningún cambio en el uso de suelo.</p>



Luego se instaló la tapadera metálica sobre los Cilindros Infiltrómetros para iniciar el proceso de hincado, no importando que el suelo se encontrara desnivelado, ya que conforme se fueron hincando los cilindros se verificó que los cilindros estuvieran a nivel.

Se hincaron los Cilindros Infiltrómetros por medio de la tapa metálica, la cual se golpeó por medio de un mazo y se usó un durmiente de madera, acá se verificó que la tapadera estuviera a nivel.

Se midió la profundidad a la que se enterraron en el suelo, generalmente se utilizó una profundidad de 5 cm, factor que dependió del tipo de suelo. Esto se realizó para evitar que hubiese fugas de agua al



momento de realizar la prueba.



Se protegió el cilindro interno con plástico para evitar que no se introdujera agua antes de iniciar el análisis de la infiltración, además se instaló el flotador donde se encuentra la escala métrica en centímetros, verificando esta escala.



Luego se llenó con agua el cilindro externo hasta lograr que el suelo se saturara y mantuviera con un nivel constante para iniciar el análisis de la infiltración.



Se llenó el cilindro interno rápidamente y se dio inicio al análisis de la infiltración, e inmediatamente se dio la primera lectura de llenado y 2 min después la otra lectura y así sucesivamente se fue aumentando el tiempo de análisis hasta llegar a los 65 min de análisis, tiempo que fue cronometrado adecuadamente siguiendo el formato establecido previamente (Ver Figura No.4.2).



Se llenaba rápidamente cuando el cilindro interno y el flotador se quedaba casi en seco, acá se anotaban dos lecturas: la lectura del análisis que se llevaba y una lectura de recarga y luego se seguía con el análisis, además se mantenía constante el nivel del cilindro exterior ya que no importaba el tiempo en este caso.

Tabla No. 4.2: Proceso de Campo para determinar la Infiltración del agua en el suelo.

Fuente: Propia



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

PROYECTO "DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO
HBV EN LA CUENCA DEL RÍO PAZ Y SU USO EN EL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR

PRUEBA DE INFILTRACION DE AGUA EN SUELOS.

HOJA DE DATOS DE CAMPO

Prueba N°: _____ Lugar: _____
 Fecha: _____ No. Pto. GPS: _____
 Hora: _____ Observador: _____

No.	Numero de Datos	Duracion del Periodo (Min)	Hora	Lecturas (cm)	
				Antes	Despues
1	1				
2		1			
3	2				
4		2			
5	3				
6		3			
7	4				
8		5			
9	5				
10		10			
11	6				
12		15			
13	7				
14		20			
15	8				
16		30			
17	9				
18		40			
19	10				
20		50			
21	11				
		176			

OBSERVACIONES: _____

Figura No. 4.2: Formato para prueba de Infiltración

Fuente: Propia

b) Trabajo de Gabinete:

El trabajo de gabinete consistió en revisar los datos de campo, luego con esos datos de campo revisados se procedió a determinar la tasa Infiltración Básica del suelo; para ello se hizo uso de la Hoja de Cálculo denominada “Análisis de la Infiltración del Agua en el suelo”⁴⁴, Ver Figura 4.3, en esta Hoja de Cálculo se introdujeron los datos de campo y al final se determinó la Infiltración Básica, a continuación se presenta un ejemplo de una prueba de campo empleando los cilindros infiltrómetros y procesado mediante la Hoja de Cálculo, para determinar la Infiltración Básica de La Geo Ahuachapán, el cual consta de los siguientes pasos:

1. Los datos obtenidos en campo y previamente revisados se ingresaron a la Hoja de Cálculo “Programa para el análisis de la Infiltración del agua en el suelo” (ver Figura No. 4.3), cabe mencionar que dentro de los datos de campo están los datos generales que describen el lugar donde se realizó la prueba, la hora a la que se realizaron las mediciones y las respectivas lecturas (Ver Figura 4.4)



Figura No. 4.3: Portada de la hoja de Cálculo para determinar la Infiltración del agua en el suelo.

Fuente: Propia.

⁴⁴ Ing. Agro. Msc. José Mauricio Tejada Asencio (n.d). *Programa para el análisis de la Infiltración del agua en el suelo*. San salvador: Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la UES

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR								
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS								
DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE								
CALCULO DE VELOCIDAD DE INFILTRACION (I) Y LAMINA ACUMULADA (D)								
POR: Ing. Agr. Msc. José Mauricio Tejeda								
LUGAR:	La Geo			PROYECTO	HBV-Rio Paz			
FECHA:	23 de Abril de 2012			RESPONSABLE	Felipe-Ruben			
HORA	TIEMPO (min)		LECTURAS (cm)		LAMINA (cm)		INFILTRACION (cm/h)	
	Parcial	Acumulado	antes	despues	Periodo	Acumulada	Periodo	Acumulada
11:42	0	0		161.00		0.00		-
					0.50		15.00	
11:44	2	2	161.50			0.50		15.00
					0.50		10.00	
11:47	3	5	162.00			1.00		12.00
					1.00		15.00	
11:51	4	9	163.00			2.00		13.33
					1.00		12.00	
11:56	5	14	164.00	160.00		3.00		12.86
					1.50		15.00	
12:02	6	20	161.50			4.50		13.50
					1.50		12.86	
12:09	7	27	163.00			6.00		13.33
					1.50		11.25	
12:17	8	35	164.50	160.40		7.50		12.86
					1.80		12.00	
12:26	9	44	162.20			9.30		12.68
					1.70		10.20	
12:36	10	54	163.90	160.00		11.00		12.22
					2.10		11.45	
12:47	11	65	162.10			13.10		12.09

Figura No. 4.4: Registro y resultados de la prueba de Infiltración de La Geo, Ahuachapán.

Fuente: Propia.

2. Debido a que las ecuaciones de Infiltración del agua 2.13 y 2.15, son exponenciales se necesita realizar una regresión lineal a los logaritmos a los pares de Tiempo, Infiltración (T,I) y Tiempo, Lamina (T,D). (Ver Figura No. 4.5).

Aplicación de logaritmos naturales

Tiempo	Lamina	Infilt.	Logaritmo			CALCULOS DE REGRESION
			Tiempo	Lamina	Infilt.	
0	0.00					
2	0.50	15.00	0.69	-0.69	2.71	
5	1.00	12.00	1.61	0.00	2.48	0.96 -0.04
9	2.00	13.33	2.20	0.69	2.59	-1.43 2.67
14	3.00	12.86	2.64	1.10	2.55	
20	4.50	13.50	3.00	1.50	2.60	0.24 14.37
27	6.00	13.33	3.30	1.79	2.59	
35	7.50	12.86	3.56	2.01	2.55	
44	9.30	12.68	3.78	2.23	2.54	
54	11.00	12.22	3.99	2.40	2.50	
65	13.10	12.09	4.17	2.57	2.49	

Figura No. 4.5: Aplicación de logaritmos y cálculo de parámetros de la Infiltración en La Geo, Ahuachapán.

Fuente: Propia.

- Con aplicación de la regresión lineal se determinan los parámetros de las constantes de las Ecuaciones de la Infiltración y Lámina acumulada. (Ver Figura No. 4.6)

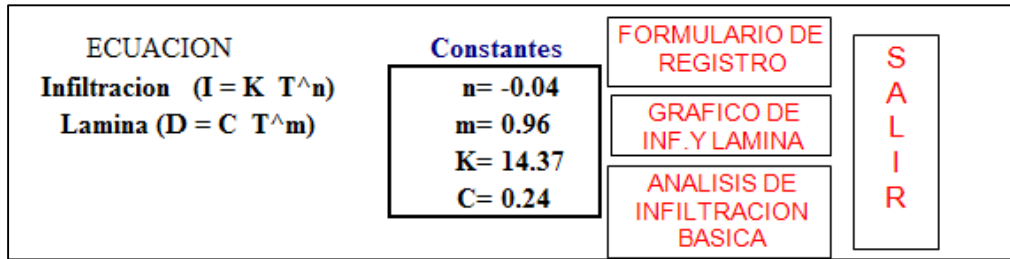


Figura No. 4.6: Parámetros de las Ecuaciones de la prueba de Infiltración de La Geo, Ahuachapán.

Fuente: Propia.

- Luego se analizó el Gráfico de Infiltración y Lámina, el cual resume el proceso de la infiltración del agua en el suelo, se puede observar que la infiltración empieza a disminuir hasta tornarse constante, es acá donde ya se puede definir la infiltración estable de equilibrio o mejor conocida como infiltración básica. (Ver Figura No. 4.7).

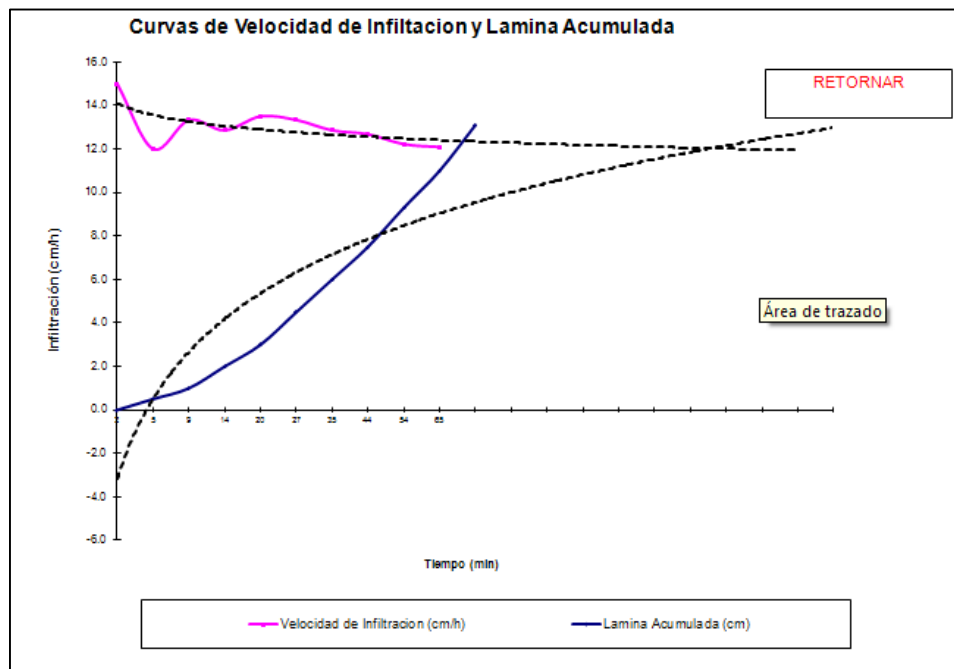


Figura No. 4.7: Gráfico de Infiltración y Lámina de Agua Acumulada de la Geo, Ahuachapán.

Fuente: Propia.

- Posteriormente se procedió al análisis de la prueba de Infiltración e Infiltración Básica. La infiltración Básica es la tasa de infiltración que permanece constante y

con pequeñas variaciones entre los valores observados, es por eso que se toma el CRITERIO que cuando la variación sea inferior al 3% se ha llegado a la Infiltración Básica. Para este ejemplo se toma el valor de 2.44% de variación en infiltración que representa una Infiltración Básica de 125.99 mm/h. (Ver Figura No. 4.8).

	A	B	C	D	E	F
1	Analisis de infiltracion básica(Ib)					
2	y Coeficientes de la ecuacion (D)					
3			COEFICIENTES		GRAFICO	
4	RETORNAR		USDA		LAMINA VRS	
5					USDA	
6	Coeficientes de la prueba			Coeficientes de USDA		
7	C=	0.24	D= C T ^{m+7}	C=	0.53	
8	m=	0.96		m=	0.62	
9	K=	14.37	I= K T ⁿ	Familia		
10	n=	-0.04		(mm/h)	1.27	
11						
12	Tiempo	Velocidad	% Variación en	Lamina acumulada (mm)		
13	acumulado	Infiltracion	infiltración	Prueba	USDA	
14	minutos	mm/h	(Inf n) e (Inf n-1)			
15						
16	1	143.71	---	7.24	7.53	
17	20	129.14	10.14	11.30	10.40	
18	40	125.99	2.44	15.40	12.22	
19	60	124.18	1.44	19.42	13.71	
20	80	122.91	1.02	23.39	15.02	
21	100	121.94	0.79	27.32	16.21	
22	120	121.15	0.65	31.23	17.31	
23	140	120.48	0.55	35.11	18.35	
24	160	119.91	0.48	38.98	19.33	
25	180	119.41	0.42	42.82	20.26	
26	200	118.96	0.38	46.65	21.16	
27	220	118.56	0.34	50.47	22.02	
28	240	118.19	0.31	54.28	22.85	
29	260	117.85	0.29	58.07	23.66	
30	280	117.54	0.26	61.85	24.44	
31	300	117.25	0.25	65.63	25.20	
32	320	116.98	0.23	69.39	25.94	
33	340	116.73	0.22	73.15	26.67	
34	360	116.49	0.20	76.90	27.38	
35	380	116.27	0.19	80.64	28.07	
36	400	116.05	0.18	84.37	28.75	
37						

Figura No. 4.8: Análisis de la prueba de infiltración e Infiltración Básica de la Geo, Ahuachapán.

Fuente: Propia.

- La otra forma de determinar la Infiltración Basica es a través de los coeficientes del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos USDA, donde se toman los valores de c y m y se ingresa a la Tabla de las Familias de infiltración (USDA 1979), horizontalmente se busca la familia de infiltración en mm/h, la cual representa la infiltración básica, a demás este método da la textura de suelo que se esta analizando dependiendo de la familia de infiltración que den los valores c y m .

(Ver Figura No. 4.9). Para este ejemplo no aplica el análisis de los coeficientes de la USDA, ya que los valores de c y m no se encuentran en ese rango.

Coeficientes de las familias de infiltracion (USDA 1979) Ecuacion de Lamina : $D = a \cdot T^b + 7$						
FAMILIA INFILTRACION		COEFICIENTES ***				TEXTURA DEL SUELO ESPERADA
pulg/h	(mm/h)	USDA		Calculados		
		a = C	b = m	K	n	
0.05	1.27	0.5334	0.618	19.78	-0.38	C
0.10	2.57	0.6198	0.661	24.58	-0.34	ARCILLOSA
0.15	3.81	0.711	0.683	29.14	-0.32	
0.20	5.08	0.7772	0.699	32.6	-0.3	CA
0.25	6.35	0.8534	0.711	36.41	-0.29	ARCILLO
0.30	7.62	0.9246	0.72	39.94	-0.28	ARENOSA
0.35	8.89	0.9957	0.729	43.55	-0.27	FC
0.40	10.16	1.064	0.736	46.99	-0.26	FRANCO
0.45	11.43	1.13	0.742	50.31	-0.26	ARCILLOSA
0.50	12.70	1.196	0.748	53.68	-0.25	
0.60	15.24	1.321	0.757	60	-0.24	F
0.70	17.78	1.443	0.766	66.32	-0.23	FRANCO
0.80	20.32	1.56	0.773	72.35	-0.23	
0.90	22.86	1.674	0.779	78.24	-0.22	
1.00	25.40	1.786	0.785	84.12	-0.22	FA
1.50	38.10	2.284	0.799	109.49	-0.2	F. ARENOSO
2.00	50.80	2.753	0.808	133.47	-0.19	A
						ARENOSO

***Seleccionar los coeficientes e introducirlos
en la hoja de analisis de infiltracion

RETORNAR

Figura No. 4.9: Coeficientes de las Familias de Infiltración USADA 1979.

Fuente: Propia.

- En el caso de que existan un análisis de la USDA y el por el Porcentaje de variación se le da mayor prioridad al Porcentaje de Variación debido a que este valor se genera en función de las ecuaciones generales de la infiltración del agua en cualquier tipo de suelo, mientras que la USDA se aplica a territorio Estadounidense y se puede tomar como referencia únicamente.

A manera de resumen, se muestra en el Anexo 2 los datos de campos y en la Tabla No. 4.3 los resultados obtenidos en la prueba de Infiltración de suelos para los 8 puntos analizados dentro de la cuenca.

No	PUNTOS DE ANALISIS	INFILTRACION (mm/h)
1	La Geotérmica, Ahuachapán	125.99
2	Cantón San Juan de Dios, Juayúa	879.00
3	Cantón El Nispero, Tacuba	399.07
4	Caserío El Copinol, Atiquizaya	1453.09*
5	Cantón San José, Chalchuapa	199.31
6	Cantón El Paste, Cerro Chingo, Chalchuapa	837.36
7	Hachadura, San Francisco Menéndez	85.28
8	Jutiapa, Guatemala	182.65

Tabla No. 4.3: Resultados de la Prueba de Infiltración

Fuente: Propia

*Respecto al valor determinado en el sitio 4 (Caserío El Copinol, Atiquizaya), se aclara que este valor obtenido es demasiado elevado y esto se debe a que el rango de tiempo destinado para la realización de la prueba fue muy corto y no se logró una tasa de infiltración constante y que por tanto se debió realizar en el sitio una o más pruebas adicionales para verificar este resultado, lo cual no fue posible.

4.4.2 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

La Conductividad Hidráulica es otro parámetro del suelo, y su determinación se realizó en dos fases, una en campo y la otra a través del trabajo de gabinete.

a) Trabajo de Campo:

La prueba en campo de la conductividad Hidráulica se realizó por medio de la utilización del Permeámetro de Guelph (o permeámetro de carga constante), el cual básicamente es un instrumento en el que se aplica una carga constante de agua al suelo y se mide la velocidad con la que esta es drenada al mismo, a continuación se detalla el proceso a seguir (Ver Tabla No. 4.4):

IMAGEN	DESCRIPCION
	<p>Se seleccionó un sitio representativo de la zona, y luego se realizó un agujero de 30 cm de profundidad con un diámetro de 6 cm, para ello se utilizó todo el equipo de herramientas de perforación que trae incluida el Permeámetro de Guelph.</p>
	<p>Una vez preparado el agujero donde se realizó la prueba, se procedió a armar el trípode que sirve de base para sostener el permeámetro.</p>
	<p>Luego de preparado el trípode se procedió al armado y ensamble de las piezas del Permeámetro, primero se conectaron el tubo de aire inferior con el tuboaire medio, luego se unieron el tubo de soporte con los recipientes interno y externo junto con la válvula de conexión, y posteriormente se instaló la escala donde dieron las cargas hidráulicas.</p>



Una vez armadas y ensambladas las piezas del Permeámetro de Guelph se procedió al montaje del permeámetro sobre el trípode de soporte, de tal manera que se deslizara suavemente hasta ajustarlo en la base del trípode y llegara hasta el fondo del agujero, procurando no golpear las paredes del agujero donde se realizó la prueba.



Con el Permeámetro instalado se procedió al llenado de los reservorios, asegurándose que se tuviera abierta la válvula y que el tubo de Mariotte estuviera abajo, con el debido cuidado de no derramar agua o basura en el agujero donde se está realizando la prueba, ya que esto podría ocasionar obstrucciones a la rejilla de salida.



Una vez llenado los reservorios del permeámetro se procedió a sellar las entradas de aire, de tal manera que se aplicara cualquier carga para estabilizar el permeámetro donde se verificaba si estaba trabajando con reservorios combinados o solo el interno, esto se realizó debido a que se buscaba un flujo constante que es la Conductividad Hidráulica.



Mientras se estabiliza el flujo del Permeámetro de Guelph, se procedió a preparar la Hoja de Campo, en la que se anotarían todos los datos de campo, así como la identificación del lugar donde se realizó la prueba, la hora y las cargas hidráulicas de 5 cm y 10 cm usadas en la misma. Ver Figura No. 4.10.



Una vez estabilizado el flujo dentro de los reservorios se procedió a efectuar la prueba de Conductividad hidráulica, que se inició con la aplicación de la carga hidráulica de 5 cm.



Se sincronizo un cronómetro y se dio la primera lectura en un tiempo cero, y luego cada dos minutos se daba una nueva lectura del nivel de los reservorios.



Después de cada dos lecturas se procedía a obtener una tasa de infiltración, es decir una diferencia de nivel entre una diferencia de tiempo entre ambas lecturas, esto se realizaba hasta que se tuviera una tasa de infiltración casi constante.



Terminada la primera carga hidráulica se paraba la prueba, luego se aplicaba la nueva carga hidráulica de 10 cm, y se iniciaba nuevamente la prueba, con el cronómetro sincronizado se daba la primera lectura en un tiempo cero y cada dos minutos se daba la nueva lectura, y nuevamente se obtenía la tasa de infiltración y se paraba la prueba hasta que se encontrara un tasa de infiltración constante.

Tabla No. 4.4: Proceso a seguir en Campo para determinar la Conductividad Hidráulica del agua en el suelo.

Fuente: Propia



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

PROYECTO "DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO HBV
EN LA CUENCA DEL RÍO PAZ Y SU USO EN EL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR

PRUEBA DE CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA EN SUELOS.

HOJA DE DATOS PERMEAMETRO DE GUELPH

Prueba N°: _____ Lugar: _____
 Fecha: _____ No. Pto. GPS: _____
 Hora: _____ Observador: _____
 Características del Suelo y estado de humedad: _____ Profundidad: _____
 Diámetro: _____
 Características del Agujero de Infiltración: _____ Reservorios utilizados durante la prueba:
 Combinados _____ Interior _____

No.	Nivel de Agua en el Agujero h ₁					Nivel de Agua en el Agujero h ₂				
	Tiempo t (min)	Δt (min)	Nivel de Agua en el reservorio h (cm)	Δh (cm)	Tasa de Infiltracion $\Delta h/\Delta t$ (cm/min)	Tiempo t (min)	Δt (min)	Nivel de Agua en el reservorio h (cm)	Δh (cm)	Tasa de Infiltracion $\Delta h/\Delta t$ (cm/min)
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										

OBSERVACIONES: _____

Figura No. 4.10: Formato para prueba de Conductividad Hidráulica

Fuente: Propia

b) **Trabajo de Gabinete:**

El trabajo de gabinete consistió en procesar todos los datos de campo, para determinar la Conductividad Hidráulica, para ello se utilizó una Hoja de Cálculo denominada “Programa para el cálculo de la Conductividad Hidraulica Kfs, utilizando el Permeámetro de Guelph”⁴⁵ (Ver Figura 4.11), a continuación se presenta un ejemplo para determinar la Conductividad Hidraulica del sitio La Geo Ahuachapán, el cual consta de los siguientes pasos:

1. Ingresar en la hoja de cálculo los datos de campo (Ver Figura No. 4.11): iniciando por los datos generales que describen el lugar donde se realizó la prueba, luego se ingresan los valores de tiempo y las diferentes lecturas de las cargas hidráulicas de 5 cm y de 10 cm. Cabe mencionar que acá no se calcula la tasa de infiltración ya que la misma hoja de cálculo realiza dicho análisis. (Ver Figura No. 4.12).

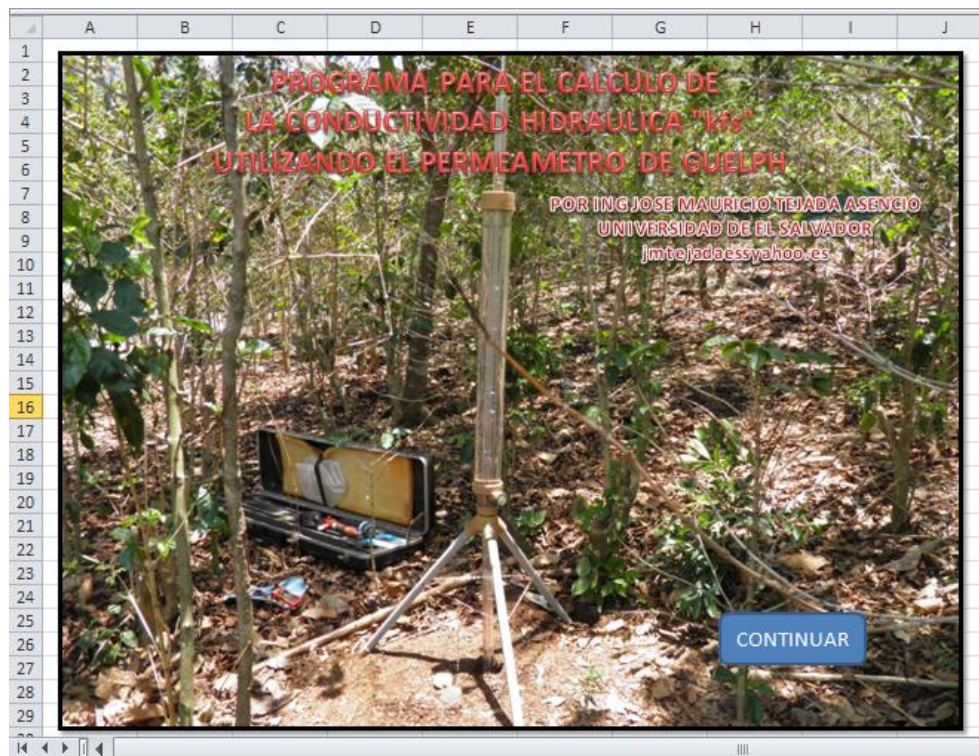


Figura No. 4.11: Portada de la hoja de Cálculo para determinar la Conductividad Hidráulica en un suelo.

Fuente: Propia.

⁴⁵ Ing. Ms. Agrónomo José Mauricio Tejada Asencio y Ing. Agrónomo Jairo Sanchez (2012). *Programa para el cálculo de la Conductividad Hidraulica Kfs, utilizando el Permeámetro de Guelph*. San Salvador: Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la UES.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L		
1	REGISTRO DE DATOS DE CAMPO													
2	PERMEAMETRO DE GUELPH													
3														
4	Lugar:	La Geo, Ahuachapan				Fecha y hora:	23/04/2012							
5	Características del suelo y estado de humedad					Zona verde, seco		FORMULARIO						
6	Características del agujero de infiltración:					Suelo franco arcilloso								
7	Profundidad:	35 cm			Diámetro:	6 cm								
8	Reservorios utilizados:		combimados		<input checked="" type="checkbox"/>	Responsables:		Prueba 1						
9			Interior		<input type="checkbox"/>	Mauricio Tejada, Jairo Sanchez, Roberto Colucho y Manuel Mendoza								
10														
11	NIVEL DEL AGUA EN EL AGUJERO h					5 cm		VEL DEL AGUA EN EL AGUJERO					10 cm	
12	TIEMPO t	Δt	Lectura	Δh	Tasa de inf.	TIEMPO t	Δt	Lectura	Δh	Tasa de inf.				
13	(min)	(min)	h(cm)	(cm)	(cm/min)	(min)	(min)	h(cm)	(cm)	(cm/min)				
14	0		3			0		25.8						
15		2		1.1	0.55		2		1.7	0.85				
16	2		10.1			2		27.5						
17		2		1.1	0.55		2		1.7	0.85				
18	4		11.2			4		29.2						
19		2		0.3	0.15		2		1.5	0.75				
20	6		11.5			6		30.7						
21		2		0.9	0.45		2		1.6	0.8				
22	8		12.4			8		32.3						
23		2		0.7	0.35		2		1.7	0.85				
24	10		13.1			10		34						
25		2		0.7	0.35		2		1.3	0.65				
26	12		13.8			12		35.3						
27		2		0.7	0.35		2		1.4	0.7				
28	14		14.5			14		36.7						
29		2		0.7	0.35		2		1.5	0.75				
30	16		15.2			16		38.2						
31							2		1.3	0.65				
32						18		39.5						
33							2		1.3	0.65				
34						20		40.8						
35														
36	Tasa de infiltración regimen permanente R1 (cm/min) =					0.35		Tasa de infiltración regimen permanente R2 (cm/min) =					0.65	
37														
38														
39	$R = \Delta h / \Delta t$													
40														

Figura No. 4.12: Hoja de Cálculo para determinar la Conductividad Hidráulica en la Geo Ahuachapán.

Fuente: Propia.

- Ingresados los valores de campo se procede al cálculo de la Conductividad Hidráulica K_{fs} , dando clic en el botón cálculo, en esta ventana se anotan las tasas de infiltración R de las dos cargas hidráulicas R_1 de los 5 cm y el valor de R_2 de la carga de 10 cm, para la Geo Ahuachapán se tiene un $R_1=0.35$ y un $R_2=0.65$. Una vez ingresados estos datos la Hoja de cálculo, ella procesa la información y determina el K_{fs} , para este ejemplo se obtiene un $K_{fs}=1.64$ cm/h. (Ver Figura No. 4.13).

	A	B	C	D	E	F
1	Calculo de la conductividad hidraulica Kfs					
2	Permeametro de Guelph					
3	Por Ing Jose Mauricio Tejada					
4					REGISTRO DE CAMPO	
5	Lugar	La Geo, Ahuachapan				
6	Fecha	23/04/2012			SALIR	
7						
8						
9		Datos	H1=5 cm	H2=10 cm		
10		R (cm/min)	0.35	0.65		
11		C =	35.22			
12						
13						
14						
15		Kfs	0.03	cm/min		
16		Kfs	1.64	cm/h		
17						
18	C= x	2.15	cte para un reservorio			
19	C= y	35.22	cte para reservorios combinador			
20	FORMULA EMPLEADA				valores comparativos de	
21						
22		$Kfs = 0.0041 * C * R2 - 0.0054 * C * R1$				

Figura No. 4.13: Cálculo de la Conductividad Hidráulica Kfs en la Geo Ahuachapán.

Fuente: Propia.

- Por último, se realiza una comparación al valor de Kfs obtenido contra los valores comparativos de la FAO de 1963 que tiene incluido la Hoja de cálculo, esto con el objetivo de Evaluar la Conductividad Hidráulica que se ha determinado por medio de la Hoja de cálculo. Para este ejemplo la Conductividad hidráulica de la Geo Ahuachapán se evalúa como una Conductividad Hidráulica LENTA debido a que se encuentra en el rango de 0.8 a 2.0 cm/h. (Ver Figura No. 4.14).

Evaluación de la Kfs según FAO (1963)			
Conductividad Hidraulica		Evaluación	
cm/hora	m/día		
0.8	0.2	Muy lenta	
0.8 – 2.0	0.2 – 0.5	Lenta	
2.0 – 6.0	0.5 – 1.4	Moderada	
6.0 – 8.0	1.4 – 1.9	Moderadamente rápida	
8.0 – 12.5	1.9 – 3.0	Rápida	
12.5	3	Muy rápida	

SALIR

Figura No. 4.14: Evaluación del Kfs en la Geo Ahuachapán respecto a los Kfs de la FAO 1963.

Fuente: Propia.

Los datos de campo se muestran en el Anexo 3 y los resultados para cada sitio analizado se presentan en la Tabla No. 4.5.

No	PUNTOS DE ANÁLISIS	CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA		EVALUACION
		cm/h	mm/h	
1	La Geotérmica, Ahuachapán	1.64	16.40	Lenta
2	Cantón San Juan de Dios, Juayúa	3.39	33.90	Moderada
3	Cantón El Nispero, Tacuba	6.05	60.50	Modernamente Rápida
4	Caserío El Copinol, Atiquizaya	11.27	112.70	Rápida
5	Cantón San José, Chalchuapa	25.81	258.10	Muy Rápida
6	Cantón El Paste, Cerro Chingo, Chalchuapa	1.91	19.10	Lenta
7	Hachadura, San Francisco Menéndez	0.64	6.40	Muy Lenta
8	Jutiapa, Guatemala	1.06	10.60	Lenta

Tabla No. 4.5: Resultados de la prueba de Conductividad Hidráulica

Fuente: Propia

4.4.3 CAPACIDAD DE CAMPO

La Capacidad de Campo al igual que la Textura del suelo, se dividió en dos procesos: uno que radicó en la recolección de la muestra en campo y el otro que consistió en la

determinación de su valor en Laboratorio; el proceso en campo es el mismo que se sigue para la textura del suelo, el cual consiste básicamente en:

- a) Buscar los sitios adecuados para extracción de muestras; estos son los que representan el tipo de suelo del lugar que se está analizando.
- b) Con una herramienta adecuada se excavaron agujeros no muy profundos, aproximadamente de unos 30 cm a 60 cm de profundidad. (Ver Figura No. 4.15).



Figura No. 4.15: Excavación para extracción de muestras de suelo

Fuente: Propia

- c) En una bolsa plástica se depositaron un aproximado de cinco libras de suelo por cada sitio visitado. (Ver Figura No. 4.16).



Figura No. 4.16: Muestras de suelo obtenida en campo

Fuente: Propia

- d) Se etiquetaron las muestras de suelo ubicando el lugar de donde se efectuó la extracción del suelo.

Los procesos de laboratorio para la determinación de la capacidad de campo y la textura, son diferentes; ya que para determinar la Capacidad de Campo de un suelo se realiza a través del Método de las Ollas de Presión; este método se describirá más adelante en este apartado. Es importante mencionar que el valor de este parámetro se determinó en el Laboratorio de Ciencias Agronómicas del Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la UES, para cada muestra de suelo recolectado en los distintos sitios de la cuenca (8 muestras analizadas en total).

El Método de las Ollas de Presión, consistió en la determinación del porcentaje de contenido de humedad de una muestra de suelo en condiciones inalteradas, el proceso que se siguió en el laboratorio es el siguiente:

- a) Se colocaron por duplicado muestras de suelo en los anillos de hule en platos de cerámica y se llenaron con suelo secado al aire y previamente tamizado por la malla de 2 mm.



Figura No. 4.17: Colocación de muestras de suelo tamizado

Fuente: Propia

b) Se saturaron las muestras de suelo con agua destilada por unas 16 a 18 horas.



Figura No. 4.18: Muestras de suelo saturadas

Fuente: Propia

c) A las muestras previamente saturadas se les aplicó presión en las Ollas de Presión con incrementos de presión cada 15 minutos, hasta llegar a la presión requerida, chequeando que el tubo de salida no tuviera ninguna burbuja de aire que representara una fuga de agua.



Figura No. 4.19: Muestras de suelo sometidas a presión

Fuente: Propia

d) Cuando las muestras dejaron salir agua por el tubo de salida, se dice que las muestras están en equilibrio, y rápidamente se transfirieron a recipientes de aluminio previamente tarados, luego se pesaron anotando sus lecturas respectivas.



Figura No. 4.20: Tubo de salida de Olla de Presión
Fuente: Propia



Figura No. 4.21: Pesado de Muestras sometidas a presión
Fuente: Propia

- e) Las muestras pesadas en los depósitos de aluminio se llevaron a la estufa para secarlas a una temperatura de 110°C durante toda la noche. Posteriormente se pesaron y anotaron los datos de suelo menos la tara para cada muestra.



Figura No. 4.22: Muestras de suelo secadas al horno

Fuente: Propia

- f) Finalmente las muestras de suelo seco se pesaron para obtener el valor del peso seco y luego aplicar la Ecuación No. 2.23 para obtener la capacidad de campo.

A manera de resumen se incluye la Tabla No. 4.6 donde se presentan los resultados obtenidos para las muestras de suelo de los sitios analizados, acá se muestran los valores de Densidad Aparente, la profundidad, Humedad Volumétrica, la Humedad Gravimétrica para la Capacidad de Campo y el Punto de Marchitez Permanente, y finalmente se incluyen los valores de F_c y PMP en términos de lámina de agua y la lámina de agua disponible.

No	PUNTOS DE ANÁLISIS	Densidad Aparente da (gr/cm ³)	Profundidad p (mm)	Humedad Volumétrica Θ_v (%)	CAPACIDAD DE CAMPO		PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE		AGUA DISPONIBLE h (mm)
					Humedad Gravimétrica Θ_g (%)	Capacidad de Campo h (mm)	Humedad Gravimétrica Θ_g (%)	Punto de Marchitez h (mm)	
1	La Geotérmica, Ahuachapán	1.42	1000	46.66	32.86	467	16.10	229	238
2	Cantón San Juan de Dios, Juayúa	1.50	1000	57.95	38.63	579	19.20	288	291
3	Cantón El Nispero, Tacuba	1.50	1000	47.40	31.6	474	15.55	233	241
4	Caserío El Copinol, Atiquizaya	1.65	1000	60.75	36.82	608	18.25	301	306
5	Cantón San José, Chalchuapa	1.65	1000	54.30	32.91	543	16.60	274	269
6	Cantón El Paste, Cerro Chingo, Chalchuapa	1.42	1000	41.65	29.33	416	14.80	210	206
7	Hachadura, San Francisco Menéndez	1.42	1000	29.72	20.93	297	10.48	149	148
8	Jutiapa, Guatemala	1.25	1000	23.75	19	238	9.00	113	125

Tabla No. 4.6: Resultados de Capacidad de Campo, Punto de Marchitez y agua disponible

Fuente: Propia

4.4.4 TEXTURA

El ultimo parámetro determinado experimentalmente es la Textura del suelo; y al igual que los anteriores ya descritos, se divide en dos procesos; el primero consiste en la extracción de muestra de suelo siguiendo los pasos abordados en la determinación de la capacidad de campo y el segundo en el análisis en laboratorio a través del método del Hidrómetro de Bouyoucos.

Previo al inicio de la descripción del proceso de laboratorio utilizado en la determinación de la textura de suelos, se presenta una fotografía de la instrumentación utilizada en el mismo: (Ver Figura No. 4.23)

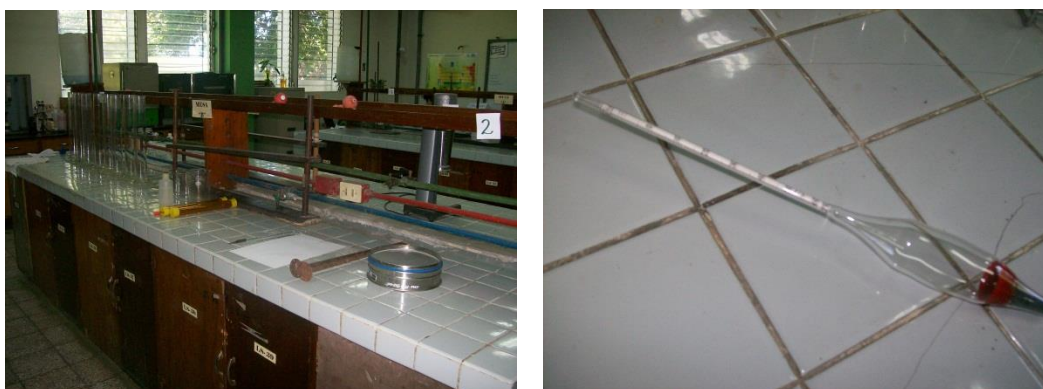



Figura No. 4.23: Instrumentación de laboratorio utilizada en la determinación de textura de suelos (Izquierda) e Hidrómetro de Bouyoucos (Derecha).

Fuente: Propia.

El proceso en laboratorio que se siguió es el siguiente:

IMAGEN	DESCRIPCION
	Inicialmente los suelos extraídos y etiquetados fueron molidos con la finalidad de eliminar cualquier grumo y roca que pudiera tener previo al tamizado. El proceso de molido se realizó con un mazo de madera tal y como se muestra en la imagen.



Luego se homogeneizo la muestra para que esta fuera representativa del tipo de suelo analizado.



El siguiente paso consistió en el tamizado mediante el uso de malla No. 200 (1 mm); acá se eliminaron las partículas gruesas y todas aquellas que no se pudieron moler adecuadamente.



Con el suelo ya tamizado se realizó la determinación de la textura de los suelos mediante el uso del método al tacto; esto se hizo con la finalidad de comparar los resultados obtenidos mediante el Método del Hidrómetro de Bouyoucos. (La comparación de estos resultados obtenidos en ambos métodos se presentará en el siguiente numeral de este capítulo)

Cabe mencionar que estos resultados preliminares sirvieron de guía para determinar la cantidad de suelo a utilizar en la aplicación del Método del Hidrómetro ya que, de encontrarse suelo arenoso se hubieran utilizado 100 gr de suelo en vez de 50gr.



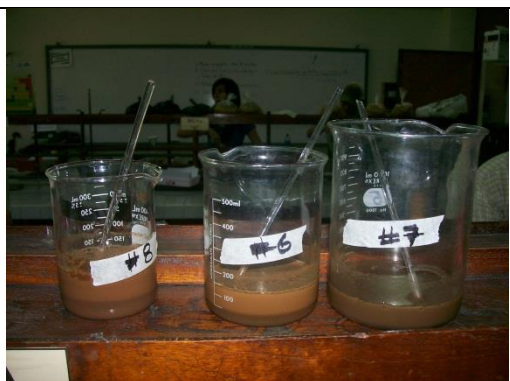
Todos los suelos analizados al realizar la textura al tacto presentaron características variables entre: francos, arcillosos y limosos por lo tanto fue necesario medir únicamente 50 gr de suelo para la realización de la prueba de textura. Primeramente se etiqueto y pesó cada una de las taras utilizadas, y se agregaron 50 gr de cada suelo en cuestión.



Ya con el suelo pesado y etiquetado, el siguiente paso es la medición de 100 ml de Hexametafosfato de sodio al 5% (Agente Dispersante) previamente preparado; el cual se verterá por completo al suelo medido para dispersar las partículas de suelo. Seguido del procedimiento de agitación manual de la muestra tal como se presenta en las imágenes.



La agitación se realizó por 5 minutos para cada muestra luego de mezclarse con el agente dispersante, dejando como resultado una mezcla totalmente homogénea.



El siguiente paso consistió en dejar en reposo cada una de las muestras sometidas a análisis al finalizar el proceso de mezclado manual. La duración del reposado de las muestras fue de 15 min.



Luego de transcurridos los 15 min de reposo se vertió cada una de las muestras en un recipiente metálico para licuar a velocidad constante, el vertido se realizó de tal manera que no se perdiera la parte sedimentada en el recipiente, para ello se roció mediante la utilización de una piseta abundante agua destilada en este proceso.



Luego se licuaron las muestras por 5 min cada una antes del segundo periodo de reposo.



Finalmente se reposó cada muestra por un periodo de 15 min antes del vertido final en la probeta donde se realizó la prueba.



Luego de transcurrido el periodo de reposo se vertió el contenido en una probeta de 1000 ml para iniciar la prueba, y al igual que en el vertido anterior se roció abundante agua destilada para garantizar que la totalidad de la muestra se conservara. Posterior a esto se agregó agua destilada para que el volumen fuese de aproximadamente la capacidad de la probeta utilizada más el volumen del

	hidrómetro.
	<p>Luego previo a la colocación del hidrómetro se agito la muestra total para dar inicio a las lecturas. Para este proceso se usó un agitador metálico.</p>
 	<p>Luego se programó el cronometro utilizado y se dio inicio a la toma de lecturas al colocar el hidrómetro dentro de la probeta. Las Lecturas efectuadas se tomaron a los 40 segundos, a los 4 minutos y a 1 y 2 horas respectivamente para cada muestra.</p> <p>Cada lectura del hidrómetro (gr/lts) fue precedida de una lectura de temperatura; dicha lectura fue utilizada en el cálculo de los porcentajes de Arena, Limo y Arcilla para cada muestra según se presenta en el ejemplo a continuación.</p>

Tabla No. 4.7: Proceso para la determinación de la textura de suelos.

Fuente: Propia

Posterior al trabajo de Laboratorio y la toma de lecturas con el hidrómetro de Bouyoucos, se calcularon los porcentajes de Arena, Limo y Arcilla para cada suelo siguiendo el proceso que se muestra a continuación: Como ejemplo se presenta el primer sitio visitado el cual está ubicado en las cercanías de la central geotérmica (La Geo) de Ahuachapán:

Inicialmente se presenta la tabla resumen de las lecturas del hidrómetro y la temperatura tomadas en el laboratorio, (Ver Tabla No. 4.10). Cabe mencionar que en dicha tabla

también se presentan los tipos de texturas determinados mediante el método del tacto, dicho resultado se utilizara para establecer comparaciones entre ambos métodos de determinación de texturas utilizados.

Para cada Muestra se tomaron 4 lecturas en diferentes periodos de tiempo iniciando a los 40 segundos la primer lectura, a los 4 minutos la segunda lectura y a 1 y 2 horas la tercera y cuarta lecturas respectivamente.

El proceso de determinación de porcentajes inicia con el cálculo del excedente de temperaturas tomando como base la temperatura de 20°C así:

$$\text{Excedente de Temperatura} = T - 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Aplicado al Ejemplo se presenta la Tabla No. 4.8:

TIEMPO DE LECTURA	LECTURA DEL HIDROMETRO	LECTURA DE TEMPERATURA	EXCEDENTE DE TEMPERATURA
(t)	(g/l)	(°C)	(°C)
40"	13.00	26.00	6.00
4'	11.00	26.40	6.40
1 h	8.00	26.50	6.50
2 h	6.10	26.50	6.50

Tabla No. 4.8: Proceso para la determinación de Excedente de temperaturas

Fuente: Propia

Esto sirvió para luego determinar el factor denominado Lectura corregida que viene dado por la expresión siguiente (Ver Tabla No. 4.9):

$$\text{Lectura Corregida} = (\text{Excedente de Temperatura} * 0.5) + \text{Lectura} - \text{Lectura de Blanco}$$

TIEMPO DE LECTURA	LECTURA DEL HIDROMETRO	LECTURA DE TEMPERATURA	EXCEDENTE DE TEMPERATURA	LECTURA DE BLANCO	LECTURA CORREGIDA
(t)	(g/l)	(°C)	(°C)	(g/l)	(g/l)
40"	13.00	26.00	6.00	6.1	9.90
4'	11.00	26.40	6.40	6.1	8.10
1 h	8.00	26.50	6.50	6.1	5.15
2 h	6.10	26.50	6.50	6.1	3.25

Tabla No. 4.9: Determinación de la lectura corregida.

Fuente: Propia

Finalmente, se calcularon los porcentajes de arena, limo y arcilla obedeciendo a las expresiones siguientes: Iniciando con el cálculo de los porcentajes de Limo más arcilla que resulta de la siguiente expresión:

$$\%_{(Limo+Arcilla)} = (Lectura\ Corregida_{40"}) * (100/50)$$

Luego se calcula el porcentaje de Arcilla que resulta de multiplicar la lectura corregida calculada a los 4 minutos por un factor de 100/50 para obtener dicho porcentaje así:

$$\%_{(Arcilla)} = (Lectura\ Corregida_{4'}) * (100/50)$$

Y por último se procede al cálculo de porcentajes de Limo y Arena mediante las expresiones siguientes:

$$\%_{(Limo)} = \%_{(Arcilla)} - \%_{(Limo+Arcilla)}$$

$$\%_{(Arena)} = 100 - \%_{(Limo+Arcilla)}$$

Los resultados obtenidos se utilizaron para ser ingresados al triangulo textural para definir la textura de la muestra de suelo analizada, determinando que para este ejemplo se trata del tipo **Franco Arenoso**. (Ver Figura No. 4.24).

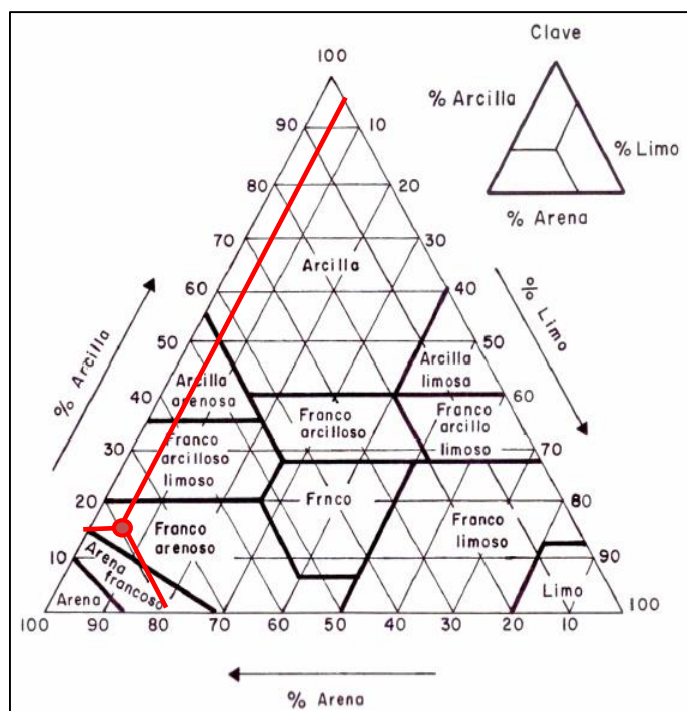


Figura No. 4.24: Triangulo textural de Bouyoucos La Geo Ahuachapán

Fuente: Propia

A manera de resumen en el Anexo 4 se presenta el cálculo de la textura del suelo para el resto de los sitios analizados y los valores en porcentaje de Arena, Limo, y arcilla para el total de las muestras analizadas se muestran en la Tabla No. 4.11 que se presenta a continuación; en la tabla se incluyen los porcentajes de Limo + Arcilla (L+c), Arcilla (C), Limo (L), arena (a), y Arcilla + Limo + Arena (C+L+a); así mismo se incluye la comparación de la textura a través del Método del Hidrómetro de Bouyoucos y el Método de Textura Manual.

N°	SITIO DE MUESTREO	40 SEGUNDOS		4 MINUTOS		1 HORA		2 HORAS		TEXTURA (METODO APROXIMADO)
		L1 (g/l)	T1 (°C)	L2 (g/l)	T2 (°C)	L3 (g/l)	T3 (°C)	L4 (g/l)	T4 (°C)	
1	La Geotérmica, Ahuachapán	13.00	26.00	11.00	26.40	8.00	26.50	6.10	26.5	Arcilloso
2	Cantón San Juan de Dios, Juayúa	33.00	26.00	31.00	26.00	24.50	26.50	22.50	26.5	Limo Arcilloso
3	Cantón El Nispero, Tacuba	23.00	26.00	18.00	26.20	12.80	26.30	11.00	26.5	Limo Arcilloso
4	Caserío El Copinol, Atiquizaya	16.00	26.10	12.50	26.20	12.00	26.30	7.60	26.6	Franco
5	Cantón San José, Chalchuapa	30.00	26.10	23.80	26.40	16.50	26.40	10.00	26.6	Limo Arcilloso
6	Cantón El Paste, Cerro Chingo, Chalchuapa	36.00	26.00	32.50	26.30	23.00	26.60	17.00	26.6	Arcillo Limoso
7	Hachadura, San Francisco Menéndez	11.00	26.00	10.00	26.10	7.20	26.60	6.90	26.5	Franco areno fino
8	Jutiapa, Guatemala	13.50	26.00	10.50	26.10	8.50	26.50	7.50	26.6	Arcillo areno limoso

Tabla No. 4.10: Lecturas tomadas del hidrómetro de Bouyoucos y Temperatura.

Fuente: Propia

N°	SITIO DE MUESTREO	PORCENTAJES					TEXTURA POR METODO DE BOUYOUCOS	TEXTURA (METODO APROXIMADO)
		L+C	C	L	a	C + L + a		
1	La Geotérmica, Ahuachapán	19.80	16.20	3.60	80.20	100.00	Franco Arenoso	Arcilloso
2	Cantón San Juan de Dios, Juayúa	59.80	55.80	4.00	40.20	100.00	Arcilla	Limo Arcilloso
3	Cantón El Nispero, Tacuba	39.80	30.00	9.80	60.20	100.00	Franco Arcilloso Limoso	Limo Arcilloso
4	Caserío El Copinol, Atiquizaya	25.90	19.00	6.90	74.10	100.00	Franco Arenoso	Franco
5	Cantón San José, Chalchuapa	53.90	41.80	12.10	46.10	100.00	Arcilla Arenosa	Limo Arcilloso
6	Cantón El Paste, Cerro Chingo, Chalchuapa	65.80	59.10	6.70	34.20	100.00	Arcilla	Arcillo Limoso
7	Hachadura, San Francisco Menéndez	15.80	13.90	1.90	84.20	100.00	Arena Francosa	Franco areno fino
8	Jutiapa, Guatemala	20.80	14.90	5.90	79.20	100.00	Franco Arenoso	Arcillo areno limoso

Tabla No. 4.11: Resultados de prueba de textura de suelos

Fuente: Propia

4.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS.

Los resultados obtenidos de las diferentes pruebas de campo de las ocho muestras del suelo de la cuenca del Río Paz, fueron analizados para verificar que los datos son congruentes y que se pueden utilizar de manera confiable para los propósitos de esta investigación.

Para ello se realizaron dos análisis importantes, el primero es la relación de la Infiltración y la Conductividad Hidráulica en zonas analizadas por otras investigaciones, y el segundo es la comparación entre la Capacidad de Campo obtenida mediante el Método de las Ollas de Presión y la obtenida mediante el Método Indirecto de Textura de suelos.

4.5.1 ANALISIS DE RESULTADOS DE INFILTRACION Y CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA

La Tasa de Infiltración en la cuenca del Río Paz se ha estudiado poco, sin embargo el estudio más completo que se ha realizado en la cuenca es el PLAMDARH, en la página 29 de dicho documento se habla acerca de la mayor Tasa de Infiltración en la cuenca con un valor del 40% que se da en las Lavas cuaternarias, es decir en la cadena volcánica de Santa Ana, Cuyanausul y la Laguna Verde como se muestra Tabla No. 4.12

Sector	Unidad Hidrogeológica	Lugares	Área (Km2)	Precipitación Anual (mm)	Tasa de Infiltración %	Volumen Infiltrado (M3)
A	Sedimentos aluviones Cuaternarios	Noreste de Chalchuapa, en planicie de Omoa y al Norte de Ahuachapán	37.88	1395	30.00	15852780.00
	Lavas y aglomerados Terciarios	Sureste de la región y al Norte del volcán Chingo	56.47	1436	5.00	4054546.00
B	Sedimentos aluviones Cuaternarios	Noreste de Chalchuapa, en planicie de Omoa y al Norte de Ahuachapán	25.56	1782	30.00	13664376.00
	Lavas Cuaternarias	Cadena Volcánica Santa-Cuyanausul-Laguna Verde	164.77	2039	40.00	134386412.00
	Piroclastos Cuaternarios	Parte central de la Región	539.86	1553	20.00	167680516.00
	Lavas y aglomerados Terciarios	Noreste de Chalchuapa, en planicie de Omoa y al Norte de Ahuachapán	104.66	1584	5.00	8289072.00
Total						343927702.00

Tabla No. 4.12: Infiltración en la cuenca del Río Paz

Fuente: PLAMDAR, Cuadro No. 16

Dónde:

Sector A. Comprende desde la Cadena Costera hasta la desembocadura del Río Paz

Sector B: Ubicada al Noreste de la Cadena Costera

Nota: Esta infiltración corresponde solo a El Salvador

En la tabla anterior se puede observar además, que en el Noreste de Chalchuapa, planicie de Omoa y al Norte de Ahuachapán se tiene una tasa de infiltración del 30%, y la tasa menor de infiltración se da al Sureste de la región y parte Norte del volcán El Chingo. En el Grafico No. 4.1 se muestran las diferentes tasas de infiltración que se determinaron en este estudio con el fin de establecer una relación entre estos y los porcentajes obtenidos del PLAMDAR.

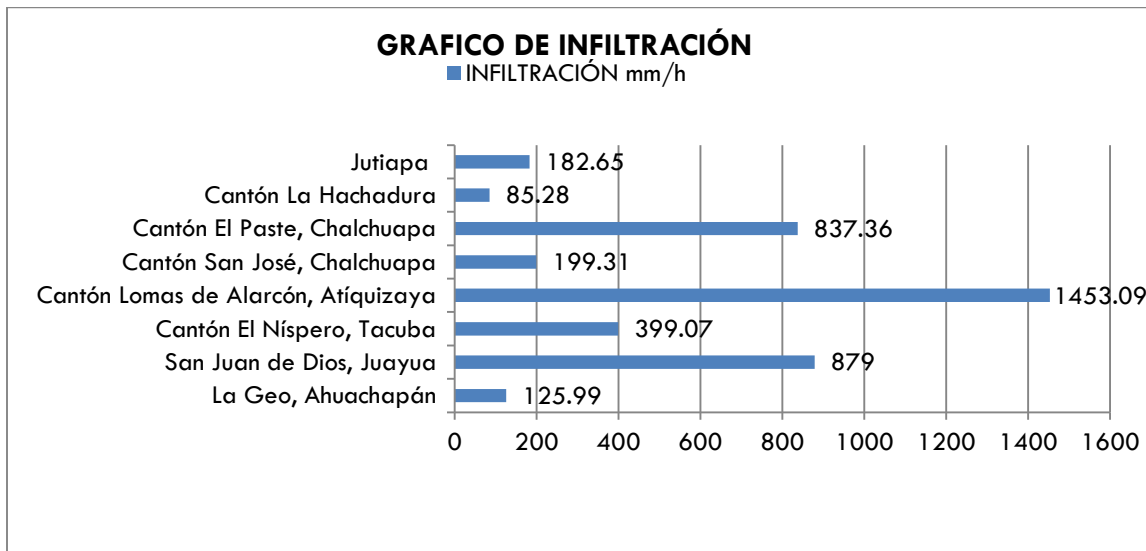


Grafico No. 4.1: Tasas de Infiltración en la cuenca del Río Paz

Fuente: Propia

Las tasas de infiltración del Grafico anterior se compararon con las tasas del PLAMDARH y se pudo establecer que efectivamente la mayor infiltración se da en la parte media alta de la cuenca, es decir la cadena volcánica y la planicie de la cuenca, de ahí que el mayor aporte de recarga en la cuenca se da en estas zonas, en el caso del valor 1453.09 mm/h es un dato que habría que realizar nuevamente la prueba ya que es demasiado alto.

En cuanto a la Conductividad Hidráulica, se observa que ha sido menos estudiada que la infiltración u otros parámetros de interés en la cuenca; pero se han realizado investigaciones que han determinado que en la parte media de la cuenca existe un gran aporte de escurrimiento⁴⁶. A partir de ese análisis se puede decir que esta aportación se ve influenciada por varios factores que permiten que el agua drene de forma

⁴⁶ Ing. Adriana María Erazo Chica. (Abril 2004). ANALISIS HIDROLÓGICOS EN CUENCA DEL RIO PAZ PARA MEJORA DE SAT DE LA CUENCA, SERVICIO HIDROLOGICO NACIONAL - AREA INVESTIGACIÓN HIDROLOGICA.

superficial y subterráneamente; la Conductividad Hidráulica como se sabe, está relacionada con la permeabilidad del suelo (Flujo Subterráneo), lo que indica que los valores mayores de este parámetro se deben generar en esta zona, en el Grafico No. 4. 2 se muestran los valores de Conductividad Hidráulica determinados en esta investigación.

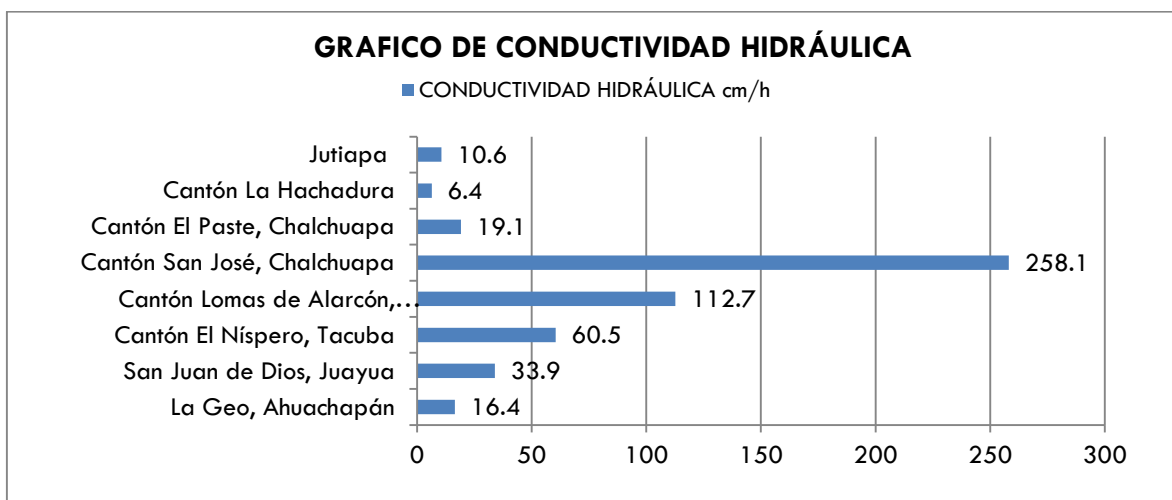


Grafico No. 4.2: Conductividad Hidráulica en la Cuenca del Río Paz

Fuente: Propia

En el gráfico anterior se puede observar que efectivamente la mayor contribución de drenaje subsuperficial se da en la parte media de la cuenca, por ende los parámetros obtenidos en campo de la Conductividad Hidráulica están en concordancia con otras investigaciones.

4.5.2 ANALISIS DE RESULTADOS DE LA CAPACIDAD DE CAMPO Y TEXTURAS

Los valores obtenidos de Capacidad de Campo (FC) por el Método de las Ollas de Presión fueron comparados con valores de tablas que se basan en la textura de suelos tal como la presentada en el capítulo dos de esta investigación, para ello se asociaron las texturas determinadas por el Método del Hidrómetro de Bouyoucos y las texturas presentadas en la Tabla No. 2. 9 obteniendo los valores de FC que se presentan a continuación (Ver Tabla No. 4.13)

No	Puntos de Análisis	Textura Metodo de Bouyoucos	Capacidad de Campo
1	La Geotérmica, Ahuachapán	Franco Arenoso	166.67
2	Cantón San Juan de Dios, Juayúa	Arcilla	333.33
3	Cantón El Nispero, Tacuba	Franco Arcilloso Limoso	316.67
4	Caserío El Copinol, Atiquizaya	Franco Arenoso	166.67
5	Cantón San José, Chalchuapa	Arcilla Arenosa	333.33
6	Cantón El Paste, Cerro Chingo, Chalchuapa	Arcilla	333.33
7	Hachadura, San Francisco Menéndez	Arena Francosa	100.00
8	Jutiapa, Guatemala	Franco Arenoso	166.67

Tabla No. 4.13: Cálculo de FC por Tabla de USDA a una profundidad de 100 cm

Fuente: Propia.

Estos valores de FC se compararon con los obtenidos en el laboratorio tal como se muestra en la Grafico No. 5.3.

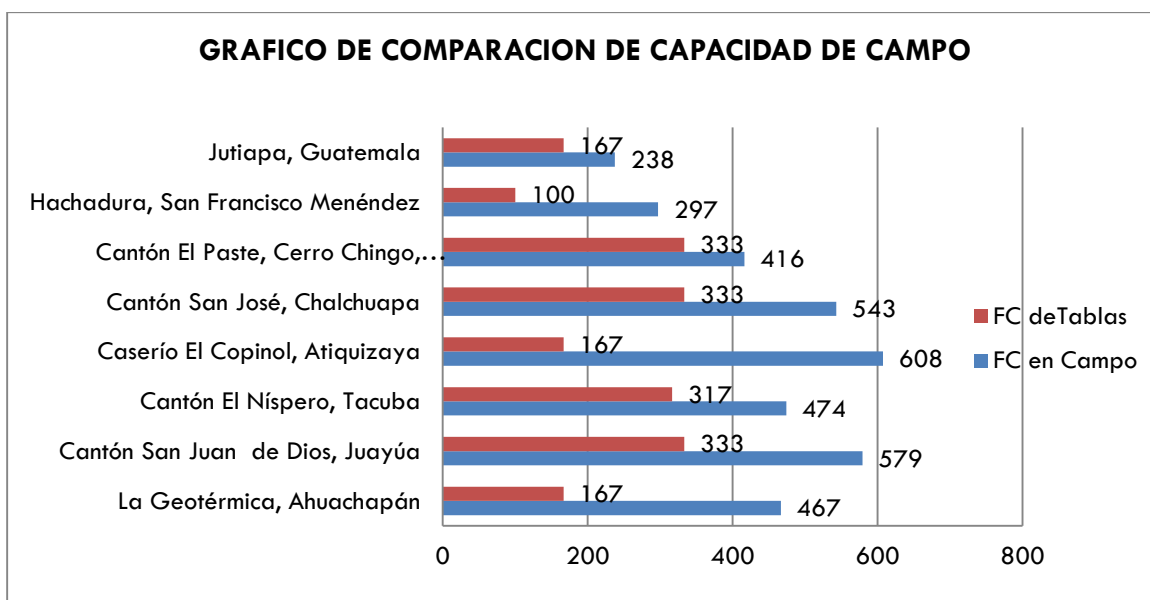


Grafico No. 4.3: Comparación de FC de Tabla USDA Vrs FC de Laboratorio.

Fuente: Propia

Luego se realizó la comparación de los valores de la Capacidad de Campo por textura y los determinados en campo y así se estableció una relación entre ambos valores que muestro el porcentaje de variación entre dichos resultados, en la Tabla No. 4. 14 se muestra esta comparación.

No	Puntos de Análisis	FC en Campo	FC de Tablas	%
1	La Geotérmica, Ahuachapán	467	167	36%
2	Cantón San Juan de Dios, Juayúa	579	333	58%
3	Cantón El Nispero, Tacuba	474	317	67%
4	Caserío El Copinol, Atiquizaya	608	167	27%
5	Cantón San José, Chalchuapa	543	333	61%
6	Cantón El Paste, Cerro Chingo, Chalchuapa	416	333	80%
7	Hachadura, San Francisco Menéndez	297	100	34%
8	Jutiapa, Guatemala	238	167	70%

Tabla No. 4.14: Comparación de FC y determinación de porcentajes de variación

Fuente: Propia

En la tabla 4.14 se puede observar claramente que la FC obtenida en laboratorio es mucho mayor que la FC de Tabla USDA, esto debido a que la FC de Tabla USDA está dada para suelos de Estados Unidos, mientras que la FC de laboratorio ha sido tomada a través de muestra de suelo propias de la cuenca que luego se determinó por el Método de la Ollas de Presión, por estas razones es que los datos de FC de laboratorio son mucho más mayores que los valores de la tabla USDA.

4.6 ANÁLISIS DE APLICABILIDAD DE PARAMETROS EXPERIMENTALES AL MODELO HBV

En este apartado se realiza un análisis de aplicabilidad de los parámetros determinados experimentalmente, para ello fue necesario conocer que parámetros utiliza el modelo HBV dentro de su estructura de funcionamiento, y se encontró que de los cuatro parámetros experimentales solamente la Capacidad de Campo forma parte directa de la Rutina de Humedad del Suelo, mientras que el resto de parámetros están incluidos implícitamente como parte del análisis del modelo, por ejemplo, la Infiltración está relacionada con la contribución a la recarga de la Rutina de Respuesta proveniente de la Rutina de Humedad del Suelo, sin embargo la infiltración no es un parámetro del modelo que se pueda calibrar directamente.

Por otra parte la Conductividad Hidráulica tampoco es un parámetro del modelo HBV que pueda influenciar en la calibración del modelo de manera directa, pero sirvió para establecer una idea general del comportamiento del drenaje subterráneo de la cuenca donde se realizaron las pruebas de campo; la Conductividad Hidráulica se ve reflejada en

el modelo con los Coeficientes Recesión K, lo cuales forman parte importante en el ajuste de las pendientes del Hidrograma de caudales, pero el dato de la Conductividad Hidráulica simplemente nos indica la permeabilidad de la cuenca de manera general esto se explicó en el numeral 4.5.1, mientras que los Coeficientes Recesión K son drenajes de salidas expresados en porcentajes.

La textura del suelo sirvió para comparar los valores de FC de laboratorio con los obtenidos en la tabla proporcionada por la USDA, dentro del modelo la textura del suelo no forma parte de la estructura del modelo, sin embargo conocer la textura del suelo dio una idea del comportamiento hidrogeológico de la cuenca.

Finalmente el parámetro experimental que servirá para la calibración del modelo es la Capacidad de Campo, la cual esta expresada en mm y representa la máxima cantidad de agua que un suelo puede retener, y dentro del modelo este parámetro forma parte importante para la Rutina de Humedad del suelo que además es el encargo de contribuir a la generación de escorrentía a partir de la lluvia precipitada.

4.7 PARÁMETROS DEL MODELO HBV NO DETERMINADOS EN CAMPO

En la sección 2.8.5 se detalló el proceso de calibración del modelo, que incluye los parámetros de Volumen, parámetros de Humedad del Suelo, parámetros de Respuesta y parámetros de Transformación, además se incluyó para cada etapa de calibración una lista de parámetros que se utilizaran para calibrar el modelo en la cuenca, en ese sentido se seleccionan un total de 18 parámetros para calibrar, Ver Tabla No. 4.15.

GRUPO DE PARÁMETROS	NOMBRE DEL PARÁMETRO	RANGO DE VALORES
Volumen	pcorr	0.5 - 1.5
	rfcf	0.90 - 1.30
	pcalt	≥ 0
Humedad del Suelo	fc	100 - 1500
	lp	0.6 - 1
	beta	1.0 - 4.0
	cflux	0.0 – 2.0
Respuesta	k0	0 - 1
	k1	0 - 1
	k2	0 - 1
	k3	0 - 1
	K4	0.001 – 0.10
	perc	0.01 – 6.00
	alfa (α)	0.50 – 1.10
	uzl0	≥ 0
	uzl1	≥ 0
	uzl2	≥ 0
Transformación	maxbaz	1 a 5

Tabla No. 4.15: Lista de Parámetros de calibración dl modelo HBV en cuenca del Río Paz

Fuente: Propia

En la tabla anterior se puede observar que de los 18 parámetros solamente 1 se ha determinado en laboratorio, el proceso a seguir con el resto de parámetros es iniciar por el valor por defecto del modelo y luego se aplicará el método de Montecarlo, es decir hacer variar un parámetro y mantener constante los demás realizando simultáneamente un adecuado proceso de evaluación de resultados.

En resumen en el modelo solo el parámetro FC será el único que no se moverá, mientras que el resto se calibrarán para la cuenca analizada; el proceso de calibración se abordará de manera detallada en el Capítulo 5.

***CAPITULO 5: PROCESO DE CALIBRACIÓN DEL
MODELO HBV EN LA CUENCA DEL RÍO PAZ.***

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo 5 se hace una descripción del proceso completo que se utilizó para la calibración del Modelo HBV, iniciado con el trabajo realizado con los Sistemas de Información Geográfica, y con la información de estaciones de lluvia utilizadas para la calibración abarcando el análisis de datos, el relleno de datos faltantes, la determinación de promedios anuales y finalmente el cálculo de los pesos de aportación que serán ingresados al sistema de modelación; luego se abordaran las estaciones utilizadas para el cálculo de la evapotranspiración potencial y posteriormente las estaciones de medición de Niveles/caudales y la obtención y aplicación de las ecuaciones de las curvas de gasto para las estaciones analizadas. Así mismo se realizara un análisis de correlación entre estaciones utilizadas en la calibración.

Finalmente se realizara una descripción detallada del ingreso de la información necesaria para la conformación del distrito de calibración, del proceso de calibración y validación de los resultados obtenidos.

5.2 SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA

Como es sabido, un Sistema de Información Geográfica (SIG) es una colección organizada de hardware, software y datos geográficos diseñados para la eficiente captura, almacenamiento, integración, actualización, modificación, análisis espacial, y despliegue de todo tipo de información geográficamente referenciada.⁴⁷

Para el análisis del caso específico de la Cuenca del Río Paz se hizo necesaria la utilización de Sistemas de Información Geográfica como parte del trabajo previo a la calibración del Modelo HBV, dado que resulta necesaria la obtención de alguna información morfométrica que se ingresara dentro del Modelo para su calibración; el proceso desarrollado se presenta a continuación.

⁴⁷ FAO (2003). Manual Curso Análisis Espacial ARCVIEW 8.2.Chile. (n.d): n.d

5.2.1 DELIMITACION DE LA CUENCA DEL RIO PAZ

La generación de la cuenca y subcuencas del Río Paz a utilizar dentro de la calibración del modelo HBV, así como la extracción de otras propiedades morfométricas de la cuenca fueron creadas con el software Arcgis, cuyo punto de partida fue la incorporación de un Modelo Digital de Elevaciones (DEM) de Centroamérica proporcionado por el MARN, el cual fue recortado de manera que se pudiera apreciar únicamente el área de la cuenca de interés y sus alrededores, lo que significa que abarca parte de la zona sur occidental de el Salvador y la parte Sur Oriental de Guatemala. (Ver Figura No. 5.1)

La delimitación abarco la generación de dos escenarios, el primero en el cual se partió la cuenca en solamente dos porciones o subcuencas y el segundo que se particionó en quince subcuencas, sin embargo se explicara primeramente el escenario con mayor cantidad de particiones por su complejidad, posteriormente se explicara el escenario más simple.

5.2.1.1 DELIMITACION DE ESCENARIO CON 15 SUBCUENCAS

La delimitación de la cuenca inicia como ya se mencionó, con el ingreso del Modelo Digital de Elevaciones (DEM) a Arcgis (Ver Figura No. 5.1), en el cual con la ayuda de la herramienta denominada Watershed Delineation que forma parte de Arcgis, se realizó el trazo de la red de ríos principales y posteriormente el trazo de la cuenca y sus respectivas subdivisiones, la cual se definió geográficamente en base a aquellos puntos que se consideran importantes para el establecimiento de los puntos de control en el SAT de la cuenca.

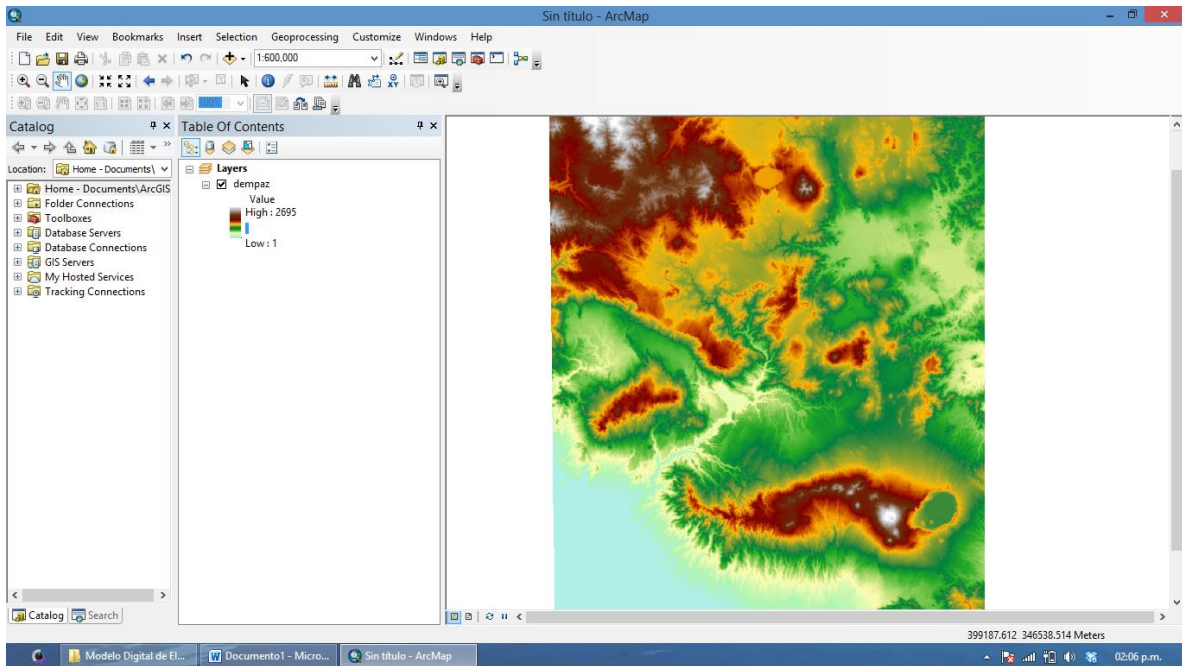
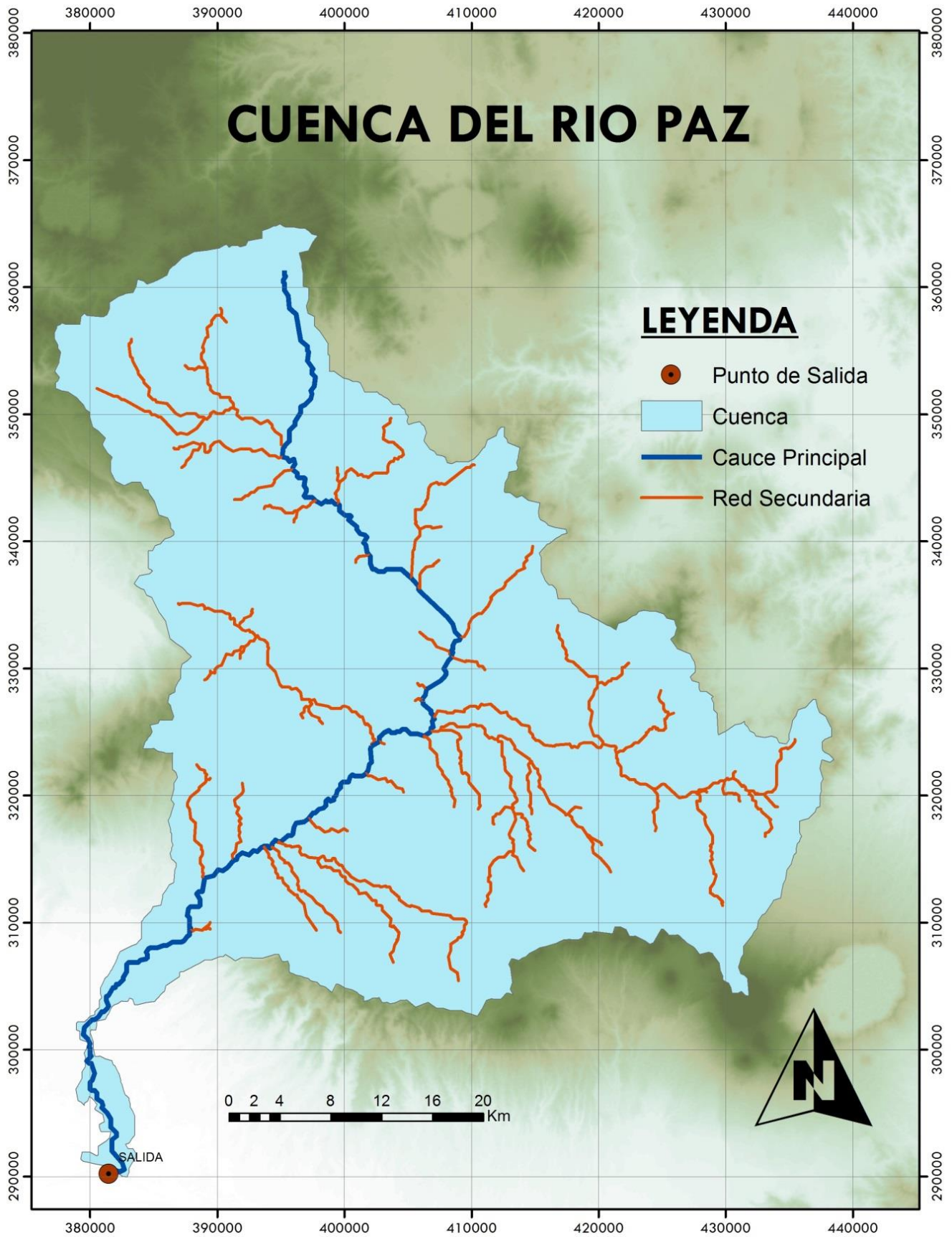


Figura No. 5.1 Captura de Pantalla del ingreso del modelo digital de elevaciones (DEM)

Fuente: Propia

Como resultado de la delimitación se obtuvo primeramente la cuenca que se presenta a continuación, cuyo punto de salida está ubicado en las coordenadas $X = 381455.6778$ y $Y = 290212.0248$ Metros. (Ver Mapa No. 5.1).

Existe una diferencia entre el Mapa presentado en el capítulo tres (Mapa No. 3.1) de este mismo documento y el Mapa No. 5.1 presentado en este capítulo, esto se debe a que el trazo que se realizó en este capítulo es para el cauce principal sin incluir los ríos de la parte baja de la cuenca que drenan hacia el mar en territorio guatemalteco, lo que hace que la parte baja de la cuenca sea mucho más angosta que la presentada en el Mapa No. 3.1 del capítulo tres.



En referencia a los puntos de control se hace necesario mencionar que el establecimiento de los mismos está directamente definido por las consideraciones siguientes:

- a. Se consideraron como puntos de control, los sitios donde se encuentran las estaciones telemétricas ubicadas dentro de la cuenca y sobre el cauce principal (Río Paz); entre estos puntos se encuentran: Estaciones Telemétricas de El Jobo y La Hachadura en el Salvador y Quezada en el departamento de Jutiapa en Guatemala.
- b. Se consideraron como puntos de control aquellos donde se generan redes de ríos que involucran varios cauces importantes en áreas representativas de la cuenca.
- c. Se tomó en consideración la zona baja de la cuenca que está cercana a la desembocadura del río principal el cual es uno de los puntos importantes dentro de la cuenca.
- d. Otros puntos que por su ubicación pueden aportar valores importantes al aumento del caudal generado en el río y que resultan apropiado para el monitoreo y la estimación de crecidas mediante el aprovechamiento de las funciones incorporadas al Modelo HBV/IHMS.

En la Figura No. 5.1 se muestra el esquema de puntos de control para las subcuencas a utilizar en la calibración del modelo HBV. Como puede apreciarse los puntos marcados en color Rojo simbolizan los puntos de ubicación de las estaciones telemétricas existentes en la cuenca, los demás puntos que se muestran en color azul son los que satisfacen las condiciones anteriormente descritas.

Como resultado de la subdivisión de la cuenca del Río Paz se obtuvieron en total 15 subcuencas, dejando aislada el área de la parte baja de la cuenca que es donde se generan las inundaciones, dejando como final de la subdivisión, el punto de control ubicado en la estación telemétrica La Hachadura; estas subcuencas se nombraron en base a los cauces principales de las mismas o por sitios conocidos los cuales forman parte de la subcuenca. (Ver Mapa No. 5.2)



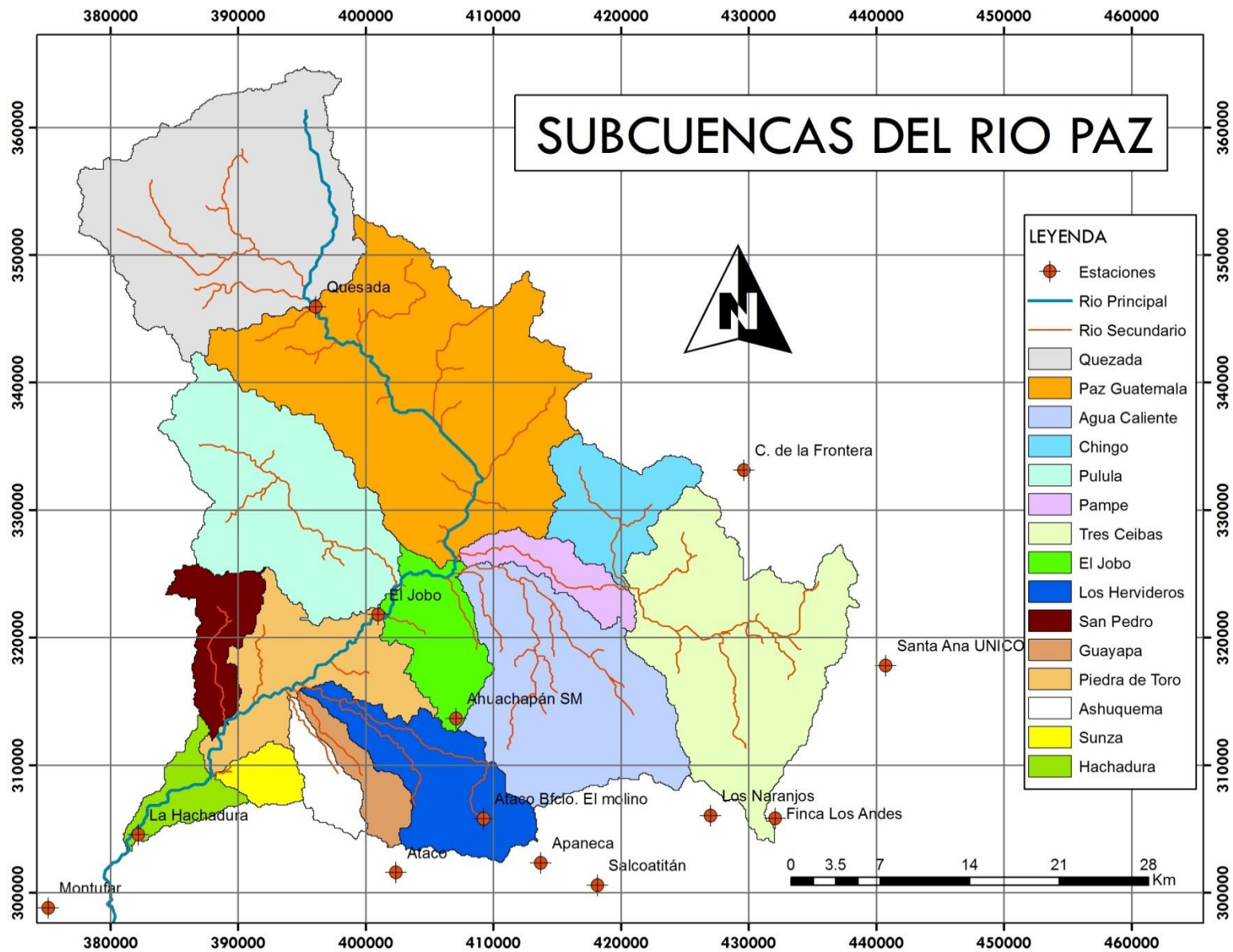
Figura No. 5.2 Esquema de ubicación de Puntos de control para generación de subcuencas del Río Paz
Fuente: Propia

Del total de 15 subcuencas las cuales pertenecen a los ríos principales de la cuenca, se pueden mencionar: Río Paz, Ashuquema, El Pampe, Pulula, San Pedro, Los Hervideros, entre otros. Además se ubicaron los puntos donde se encuentran estaciones Hidrométricas de transmisión telemétrica tal como se mencionó en los párrafos anteriores (El Jobo, La Hachadura, Quezada). (Ver Figura No. 5.2 y Mapa No. 5.2). A continuación se muestra la tabla No. 5.1 donde se presenta el listado de las subcuencas generadas y su ubicación geográfica por País. (Ver Tabla No. 5.1)

No. DE SUBCUENCA	NOMBRE DE SUBCUENCA	PAÍS DE UBICACIÓN
1	Quezada	Guatemala
2	Paz Guatemala	Guatemala
3	Agua Caliente	El Salvador
4	Chingo	El Salvador/Guatemala
5	Pulula	Guatemala
6	Pampe	El Salvador
7	Tres Ceibas	El Salvador
8	El Jobo	El Salvador/Guatemala
9	Los Hervideros	El Salvador
10	San Pedro	Guatemala
11	Guayapa	El Salvador
12	Piedra de Toro	El Salvador/Guatemala
13	Ashuquema	El Salvador
14	Sunza	El Salvador
15	Hachadura	El Salvador/Guatemala

Tabla No. 5.1: Subcuencas de la Cuenca del Río Paz ubicadas por país.

Fuente: Propia.



Mapa No. 5.2: Subcuencas del Río Paz escenario con 15 subcuencas

Fuente: Propia

5.2.1.2 DELIMITACION PARA CALIBRACION CON 2 SUBCUENCAS

Además del proceso regular de delimitación planteado en el numeral anterior, el cual incluye el uso de 15 subcuencas, se propone como parte de la metodología, el proceso de calibración usando solamente dos subcuencas, como una metodología simplificada que sirvió de apoyo para la calibración con el escenario con 15 subcuencas, de modo que los parámetros encontrados sean heredados a este proceso de calibración para las subcuencas que pertenecen a este escenario.

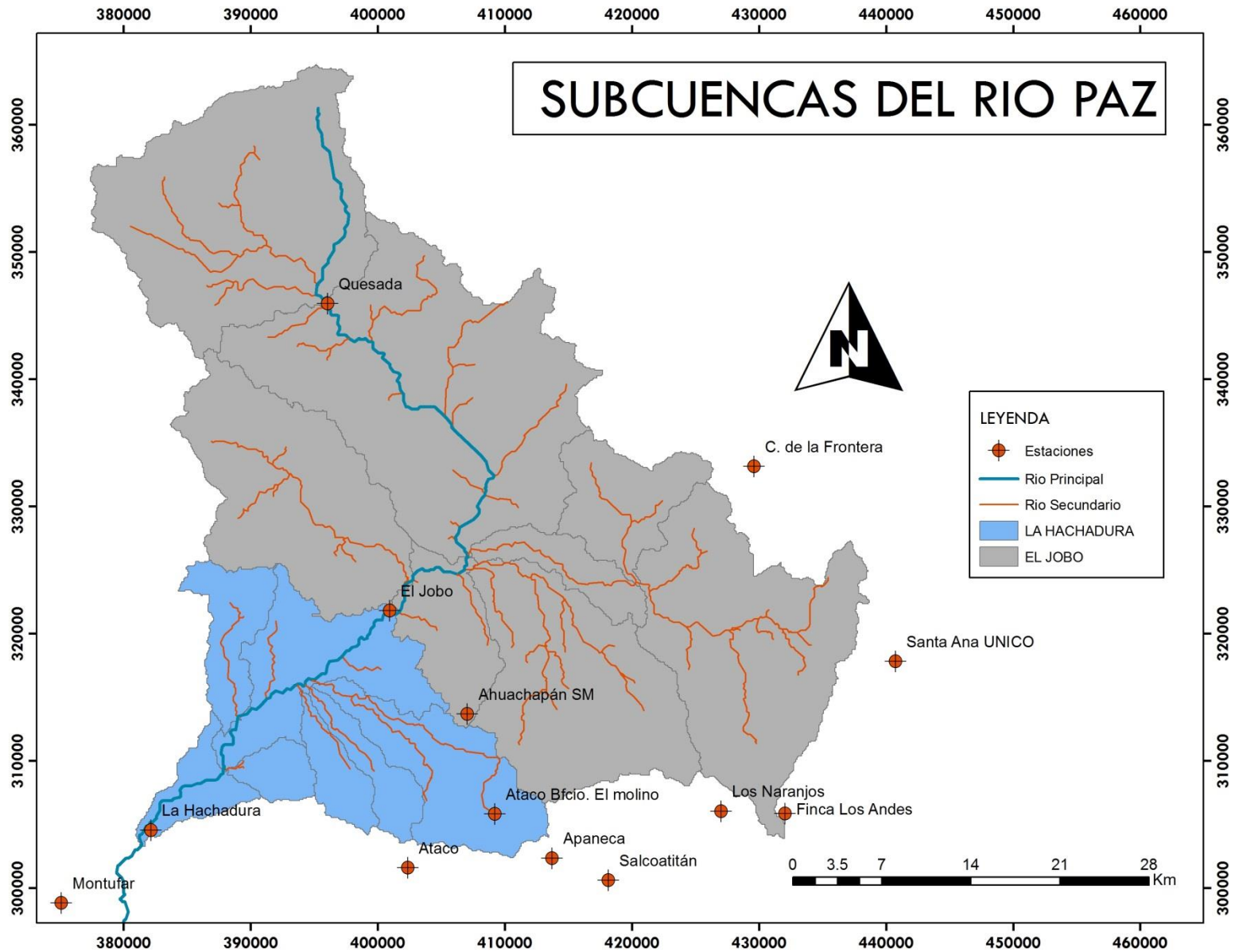
Se escogió una partición como la que se presenta en el Mapa No. 5.3 donde los puntos de control son las estaciones de transmisión El Jobo y La Hachadura ubicados en las coordenadas presentadas en la siguiente tabla: (ver Tabla No. 5.2)

ESTACION	COORD X	COORD Y
El Jobo	400974	321815
La Hachadura	381089	303456

Tabla No. 5.2: Puntos de ubicación de estaciones El Jobo y La Hachadura

Fuente: Propia.

Como resultado de la subdivisión con estos dos puntos presentados en la tabla No. 5.2 se presenta el Mapa No. 5.3 donde se delimitan las subcuencas EL JOBO y HACHADURA que sirvieron para realizar una calibración preliminar que antecede a la que incluye las 15 subcuencas mostradas en el Mapa No. 5.2



Mapa No. 5.3: Subcuencas del Río Paz escenario con 2 subcuencas

Fuente: Propia

5.2.2 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS PARA ESCENARIOS

Luego de haber definido todos los puntos de control necesarios, y de obtener las subdivisiones necesarias para la implementación del Modelo HBV en la cuenca del Río Paz, se procedió a la determinación de los parámetros morfométricos importantes para cada subcuenca con el uso de Arcgis, los cuales servirán para caracterizar cada subcuenca dentro de la modelación mediante el HBV.

Primeramente se determinaron los parámetros para las 2 subcuencas (EL JOBO Y HACHADURA), los cuales se muestran en la tabla No. 5.3

No.	SUBCUENCA	AREA (km ²)	ELEVACION (mts.)
1	EL JOBO	1638.30	815.12
2	HACHADURA	397.60	641.01

Tabla No. 5.3: Parámetros Morfométricos para escenario con 2 subcuencas

Fuente: Propia

Luego se realizó un proceso similar para la determinación de los parámetros para las 15 subcuencas; entre los parámetros principales se tienen: el área, el perímetro, la pendiente, la longitud del cauce más largo, la coordenadas de longitud y latitud del centroide de cada subcuenca, así como su elevación, y finalmente las elevaciones máxima y mínima para cada subcuenca. (Ver Tabla No. 5.4)

No. DE SUBCUENCA	NOMBRE DE SUBCUENCA	ÁREA (Ha)	ÁREA (km ²)	PERÍMETRO (mts.)	PENDIENTE (%)	LONG. CAUCE MAS LARGO (mts.)	CENTROIDE DE CADA SUBCUENCA			ELEVACIONES POR SUBCUENCA	
							LATITUD	LONGITUD	ELEVACIÓ N (mts.)	ELEVACIÓN MÍNIMA (mts.)	ELEVACIÓN MÁXIMA (mts.)
1	Quezada	32212.08	322.1	109980	19.24999	29409.3539	14.30139	-90.0315	1209	771	2094
2	Paz Guatemala	41711.76	417.1	147780	20.40318	47394.5552	14.17702	-89.9029	907	346	1435
3	Agua Caliente	21990.69	219.9	93240	12.73688	30220.4513	13.96025	-89.7751	782	337	2030
4	Chingo	7631.01	76.3	62100	19.66942	17006.3474	14.03968	-89.7387	898	553	1751
5	Pulula	21973.68	219.7	99180	16.71433	33673.9838	14.09738	-89.9885	717	309	1434
6	Pampe	4260.6	42.6	52740	19.48768	18785.0584	14.0574	-89.7941	611	349	1077
7	Tres Ceibas	26840.16	268.4	118800	11.89822	31405.3441	13.97077	-89.6539	851	550	2361
8	El Jobo	7220.34	72.2	58500	10.40553	23108.8052	13.94527	-89.8741	548	300	763
9	Los Hervideros	10750.32	107.5	77400	21.39171	31321.1915	13.89967	-89.8869	914	213	1724
10	San Pedro	5169.42	51.7	56520	20.35859	17164.5097	13.98695	-90.0347	756	151	1443
11	Guayapa	3326.67	33.3	45180	25.80291	16997.3019	13.91252	-89.9331	734	223	1406
12	Piedra de Toro	11619.45	116.2	102780	19.79379	27798.948	13.98726	-89.9601	526	90	1368
13	Ashuquema	3126.6	31.3	39060	27.0363	14498.5909	13.89576	-89.9531	756	203	1312
14	Sunza	2281.77	22.8	25740	35.91161	9482.52921	13.90085	-90.0022	610	102	1240
15	Hachadura	3478.95	34.8	46080	15.34865	16031.789	13.89616	-90.0559	191	25	623

Tabla No. 5.4: Parámetros Morfométricos para escenario con 15 Subcuencas.

Fuente: Propia.

5.3 INCORPORACION DE ESTACIONES EN LA CUENCA

Para la calibración del modelo HBV a nivel horario en la cuenca, se incorporaron:

- a) Estaciones automáticas o telemétricas que tienen un registro histórico de datos horarios de Precipitación.
- b) Estaciones Convencionales con datos de precipitación diaria.
- c) Estaciones automáticas o telemétricas que tienen un registro histórico de datos horarios de Niveles (Caudales)
- d) Estaciones convencionales con datos promedios mensuales de Evapotranspiración Potencial.

Para la conformación del registro a utilizar en la calibración se usó el registro histórico de la precipitación horaria de las estaciones telemétricas y convencionales pertenecientes a la cuenca; para El Salvador se ocuparon seis estaciones telemétricas de precipitaciones, las cuales son la base del registro y siete estaciones convencionales que sirvieron de complemento, mientras que para Guatemala se ocuparon dos estaciones telemétricas solamente que también sirvieron de complemento debido a que sus registros no están disponibles.

Es necesario aclarar que las estaciones convencionales se utilizaron para realizar correlaciones con las estaciones telemétricas y además sirvieron para determinar los pesos de aportación de las estaciones en la cuenca, estas quedaron detalladas en la modelación pero debido a que su registro es diario serán reemplazadas por una estación telemétrica con el fin de poder calibrar el modelo a nivel horario, esto significa que aunque en el modelo se incluyeron tales estaciones bajo esta modalidad, se espera que en periodos futuros se puedan incorporar sus registros históricos reales y así mejorar la calibración. (el establecimiento de las correlaciones entre estaciones se detallara más adelante en este documento).

En el caso de los datos horarios de caudales, estos fueron obtenidos tomando como base los niveles registrados por las estaciones hidrométricas, tales niveles fueron transformados en caudales a través de curvas de gasto, cabe destacar que en El Salvador se tienen dos

estaciones telemétricas que llevan este registro y que se tiene un registro de curvas de gasto con varios años de registro, mientras que para la parte guatemalteca solo se tiene una estación, sin embargo para esta estación no se ha obtenido acceso a su registro histórico por el momento, aunque en la modelación se incluyó la estación con el fin de que en el futuro se obtenga su registro histórico y así calibrar de mejor manera la parte alta de cuenca en dicha zona.

Para los datos de Evapotranspiración Potencial se utilizaron siete estaciones convencionales (seis de El Salvador y una de Guatemala) que miden la temperatura media mensual y en base a fórmulas matemáticas se obtiene la Evapotranspiración Potencial, claro que además de la temperatura media mensual se necesita de otra información tal como la elevación, la radiación solar, entre otros, el cálculo de este parámetro se explicara más adelante.

5.3.1 CODIFICACION DE ESTACIONES

Las estaciones de Precipitación y Caudal que se utilizaron para la calibración se codificaron; esta codificación obedeció a aspectos propios de la cuenca, códigos de país, código de Departamento, Codificación de estaciones usada por las instituciones encargadas de su manejo y el código por tipo de estación.

Dado que la codificación está restringida por el modelo, ya que este no acepta letras en el código de estaciones, en ese sentido fue necesario establecer un solo código numérico donde se incluyó el país donde se encontraba la estación, el departamento, el número o ID de la estación y por último el tipo de estación.

El código del país que se utilizó fue 503 para El Salvador y 502 para Guatemala, ya que la cuenca del Río Paz es compartida por estos dos países.

El código por departamento que se utilizó está basado en un código nacional y el código de Guatemala, en el caso de El Salvador los departamentos están representados en base a un código nacional Ver tabla No. 5.5, en esta tabla cada departamento está representado por una letra del abecedario y luego en la Tabla No. 5.6 se busca el valor numérico de

dicha letra. Así, por ejemplo la estación convencional Ahuachapán SM está ubicada en el departamento de Ahuachapán que se representa por la letra H y su valor numérico es 08.

En el caso de Guatemala el procedimiento es el mismo, con la diferencia que las estaciones de la parte guatemalteca de cuenca están en el departamento de Jutiapa el cual se representa por el valor numérico de 10.

CODIGO	DEPARTAMENTO
A	Santa Ana
B	Cabañas
C	Cuscatlán
G	Chalatenango
H	Ahuachapán
L	La Libertad
M	San Miguel
N	La Unión
P	La Paz
S	San Salvador
T	Sonsonate
U	Usulután
V	San Vicente
Z	Morazán

Tabla No. 5.5: Código de letras en los departamentos de El Salvador para estaciones de lluvia.

Fuente: Aplicación del Modelo HBV (Sistema Mike-11) para la calibración de cuencas hidrográficas en El Salvador, pág. 87.

CODIGO	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
VALOR NUMÉRICO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27

Tabla No. 5.6: Valor Numérico del código de letras para departamentos de El Salvador

Fuente: Propia

El número de estación o ID cambia de un país a otro, en el caso de El Salvador está asignado por el MARN para cada estación convencional o telemétrica, así para la estación convencional Ahuachapán SM se tiene el código de 08.

Para Guatemala los ID están dados por el INSIVUMEH, y los códigos numéricos son muy largos, por lo que opto por cambiarlo utilizando un número correlativo desde 01 al 03, ya que solo son tres estaciones (dos de lluvia y una de nivel), por lo tanto dichas estaciones tendrá código de país, el valor numérico de Jutiapa, un numero correlativo y finalmente un código por el tipo de estación.

Finalmente el código numérico lleva el tipo de estación si esta es convencional se utiliza el 2, si la estación es telemétrica la terminación es 1, así para la estación convencional Ahuachapán SM su terminación será 2, el código numérico final para esta estación es 50308082, en la Tabla No. 5.7 se muestra de manera resumida el código que se introduce en el modelo HBV para cada estación de lluvia, como también sus coordenadas planas y la elevación a la que se encuentran dichas estaciones.

PAIS	REGISTRO	TIPO	ID	CODIGO	NOMBRE	DEPARTAMENTO	COORD X	COORD Y	ALTITUD (msnm)
El Salvador	AUT	PLV	53	50308531	Ataco	Ahuachapán	402378	301598	1120
El Salvador	CON	PLV	23	50308232	Ataco Bfcio. EL Molino	Ahuachapán	409239	305819	1231
El Salvador	CON	PLV	H14	50308142	La Hachadura	Ahuachapán	382175	304558	38
El Salvador	CON	PLV	H8	50308082	Ahuachapán SM	Ahuachapán	407070	313676	727
El Salvador	AUT	PLV	72	50308721	Apaneca	Ahuachapán	413729	302350	1809
El Salvador	AUT	HID	21	50308211	Hachadura	Ahuachapán	381089	303456	31
El Salvador	AUT	HID	20	50308201	El Jobo	Ahuachapán	400974	321815	433
El Salvador	CON	PLV	A27	50301272	Candelaria de la Frontera	Santa Ana	429635	333150	728
El Salvador	AUT	MET	33	50301331	Santa Ana	Santa Ana	440707	317910	658
El Salvador	CON	PLV	A18	50301182	Finca Los Andes	Santa Ana	432083	305854	1780
El Salvador	CON	PLV	A37	50301372	Santa Ana UNICO	Santa Ana	440758	317818	657
El Salvador	CON	PLV	T24	50321242	Los Naranjos	Sonsonate	427039	306052	1446
El Salvador	AUT	PLV	58	50321581	Los Naranjos	Sonsonate	427115	306196	1452
El Salvador	CON	PLV	T21	50321212	Salcoatitán	Sonsonate	418164	300608	1058
Guatemala	AUT	HID	F2359514	50210011	Quesada	Jutiapa	396093	345941	795
Guatemala	AUT	MET	F2364472	50210021	Montufar	Jutiapa	375121	298828	12

Tabla No. 5.7: Estaciones de Precipitación utilizadas en el modelo HBV.

Fuente: Propia

Para los caudales se utilizó solamente tres estaciones telemétricas y el código para ellas es semejante al de lluvia, solamente cambia el último dígito el cual representa al caudal y es de terminación 3, de manera resumida se presenta en la siguiente Tabla No. 5.8.

PAIS	REGISTRO	TIPO	ID	CODIGO	NOMBRE	DEPARTAMENTO	COORD X	COORD Y	ALTITUD (msnm)
El Salvador	AUT	HID	20	50308203	El Jobo_q	Ahuachapán	400974	321815	433
El Salvador	AUT	HID	21	50308213	Hachadura_q	Ahuachapán	381089	303456	31
Guatemala	AUT	HID	F2359514	50210013	Quesada_q	Jutiapa	396093	345941	795

Tabla No. 5.8: Estaciones de Caudal utilizadas en el modelo HBV.

Fuente: Propia

El código para las estaciones de Evapotranspiración Potencial el proceso fue distinto, simplemente se tomó el código de país y se siguió con un número correlativo tanto para El Salvador como para Guatemala, en la Tabla No. 5.9 se muestra el código de dichas estaciones.

PAIS	REGISTRO	TIPO	ID	CODIGO	NOMBRE	DEPARTAMENTO	COORD X	COORD Y	ALTITUD (msnm)
El Salvador	CON	PLV	H8	5031	Ahuachapán SM	Ahuachapán	407070	313676	727
El Salvador	CON	PLV	A37	5032	Santa Ana UNICO	Santa Ana	440758	317818	657
El Salvador	CON	PLV	A27	5033	Candelaria de la Frontera	Santa Ana	429635	333150	728
El Salvador	CON	PLV	T24	5034	Los Naranjos	Sonsonate	427039	306052	1446
El Salvador	CON	PLV	H14	5035	La Hachadura	Ahuachapán	382175	304558	38
El Salvador	CON	PLV	A18	5036	Finca Los Andes	Santa Ana	432083	305854	1780
Guatemala	AUT	HID	F2359514	5021	Quesada	Jutiapa	396093	345941	795

Tabla No. 5.9: Estaciones de Evapotranspiración Potencial utilizadas en el modelo HBV.

Fuente: Propia

5.4 PRECIPITACIÓN

Uno de los datos más importantes del modelo es la precipitación, por lo cual fue necesario establecer un periodo de registro donde se posean la menor cantidad de datos faltantes y que además se incluyan eventos que hayan inundado la parte baja de la cuenca, ya que el modelo será calibrado a nivel horario con el fin de utilizarse el SAT por Inundaciones de la cuenca del Río Paz.

El periodo que se seleccionó fue a partir del funcionamiento de las estaciones telemétricas de El Jobo y La Hachadura, las cuales empezaron a funcionar a partir del 6 de Noviembre de 2002 a las 00:00 horas, y finaliza hasta el 01 de Enero de 2013 para el periodo utilizado en esta investigación, es importante aclarar que la estación telemétrica de Santa Ana tiene datos más antiguos, sin embargo se utilizó el periodo anterior para homogeneizar los datos a partir del periodo antes mencionado, y como se verá más adelante los periodos de calibración y condiciones iniciales del modelo serán a partir del año 2003, ya que a partir de este año los registros están completos en las estaciones telemétricas antes mencionadas.

En el caso de las estaciones convencionales se tienen registros mucho más antiguos pero con el fin de homogeneizar las series de datos solo se tomaran aquellos registros diarios en el periodo mencionado en el párrafo anterior.

5.4.1 DATOS HISTÓRICOS DE LLUVIA HORARIA





Los datos de la lluvia horaria se obtuvieron de las estaciones telemétricas El Jobo, La Hachadura, Santa Ana, Ataco, Apaneca y Los Naranjos. Los años de registros varían, ya que algunas estaciones son más recientes que otras, tal es el caso de Apaneca, la cual funciona a partir de Diciembre de 2011, mientras que los Naranjos funciona desde Diciembre de 2009 y Ataco funcionan desde Enero de 2009. Para ello se realizó un análisis de los periodos de datos disponibles de dichas estaciones, los cuales se resumen a continuación. (Ver Tabla No. 5.10)

CODIGO	ESTACION	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
50308201	El Jobo											
50308211	Hachadura											
50308531	Ataco											
50308721	Apaneca											
50321581	Los Naranjos											
50301331	Santa Ana											
50210011	Quesada											
50210021	Montufar											

Tabla No. 5.10: Registro de Lluvia Horaria en Estaciones Telemétricas

Fuente: Propia

Dónde:

	Año de registro completo
	Año de registro completo pero con datos faltantes
	Año de registro incompleto
	No hay datos

En la tabla anterior se puede observar que en el registro de lluvia horaria que se poseía para realizar la calibración habían muchos datos faltantes en la mayoría de estaciones telemétricas sobre todo en Santa Ana, y dicha estación es de mucha importancia ya que representa buena parte de la lluvia registrada en la parte alta de la cuenca en territorio salvadoreño y no existe otra estación telemétrica cercana con el mismo periodo de registro que hubiese podido ser utilizada.

En el modelo HBV los datos faltantes pudieron rellenarse con el valor -9999, pero esto implicaría que la calibración solo funcionara con dos estaciones telemétricas El Jobo y La

Hachadura con registros casi completos a lo largo del periodo, por tal razón fue necesario realizar un relleno de datos horarios para lograr tener una serie de registro de lluvia horaria completa lo cual se explicara más adelante.

5.4.2 DATOS HISTÓRICOS DE LLUVIA DIARIA

El registro de lluvia diaria como ya menciono anteriormente se obtuvo de las estaciones convencionales que están en la cuenca del Río Paz, es importante mencionar que muchas de estas estaciones tienen un registro que incluye muchos años, pero para homogeneizar la serie de datos de fue necesario solo tomar el mismo periodo que se usó para las estaciones telemétricas. En la Tabla No. 5.11 se presenta de manera resumida el registro disponible de dichas estaciones.

CODIGO	ESTACION	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
50308232	Ataco Bfcio. EL Molino											
50321212	Salcoatitán											
50321242	Los Naranjos											
50301272	Candelaria de La Frontera											
50308082	Ahuachapán SM											
50301182	Finca Los Andes											
50301372	Santa Ana UNICO											
50308142	La Hachadura											

Tabla No. 5.11: Registro de Lluvia Diaria en las Estaciones Convencionales

Fuente: Propia

Dónde:

 Año de registro completo

En la tabla anterior se puede observar que las estaciones convencionales tienen un buen registro histórico, dicho registro sirvió para realizar una correlación entre estaciones convencionales y telemétricas, además este registro se utilizó para el relleno de datos horarios de estaciones telemétricas y finalmente se utilizó como punto de partida para determinar los pesos de aportación de las estaciones usadas en la calibración del modelo HBV. Esto se explicara más adelante.

5.4.3 RELLENO DE DATOS HORARIOS A PARTIR DE DATOS DIARIOS

En la Sección 5.5.1 se mencionó que las estaciones telemétricas tienen muchos datos faltantes, y para rellenarlos fue necesario utilizar una metodología apropiada, ya que generalmente el relleno de datos es del tipo diario, mensual o anual, pero en este caso no esto no aplica ya que la distribución de la lluvia tiene que hacerse de manera horaria.

Para el relleno de datos se tomó de referencia el estudio *RELACIÓN ENTRE LÁMINAS DE LLUVIA PARA DETERMINACIÓN DE HIETOGRAMAS DE DISEÑO DE DIFERENTES DURACIONES EN EL SALVADOR*.⁴⁸ Este estudio consistió en la determinación de las cantidades de lluvias máximas de un día pluviométrico (de 7 am de un día a 7 am del siguiente día) para diferentes periodos de retorno a nivel nacional; también se determinó las relaciones entre las cantidades de lluvia máxima para 24 horas con las cantidades de lluvia máxima tanto para 1 día pluviométrico como para duraciones menores, a partir de información pluviométrica, pluviográfica y telemétrica en diferentes estaciones ubicadas en el país.

En resumen para aplicar esta metodología se sigue el siguiente proceso:

- a) Determinar la precipitación promedio en la cuenca de interés para el periodo de retorno requerido a partir de los mapas de isolíneas de precipitación máxima para 1 día.
- b) Multiplicar el valor calculado anterior por 1.14 (valor de R para El Salvador) para calcular de precipitación máxima en 24 horas.
- c) Si se desea calcular la cantidad de lluvia máxima para duraciones menores de 1 día, multiplicar el valor calculado de lluvia máxima en 24 horas por los valores de la tabla 3 la investigación antes mencionada, de acuerdo a la duración de interés.
- d) Afectar el valor anterior por un factor de reducción de área (NERC 1975), debido a que la lluvia no se presenta en formas simultánea en toda la cuenca, y

⁴⁸ Ing. MSc. Adriana María Erazo Chica (2011). *RELACIÓN DE LÁMINAS DE LLUVIA PARA DETERMINACIÓN DE HIETOGRAMAS DE DISEÑO DE DIFERENTES DURACIONES EN EL SALVADOR*. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. San Salvador.

entre mayor es el área de la cuenca esta simultaneidad de la lluvia en ella es menor.

- e) Finalmente se realiza la distribución de temporal de la lluvia calculada, para lluvias menores a 2 horas, lluvias mayores a 2 horas y la distribución temporal promedio de lluvia. Ver Tabla No. 5.12

DISTRIBUCION TEMPORAL DE LLUVIA EN EL SALVADOR			
% DE CANTIDAD DE AGUA ACUMULADA			
% DE DURACION	MENOS DE 2 HR	MAYOR DE 2HR	PROMEDIO
5	4	11	8
10	9	22	16
12.5		32	
15	23	42	33
20	40	53	47
25	58	66	62
30	65	77	71
35	74	80	77
37.5		81	
40	81	82	81
45	86	88	87
50	87	89	88
55	91	91	91
60	93	93	93
62.5		93.5	
65	94	94	94
70	95	95	95
75	96	96	96
80	97	97	97
85	98	98	98
87.5		98.5	
90	99	99	99
95	99	99	99
100	100	100	100

Tabla No. 5.12: Distribución Temporal de Lluvia en El Salvador

Fuente: Estudio *RELACIÓN ENTRE LÁMINAS DE LLUVIA PARA DETERMINACIÓN DE HIETOGRAMAS DE DISEÑO DE DIFERENTES DURACIONES EN EL SALVADOR*

La metodología anterior es aplicable para casos donde no se cuenta con información de lluvia de dichas duraciones en el sitio de interés o en algún lugar cercano. En el caso de contar con información local, debe de preferirse dicha información, ya que representa las condiciones propias de la zona.

Por esta razón se optó por realizar una metodología propia para los datos de las estaciones de la cuenca del Río Paz, partiendo del análisis anterior, a continuación se detallara más explícitamente este proceso que inicia con la determinación de la correlación de estaciones, luego la determinación de porcentajes de lluvia acumulada y finalmente la distribución espacial de la lluvia, a manera de ejemplo se muestra el proceso para la estación telemétrica Santa Ana con la estación convencional Santa Ana UNICO.

5.4.3.1 CORRELACION DE ESTACIONES DE LLUVIA PARA RELLENO DE DATOS

En la cuenca del Río Paz se tienen estaciones telemétricas que a su vez tienen registro de datos diarios por estaciones convencionales, este es el caso de las estaciones Santa Ana, Los Naranjos y La Hachadura. El resto de estaciones telemétricas tienen a su alrededor estaciones convencionales que se pueden correlacionar para utilizar sus registros, pero antes hay que distribuir la lluvia horaria registrada en las estaciones telemétricas a diaria para realizar una correlación diaria con las estaciones convencionales cercanas.

El proceso inició con establecimiento de un periodo de análisis adecuado para realizar las comparaciones, **para dicho periodo se seleccionó un registro diario de un mes con al menos 10 días consecutivos de lluvia;** en El Salvador, estadísticamente se tiene que los meses más lluviosos son de Julio a Octubre; además estos periodos se eligieron de años donde se dieron eventos muy severos entre estos: 2005, 2009, 2010 y 2011, con el objetivo de que estos periodos seleccionados fuesen representativos del comportamiento de la lluvia en la cuenca. Para este ejemplo se eligió el mes de Octubre del 2005.

La siguiente fase fue la determinación de la lluvia diaria a partir de la lluvia horaria de la estación telemétrica, este proceso se realizó haciendo una suma desde las 8 am de un día hasta las 7 am del siguiente día, para cada día analizado. (Ver Tabla No. 5.13)

Luego que se determinó la lluvia diaria para la estación telemétrica (PT), se ingresó la lluvia de la estación convencional (PC) correspondiente al mismo periodo de análisis (Tabla No. 5.14), se realizó el grafico de correlación de ambas estaciones (Ver Gráfico No. 5.1), y finalmente se realizó un análisis estadístico de los datos, donde se analizó la desviación estándar de los datos, comprobando que esta disminuyese.

YY	MM	DD	HH	P HORARIA	P DIARIA
2005	9	30	8	0	
2005	9	30	9	0	
2005	9	30	10	0	
2005	9	30	11	0	
2005	9	30	12	0	
2005	9	30	13	0	
2005	9	30	14	0	
2005	9	30	15	0	
2005	9	30	16	0	
2005	9	30	17	0	
2005	9	30	18	0	
2005	9	30	19	1	
2005	9	30	20	0.2	
2005	9	30	21	0	
2005	9	30	22	0	
2005	9	30	23	0	
2005	10	1	0	0	
2005	10	1	1	0	
2005	10	1	2	0	
2005	10	1	3	0	
2005	10	1	4	0	
2005	10	1	5	0	
2005	10	1	6	0	
2005	10	1	7	0	1.2
2005	10	1	8	0	
2005	10	1	9	0	
2005	10	1	10	0	
2005	10	1	11	0	
2005	10	1	12	0	
2005	10	1	13	0	
2005	10	1	14	1.6	
2005	10	1	15	4.4	
2005	10	1	16	12.8	
2005	10	1	17	0	
2005	10	1	18	0	
2005	10	1	19	0	
2005	10	1	20	0	
2005	10	1	21	0	
2005	10	1	22	0	
2005	10	1	23	0	
2005	10	2	0	0	
2005	10	2	1	0	
2005	10	2	2	0	
2005	10	2	3	0	
2005	10	2	4	0	
2005	10	2	5	0	
2005	10	2	6	0	
2005	10	2	7	0	18.8
2005	10	2	8	0	
2005	10	2	9	3.2	

Tabla No. 5.13: Determinación de Lluvia Diaria a partir de Lluvia Horaria para estaciones telemétricas

Fuente: Propia

Dónde:

YY: Año de análisis
MM: Mes de análisis
DD: Día de análisis
HH: Hora de análisis
P HORARIA: Precipitación Horaria
P DIARIA: Precipitación Diaria

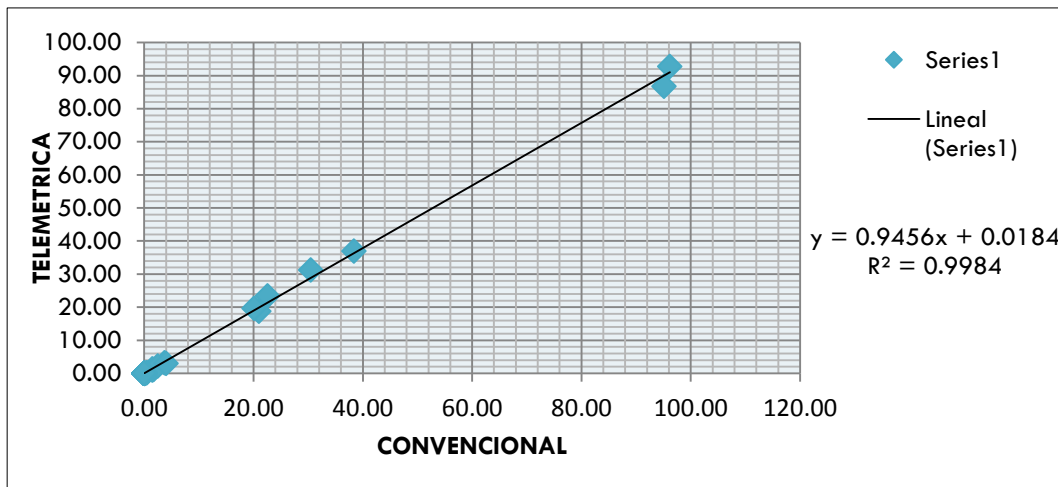


Gráfico No. 5.1: Correlación de la Estación Santa Ana Vrs Estación Santa Ana UNICO

Octubre 2005

Fuente: Propia

En la Gráfico No. 5.1 se puede ver que la estación telemétrica de Santa Ana con la estación convencional Santa Ana UNICO, tienen una muy buena correlación con un $R^2 = 0.9984$, ya que generalmente son aceptadas correlaciones lo más cercanas a 1.0 o que varíen entre 0.9 a 1.0

El factor de corrección está dado por la pendiente del Gráfico No. 5.1 de la gráfica de correlación de ambas estaciones, para este ejemplo el factor de corrección es de 0.9456 y significa que toda la lluvia de la estación convencional debe de multiplicarse por este factor para semejar la lluvia de la estación telemétrica.

YY	MM	DD	PT	PC	DIFERENCIA 1 (PC - PT)	PC ₂ = R ² x PC	DIFERENCIA 2 (PC - PC ₂)
2005	10	1	1.20	1.70	0.50	1.61	0.09
2005	10	2	18.80	21.00	2.20	19.86	1.14
2005	10	3	86.80	95.10	8.30	89.93	5.17
2005	10	4	37.00	38.40	1.40	36.31	2.09
2005	10	5	92.80	96.20	3.40	90.97	5.23
2005	10	6	23.40	22.60	-0.80	21.37	1.23
2005	10	7	1.00	1.50	0.50	1.42	0.08
2005	10	8	0.20	0.50	0.30	0.47	0.03
2005	10	9	19.60	20.10	0.50	19.01	1.09
2005	10	10	3.20	3.70	0.50	3.50	0.20
2005	10	11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2005	10	12	1.40	1.50	0.10	1.42	0.08
2005	10	13	2.20	2.50	0.30	2.36	0.14
2005	10	14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2005	10	15	0.00	0.20	0.20	0.19	0.01
2005	10	16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2005	10	17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2005	10	18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2005	10	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2005	10	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2005	10	21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2005	10	22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2005	10	23	3.00	4.00	1.00	3.78	0.22
2005	10	24	31.20	30.50	-0.70	28.84	1.66
2005	10	25	0.00	0.20	0.20	0.19	0.01
2005	10	26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2005	10	27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2005	10	28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2005	10	29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2005	10	30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2005	10	31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
				σ₁ =	1.66	σ₂ =	1.37

Tabla No. 5.14: Análisis Estadísticos de la desviación estándar de datos diarios de la estación Santa Ana

Fuente: Propia

5.4.3.2 DETERMINACION DE PORCENTAJES DE LLUVIA ACUMULADA

Una vez que se verificó una buena correlación entre ambas estaciones analizadas se procedió al cálculo de los porcentajes, para ello fue necesario elegir un periodo de análisis de 10 días consecutivos de lluvia diaria, para este ejemplo se eligieron los primeros 10 días del mes de Octubre de 2005, ya que era el único periodo del mes en el que los 10 días de análisis los datos estaban completos. Luego para cada día de análisis desde de las 8 am hasta las 7 am del siguiente día se procedió a calcular el porcentaje de lluvia horaria con respecto a la suma de ese lapso de tiempo, en la Tabla No. 5.15 se muestra el cálculo de este porcentaje para dos días y para los ocho días restantes en la Tabla No. 5.16 donde se resumen los diferentes porcentajes horarios, y el porcentaje acumulado para cada hora.

Así mismo, en la Tabla No. 5.16 se muestra el promedio por hora de cada día analizado, estos porcentajes son los que posteriormente se multiplicaron por cada dato diario para obtener un dato horario en el que no hay registro para la estación telemétrica.

YY	MM	DD	HH	P HORARIA	P DIARIA	%
2005	9	30	8	0		0.00%
2005	9	30	9	0		0.00%
2005	9	30	10	0		0.00%
2005	9	30	11	0		0.00%
2005	9	30	12	0		0.00%
2005	9	30	13	0		0.00%
2005	9	30	14	0		0.00%
2005	9	30	15	0		0.00%
2005	9	30	16	0		0.00%
2005	9	30	17	0		0.00%
2005	9	30	18	0		0.00%
2005	9	30	19	1		83.33%
2005	9	30	20	0.2		16.67%
2005	9	30	21	0		0.00%
2005	9	30	22	0		0.00%
2005	9	30	23	0		0.00%
2005	10	1	0	0		0.00%
2005	10	1	1	0		0.00%
2005	10	1	2	0		0.00%
2005	10	1	3	0		0.00%
2005	10	1	4	0		0.00%
2005	10	1	5	0		0.00%
2005	10	1	6	0		0.00%
2005	10	1	7	0	1.2	0.00%
2005	10	1	8	0		0.00%
2005	10	1	9	0		0.00%
2005	10	1	10	0		0.00%
2005	10	1	11	0		0.00%
2005	10	1	12	0		0.00%
2005	10	1	13	0		0.00%
2005	10	1	14	1.6		8.51%
2005	10	1	15	4.4		23.40%
2005	10	1	16	12.8		68.09%
2005	10	1	17	0		0.00%
2005	10	1	18	0		0.00%
2005	10	1	19	0		0.00%
2005	10	1	20	0		0.00%
2005	10	1	21	0		0.00%
2005	10	1	22	0		0.00%
2005	10	1	23	0		0.00%
2005	10	2	0	0		0.00%
2005	10	2	1	0		0.00%
2005	10	2	2	0		0.00%
2005	10	2	3	0		0.00%
2005	10	2	4	0		0.00%
2005	10	2	5	0		0.00%
2005	10	2	6	0		0.00%
2005	10	2	7	0	18.8	0.00%
2005	10	2	8	0		0.00%
2005	10	2	9	3.2		3.69%

Tabla No. 5.15: Determinación de Porcentaje de Lluvia horaria para un día de análisis

Fuente: Propia

HORA	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7	DIA 8	DIA 9	DIA 10	PROM	PROM_AC
8	0.00%	0.00%	0.00%	14.59%	0.86%	17.09%	0.00%	0.00%	3.06%	0.00%	3.56%	3.56%
9	0.00%	0.00%	3.69%	12.43%	3.23%	23.08%	0.00%	0.00%	1.02%	0.00%	4.34%	7.91%
10	0.00%	0.00%	0.00%	6.49%	3.23%	22.22%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	3.19%	11.10%
11	0.00%	0.00%	0.00%	5.41%	2.16%	14.53%	0.00%	0.00%	6.12%	0.00%	2.82%	13.92%
12	0.00%	0.00%	0.00%	1.08%	7.11%	3.42%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.16%	15.08%
13	0.00%	0.00%	0.00%	2.70%	19.83%	10.26%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	3.28%	18.36%
14	0.00%	8.51%	0.00%	1.62%	5.17%	0.85%	0.00%	0.00%	1.02%	0.00%	1.72%	20.08%
15	0.00%	23.40%	0.00%	0.00%	0.86%	4.27%	0.00%	0.00%	3.06%	0.00%	3.16%	23.24%
16	0.00%	68.09%	0.00%	0.00%	3.23%	1.71%	80.00%	0.00%	15.31%	0.00%	16.83%	40.07%
17	0.00%	0.00%	2.76%	0.00%	3.02%	1.71%	0.00%	0.00%	9.18%	0.00%	1.67%	41.74%
18	0.00%	0.00%	10.14%	0.00%	1.29%	0.00%	0.00%	0.00%	52.04%	0.00%	6.35%	48.09%
19	83.33%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	5.10%	0.00%	8.84%	56.93%
20	16.67%	0.00%	0.00%	0.00%	1.94%	0.00%	0.00%	0.00%	1.02%	6.25%	2.59%	59.52%
21	0.00%	0.00%	24.19%	0.00%	3.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	2.72%	62.24%
22	0.00%	0.00%	14.52%	35.14%	6.68%	0.00%	0.00%	0.00%	1.02%	0.00%	5.74%	67.98%
23	0.00%	0.00%	13.13%	1.62%	7.33%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	2.21%	70.18%
0	0.00%	0.00%	4.84%	3.78%	7.11%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	50.00%	6.57%	76.76%
1	0.00%	0.00%	11.98%	0.54%	7.11%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	43.75%	6.34%	83.10%
2	0.00%	0.00%	6.91%	0.00%	2.80%	0.00%	20.00%	0.00%	0.00%	0.00%	2.97%	86.07%
3	0.00%	0.00%	1.38%	7.57%	4.31%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	11.33%	97.39%
4	0.00%	0.00%	0.00%	1.62%	1.29%	0.00%	0.00%	0.00%	1.02%	0.00%	0.39%	97.79%
5	0.00%	0.00%	0.92%	0.00%	0.22%	0.85%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.20%	97.99%
6	0.00%	0.00%	0.46%	0.00%	1.72%	0.00%	0.00%	0.00%	1.02%	0.00%	0.32%	98.31%
7	0.00%	0.00%	5.07%	5.41%	6.47%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.69%	100.00%
SUMA	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	

Tabla No. 5.16: Porcentajes promedios para cada hora de los 10 días de análisis de Estación de Santa Ana.

Fuente: Propia

5.4.3.3 DISTRIBUCION ESPACIAL DE LA LLUVIA

El siguiente proceso consistió en realizar la distribución espacial de la lluvia a través de los porcentajes promedio obtenidos para cada estación de análisis, para el ejemplo que es la Estación de Santa Ana, la distribución para las 24 horas de un día de análisis se resume en siguiente gráfico. Ver Gráfico No. 5.2 y Ver Gráfico No. 5.3

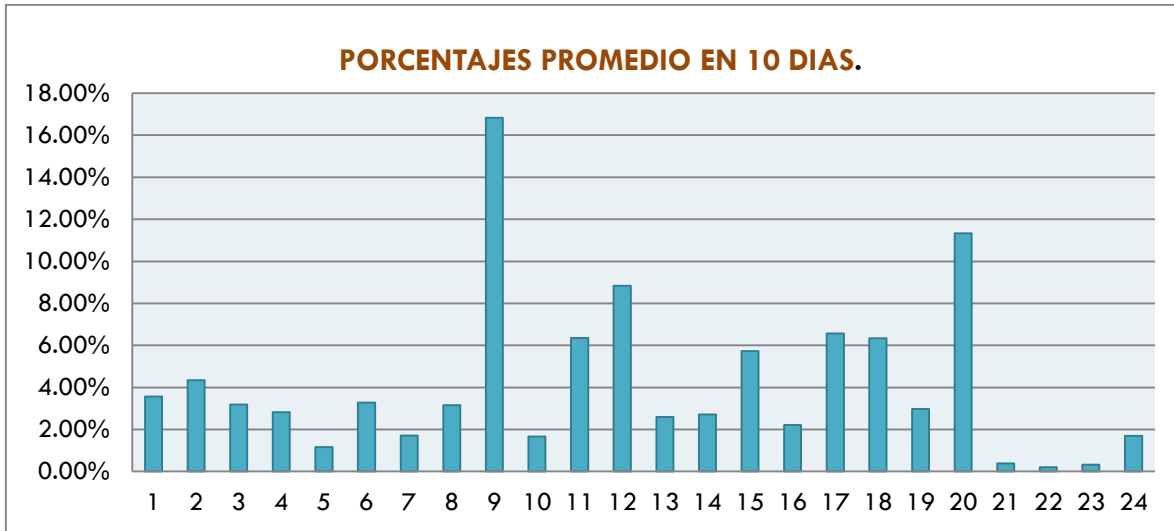


Gráfico No. 5.2: Distribución temporal de la lluvia para un día de análisis de la Estación Santa Ana

Fuente: Propia

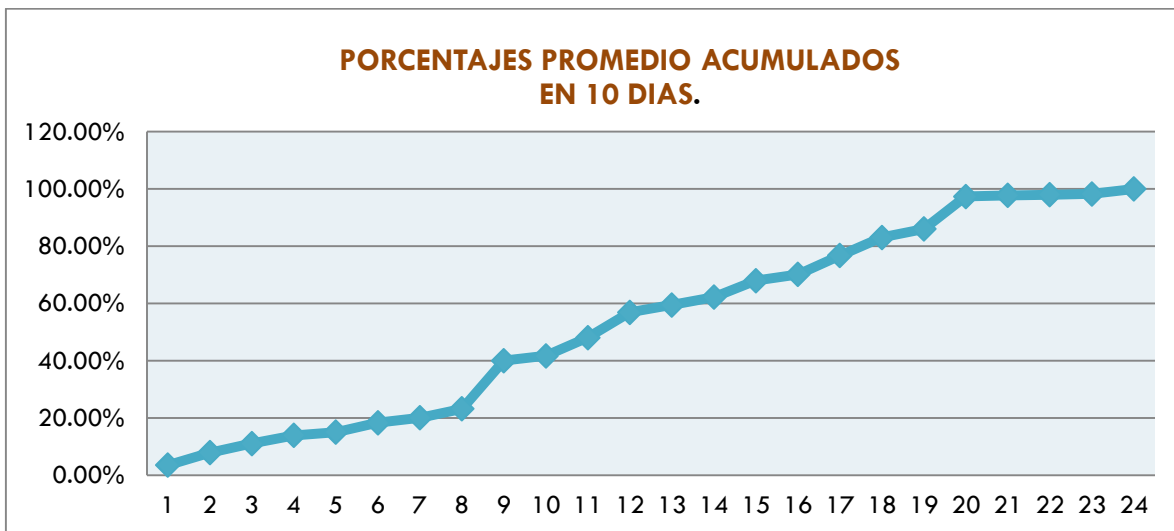


Gráfico No. 5.3: Porcentajes promedio Acumulados de Santa Ana

Fuente: Propia

Cabe mencionar que estos porcentajes se obtuvieron de un periodo de 10 días de análisis con el objetivo de obtener el porcentaje promedio de lo que llueve a cada hora en un día, el siguiente paso consistió, primero en ingresar la lluvia registrada para todo el año de análisis donde se tienen los datos horarios faltantes de acuerdo al orden presentados, en este caso es el año 2005 de la Estación Santa Ana. Ver Tabla No. 5.17

AÑO	MES	DIA	H	PH
2005	1	1	0	0
2005	1	1	1	0
2005	1	1	2	0
2005	1	1	3	0
2005	1	1	4	0
2005	1	1	5	0
2005	1	1	6	0
2005	1	1	7	0
2005	1	1	8	0
2005	1	1	9	0
2005	1	1	10	0
2005	1	1	11	0
2005	1	1	12	0
2005	1	1	13	0
2005	1	1	14	0
2005	1	1	15	0
2005	1	1	16	0
2005	1	1	17	0
2005	1	1	18	0
2005	1	1	19	0
2005	1	1	20	0
2005	1	1	21	0
2005	1	1	22	0
2005	1	1	23	0
2005	1	2	0	0
2005	1	2	1	0
2005	1	2	2	0
2005	1	2	3	0
2005	1	2	4	0
2005	1	2	5	0
2005	1	2	6	0
2005	1	2	7	0

Tabla No. 5.17: Distribución de Porcentajes de Lluvia para un año de datos faltantes en Santa Ana

Fuente: Propia

Luego se ingresó la lluvia diaria de la estación convencional para el año de datos faltantes, para el ejemplo se utilizó el año 2005 tal como se presenta en la Tabla No. 5.18

Día/Mes	Enero	Febreo	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	0	0	0	0	0	0	7.2	0	2.3	1.7	0.7	0
2	0	0	2.2	0	0	0	0	0	14.2	21	0	0
3	0	0	0	0	1	19	26.7	7.5	8.9	95.1	0	0
4	0	0	0	0	60	6.2	23.6	0	2.1	38.4	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0.3	12	5	96.2	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0.8	10.4	22.6	0	0
7	0	0	0	0	0	19.3	0	19.3	7.6	1.5	0	0
8	0	0	0	0	30.4	58.8	9.5	0	0	0.5	0	0
9	0	0	0	0	1	43.3	0	0	0	20.1	0	0
10	0	0	0	0	0.4	0	0	19.1	0	3.7	0	0
11	0	0	0	0	14	9.3	36.8	4.2	20.8	0	0	0
12	0	0	0	0	20.3	16	15.7	39	0	1.5	0	0
13	0	0	0	0	2.8	0.6	15.5	1.4	0	2.5	0	0
14	0	0	0	2	0	0	0.3	15.6	8	0	0	0
15	0	0	0	0	2.6	0.3	11.4	1.3	12.8	0.2	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0.6	15.5	0	0	0
17	0	0	0	0	0.2	3.4	4.8	35.1	2.2	0	0	21.6
18	0	0	0	0	2.5	0	2.4	16.5	3.8	0	0	0
19	0	0	12	0	7.5	28.6	0.6	14.5	0	0	0	0
20	0	0	0.7	0	40.7	0.2	10	1.9	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	67.2	0.4	9.6	47.2	0	0	0
22	0	0	0	0	0	17.4	30.4	0.4	7.4	0	0	0
23	0	0	0	1.4	2.1	40.5	0.8	0	17.3	4	0	0
24	0	0	0	0.5	1	4.8	0.4	1.2	22	30.5	0	0
25	0	0	0	10	0	5.1	0.7	14	15.6	0.2	0	0
26	0	0	0	0	0	9.5	4	5.6	0	0	0	0
27	0	0	0	0	3.5	4	0	1.2	26.4	0	0	0
28	0	0	0	0	2.9	1.9	0	0	29.5	0	0	0
29	0	0	1	0	50	19.4	0	2.2	1	0	0	0
30	0	0	0	0	4.7	1.5	0	0	33.7	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	8.2	0	0	0	0	0
Suma/Mes	0	0	15.9	13.9	247.6	376.3	209.7	223	313.7	339.7	0.7	21.6

Tabla No. 5.18: Lluvia diaria de la estación Santa Ana UNICO del año 2005

Fuente: Propia

La información de la tabla anterior se ubicó justo a las 7 am de cada día de todo el año de datos horarios, en la Tabla No. 5.19 esto se refleja con los datos en color naranja.

AÑO	MES	DIA	H	PH	PC DIARIA
2005	1	1	0	0	
2005	1	1	1	0	
2005	1	1	2	0	
2005	1	1	3	0	
2005	1	1	4	0	
2005	1	1	5	0	
2005	1	1	6	0	
2005	1	1	7	0	0
2005	1	1	8	0	
2005	1	1	9	0	
2005	1	1	10	0	
2005	1	1	11	0	
2005	1	1	12	0	
2005	1	1	13	0	
2005	1	1	14	0	
2005	1	1	15	0	
2005	1	1	16	0	
2005	1	1	17	0	
2005	1	1	18	0	
2005	1	1	19	0	
2005	1	1	20	0	
2005	1	1	21	0	
2005	1	1	22	0	
2005	1	1	23	0	
2005	1	2	0	0	
2005	1	2	1	0	
2005	1	2	2	0	
2005	1	2	3	0	
2005	1	2	4	0	
2005	1	2	5	0	
2005	1	2	6	0	
2005	1	2	7	0	0
2005	1	2	8	0	
2005	1	2	9	0	
2005	1	2	10	0	
2005	1	2	11	0	
2005	1	2	12	0	
2005	1	2	13	0	
2005	1	2	14	0	
2005	1	2	15	0	
2005	1	2	16	0	
2005	1	2	17	0	
2005	1	2	18	0	
2005	1	2	19	0	
2005	1	2	20	0	

Tabla No. 5.19: Ingreso de Datos diarios al registro horario del año de datos faltantes

Fuente: Propia

El siguiente paso consistió en multiplicar la precipitación diaria por el Coeficiente o Factor de Corrección que se determinó a través de la curva de correlación de dichas estaciones, para este ejemplo el factor de corrección es 0.9456, en la Tabla No. 5.20 esto se ilustra en color amarillo.

AÑO	MES	DIA	H	PH	PC DIARIA	PT DIARIA (PC x COEF)
2005	1	1	0	0		0
2005	4	24	5	0.2		0
2005	4	24	6	0		0
2005	4	24	7	0	0.5	0.4728
2005	4	24	8	0		0
2005	4	24	9	0		0
2005	4	24	10	0		0
2005	4	24	11	0		0
2005	4	24	12	0		0
2005	4	24	13	0		0
2005	4	24	14	0		0
2005	4	24	15	0		0
2005	4	24	16	0		0
2005	4	24	17	0		0
2005	4	24	18	0		0
2005	4	24	19	0		0
2005	4	24	20	0		0
2005	4	24	21	10.8		0
2005	4	24	22	0		0
2005	4	24	23	0		0
2005	4	25	0	0		0
2005	4	25	1	0.2		0
2005	4	25	2	0		0
2005	4	25	3	0		0
2005	4	25	4	0		0
2005	4	25	5	0		0
2005	4	25	6	0		0
2005	4	25	7	0	10	9.456
2005	4	25	8	0		0
2005	4	25	9	0		0
2005	4	25	10	0		0
2005	4	25	11	0		0
2005	4	25	12	0		0
2005	4	25	13	0		0
2005	4	25	14	0		0
2005	4	25	15	0		0
2005	4	25	16	0		0

Tabla No. 5.20: Multiplicación de los datos diarios por el Factor de Corrección

Fuente: Propia

Posteriormente se procedió a ingresar los porcentajes horarios determinados a partir de los datos horarios y los diarios calculados, esto se refleja en la Tabla No. 5.21. En color verde y representa la distribución de la lluvia horaria en un día, luego se multiplicaron estos porcentajes por la lluvia diaria corregida mediante el Factor de correlación y se calculó la lluvia horaria donde existían datos faltantes.

AÑO	MES	DIA	H	PH	PC DIARIA	PT DIARIA (PC x COEF)	% DIARIOS	P HORARIA CALCULADA
2005	5	8	7	0	30.4	28.74624	1.69%	0.49
2005	5	8	8	0		0	3.56%	0.03
2005	5	8	9	0		0	4.34%	0.04
2005	5	8	10	0		0	3.19%	0.03
2005	5	8	11	0		0	2.82%	0.03
2005	5	8	12	0		0	1.16%	0.01
2005	5	8	13	0		0	3.28%	0.03
2005	5	8	14	0		0	1.72%	0.02
2005	5	8	15	0		0	3.16%	0.03
2005	5	8	16	0		0	16.83%	0.16
2005	5	8	17	0		0	1.67%	0.02
2005	5	8	18	0		0	6.35%	0.06
2005	5	8	19	0.4		0	8.84%	0.08
2005	5	8	20	0.2		0	2.59%	0.02
2005	5	8	21	0.2		0	2.72%	0.03
2005	5	8	22	0		0	5.74%	0.05
2005	5	8	23	0		0	2.21%	0.02
2005	5	9	0	0		0	6.57%	0.06
2005	5	9	1	0		0	6.34%	0.06
2005	5	9	2	0		0	2.97%	0.03
2005	5	9	3	0		0	11.33%	0.11
2005	5	9	4	0		0	0.39%	0.00
2005	5	9	5	0		0	0.20%	0.00
2005	5	9	6	0		0	0.32%	0.00
2005	5	9	7	0	1	0.9456	1.69%	0.02
2005	5	9	8	0		0	3.56%	0.01
2005	5	9	9	0		0	4.34%	0.02
2005	5	9	10	0		0	3.19%	0.01
2005	5	9	11	0		0	2.82%	0.01
2005	5	9	12	0		0	1.16%	0.00
2005	5	9	13	0		0	3.28%	0.01
2005	5	9	14	0		0	1.72%	0.01
2005	5	9	15	0		0	3.16%	0.01
2005	5	9	16	0.2		0	16.83%	0.06

Tabla No. 5.21: Multiplicación de Datos Diarios por lo Porcentajes Horarios de Santa Ana

Fuente: Propia

Posteriormente se realizó el relleno de datos donde se determinó la precipitación en la estación que tenía datos faltantes, para ello se utilizó una formula lógica en la que seleccionara solo las casillas donde habían datos faltantes, de esta manera se rellenaron los datos faltantes horarios de la estación telemétrica a partir de la lluvia horaria determinada por los porcentajes, Ver Tabla No. 5.22

AÑO	MES	DIA	H	PH	PC DIARIA	PT DIARIA (PC x COEF)	% DIARIOS	P HORARIA CALCULADA	P FINAL
2005	7	11	21	-9999		0	2.72%	0.40	0.40
2005	7	11	22	-9999		0	5.74%	0.85	0.85
2005	7	11	23	-9999		0	2.21%	0.33	0.33
2005	7	12	0	-9999		0	6.57%	0.98	0.98
2005	7	12	1	-9999		0	6.34%	0.94	0.94
2005	7	12	2	-9999		0	2.97%	0.44	0.44
2005	7	12	3	-9999		0	11.33%	1.68	1.68
2005	7	12	4	-9999		0	0.39%	0.06	0.06
2005	7	12	5	-9999		0	0.20%	0.03	0.03
2005	7	12	6	-9999		0	0.32%	0.05	0.05
2005	7	12	7	-9999	15.7	14.84592	1.69%	0.25	0.25
2005	7	12	8	-9999		0	3.56%	0.52	0.52
2005	7	12	9	-9999		0	4.34%	0.64	0.64
2005	7	12	10	-9999		0	3.19%	0.47	0.47
2005	7	12	11	-9999		0	2.82%	0.41	0.41
2005	7	12	12	-9999		0	1.16%	0.17	0.17
2005	7	12	13	-9999		0	3.28%	0.48	0.48
2005	7	12	14	0		0	1.72%	0.25	0.00
2005	7	12	15	0.4		0	3.16%	0.46	0.40
2005	7	12	16	0		0	16.83%	2.47	0.00
2005	7	12	17	0		0	1.67%	0.24	0.00
2005	7	12	18	0		0	6.35%	0.93	0.00
2005	7	12	19	0		0	8.84%	1.30	0.00
2005	7	12	20	0		0	2.59%	0.38	0.00
2005	7	12	21	0		0	2.72%	0.40	0.00
2005	7	12	22	0		0	5.74%	0.84	0.00
2005	7	12	23	0		0	2.21%	0.32	0.00
2005	7	13	0	0		0	6.57%	0.96	0.00
2005	7	13	1	12.8		0	6.34%	0.93	12.80
2005	7	13	2	0.6		0	2.97%	0.44	0.60
2005	7	13	3	0.2		0	11.33%	1.66	0.20
2005	7	13	4	0		0	0.39%	0.06	0.00
2005	7	13	5	0		0	0.20%	0.03	0.00
2005	7	13	6	0		0	0.32%	0.05	0.00
2005	7	13	7	0	15.5	14.6568	1.69%	0.25	0.00
2005	7	13	8	0		0	3.56%	0.01	0.00

Tabla No. 5.22: Relleno de datos faltantes de la estación Santa Ana año 2005

Fuente: Propia

Finalmente se completó la serie del año de datos faltantes y se procedió a configurar los datos en el formato de ordenamiento aceptado por el modelo, en dicho formato se ingresa el tipo de estación (“p” para precipitación o “q” para estaciones de caudal), seguido del código de estación, luego el nombre de la estación y el paso de tiempo (1 para datos diarios y 24 para datos horarios), posteriormente se configuraron los datos por columna se coloca año, mes, día, hora y datos de precipitación o caudal. (Ver Tabla No. 5.23)

Luego se procedió a guardar el archivo de Excel como Texto (Delimitado por Tabulaciones), que posteriormente se ingresó modelo HBV, Ver Figura No. 5.15.

'p'				
50301331				
santa ana'				
24				
2005	1	1	0	0.00
2005	1	1	1	0.00
2005	1	1	2	0.00
2005	1	1	3	0.00
2005	1	1	4	0.00
2005	1	1	5	0.00
2005	1	1	6	0.00
2005	1	1	7	0.00
2005	1	1	8	0.00
2005	1	1	9	0.00
2005	1	1	10	0.00
2005	1	1	11	0.00
2005	1	1	12	0.00
2005	1	1	13	0.00
2005	1	1	14	0.00
2005	1	1	15	0.00
2005	1	1	16	0.00
2005	1	1	17	0.00

Tabla No. 5.23: Precipitación Final para la Estación de Santa Ana año 2005

Fuente: Propia

Year	Day	Hour	Precipitation (mm)
2005	1	1	0
2005	1	1	1
2005	1	1	2
2005	1	1	3
2005	1	1	4
2005	1	1	5
2005	1	1	6
2005	1	1	7
2005	1	1	8
2005	1	1	9
2005	1	1	10
2005	1	1	11
2005	1	1	12
2005	1	1	13
2005	1	1	14
2005	1	1	15
2005	1	1	16
2005	1	1	17
2005	1	1	18
2005	1	1	19
2005	1	1	20
2005	1	1	21
2005	1	1	22
2005	1	1	23
2005	1	2	0

Figura No. 5.3: Precipitación Final en Txt de la Estación Santa Ana año 2005

Fuente: Propia

Este proceso antes descrito se siguió para llenar los demás años restantes de Santa Ana utilizando los porcentajes y la lluvia diaria de cada año hasta completar el registro de la precipitación de todas las estaciones telemétricas en dicha cuenca.

De manera resumida los porcentajes que se utilizaron para el relleno de datos horarios de las estaciones telemétricas en la cuenca del Río Paz se presenta en la Tabla No. 5.24. Cabe mencionar que la estación de Apaneca no se encuentra en esta tabla ya que era la única estación que no tenía datos faltantes debido a que solo se tiene completo el registro del año 2012.

DISTRIBUCION TEMPORAL DE LLUVIA EN LA CUENCA DEL RIO PAZ					
% DE CANTIDAD DE LLUVIA REGISTRADA					
Hora	Santa Ana	Los Naranjos	La Hachadura	El Jobo	Ataco
8	3.56%	0.13%	5.61%	2.26%	0.00%
9	4.34%	0.07%	6.50%	2.63%	0.00%
10	3.19%	0.18%	4.84%	3.59%	0.30%
11	2.82%	0.00%	10.75%	3.24%	1.99%
12	1.16%	0.00%	4.93%	6.65%	3.70%
13	3.28%	6.28%	3.43%	3.20%	13.95%
14	1.72%	3.49%	0.99%	9.20%	22.26%
15	3.16%	0.00%	1.99%	17.28%	30.53%
16	16.83%	0.00%	1.65%	5.94%	2.99%
17	1.67%	9.54%	5.63%	2.90%	4.75%
18	6.35%	4.10%	5.43%	0.70%	2.56%
19	8.84%	2.16%	4.67%	3.12%	1.99%
20	2.59%	7.19%	4.59%	8.90%	0.15%
21	2.72%	25.73%	5.62%	2.06%	3.30%
22	5.74%	11.00%	5.30%	4.47%	1.35%
23	2.21%	9.46%	4.12%	1.45%	1.92%
0	6.57%	5.85%	2.79%	2.76%	3.67%
1	6.34%	8.72%	2.45%	1.33%	2.39%
2	2.97%	0.62%	2.54%	3.17%	2.08%
3	11.33%	5.27%	4.40%	1.62%	0.00%
4	0.39%	0.00%	3.12%	0.38%	0.00%
5	0.20%	0.00%	1.34%	1.54%	0.06%
6	0.32%	0.22%	2.62%	3.24%	0.06%
7	1.69%	0.00%	4.67%	8.37%	0.00%

Tabla No. 5.24: Distribución Temporal horaria de la Lluvia en la cuenca del Río Paz

Fuente: Propia

Además se hizo una comparación de estos porcentajes con los obtenidos por el estudio “Relación entre láminas de lluvia para determinación de hietogramas de diseño de diferentes duraciones en El Salvador” tal como se muestra en la Tabla No. 5.25 y la Gráfico No. 5.4

%	DISTRIBUCION TEMPORAL DE LLUVIA EN EL SALVADOR				DISTRIBUCION TEMPORAL DE LLUVIA EN LA CUENCA DEL RIO PAZ				
	% DE CANTIDAD DE AGUA ACUMULADA				% DE CANTIDAD DE LLUVIA REGISTRADA ACUMULADA				
	% DE DURACION	MENOS DE 2 HR	MAYOR DE 2HR	PROMEDIO	Santa Ana	Los Naranjos	La Hachadura	El Jobo	Ataco
4%	5	4	11	8	3.6	0.1	5.6	2.3	0.0
8%	10	9	22	16	7.9	0.2	12.1	4.9	0.0
13%	12.5		32		11.1	0.4	17.0	8.5	0.3
17%	15	23	42	33	13.9	0.4	27.7	11.7	2.3
21%	20	40	53	47	15.1	0.4	32.6	18.4	6.0
25%	25	58	66	62	18.4	6.7	36.1	21.6	19.9
29%	30	65	77	71	20.1	10.1	37.0	30.8	42.2
33%	35	74	80	77	23.2	10.1	39.0	48.0	72.7
38%	37.5		81		40.1	10.1	40.7	54.0	75.7
42%	40	81	82	81	41.7	19.7	46.3	56.9	80.5
46%	45	86	88	87	48.1	23.8	51.8	57.6	83.0
50%	50	87	89	88	56.9	25.9	56.4	60.7	85.0
54%	55	91	91	91	59.5	33.1	61.0	69.6	85.2
58%	60	93	93	93	62.2	58.9	66.6	71.7	88.5
63%	62.5		93.5		68.0	69.9	71.9	76.1	89.8
67%	65	94	94	94	70.2	79.3	76.1	77.6	91.7
71%	70	95	95	95	76.8	85.2	78.9	80.3	95.4
75%	75	96	96	96	83.1	93.9	81.3	81.7	97.8
79%	80	97	97	97	86.1	94.5	83.8	84.8	99.9
83%	85	98	98	98	97.4	99.8	88.3	86.5	99.9
88%	87.5		98.5		97.8	99.8	91.4	86.8	99.9
92%	90	99	99	99	98.0	99.8	92.7	88.4	99.9
96%	95	99	99	99	98.3	100.0	95.3	91.6	100.0
100%	100	100	100	100	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Tabla No. 5.25: Comparación de la Distribución de lluvia en la cuenca del río Paz Vrs la distribución de la lluvia en El Salvador

Fuente: Propia

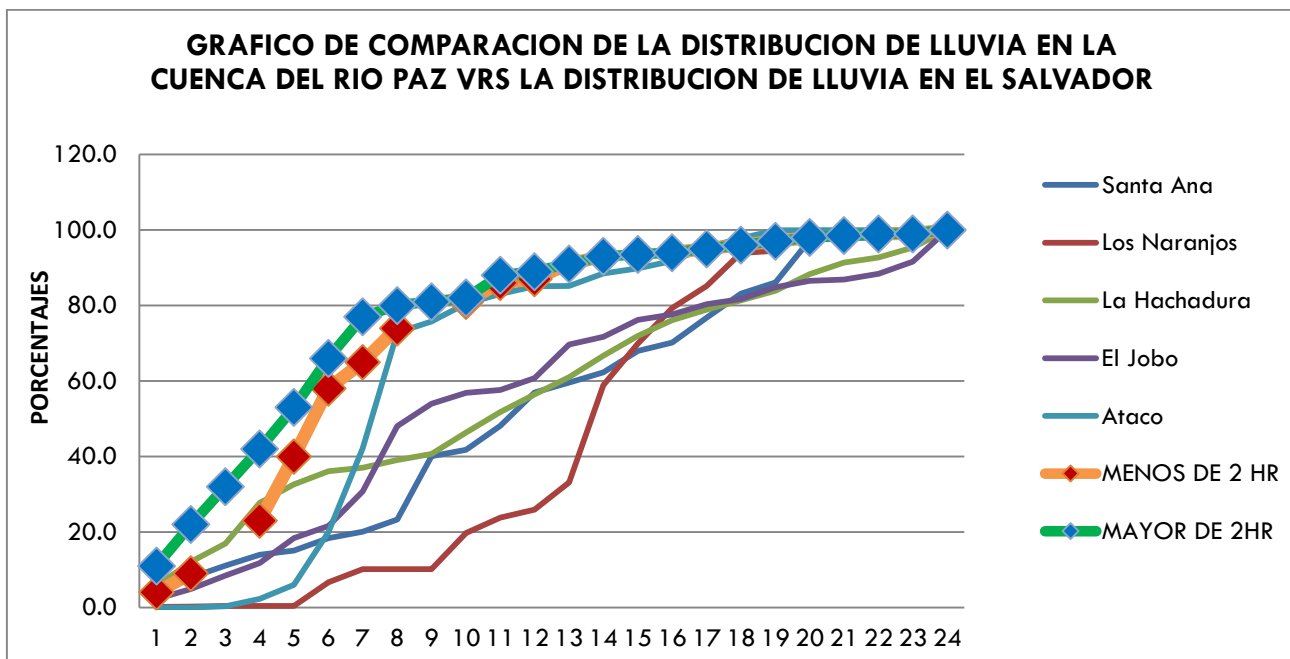


Grafico No. 5.4: Comparación de Distribución de la lluvia acumulada en la cuenca del Río Paz Vrs la Distribución de la lluvia acumulada en El Salvador

Fuente: Propia

En el grafico anterior se observa la relación de los porcentajes de lluvia acumulada de las estaciones de la cuenca del Río Paz con respecto a un tiempo de 24 horas, la estación de Santa Ana tienen una tendencia similar a la gráfica de lluvia menores de 2 horas, mientras que el resto estaciones telemétricas tienen una tendencia similar a la gráfica de lluvia mayores de 2 horas, lo que significa que las lluvias en la cuenca son bastante similares y que pueden usarse dichas distribuciones para realizar los rellenos de datos faltantes.

5.5 DETERMINACION DE PESOS DE APORTACION

5.5.1 PROMEDIOS ANUALES DE LLUVIA EN LA CUENCA

Con los porcentajes de la Tabla No. 5.24 se rellenaron los datos faltantes de los años de cada estación telemétrica hasta completar la serie de datos. Como ya menciono

anteriormente algunas estaciones telemétricas no tienen el mismo periodo de registro y para obtener el promedio anual de lluvia de dichas estaciones, solamente se ocupó aquellos años con registro completo (365 días). En la Tabla No. 5.26 se presenta la lluvia anual y el promedio anual para cada estación telemétrica de la cuenca del Río Paz.

También se utilizó los promedios de lluvia anual de las estaciones convencionales de la cuenca del Río Paz, esta información se resume en la siguiente tabla. Ver Tabla No. 5.14

CODIGO	ESTACION	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	PROMEDIO	PERIODO
50308201	El Jobo	1538.00	1550.40	1747.50	1684.50	1156.20	1662.20	1016.40	1655.60	1751.80	1107.70	1487.03	2003 - 2012
50308211	Hachadura	1456.40	1309.40	2082.80	1539.80	1527.30	2071.60	1360.40	2563.70	2450.90	1168.20	1753.05	2003 - 2012
50308531	Ataco							1129.90	3782.50	3456.80	1826.20	2548.85	2009 - 2012
50308721	Apaneca										1823.60	1823.60	2012
50321581	Los Naranjos								3353.60	3423.20	1732.50	2836.43	2010 - 2012
50301331	Santa Ana	1439.90	1620.10	1751.00	2124.80	1333.00	1822.30	1542.80	1872.70	2394.70	1583.40	1748.47	2003 - 2012
50210011	Quesada												
50210021	Montufar												

Tabla No. 5.26: Promedio Anual de Estaciones Telemétricas de la Cuenca Río Paz

Fuente: Propia

CODIGO	ESTACION	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	PROMEDIO (2003-2012)
50308232	Ataco Bfcio. EL Molino	2120.80	2023.50	2862.30	2398.00	1798.60	1743.80	1663.30	2825.40	2959.80	1772.40	2216.79
50321212	Salcoatitán	2425.30	1431.90	2318.30	2748.20	1870.30	2286.40	2632.40	3468.70	3554.50	2738.60	2547.46
50321242	Los Naranjos	1615.20	1863.40	2774.60	2357.30	2075.70	2380.10	2116.30	3510.00	3187.20	2005.10	2388.49
50301272	Candelaria de la Frontera	1416.40	1549.70	1455.80	1839.90	1744.40	1688.80	1543.80	1700.20	1960.30	1479.00	1637.83
50308082	Ahuachapán SM	1345.00	1504.20	1893.80	1746.40	1592.80	1832.70	1328.20	2064.40	2342.00	1430.60	1708.01
50301182	Finca Los Andes	1615.20	1863.40	2774.60	2357.30	2075.70	2380.10	2116.30	3510.00	3171.40	2115.20	2397.92
50301372	Santa Ana UNICO	1634.40	1824.70	1530.80	1879.50	1409.60	1738.30	1625.20	2035.40	2357.80	1609.80	1764.55
50308142	La Hachadura	1654.60	1635.50	2398.00	2000.30	1762.40	2428.50	1630.20	3102.00	3081.40	1565.60	2125.85

Tabla No. 5.27: Promedio Anual de Estaciones Convencional de la Cuenca del Río Paz

Fuente: Propia

5.5.2 DETERMINACION DE PESOS DE APORTACION

El próximo paso en la Calibración es el análisis de la serie de datos promedios de lluvia anual de cada estación con los que se procedió al cálculo de los pesos de aportación de las estaciones utilizadas, por los métodos de Isoyetas y Polígono de Thiessen, los cuales sirvieron para distribuir la lluvia en cada subcuenca; dentro del modelo se refleja el peso como Weigth.

Las estaciones utilizadas para este proceso, se presentan en la Tabla No. 5.28 y se encuentran descritas anteriormente en las Tablas No 5.26 y 5.27. Cabe mencionar que la mayoría de estaciones usadas en este análisis son del tipo convencional debido a la confiabilidad de los promedios de lluvia obtenidos dentro de la cuenca.

ID	ESTACION	COORD X	COORD Y	PMA	PERIODO DE REGISTRO
50301182	Finca Los Andes	432083	305854	2397.92	2003-2012
50321242	Los Naranjos	427039	306052	2388.49	2003-2012
50301372	Santa Ana UNICO	440758	317818	1764.55	2003-2012
50308142	La Hachadura	382175	304558	2125.85	2003-2012
50301272	Candelaria de la Frontera	429635	333150	1637.83	2003-2012
50308082	Ahuachapán SM	407070	313676	1708.01	2003-2012
50321212	Salcoatitán	418164	300608	2547.46	2003-2012
50308531	Ataco	402378	301598	2548.85	2009-2012
50308232	Ataco Bfcio. El molino	409239	305819	2216.79	2003-2012
50308721	Apaneca	413729	302350	2426.00	Interpolado
50308201	El Jobo	400974	321815	1487.03	2003-2012
50210011	Quesada	396093	345941	1009.50	1990-2001
50210021	Montufar	375121	298828	1366.90	Interpolado

Tabla No. 5.28: Estaciones Usadas en la calibración

Fuente: Propia.

5.5.2.1 METODO DE ISOYETAS

Los datos de precipitación promedio de las estaciones que se utilizaron para generar el Mapa de Isoyetas y que se listaron en la tabla No. 5.28, se presentan a continuación de manera gráfica para cada una de las estaciones:

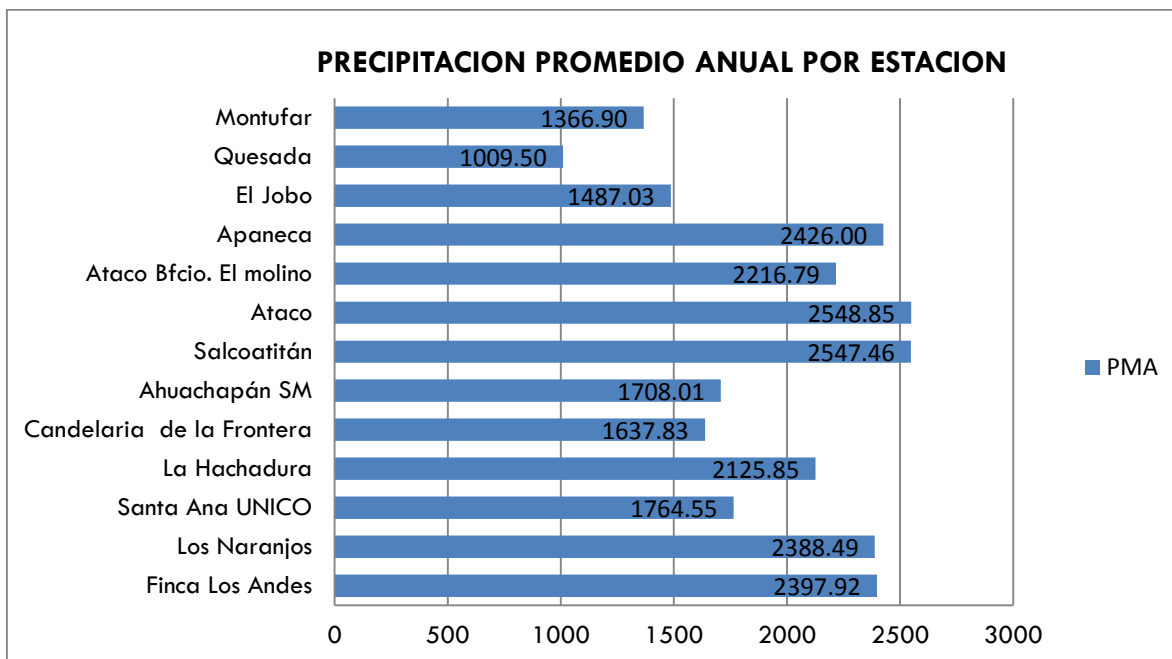


Gráfico No. 5.5: Precipitación Promedio Anual por estaciones para generación de Mapa de Isoyetas

Fuente: Propia

Estos valores obtenidos de los registros históricos de lluvia fueron ingresados al software Surfer 10, a partir de una hoja de Excel en la cual se encontraban los Nombres de las estaciones, las coordenadas de ubicación (x,y) y el valor de la precipitación promedio de cada una de las estaciones utilizadas; esto con la finalidad de generar una grilla para posteriormente generar las curvas. (Ver Figura No. 5.4)

Posteriormente se agregó la grilla generada por Surfer para calcular las Isoyetas y se agregaron además cada una de las subcuencas trazada en Arcgis (Ver Figura No. 5.5).

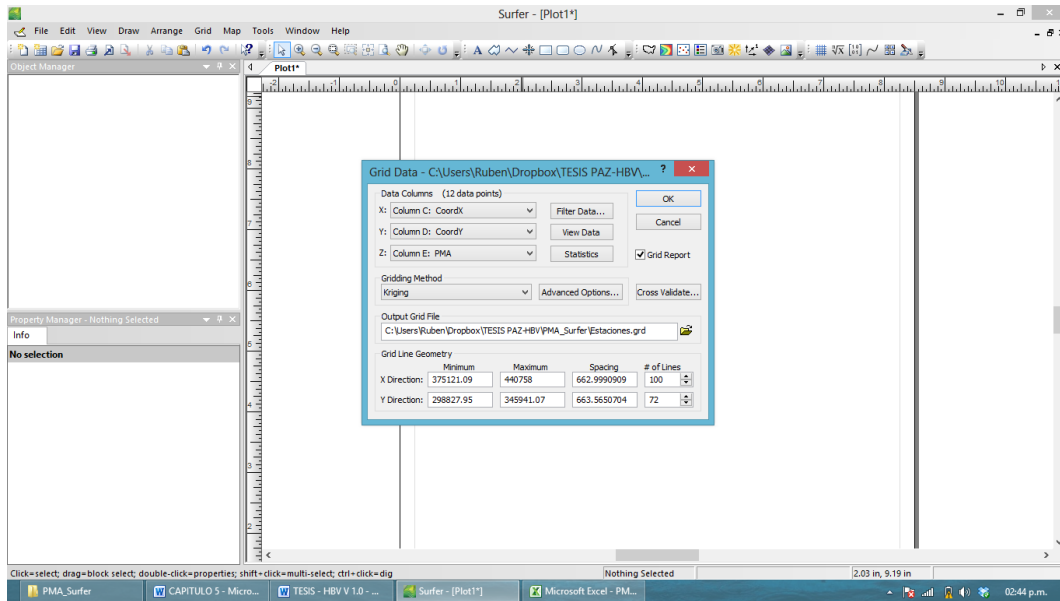


Figura No. 5.4: Ingreso de estaciones para generación de mapa de Isoyetas.

Fuente: Propia

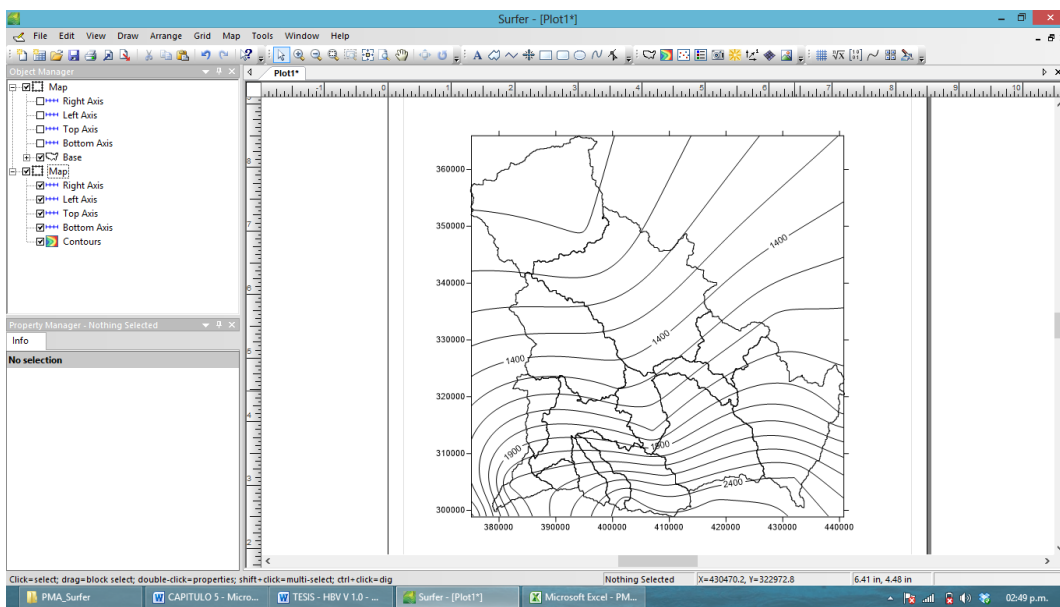


Figura No. 5.5: Generación de Isoyetas para la cuenca del Río Paz

Fuente: Propia

Finalmente se obtuvo el Mapa de Isoyetas que se presenta en la Figura No. 5.6, donde se pueden observar las 13 estaciones utilizadas en la elaboración de las curvas:

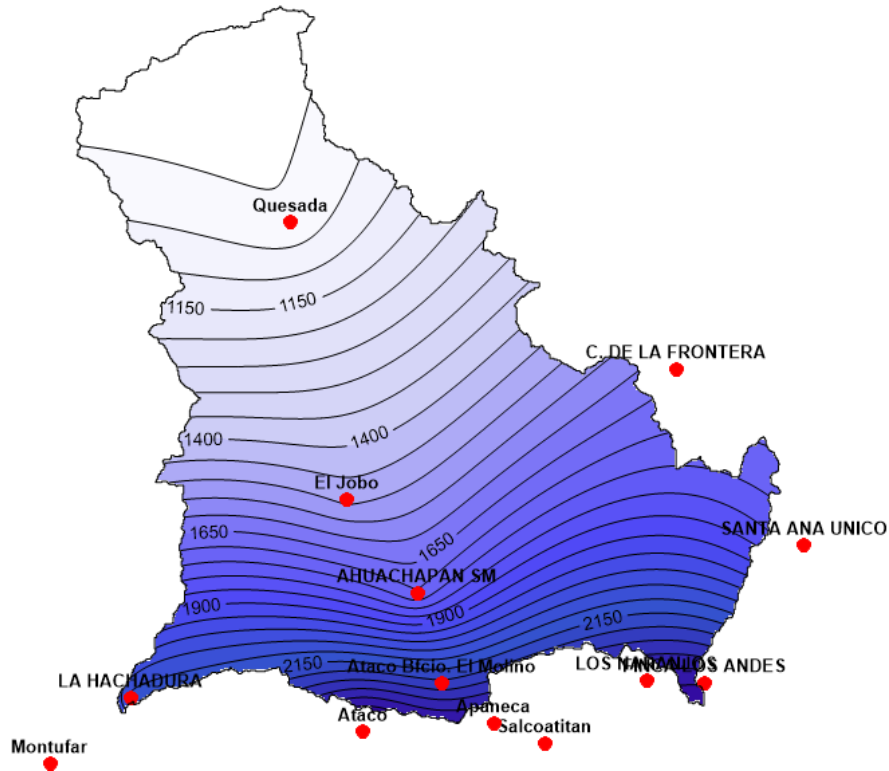


Figura No. 5.6: Mapa de Isoyetas de la Cuenca del Río Paz

Fuente: Propia

Además puede apreciarse que los resultados obtenidos en la cuenca mediante la generación del Mapa de Isoyetas revelan que las zonas con mayores lluvias registradas pertenecen al territorio salvadoreño en la cuenca alta, media y baja; por el contrario la totalidad de las zonas de la cuenca en territorio Guatemalteco presentan lluvias mucho menores que las registradas en territorios Salvadoreño.

Finalmente, como resultado del análisis por medio de Surfer se obtuvieron las Precipitaciones Medias Anuales (PMA) para cada una de las 2 subcuencas que se usaron dentro de la calibración del escenario con 2 subcuencas (Ver Tabla No. 5.29) y para las 15 subcuencas utilizadas en la calibración del otro escenario presentado (Ver Tabla No. 5.30)

ESTACION	ID	PMA
El Jobo	1	1430
Hachadura	2	1897

Tabla No. 5.29: PMA para calibración de escenario con 2 Subcuencas

Fuente: Propia

SUBCUENCA	ID	PMA
Quezada	1	997.02
Paz Guatemala	2	1228.07
Chingo	3	1551.74
Tres Ceibas	4	1901.24
Pampe	5	1596.55
Agua Caliente	6	1873.34
Pulula	7	1311.67
El Jobo	8	1562.54
Los Hervideros	9	2057.76
Guayapa	10	2078.16
Ashuquema	11	2080.10
Piedra de Toro	12	1698.10
Sunza	13	2053.21
San Pedro	14	1613.19
Hachadura	15	2050.19

Tabla No. 5.30: PMA para calibración de escenario con 15 subcuencas

Fuente: Propia

Luego se procedió al cálculo de los pesos de las estaciones mediante el uso del Método del Polígono de Thiessen para cada uno de los dos escenarios tal como se presenta a continuación.

5.5.2.2 METODO DEL POLIGONO DE THIESSEN

El proceso de cálculo de los pesos por el Método del Polígono de Thiessen inicio con la introducción de las estaciones a Arcgis para realizarlo de manera automática por medio de la herramienta denominada Create Thiessen Polygons (ArcToolbox/ Analisis Tools/ Proximity/ Create Thiessen Polygons).

El ingreso de estaciones se realizó por medio de la creación de un layer con los datos de ubicación de las estaciones utilizadas en la calibración a partir de la Tabla No. 5.28, luego se ingresó el layer de la cuenca previamente trabajado tal como lo muestra la imagen a continuación: (Ver Figura No. 5.7)

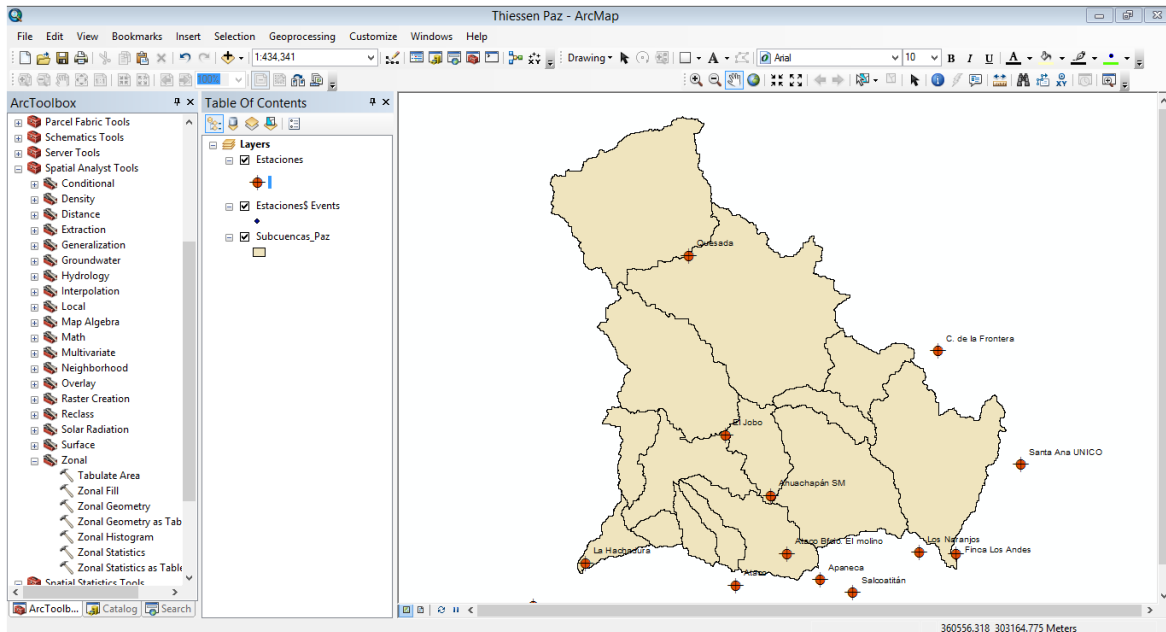


Figura No. 5.7: Ingreso de estaciones y subcuencas a Arcgis

Fuente: Propia

Posteriormente se realizó el trazo de los Polígonos de Thiessen mediante el uso de la herramienta antes mencionada, utilizando como Input Features la capa donde están almacenadas las estaciones, este proceso se muestra en la Figura No. 5.8

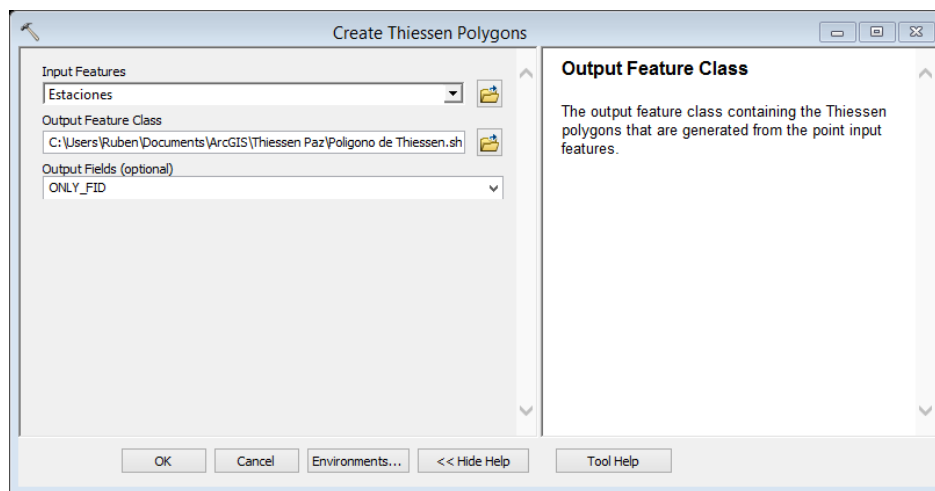


Figura No. 5.8: Herramienta de creación de Polígonos de Thiessen

Fuente: Propia

Como resultado se obtuvieron los Polígonos para las 13 estaciones que participaron dentro de la determinación de los pesos para cada una de las Subcuencas. (Ver figura No. 5.9)

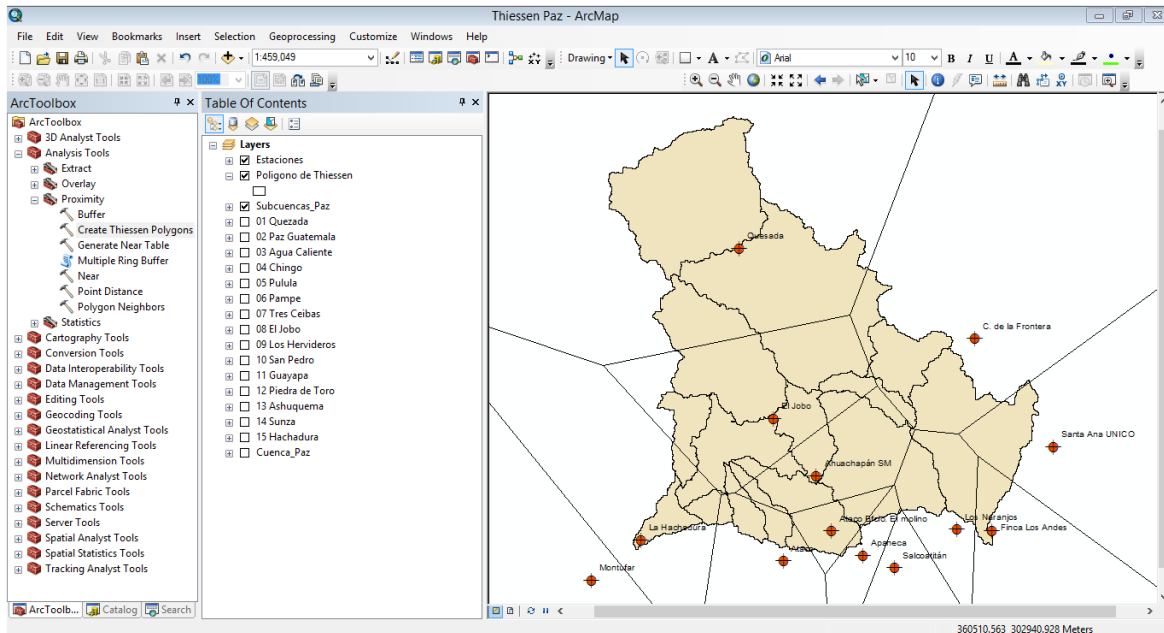
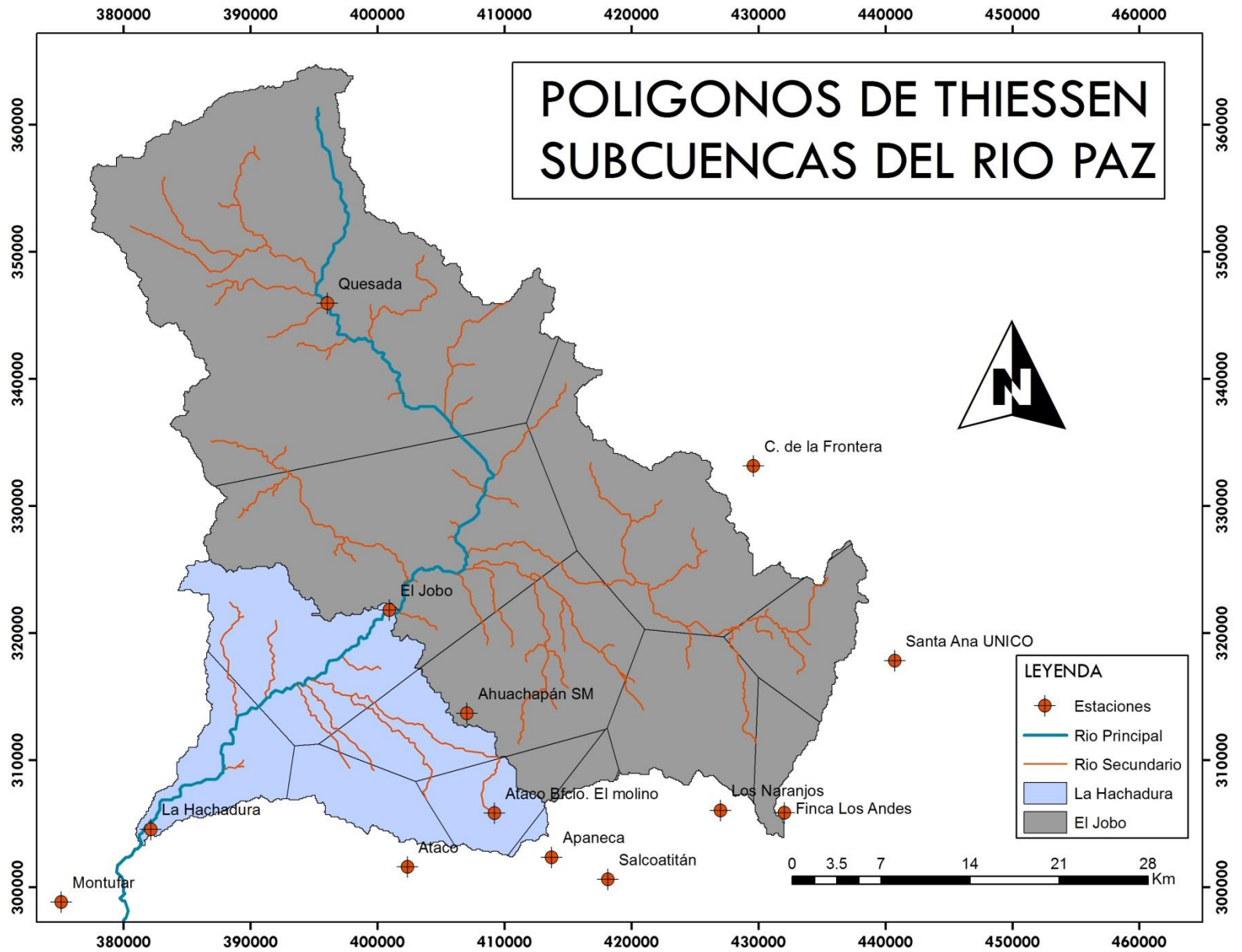


Figura No. 5.9: Determinación de Polígonos Thiessen

Fuente: Propia

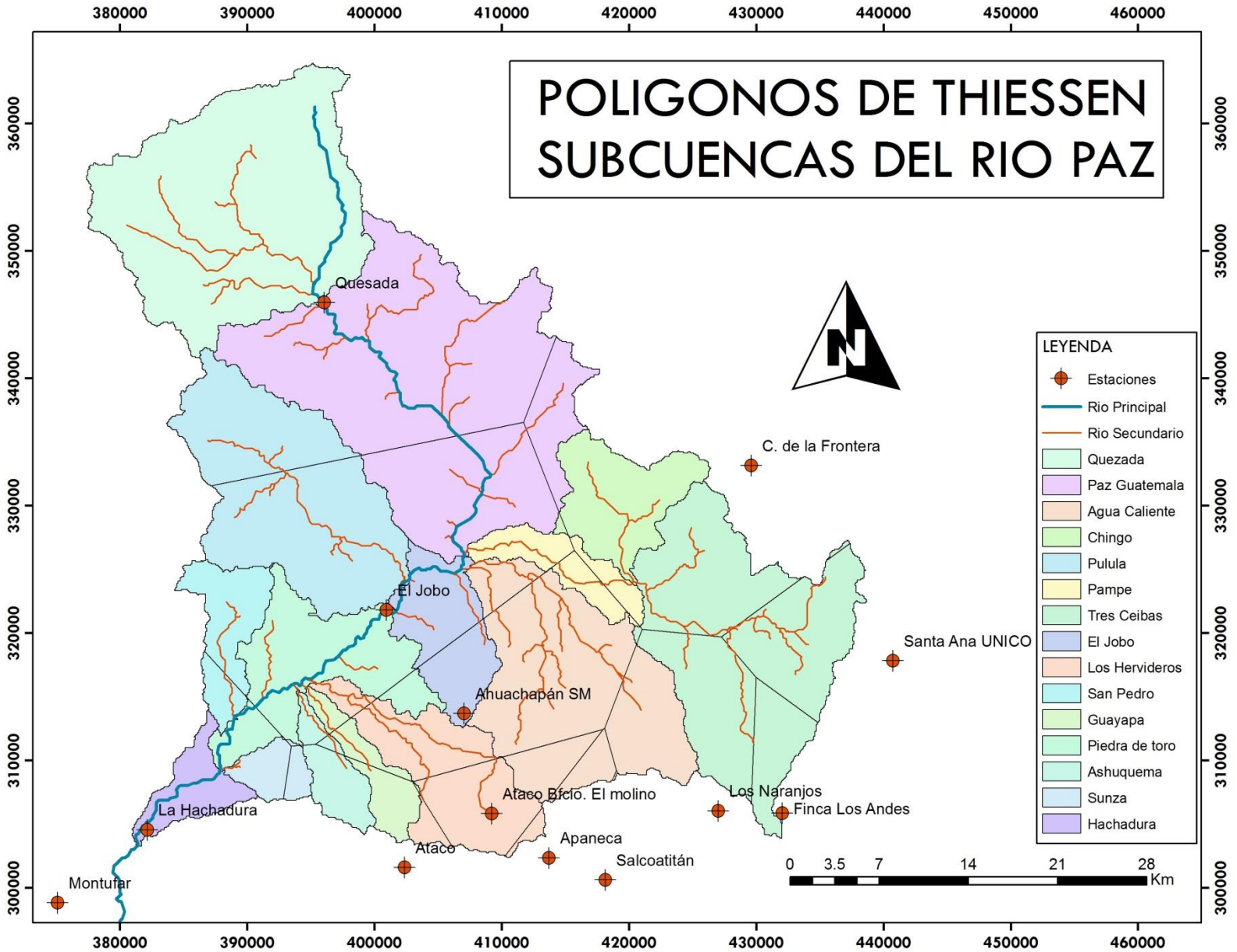
Finalmente como parte del Proceso se utilizó La herramienta Clip ubicada dentro de Menú Geoprocessing para recortar los polígonos generados a partir de las diferentes subcuencas.

Cabe mencionar que este proceso al igual que la aplicación del Método de Isoyetas fue realizado para ambas delimitaciones, la primera para el escenario con 2 subcuencas y luego para el escenario de 15 subcuencas, como resultado final se presentan lo mapas generados a partir de los resultados obtenidos (Ver Mapa No. 5.4 y No. 5.5)



Mapa No. 5.4: Determinación de Polígonos Thiessen para escenario con 2 Subcuencas

Fuente: Propia



Mapa No. 5.5: Determinación de Polígonos Thiessen para escenario con 15 Subcuencas

Fuente: Propia

Cabe mencionar que para el cálculo de los pesos de aportación para aquellas estaciones telemétricas que a la vez poseen una estación convencional, se eligieron las precipitaciones promedio anuales de las estaciones convencionales según la Tabla No. 5.28, ya que su registro es más confiable que el registro de las estaciones telemétricas; sin embargo para la calibración se necesitan los pesos para las estaciones telemétricas por tal razón el peso que se calculó se le asignó a la estación telemétrica respectiva, para detallar a que estaciones se les aplico esta sustitución se muestra la Tabla No. 5.31 donde se han sustituido las estaciones convencionales con las telemétricas cuando existen simultáneamente en ubicaciones cercanas o iguales.

No.	ESTACION CONVENCIONAL	CODIGO	ESTACION TELEMETRICA	CODIGO
1	Santa Ana UNICO	50301372	Santa Ana	50301331
2	Los Naranjos	50321242	Los Naranjos	50321581
3	La Hachadura	50308142	Hachadura	50308211

Tabla No. 5.31: Sustitución de estaciones Convencionales/Telemétricas

Fuente: Propia

Dada la aclaración hecha en el párrafo anterior, se procedió al cálculo de los pesos que se ingresaron a la Calibración con 2 Subcuencas primeramente, los cuales se presentan a continuación: (Ver Tabla No. 5.32 y 5.33).

SUBCUENCA El Jobo	CODIGO	PMA 1430	AREAS (Km ²)	PMA*A/AT	PESOS THIESSEN
Ahuachapán SM	50308082	1708	165.38	172.41	0.10
Apaneca	50308721	2426	11.28	16.70	0.01
Candelaria de la Frontera	50301272	1638	209.01	208.94	0.13
El Jobo	50308201	1487	322.17	292.41	0.20
Finca Los Andes	50301182	2398	33.62	49.21	0.02
Los Naranjos	50321581	2388	118.23	172.36	0.07
Quesada	50210011	1010	681.66	420.01	0.42
Salcoatitan	50321212	2547	0.14	0.22	0.00
Santa Ana	50301331	1765	77.05	82.98	0.05
Ataco Bfcio. El molino	50308232	2217	19.85	26.86	0.01
TOTAL			1638.39	1442	1.00

Tabla No. 5.32: Pesos de estaciones Subcuenca EL JOBO

Fuente: Propia

SUBCUENCA Hachadura	CODIGO	PMA 1897	AREAS (Km²)	PMA*A/AT	PESOS THIESEN
Ahuachapán SM	50308082	1708	63.10	271.11	0.16
Apaneca	50308721	2426	3.31	20.20	0.01
Ataco	50308531	2549	55.01	352.70	0.14
El Jobo	50308201	1487	150.81	564.12	0.38
Hachadura	50308211	2126	77.53	414.59	0.20
Montufar	50210021	1367	0.00	0.00	0.00
Ataco Bfcio. El molino	50308232	2217	47.78	266.43	0.12
TOTAL			397.54	1889	1.00

Tabla No. 5.33: Pesos de estaciones Subcuenca LA HACHADURA

Fuente: Propia

Luego se realizó el proceso para las 15 subcuencas, así: (Ver tablas No. 5.34 a 5.48)

SUBCUENCA Quezada	CODIGO	PMA 997.02	AREAS (Km²)	PMA*A/AT	PESOS THIESEN
Quezada	50210011	1009.50	322.12	1009.50	1.00
TOTAL			322.12	1009.50	1.00

Tabla No. 5.34: Pesos de estación Subcuenca Quezada

Fuente: Propia

SUBCUENCA Paz Guatemala	CODIGO	PMA 1228.07	AREAS THIESEN	PMA*A/AT	PESOS THIESEN
Quezada	50210011	1009.50	277.64	671.94	0.57
El Jobo	50308201	1487.03	105.93	377.65	0.32
Candelaria de la Frontera	50301272	1637.83	33.54	131.70	0.11
TOTAL			417.12	1181.30	1.00

Tabla No. 5.35: Pesos de estación Subcuenca Paz Guatemala

Fuente: Propia

SUBCUENCA Chingo	CODIGO	PMA 1551.74	AREAS THIESEN	PMA*A/AT	PESOS THIESEN
Candelaria de la Frontera	50301272	1637.83	75.35	1617.32	0.99
El Jobo	50308201	1487.03	0.96	18.62	0.01
TOTAL			76.31	1635.94	1.00

Tabla No. 5.36: Pesos de estación Subcuenca El Chingo

Fuente: Propia

SUBCUENCA Tres Ceibas	CODIGO	PMA 1901.24	AREAS THIESEN	PMA*A/AT	PESOS THIESEN
Candelaria de la Frontera	50301272	1637.83	89.22	544.45	0.28
Finca Los Andes	50301182	2397.92	33.62	300.33	0.15
Los Naranjos	50321581	2388.49	67.90	604.26	0.31
Santa Ana	50301331	1764.55	77.05	506.55	0.26
Ahuachapán SM	50308082	1708.01	0.61	3.88	0.00
TOTAL			268.40	1959.47	1.00

Tabla No. 5.37: Pesos de estación Subcuenca Tres Ceibas

Fuente: Propia

SUBCUENCA Pampe	CODIGO	PMA 1596.55	AREAS THIESEN	PMA*A/AT	PESOS THIESEN
Ahuachapán SM	50308082	1708.01	13.06	523.49	0.33
Candelaria de la Frontera	50301272	1637.83	10.89	418.72	0.26
El Jobo	50308201	1487.03	18.66	651.10	0.41
TOTAL			42.61	1593.31	1.00

Tabla No. 5.38: Pesos de estación Subcuenca Pampe

Fuente: Propia

SUBCUENCA Agua Caliente	CODIGO	PMA 1873.34	AREAS THIESEN	PMA*A/AT	PESOS THIESEN
El Jobo	50308201	1487.03	15.82	106.99	0.06
Ahuachapán SM	50308082	1708.01	122.48	951.33	0.49
Apaneca	50308721	2426.00	11.28	124.45	0.06
Salcoatitán	50321212	2547.46	0.14	1.67	0.01
Los Naranjos	50321581	2388.49	50.32	546.58	0.28
Ataco Bfcio. El molino	50308232	2216.79	19.85	200.13	0.10
TOTAL			219.90	1931.15	1.00

Tabla No. 5.39: Pesos de estación Subcuenca Agua Caliente

Fuente: Propia

SUBCUENCA Pulula	CODIGO	PMA 1311.67	AREAS THIESEN	PMA*A/AT	PESOS THIESEN
El Jobo	50308201	1487.03	137.84	932.78	0.71
Quesada	50210011	1009.50	81.90	376.26	0.29
TOTAL			219.74	1309.04	1.00

Tabla No. 5.40: Pesos de estación Subcuenca Pulula

Fuente: Propia

SUBCUENCA El Jobo	CODIGO	PMA 1562.54	AREAS THIESEN	PMA*A/AT	PESOS THIESEN
Ahuachapán SM	50308082	1708.01	29.23	691.54	0.44
El Jobo	50308201	1487.03	42.97	884.96	0.56
TOTAL			72.20	1576.50	1.00

Tabla No. 5.41: Pesos de estación Subcuenca El Jobo

Fuente: Propia

SUBCUENCA Los Hervideros	CODIGO	PMA 2057.76	AREAS THIESEN	PMA*A/AT	PESOS THIESEN
Ahuachapán SM	50308082	1708.01	42.58	676.49	0.35
Apaneca	50308721	2426.00	3.31	74.73	0.04
Ataco	50308531	2548.85	6.17	146.37	0.07
El Jobo	50308201	1487.03	7.83	108.30	0.05
Ataco Bfcio. El molino	50308232	2216.79	47.61	981.75	0.49
TOTAL			107.50	1987.64	1.00

Tabla No. 5.42: Pesos de estación Subcuenca Los Hervideros

Fuente: Propia

SUBCUENCA Guayapa	CODIGO	PMA 2078.16	AREAS THIESEN	PMA*A/AT	PESOS THIESEN
El Jobo	50308201	1487.03	5.78	258.49	0.12
Ahuachapán SM	50308082	1708.01	9.07	465.74	0.22
Ataco	50308531	2548.85	18.24	1397.81	0.65
Ataco Bfcio. El molino	50308232	2216.79	0.17	11.27	0.01
TOTAL			33.27	2133.31	1.00

Tabla No. 5.43: Pesos de estación Subcuenca Guayapa

Fuente: Propia

SUBCUENCA Ashuqema	CODIGO	PMA 2080.10	AREAS THIESEN	PMA*A/AT	PESOS THIESEN
Ataco	50308531	2548.85	23.59	1922.69	0.84
El Jobo	50308201	1487.03	6.02	286.17	0.12
Ahuachapán SM	50308082	1708.01	1.66	90.90	0.04
TOTAL			31.27	2299.76	1.00

Tabla No. 5.44: Pesos de estación Subcuenca Ashuqema

Fuente: Propia

SUBCUENCA Piedra de Toro	CODIGO	PMA 1698.10	AREAS THIESEN	PMA*A/AT	PESOS THIESEN
Ahuachapán SM	50308082	1708.01	9.78	143.81	0.09
El Jobo	50308201	1487.03	91.06	1165.34	0.73
Hachadura	50308211	2125.85	15.33	280.46	0.18
Ataco	50308531	2548.85	0.02	0.52	0.00
TOTAL			116.19	1590.13	1.00

Tabla No. 5.45: Pesos de estación Subcuenca Piedra de Toro

Fuente: Propia

SUBCUENCA Sunza	CODIGO	PMA 2053.21	AREAS THIESEN	PMA*A/AT	PESOS THIESEN
El Jobo	50308201	1487.03	0.25	16.05	0.01
Ataco	50308531	2548.85	6.98	779.66	0.35
Hachadura	50308211	2125.85	15.59	1452.64	0.64
TOTAL			22.82	2248.35	1.00

Tabla No. 5.46: Pesos de estación Subcuenca Sunza

Fuente: Propia

SUBCUENCA San Pedro	CODIGO	PMA 1613.19	AREAS THIESEN	PMA*A/AT	PESOS THIESEN
El Jobo	50308201	1487.03	39.88	1147.04	0.70
Hachadura	50308211	2125.85	11.82	486.04	0.30
Montufar	50210021	1366.90	0.00	0.00	0.00
TOTAL			51.69	1633.09	1.00

Tabla No. 5.47: Pesos de estación Subcuenca San Pedro

Fuente: Propia

SUBCUENCA Hachadura	CODIGO	PMA 2050.19	AREAS THIESEN	PMA*A/AT	PESOS THIESEN
Hachadura	50308211	2125.85	34.79	2125.85	1.00
Montufar	50210021	1366.90	0.00	0.00	0.00
TOTAL			34.79	2125.85	1.00

Tabla No. 5.48: Pesos de estación Subcuenca Hachadura

Fuente: Propia

Determinados los pesos de aportación para las diferentes estaciones que corresponden a cada subcuenca, estos se ingresaron al modelo HBV, proceso que se explicara más adelante.

5.6 CALCULO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

La Evapotranspiración Potencial (ETP) es uno de los datos de entrada del modelo HBV, y que tiene gran importancia en la rutina de Humedad del suelo, además este parámetro influye en la generación de la escorrentía superficial.

En el Salvador la Evapotranspiración Potencial se determina a través de la medición de la Temperatura y la aplicación de fórmulas definidas que toman en cuenta características propias de cada zona donde se determina la Evapotranspiración Potencial, a continuación se explicara el proceso que se siguió para determinar este parámetro y su posterior ingreso al modelo HBV.

En la Tabla No. 5.9 se presentó el número de estaciones que se utilizaron para el cálculo de la ETP, donde se muestran 7 estaciones dentro de la cuenca, se tienen 6 estaciones que registran la temperatura en territorio salvadoreño, y en el caso de Guatemala solo se tiene 1 estación.

A manera de ejemplo se explicara el proceso para una estación ya que este es similar para todas las demás estaciones, para ello se ha elegido la estación de Ahuachapán donde para el cálculo de la ETP se utilizó el Método Hargreaves, haciendo uso una Hoja de Cálculo proporcionada por el MARN, la cual necesita el ingreso de los datos de Temperatura media mensual y datos de Radiación Solar.

El primer paso fue obtener el registro de la Temperatura Media Mensual (°C) y el registro de Humedad Relativa (%) en la estación Ahuachapán, la cual se obtiene del registro de la DGOA de MARN, en este caso se utilizó un registro que data desde 1981 hasta el 2010, tal como se muestra en la Tabla No. 5.49 para la Temperatura y la Tabla No. 5.51 para la Humedad Relativa.

ID	ESTACIONES	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	PROM
		NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	ANUAL
A-15	Guija	25.2	26.3	27.5	28.2	27.3	25.7	25.4	25.6	25.1	25.1	25.2	25.2	26.0
A-18	Finca Los Andes	14.8	15.9	17.1	18.3	18.4	17.9	17.6	17.6	17.3	16.6	15.6	15.2	16.9
A-27	Candelaria de la Frontera	22.8	23.7	24.7	25.9	25.4	24.3	24.2	24.4	23.8	23.7	23.2	22.8	24.1
A-31	Planes de Montecristo	14.3	15.1	16.2	17.2	17.3	16.8	16.8	16.8	16.4	15.9	15.1	14.5	16.0
A-37	Santa Ana UNICO	22.9	23.9	24.9	25.9	25.3	24.4	24.5	24.5	23.6	23.6	23.2	23.1	24.2
T-6	Acajutla	26.7	27.2	28.0	28.7	28.6	27.9	27.8	27.7	27.2	27.2	27.2	27.0	27.6
T-24	Los Naranjos	16.0	16.6	17.3	18.8	19.3	19.0	19.3	19.2	18.4	18.2	17.3	16.5	18.0
H-8	Ahuachapán SM	22.1	22.7	23.7	24.8	24.5	23.6	23.7	23.6	23.0	23.0	22.7	22.3	23.3
H-14	La Hachadura	27.2	27.5	28.2	29.1	28.4	27.3	27.2	27.1	26.3	26.7	27.2	27.3	27.5
L-4	San Andrés	22.9	24.0	25.0	25.9	25.6	24.6	24.5	24.5	24.1	23.8	23.1	22.7	24.2
L-27	Chiltupán	23.2	23.4	23.7	24.2	23.7	23.3	23.5	23.3	22.6	22.8	23.2	23.2	23.3
S-10	Aerop. Ilopango	22.8	23.6	24.2	25.0	24.6	23.9	23.9	23.9	23.3	23.3	23.0	22.8	23.7
G-3	Nueva Concepción	25.7	27.0	28.0	28.9	27.9	26.4	26.0	26.1	25.7	25.7	25.5	25.5	26.5
G-4	La Palma	19.7	20.7	21.9	23.0	22.7	21.9	21.9	21.9	21.3	21.2	20.4	19.9	21.4
G-13	Las Pilas	14.3	14.9	16.0	17.1	17.4	17.2	17.0	17.1	17.2	16.4	15.4	15.0	16.2
V-9	Puente Cuscatlán	26.4	27.2	27.8	28.3	27.8	27.0	26.9	26.7	26.4	26.3	26.3	26.3	26.9
B-1	Chorrera del Guayabo	27.0	28.2	29.0	29.6	28.2	26.8	26.5	26.5	26.1	26.1	26.1	26.5	27.2
B-6	Sensuntepeque	23.0	24.0	24.7	25.7	25.0	24.2	24.0	24.0	23.6	23.6	23.0	23.0	24.0
B-10	Cerrón Grande	25.5	27.3	28.5	29.1	27.6	26.3	26.0	26.1	25.6	25.6	25.1	25.0	26.5
C-9	Cojutepeque	21.8	22.5	23.0	23.6	23.2	22.7	22.9	22.8	22.1	21.9	21.8	21.7	22.5
M-24	El Papalón	27.5	28.4	29.3	30.0	29.1	28.0	28.1	28.0	27.1	27.0	27.0	27.3	28.0
N-15	La Unión	28.2	28.9	29.6	30.3	29.4	28.4	28.7	28.5	27.5	27.5	27.7	28.0	28.6
U-6	Santiago de María	21.6	22.3	22.7	23.3	23.0	22.7	23.0	22.7	21.9	21.9	21.7	21.5	22.4
Z-2	San Francisco Gotera	27.2	28.3	29.1	29.6	28.3	27.0	27.1	26.9	26.1	26.0	26.4	26.9	27.4
Z-3	Perquín	Faltan 13 años de 1981 a 2010												

Tabla No. 5.49: Registro de Temperaturas Promedios de El Salvador

Temperatura (°C)

Fuente: DGOA – MARN

ID	ESTACIONES	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	ANUAL
		NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	
A-15	Guija	63.6	61.6	60.3	61.6	70.5	78.9	78.3	78.3	81.5	77.8	70.1	65.6	70.7
A-18	Finca Los Andes	79.3	75.1	72.2	74.0	79.8	84.8	83.7	85.0	86.8	87.7	86.0	83.5	81.5
A-27	Candelaria de la Frontera	62.1	60.5	59.7	60.8	68.7	77.2	73.9	75.1	79.2	74.8	68.0	64.7	68.7
A-31	Planes de Montecristo	80.4	78.5	76.7	78.5	84.1	89.3	84.5	85.9	90.5	87.5	84.6	82.4	83.6
A-12	Santa Ana UNICO	65.4	63.7	62.3	63.6	73.1	80.1	76.5	78.4	82.2	78.0	71.5	68.4	71.9
T-6	Acajutla	68.3	68.4	70.1	72.2	77.4	79.0	77.9	78.6	81.3	79.3	72.0	69.9	74.6
T-24	Los Naranjos	77.5	77.3	78.6	81.3	85.2	87.5	82.6	84.4	88.6	84.7	81.3	79.6	82.4
H-8	Ahuachapán SM	66.2	65.7	65.3	66.4	74.0	80.3	76.8	79.3	83.0	77.9	71.9	69.3	73.0
H-14	La Hachadura	68.3	68.1	69.5	70.0	74.9	81.0	80.1	81.3	83.1	80.7	72.2	68.9	74.9
L-4	San Andrés	71.2	67.9	67.9	70.8	78.4	83.3	81.9	82.4	85.2	83.6	77.6	73.1	76.7
L-27	Chiltiupán	63.9	64.6	67.1	72.4	80.9	84.0	81.5	83.4	86.4	83.7	73.7	67.4	75.8
S-10	Aerop. Ilopango	66.9	65.6	66.8	71.7	79.7	83.3	81.3	82.6	85.1	82.6	76.4	71.9	76.2
G-3	Nueva Concepción	60.2	57.2	56.4	59.9	70.6	80.1	79.4	79.9	82.5	78.1	69.5	64.2	69.8
G-4	La Palma	74.6	72.3	70.7	72.2	79.4	86.2	83.3	82.9	87.3	83.7	79.1	77.4	79.1
G-13	Las Pilas	83.0	81.4	79.6	80.3	83.5	86.2	84.4	84.5	87.1	86.6	85.3	84.2	83.8
V-9	Puente Cuscatlán	75.4	73.2	72.1	73.2	75.9	78.4	78.8	79.2	81.2	80.1	77.7	75.7	76.7
B-1	Chorrera del Guayabo	61.0	59.0	58.3	61.0	71.8	78.9	79.3	79.8	81.8	79.9	71.8	65.7	70.7
B-6	Sensuntepeque	69.3	67.2	67.5	71.0	79.4	84.7	83.6	84.5	87.0	84.6	79.0	74.8	77.7
B-10	Cerrón Grande	66.6	63.3	61.9	64.4	72.4	77.6	77.4	77.9	79.6	78.4	73.9	70.0	71.9
C-9	Cojutepeque	67.1	65.1	67.6	73.3	81.9	86.0	82.1	84.2	88.6	86.0	78.6	72.5	77.8
M-6	El Papalón	59.6	56.4	57.4	61.4	70.9	77.1	74.8	76.5	81.3	79.6	72.8	64.2	69.3
N-15	La Unión	55.7	54.6	55.4	58.5	67.8	71.9	68.5	69.9	76.3	74.5	65.4	58.9	64.8
U-6	Santiago de María	63.4	61.5	63.0	69.9	78.4	79.1	72.2	76.4	82.5	78.7	72.5	67.1	72.1
Z-2	San Francisco Gotera	58.8	56.3	56.9	59.7	70.6	77.1	74.6	75.5	80.3	78.8	71.7	63.4	68.6
Z-3	Perquín	Faltan 13 años de 1981 a 2010												

Tabla No. 5.50: Registro de Humedades Relativas de El Salvador

Humedad Relativa HR (%)

Fuente: DGOA – MARN

El segundo paso fue ingresar la información de la Temperatura Media Mensual (Ver Tabla No. 5.49) y la Humedad Relativa Mensual (Ver Tabla No. 5.50) de la Estación de Ahuachapán SM a la Tabla No. 5.51

MESES	TEMP	HR	RMM
1	22.1	66.2	12.41
2	22.7	65.7	13.62
3	23.7	65.3	14.89
4	24.8	66.4	15.65
5	24.5	74.0	15.83
6	23.6	80.3	15.7
7	23.7	76.8	15.72
8	23.6	79.3	15.65
9	23.0	83.0	15.14
10	22.7	77.9	14.12
11	22.3	71.9	12.84
12	23.3	69.3	12.02

Tabla No. 5.51: Temperatura Media Mensual de Ahuachapán

Fuente: DGOA

Dónde:

TEMP: Temperatura Media Mensual °C

HR: Humedad Relativa en %

RMM: Radiación Solar Extraterrestre (mm de Agua Evaporada)

Cabe mencionar que los datos de Humedad Relativa son propios de cada estación mientras que los datos de Radiación Solar Extraterrestre son para todas las estaciones, y que en ambos casos fueron proporcionados por el MARN.

Para el ejemplo, una vez ingresados los datos de Temperatura Media Mensual a la Hoja de Cálculo de ETP, el cálculo se realiza y se presenta en forma de tabla (Ver Tabla No. 5.52)

MESES	S	S 1/2	RSM	TMF	ETP/D	ETP/M	1 DEC	2 DEC	3 DEC
1	72.67221	8.5248	7.934457	71.78	4.2715	132.4170	42.7152	42.7152	46.9867
2	73.18199	8.554647	8.738572	72.86	4.7752	133.7054	47.7519	47.7519	38.2015
3	73.63338	8.58099	9.58282	74.66	5.3659	166.3429	53.6590	53.6590	59.0249
4	72.49282	8.514271	9.993626	76.64	5.7443	172.3301	57.4434	57.4434	57.4434
5	63.69687	7.981032	9.47548	76.1	5.4081	167.6520	54.0813	54.0813	59.4894
6	55.43389	7.445394	8.766952	74.48	4.8972	146.9166	48.9722	48.9722	48.9722
7	60.20797	7.75938	9.148309	74.66	5.1226	158.8005	51.2260	51.2260	56.3485
8	56.82576	7.538286	8.848063	74.48	4.9425	153.2184	49.4253	49.4253	54.3678
9	51.59106	7.182692	8.155947	73.4	4.4898	134.6955	44.8985	44.8985	44.8985
10	58.71896	7.66283	8.114937	72.86	4.4344	137.4666	44.3441	44.3441	48.7785
11	66.30108	8.142548	7.841273	72.14	4.2425	127.2756	42.4252	42.4252	42.4252
12	69.22187	8.319968	7.500451	73.94	4.1594	128.9406	41.5938	41.5938	45.7531

Tabla No. 5.52: Cálculo de ETP de la Estación Ahuachapán

Fuente: DGOA

Dónde:

S: % de Brillo del Sol

RSM: Radiación Solar Incidente

TMF: Temperatura Media en Fahrenheit

ETP/D: Evapotranspiración Potencial Diaria

ETP/M: Evapotranspiración Potencial Mensual

DEC1: Evapotranspiración Potencial aproximada por Décadas

La Tabla No. 5.52 muestra el cálculo de ETP, y de ella se seleccionó solamente el cálculo de la columna ETP/D que representa la Evapotranspiración Potencial Diaria, ya que este dato no cambia durante el mes a diferencia de las variaciones que puede experimentar la lluvia o el caudal los cuales son datos que varían de acuerdo a las condiciones climáticas.

En la Tabla No. 5.53 se presenta de manera resumida los valores de ETP que se ingresaron en el modelo HBV con sus respectivas estaciones para cada mes del año.

MES	ESTACION						
	50301	50302	50303	50304	50305	50306	50201
	Ahuachapán SM	Santa Ana UNICO	Candelaria de la Frontera	Los Naranjos	La Hachadura	Finca Los Andes	Quezada
1	4.27	4.38	4.47	3.27	4.74	3.09	4.06
2	4.78	4.99	5.07	3.66	5.24	3.66	4.53
3	5.37	5.64	5.71	4.02	5.76	4.26	5.09
4	5.74	6.01	6.12	4.26	6.14	4.56	5.41
5	5.41	5.56	5.79	4.12	5.86	4.35	5.25
6	4.90	5.01	5.17	3.88	5.29	3.95	5.00
7	5.12	5.24	5.34	4.26	5.34	4.00	5.23
8	4.94	5.11	5.28	4.11	5.23	3.91	5.02
9	4.49	4.61	4.81	3.60	4.84	3.63	4.63
10	4.43	4.53	4.70	3.60	4.71	3.26	4.16
11	4.24	4.35	4.48	3.35	4.75	2.97	3.95
12	4.16	4.17	4.26	3.13	4.58	2.86	3.71

Tabla No. 5.53: Valores de ETP que se ingresaron al Modelo HBV

Fuente: Propia

5.7 CAUDALES OBSERVADOR EN LAS ESTACIONES HIDROMETRICAS DE LA CUENCA

La calibración del modelo HBV se logra cuando los caudales simulados son ajustados con los caudales observados, por lo tanto el modelo necesita de por lo menos una estación que registre caudales, para esta investigación se utilizaron las estaciones telemétricas El Jobo y La Hachadura que tienen datos de nivel y a través de curvas de gasto se transformaron los niveles observados en caudales observados.

5.7.1 REGISTRO DE NIVELES HORARIOS

La calibración del modelo HBV es horaria y se necesitan niveles horarios que luego se transforman a caudal horario, pero las estaciones tienen registro a cada 15 minutos por lo que se utilizó el promedio de lo registrado en una hora para ser más conservadores con aquellos eventos severos que se dieron en ese lapso de tiempo.

Las Estaciones El Jobo y La Hachadura tienen datos faltantes, sin embargo estas series pueden ser usadas adicionando el valor de -9999 donde se encuentren datos faltantes, y así ingresarlos al modelo. En la Tabla 5. 19 se presenta de manera resumida los años

donde se tiene registro datos horarios de nivel de las estaciones telemétricas El Jobo y La Hachadura.

CODIGO	ESTACION	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
50308203	El Jobo_q										
50308213	Hachadura_q										

Tabla No. 5.54: Registro de Niveles del Jobo y LA Hachadura

Fuente: Propia

Dónde:

- Año de registro completo
- Año de registro completo pero con datos faltantes

5.7.2 CURVAS DE GASTO

Los niveles horarios se transformaron en caudales, previo a su ingreso al modelo, para ello se utilizaron las curvas de gasto que se han obtenido mediante registros realizados por el MARN para diferentes años hidrológicos, las curvas de gasto se generaron a partir de los diferentes aforos que realizan la institución en las estaciones El Jobo y La Hachadura. En la Tabla No. 5.55 y Tabla No. 5.56 se presenta las diferentes curvas de gasto para los diferentes años hidrológicos en las Estaciones del Jobo y la Hachadura respectivamente.

AÑO HIDROLOGICO	PERIODO HIDROLOGICO		a	b	c	NIVELES	
	INICIO	FINAL				MIN	MAX
2002 - 2003	01/05/2002	30/04/2003	-1.1539	2.0178	43.2423	1.51	4.09
2003 - 2004	01/05/2003	30/09/2003	-1.3272	1.7124	63.2468	1.60	4.39
	30/09/2003	30/04/2004	-1.3891	0.5722	21.1276	1.47	1.66
2004 - 2005	01/05/2004	22/09/2004	-1.1091	2.1394	40.9827	1.66	3.08
	22/09/2004	30/04/2005	-1.3268	1.2453	47.4274	1.47	1.82
2005 - 2006	01/05/2005	30/04/2006	-1.0228	2.4200	39.2494	1.47	6.15
2006 - 2007	01/05/2006	16/11/2006	-1.4098	1.7354	116.9365	1.72	4.26
	16/11/2006	30/04/2007	-1.3249	1.5444	65.9992	1.50	1.72
2007 - 2008	01/05/2007	19/10/2007	-1.4342	1.6252	103.4519	1.71	4.79
	19/10/2007	30/04/2008	-1.2048	1.8993	63.0657	1.48	2.00
2008 - 2009	01/05/2008	30/04/2009	-1.2074	1.7166	55.2161	1.48	4.26
2009 - 2010	01/05/2009	30/04/2010	-1.1254	1.7474	49.7694	1.42	5.08
2010 - 2011	01/05/2010	30/04/2011	-	-	-	-	-
2011 - 2012	01/05/2011	30/04/2012	-1.0851	2.1087	52.3331	1.44	7.16

Tabla No. 5.55: Curvas de Gasto de la Estación El Jobo.

Fuente: MARN

AÑO HIDROLOGICO	PERIODO HIDROLOGICO		a	b	c	NIVELES	
	INICIO	FINAL				MIN	MAX
2002 - 2003	01/05/2002	30/042003	-1.0538	2.0048	51.2892	1.45	4.84
2003 - 2004	01/052003	24/10/2003	-1.0351	2.0119	46.6811	1.46	4.76
	24/10/2003	30/042004	-0.9809	3.3111	85.1389	1.44	1.53
2004 - 2005	01/05/2004	22/09/2004	-0.8532	2.6458	32.6843	1.46	3.15
	22/09/2004	30/04/2005	-0.6732	5.3134	15.2845	1.45	1.78
2005 - 2006	01/05/2005	30/04/2006	-1.0778	2.0300	75.9063	1.39	6.27
2006 - 2007	01/05/2006	30/04/2007	-0.8621	2.2773	34.5008	1.39	5.09
2007 - 2008	01/05/2007	30/04/2008	-0.8598	2.2732	33.5491	1.39	5.11
2008 - 2009	01/05/2008	30/04/2009	-0.8554	2.1353	32.2378	1.35	4.05
2009 - 2010	01/05/2009	30/04/2010	-0.9334	2.0544	43.6993	1.39	5.00
2010 - 2011	01/05/2010	30/04/2011	-	-	-	-	-
2011 - 2012	01/05/2011	30/04/2012	-	-	-	-	-

Tabla No. 5.56: Curvas de Gasto de la Estación La Hachadura

Fuente: MARN

En las tablas anteriores se pueden observar las constantes a , b y c , que representan las constantes de las diferentes secciones transversales de las estaciones El Jobo y La Hachadura. La ecuación que utilizo fue similar a la Ecuación No. 2.4, la cual se expresa así: $Q = a (h \pm b)^c$, donde a , b , y c son constantes propias de la sección y h es la lectura de mira registrada en la estación de análisis.

5.7.3 CALCULO DE CAUDALES OBSERVADOS

El cálculo de Caudales se realizó primero seleccionando el periodo de registro de un año y precedido del ingreso de las ecuaciones de gasto para ese mismo año, finalmente se aplicó la ecuación anterior para determinar el caudal a nivel horario.

En la Tabla No 5.57 se presenta de manera resumida este proceso, en el que se ingresan los niveles observados a los cuales se les aplico la ecuación de la curva de gasto para el mismo periodo, a manera de ejemplo se cita el proceso que se siguió en el cálculo en la estación El Jobo para el año hidrológico 2009 – 2010, donde solamente se tiene una Curva de Gasto.

a		b		c	
-1.1254		1.7474		49.7694	
YY	MM	DD	HH	H	Q
2009	5	1	0	1.52	9.8
2009	5	1	1	1.52	9.8
2009	5	1	2	1.52	9.8
2009	5	1	3	1.53	10
2009	5	1	4	1.53	10
2009	5	1	5	1.54	11
2009	5	1	6	1.54	11
2009	5	1	7	1.55	11
2009	5	1	8	1.55	11
2009	5	1	9	1.55	11
2009	5	1	10	1.55	11
2009	5	1	11	1.55	11
2009	5	1	12	1.55	11
2009	5	1	13	1.55	11
2009	5	1	14	1.55	11
2009	5	1	15	1.55	11
2009	5	1	16	1.55	11
2009	5	1	17	1.55	11

Tabla No. 5.57: Cálculo de Caudales Observados mediante Curvas de Gasto del Jobo 2009 - 2010

Fuente: Propia

Dónde:

- YY: Año de análisis
- MM: Mes de análisis
- DD: Día de análisis
- HH: Hora de análisis
- H: Nivel Observado
- Q: Caudal Observado

En la Gráficos No. 5.6 y No. 5.7, se muestran los resultados de los Niveles y Caudales para este ejemplo, en los gráficos se observa el periodo de que va desde el 1 de Mayo del 2009 al 31 de Diciembre de 2009.

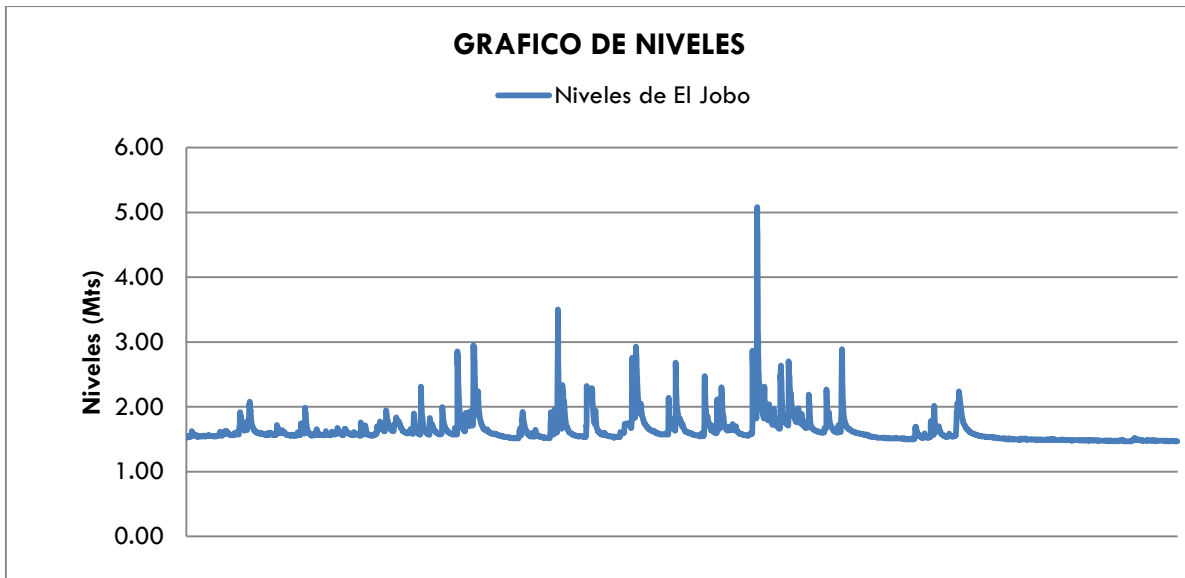


Grafico No. 5.6: Niveles de la Estación El Jobo para el año 2009

Fuente: Propia

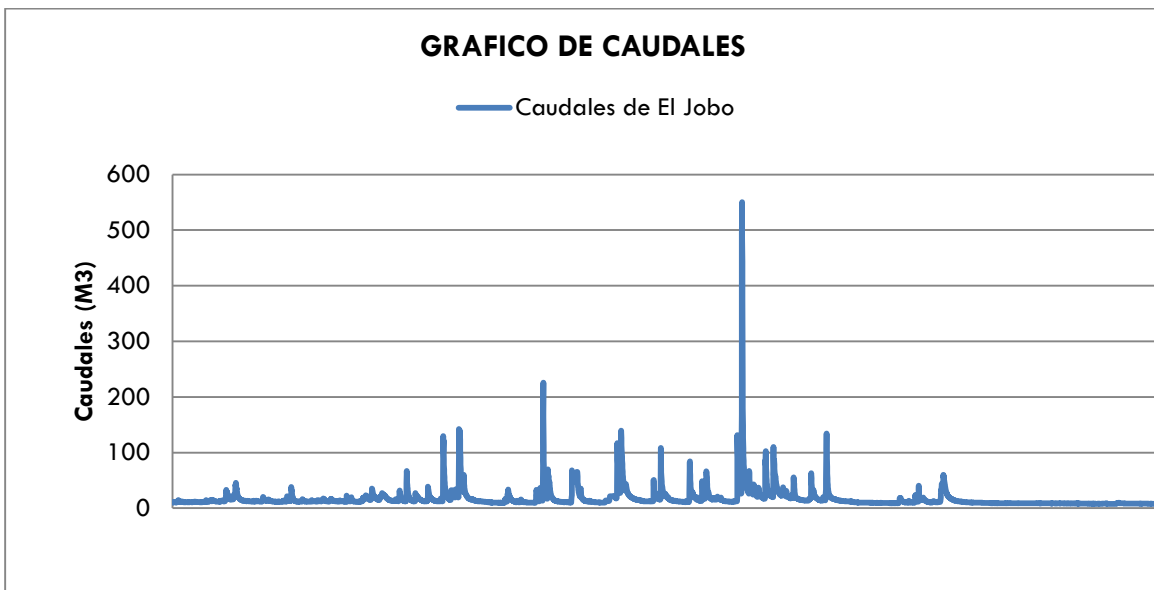


Grafico No. 5.7: Caudales de la Estación El Jobo para el año 2009

Fuente: Propia

Este proceso se siguió para los demás años restantes y para la estación la Hachadura, de manera resumida en la Tabla No. 5.58 se muestran los Caudales máximos y mínimos para cada año de registro de la estación El Jobo y La Hachadura.

AÑO	EL JOBO			LA HACHADURA		
	PROMEDIO	MINIMO	MAXIMO	PROMEDIO	MINIMO	MAXIMO
2003	11.20	4.10	430.00	17.00	6.50	657.90
2004	10.70	4.60	167.50	16.20	6.60	295.00
2005	23.40	5.70	2049.90	37.90	5.60	2150.00
2006	21.30	2.50	720.00	29.10	7.60	919.80
2007	19.50	1.90	740.00	25.50	8.10	899.90
2008	25.60	5.40	375.00	25.70	9.20	385.00
2009	13.80	6.00	550.00	17.70	8.60	780.00
2010	4.00	6.20	573.90	11.10	1.40	688.30
2011	25.90	5.90	2349.80	10.20	10.20	39.90*
2012	6.70	8.60	335.90	40.00	22.70	413.00

Tabla No. 5.58: Caudales Promedio, Máximos y Mínimos de la estación El Jobo y La Hachadura

Caudales en m³/s

Fuente: Propia

En el caso del caudal máximo del año 2011 en la estación hidrométrica La Hachadura, no se obtuvo un registro del mismo en el periodo lluvioso, por eso el máximo de 39.90 M³/s presentado en la Tabla No. 5.58 corresponde al periodo seco.

5.8 CORRELACION DE ESTACIONES

Una vez rellenos los datos faltantes en las diferentes estaciones telemétricas o automáticas se procedió a correlacionar las estaciones de la cuenca, para ello fue necesario primero definir que la calibración es a nivel horario, y por ende en la modelación solo se usaran aquellas estaciones con transmisión de datos reales, esto debido a que la calibración del modelo servirá para el fortalecimiento del Sistema de Alerta Temprana por Inundaciones de la cuenca; y segundo que las estaciones convencionales serán incluidas dentro del modelo pero serán reemplazadas por aquellas estaciones telemétricas con las que tengan una excelente correlación de datos diarios.

El análisis de la correlación de estaciones también sirvió para correlacionar estaciones telemétricas que tenían un periodo corto de datos registrados, tal es caso de las estaciones telemétricas de Ataco y Los Naranjos que se tenían registro de lluvia a partir del 2009,

mientras que Apaneca solo se tenía completo el año 2012, por esa razón las estaciones antes mencionadas se correlacionaron con el resto de estaciones telemétricas para definir la mejor correlación y el factor de reemplazo.

Antes de iniciar con el proceso de correlación, se definió primero el tipo de correlación entre estaciones, el cual pudo ser: Estación Telemétrica con Estación Telemétrica y Estación Telemétrica con Estación Convencional, para el primer caso los periodos de registros horarios de las estaciones telemétricas no son homogéneos y en el segundo caso las estaciones convencionales existentes en la cuenca poseen registro diario que no puede ser usado en la calibración y que por lo tanto se debieron reemplazar por estaciones telemétricas con registros horarios.

Para el establecimiento de las correlaciones fue necesario convertir la lluvia horaria a diaria y así comparar periodos similares, homogeneizando los periodos de registro, además como ya se explicó anteriormente los datos de lluvia fueron rellenados de manera que no existiesen datos faltantes, también se puede observar que todas las estaciones telemétricas el año 2012 tiene un registro completo al igual que las estaciones convencionales, de tal manera que este es fue el periodo de registro adecuado para realizar la correlación entre las estaciones de la cuenca del Río Paz.

Para explicar el proceso de correlación se seleccionaron las estaciones El Jobo (Estación Telemétrica) y la estación convencional Ahuachapán SM; el proceso inicio con el ingreso de la lluvia horaria que luego se transformó a lluvia diaria para la estación El Jobo, esto se logró realizando una suma de la lluvia horaria a partir de las 8 de la mañana de un día a las 7 de la mañana del siguiente día, ver Tabla No. 5.59

EL JOBO					
AÑO	MES	DIA	H	PH	P DIARIA
2012	1	1	0	0.00	
2012	1	1	1	0.00	
2012	1	1	2	0.00	
2012	1	1	3	0.00	
2012	1	1	4	0.00	
2012	1	1	5	0.00	
2012	1	1	6	0.00	
2012	1	1	7	0.00	0.00
2012	1	1	8	0.00	
2012	1	1	9	0.00	
2012	1	1	10	0.00	
2012	1	1	11	0.00	
2012	1	1	12	0.00	
2012	1	1	13	0.00	
2012	1	1	14	0.00	
2012	1	1	15	0.00	
2012	1	1	16	0.00	
2012	1	1	17	0.00	
2012	1	1	18	0.00	
2012	1	1	19	0.00	
2012	1	1	20	0.00	
2012	1	1	21	0.00	
2012	1	1	22	0.00	
2012	1	1	23	0.00	
2012	1	2	0	0.00	
2012	1	2	1	0.00	
2012	1	2	2	0.00	
2012	1	2	3	0.00	
2012	1	2	4	0.00	
2012	1	2	5	0.00	
2012	1	2	6	0.00	
2012	1	2	7	0.00	0.00
2012	1	2	8	0.00	
2012	1	2	9	0.00	
2012	1	2	10	0.00	

Tabla No. 5.59: Cálculo de lluvia diaria a partir de la lluvia horaria

Fuente: Propia

Luego se ingresó la lluvia diaria de la estación Ahuachapán SM de todo el año 2012, (ver Tabla No. 5.60)

LLUVIA DIARIA DE ESTACION CONVENCIONAL: AHUACHAPAN												
DIAS	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.20	59.70	13.80	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.80	13.80	4.90	0.00	1.20	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	10.80	12.90	0.00	0.30	0.00	19.70	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	5.80	24.90	8.80	49.70	0.00	22.90	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	12.50	4.20	0.40	16.40	10.00	0.00	0.20	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	2.40	0.50	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	19.40	0.00	0.00	0.80	33.30	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	1.10	3.50	17.80	6.10	8.30	18.00	0.00	0.00
9	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	1.80	50.00	0.00	13.40	19.60	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.50	0.00	1.00	7.30	19.70	0.00	0.00
11	0.00	0.00	0.00	0.00	1.20	6.40	5.40	22.70	2.80	1.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.20	2.30	0.00	0.60	0.00	18.00
13	0.00	0.00	0.00	0.60	45.30	0.00	7.50	7.30	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.80	29.70	1.30	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00	7.20	17.40	7.10	5.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	0.00	0.00	0.00	0.00	2.60	0.00	0.90	33.90	1.60	0.00	0.00	0.00
17	0.00	29.20	0.00	0.00	1.00	7.60	4.50	1.00	10.90	2.60	0.00	0.00
18	0.00	0.00	0.00	2.50	5.80	0.70	18.20	2.00	2.00	0.00	0.00	0.00
19	0.00	0.00	16.50	0.00	0.10	13.20	0.10	14.30	44.70	0.30	0.00	0.00
20	0.00	0.00	0.00	0.00	1.30	17.80	0.00	0.20	0.50	11.80	0.00	0.00
21	0.00	0.00	0.00	0.00	8.00	0.40	0.00	23.70	8.70	0.00	0.00	0.00
22	0.00	0.00	0.00	24.40	10.90	28.30	1.50	28.50	12.30	1.00	0.00	0.00
23	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	49.70	4.20	19.70	0.00	0.00	0.00
24	4.20	0.00	0.00	0.00	1.70	7.10	0.30	23.60	2.90	0.00	0.00	0.00
25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.30	0.00	19.70	0.00	0.00	0.00
26	0.00	0.00	0.00	0.00	3.00	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27	0.00	0.00	0.00	0.00	11.00	0.00	0.00	6.10	0.00	5.00	0.00	0.00
28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	17.00	0.00	7.80	3.50	0.00	0.00	0.00
29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.60	0.00	16.90	12.80	0.00	0.00	0.00
30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60	28.40	0.00	13.10	1.00	0.00	0.00	0.00
31	0.00	0.00	0.00	0.00	1.70	0.00	0.00	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00
SUMAS	4.50	29.70	16.50	34.70	145.40	252.20	227.10	347.90	196.70	157.70	0.20	18.00
											TOTAL	1430.60

Tabla No. 5.60: Registro de lluvia diaria de estación Ahuachapán SM, año 2012

Fuente: MARN

Ya obtenido el registro diario de ambas estaciones se procedió a acumular los datos de ambas estaciones, ver Tabla No. 5.61

YY	MM	DD	EL JOBO	AHUACHAPAN	EL JOBO	AHUACHAPAN
2012	11	27	0.00	0.00	1100.58	1412.60
2012	11	28	0.00	0.00	1100.58	1412.60
2012	11	29	0.00	0.00	1100.58	1412.60
2012	11	30	0.00	0.00	1100.58	1412.60
2012	12	1	0.00	0.00	1100.58	1412.60
2012	12	2	0.00	0.00	1100.58	1412.60
2012	12	3	0.00	0.00	1100.58	1412.60
2012	12	4	0.00	0.00	1100.58	1412.60
2012	12	5	0.00	0.00	1100.58	1412.60
2012	12	6	0.00	0.00	1100.58	1412.60
2012	12	7	0.00	0.00	1100.58	1412.60
2012	12	8	0.00	0.00	1100.58	1412.60
2012	12	9	0.00	0.00	1100.58	1412.60
2012	12	10	0.00	0.00	1100.58	1412.60
2012	12	11	0.00	0.00	1100.58	1412.60
2012	12	12	1.02	18.00	1101.60	1430.60
2012	12	13	4.32	0.00	1105.92	1430.60
2012	12	14	0.00	0.00	1105.92	1430.60
2012	12	15	0.00	0.00	1105.92	1430.60
2012	12	16	0.00	0.00	1105.92	1430.60
2012	12	17	0.00	0.00	1105.92	1430.60
2012	12	18	0.00	0.00	1105.92	1430.60
2012	12	19	0.00	0.00	1105.92	1430.60
2012	12	20	0.00	0.00	1105.92	1430.60
2012	12	21	0.00	0.00	1105.92	1430.60
2012	12	22	0.00	0.00	1105.92	1430.60
2012	12	23	0.00	0.00	1105.92	1430.60
2012	12	24	0.00	0.00	1105.92	1430.60
2012	12	25	0.00	0.00	1105.92	1430.60
2012	12	26	0.00	0.00	1105.92	1430.60
2012	12	27	0.00	0.00	1105.92	1430.60
2012	12	28	0.00	0.00	1105.92	1430.60
2012	12	29	0.00	0.00	1105.92	1430.60
2012	12	30	0.00	0.00	1105.92	1430.60
2012	12	31	1.77	0.00	1107.69	1430.60

Tabla No. 5.61: Lluvia acumulada de las estaciones El Jobo (T)- Ahuachapán (C)

Fuente: Propia

Los datos diarios acumulados se graficaron para ver la tendencia de la curva y buscar la mejor curva de ajuste que produzca la correlación de los datos que tiene que ser cercana a 1, y luego para determinar la ecuación que gobierna esa correlación y así definir el coeficiente de corrección, que es el coeficiente que multiplica a la variable independiente que en este caso es El Jobo. Ver Figura No. 5. 21

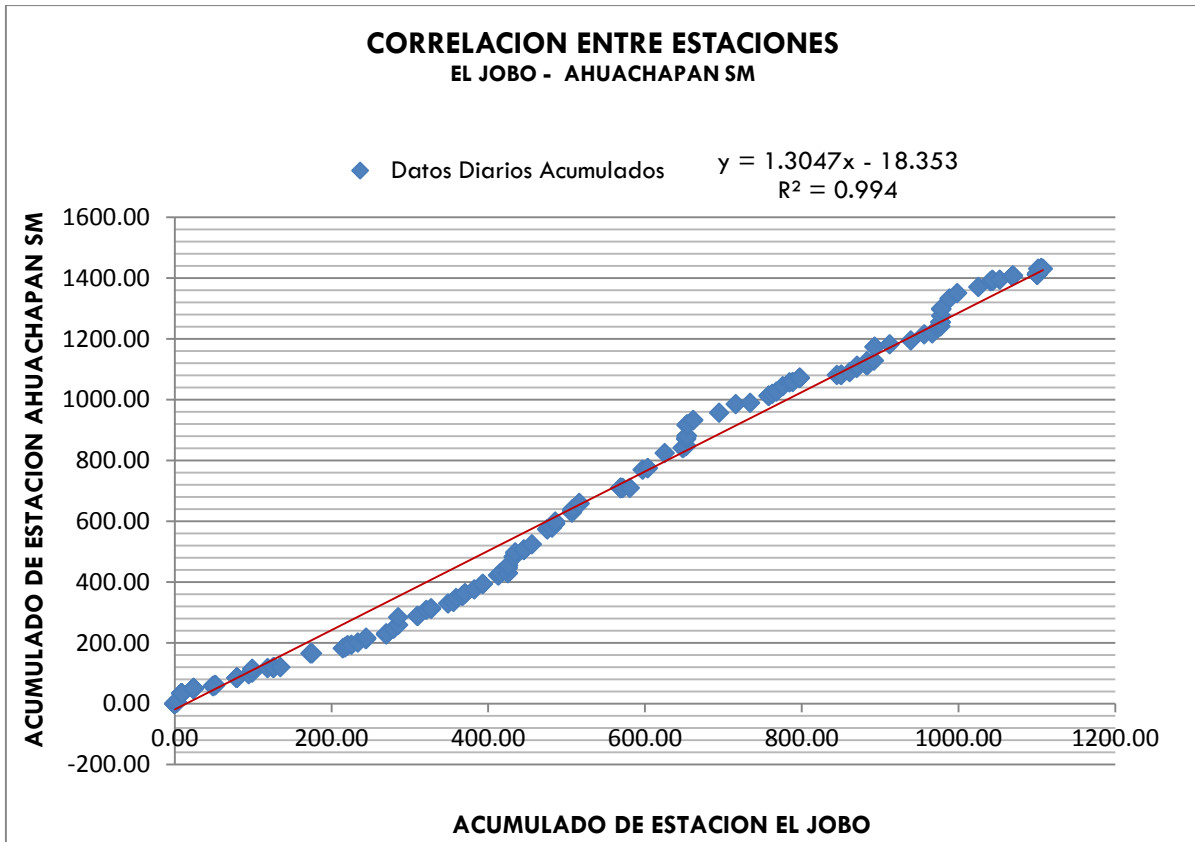


Gráfico No. 5.8: Gráfico de Correlación de las Estaciones El Jobo y Ahuachapán SM

Fuente: Propia

En la gráfica anterior se puede observar dos aspectos importantes, el primero es valor de coeficiente de correlación de 0.994 que muestra una buena correlación entre ambas estaciones (valor cercano a 1.0) y segundo la ecuación que gobierna esta correlación que es $y = 1.3047x - 18.53$, donde 1.3047 es la pendiente de dicha ecuación y que a su vez se define como el factor de corrección.

También los datos acumulados diarios de ambas estaciones y los datos diarios no acumulados se compararon entre sí, y se pudo observar que existe una tendencia bastante similar entre las estaciones partiendo del hecho de que llueve más en Ahuachapán que en El

Jobo, sin embargo el comportamiento de la lluvia es casi el mismo, demostrando que si se registra lluvia en la estación de Ahuachapán SM también se registra en la estación El Jobo solamente que las proporciones son diferentes. Ver las Gráficas No. 5.9 y No. 5.10

En resumen, de la correlación de Ahuachapán SM con El Jobo se puede concluir que esta es excelente, sin embargo para las estaciones que se usaron en la calibración del modelo se realizaron varias correlaciones diferentes hasta encontrar los valores que produjeron los mejores ajustes de datos acompañados de los mejores valores de correlación.

Finalmente se realizaron correlaciones entre las distintas estaciones y se obtuvieron resultados bastante satisfactorios, de los cuales se eligieron los mejores valores para ser ingresados al modelo HBV. Tales correlaciones se muestran resumidas en la tabla No. 5.62

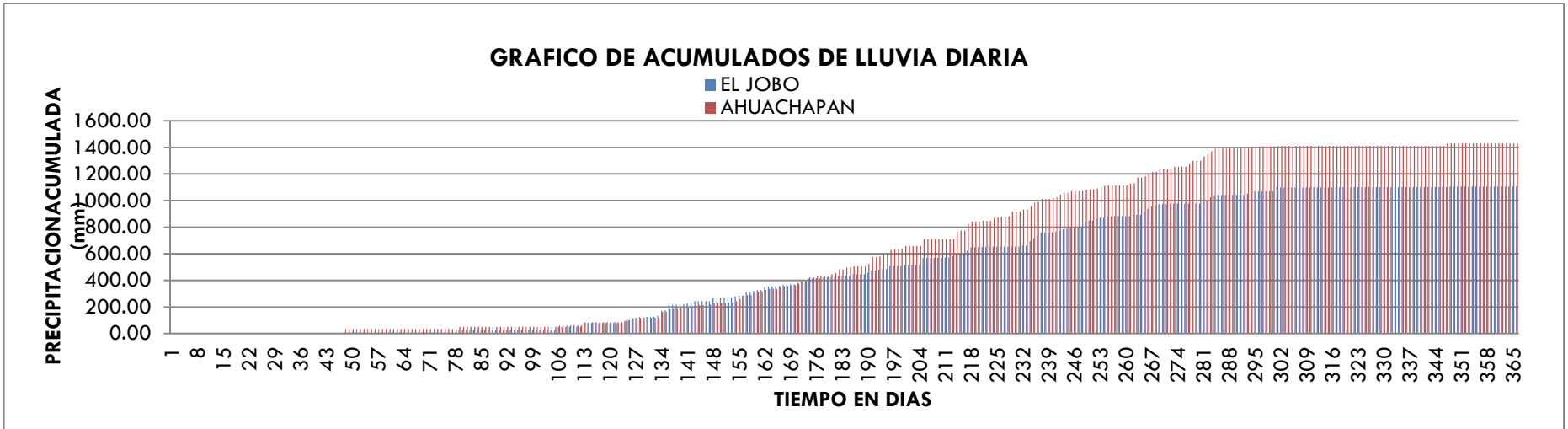


Grafico No. 5.9: Comparativo de Datos Acumulados Diarios de las estaciones El Jobo y Ahuachapán SM año 2012

Fuente: Propia

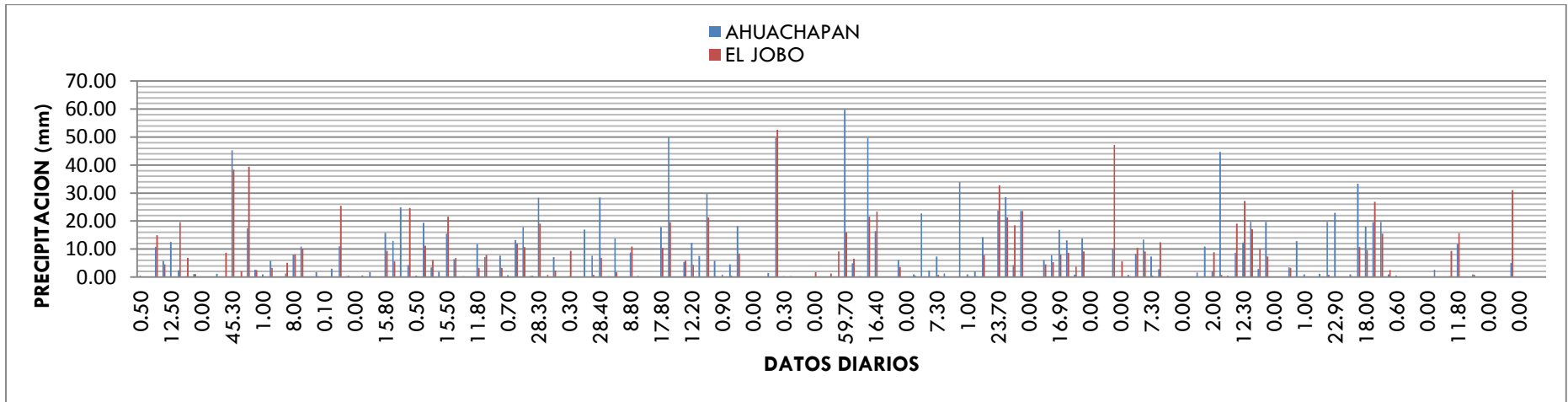


Grafico No.5.10: Comparación de lluvia diaria de las estaciones El Jobo y Ahuachapán SM año 2012

Fuente: Propia

ESTACION 1		ESTACION 2		R ²	ECUACION	FACTOR DE CORRECCION	OBSERACIONES
NOMBRE	CODIGO	NOMBRE	CODIGO				
El Jobo	50308201	Ataco	50308531	0.9952	$y = 1.6912x - 45.503$	1.69	Llueve mucho más en Ataco y la diferencia de acumulados no tienen la misma tendencia
El Jobo	50308201	Ataco Bfcio. El molino	50308232	0.9949	$y = 1.6578x - 25.119$	1.66	Llueve mucho más en la estación de ataco El Molino
El Jobo	50308201	La Hachadura	50308142	0.9964	$y = 1.4054x + 5.6881$	1.41	Llueve mucho más en la Hachadura, sin embargo la tendencia de los acumulados es bastante similar
El Jobo	50308201	Ahuachapán SM	50308082	0.9940	$y = 1.3047x - 18.353$	1.30	Llueve más en Ahuachapán SM aunque la gráfica acumulada revela un buena tendencia entre ambas estaciones
El Jobo	50308201	Apaneca	50308721	0.9967	$y = 1.6545x - 15.049$	1.65	Llueve mucho mayor en Apaneca y la tendencia de la lluvia acumulada no es muy buena
El Jobo	50308201	Candelaria de la frontera	50301272	0.9816	$y = 1.3085x - 43.768$	1.31	A pesar de que el R ² es bajo los acumulados son bastantes buenos, y llueve más en Candelaria
El Jobo	50308201	Santa Ana UNICO	50301372	0.9959	$y = 1.4402x - 3.88$	1.44	Llueve más en Sata Ana, pero la lluvia acumulada tienen la misma tendencia
El Jobo	50308201	Finca Los Andes	50301182	0.9952	$y = 1.9063 - 26.641$	1.91	A pesar de una buena correlación la gráfica de acumulados muestra que la tendencia no es muy buena

El Jobo	50308201	Salcoatitán	50321212	0.9964	$y = 2.519x - 40.84$	2.52	Se tiene una buena correlación sin embargo la lluvia acumulado no tiene una buena relación
El Jobo	50308201	Los Naranjos	50321242	0.9959	$y = 1.8406x - 16.822$	1.84	Se tiene una buena correlación sin embargo la lluvia acumulado no tiene una buena relación
El Jobo	50308201	Hachadura	50308211	0.9955	$y = 1.0522x + 9.311$	1.05	Muy buena correlación
Santa Ana	50301331	Ataco	50308531	0.9947	$y = 1.1889x - 53.907$	1.19	LA grafica de acumuladas es bastante buena y la diferencia de lluvia es poca
Santa Ana	50301331	Ataco Bfcio. El molino	50308232	0.9918	$y = 1.1639x - 32.296$	1.16	Se tiene una muy buena tendencia d los acumulados de lluvia
Santa Ana	50301331	Ahuachapán SM	50308082	0.9943	$y = 0.9176x - 25.109$	0.92	Se tiene una muy buena tendencia d los acumulados de lluvia
Santa Ana	50301331	Apaneca	50308721	0.9920	$y = 1.1607x - 21.529$	1.16	Se tiene una muy buena tendencia d los acumulados de lluvia
Santa Ana	50301331	Candelaria de la frontera	50301272	0.9918	$y = 1.1639x - 32.296$	1.16	Se tiene una muy buena tendencia d los acumulados de lluvia
Santa Ana	50301331	Salcoatitan	50321212	0.9963	$y = 1.7712x - 53.587$	1.77	La grafica acumulada no es tan buena, sin embargo tiene un excelente R2
Santa Ana	50301331	Finca Los Andes	50301182	0.9984	$y = 1.3426x - 40.88$	1.34	Se tiene un excelente R2 y la gráfica de acumulados es bastante buena
Santa Ana	50301331	Santa Ana UNICO	50301372	0.9996	$y = 1.0146x - 12.544$	1.01	Excelente correlación

Santa Ana	50301331	Los Naranjos	50321242	0.9954	$y = 1.2939x - 25.986$	1.29	Muy buena correlación
Los Naranjos	50321581	Santa Ana UNICO	50301372	0.9939	$y = 0.9165x + 0.6242$	0.92	Muy buena correlación
Hachadura	50308211	La Hachadura	50308142	0.9996	$y = 1.3347x - 6.2896$	1.33	Muy buena correlación
Apaneca	50308721	Santa Ana UNICO	50301372	0.9913	$y = 0.867x + 12.01$	0.87	Muy buena correlación

Tabla No. 5.62: Correlación entre estaciones de lluvia

Fuente: Propia

5.9 ETAPA PRELIMINAR A LA CALIBRACION DEL MODELO HBV

Se puede definir la calibración como, la etapa del proceso de modelización que obliga a que el funcionamiento del Modelo Matemático reproduzca en mayor o menor grado la historia del sistema real. Es por ello que esta etapa de la modelación se procederá al ajuste de los parámetros incluidos en el modelo y a la comparación de los resultados obtenidos mediante la modelación y los obtenidos por el sistema de monitoreo hidrológico que actualmente funciona en la cuenca.

Para ello el proceso se subdividió en al menos tres pasos ordenadas de manera lógica y consecutiva, el primer paso consistió en realizar una secuencia lógica para la creación de distritos de calibración, seguido del ingreso de las estaciones y la información del distrito de manera general; el segundo paso consistió en detallar el proceso de calibración con el escenario con dos subcuencas, y finalmente el tercer paso fue igual que el segundo paso con la diferencia que se hará para el escenario con las quince subcuencas.

Partiendo del hecho que la calibración se hará para ambos sistemas, este proceso se puede subdividir en dos grandes etapas, de la siguiente manera: La etapa de la calibración en la que comprende el ingreso de aquellos parámetros determinados mediante pruebas de campo y laboratorio, y el ajuste de aquellos parámetros que serán simulados mediante el Método de Montecarlo según la clasificación presentada el capítulos anteriores, la inspección visual y comparación de Hidrograma simulado y observado, cálculo de la diferencia acumulada, y cálculo de la varianza. Posteriormente se realizara la segunda etapa denominada validación de la calibración que incluye: un reajuste de parámetros y el cumplimiento de los pasos descritos en la etapa anterior.

5.9.1 CREACION DEL DISTRITO DE CALIBRACION

El punto de partida para calibrar cualquier subcuenca mediante el uso del Modelo HBV, es el establecimiento o creación del distrito de calibración, este proceso lleva implícito una serie de pasos o subprocesos que resultan imprescindibles para el ingreso del distrito al

modelo. Como se explicó a lo largo de todo este capítulo, resulta conveniente que se haya definido con anterioridad el propósito de la calibración; en pocas palabras se debe perseguir un objetivo bien definido del porqué de la calibración; y dado que el modelo posee una diversidad de aplicaciones, se debe procurar que todo el trabajo previo a la calibración posea este enfoque.

Desde la pantalla principal del modelo se puede apreciar el menú *File* donde se encuentra la opción *New District*, que sirve para la creación de un nuevo distrito (Ver Figura No. 5.10)

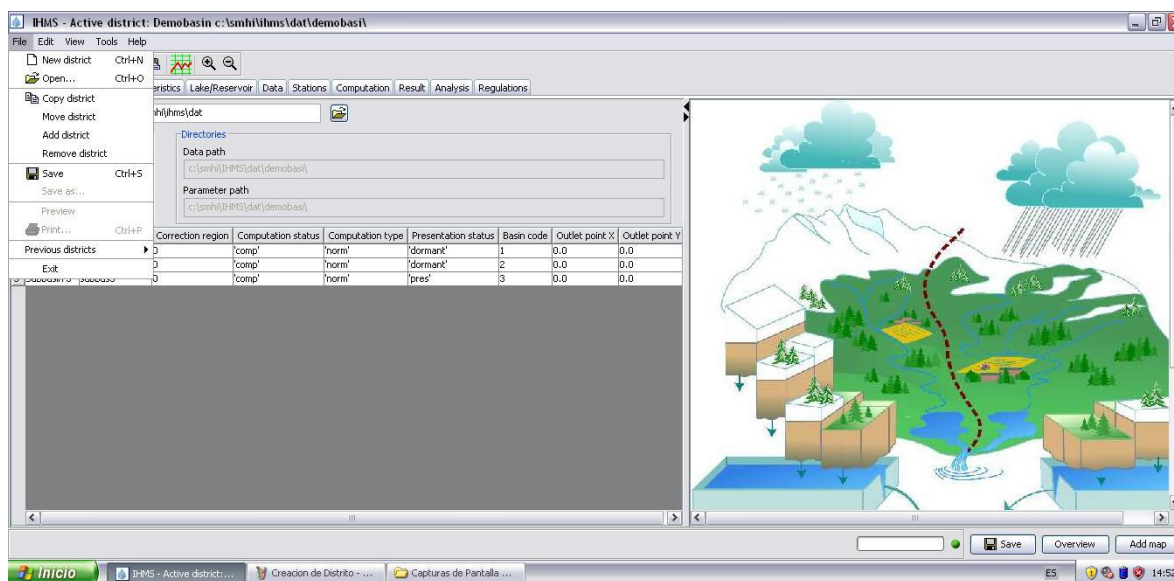


Figura No. 5.10: Pantalla principal del software del Modelo HBV

Fuente: Propia

Particularmente se ha enfocado la calibración del Modelo HBV hacia el fortalecimiento del Sistemas de Alerta Temprana por Inundaciones, esa es la razón por la cual la cuenca se ha dividido mediante el establecimiento de los puntos de control, de dos maneras; este criterio de división se explicara a detalle más adelante.

5.9.1.1 *DISTRITO PARA CALIBRACION CON 2 SUBCUENCAS*

Según se estableció previamente, se crearon dos escenarios en los cuales se realizó el proceso de calibración, el primero corresponde a dos subcuencas principales cuyos puntos

de control son las estaciones El Jobo y Hachadura. Este distrito fue creado como una forma simplificada de la cuenca, dado que el Manual del Modelo HBV recomienda que las subdivisiones de las cuencas se realicen donde existan estaciones de medición de caudales para tener puntos de control; que además sirvió para establecer un patrón de comportamiento de los parámetros de la cuenca, de manera que estos faciliten la calibración con el escenario de 15 subcuencas.

Como puede observarse en el Mapa No. 5.3, a este distrito se le adicionaron 2 subcuencas que fueron nombradas en base a sus dos estaciones de medición de caudales, esto también se refleja en el modelo. (Ver Figura No. 5.11)

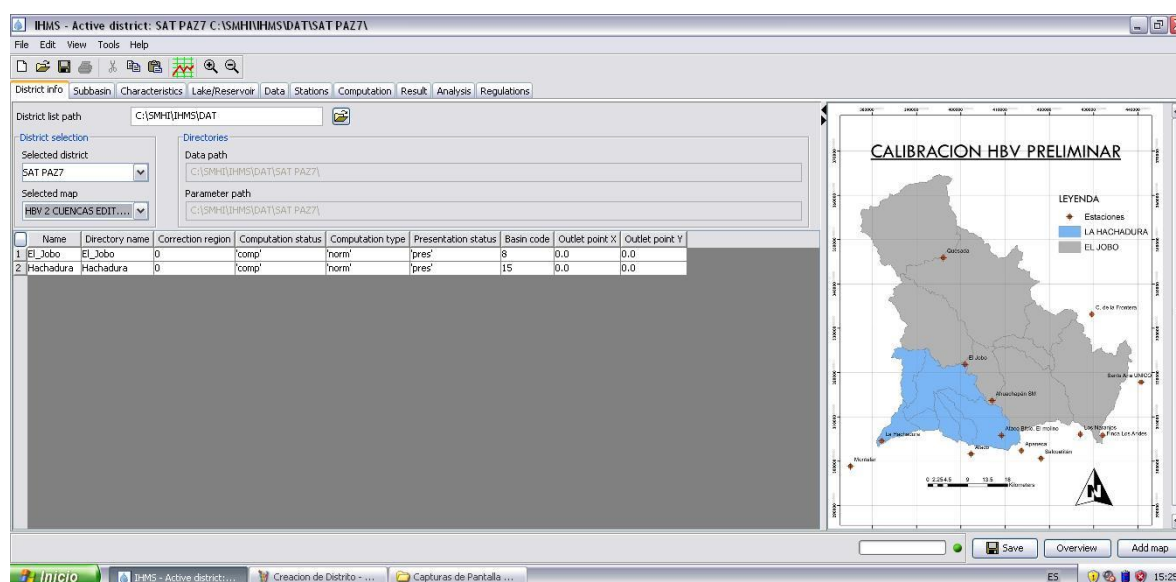


Figura No. 5.11: Creación del distrito con 2 subcuencas

Fuente: Propia

5.9.1.2 *DISTRITO PARA CALIBRACION CON 15 SUBCUENCAS*

Luego, además del distrito creado para dos subcuencas, también se creó el distrito propio de la calibración, el cual se le adicionaron quince subcuencas, las cuales se nombraron en base a los ríos más largos de dichas subcuencas y a los puntos de control. Ver Figura No. 5.12

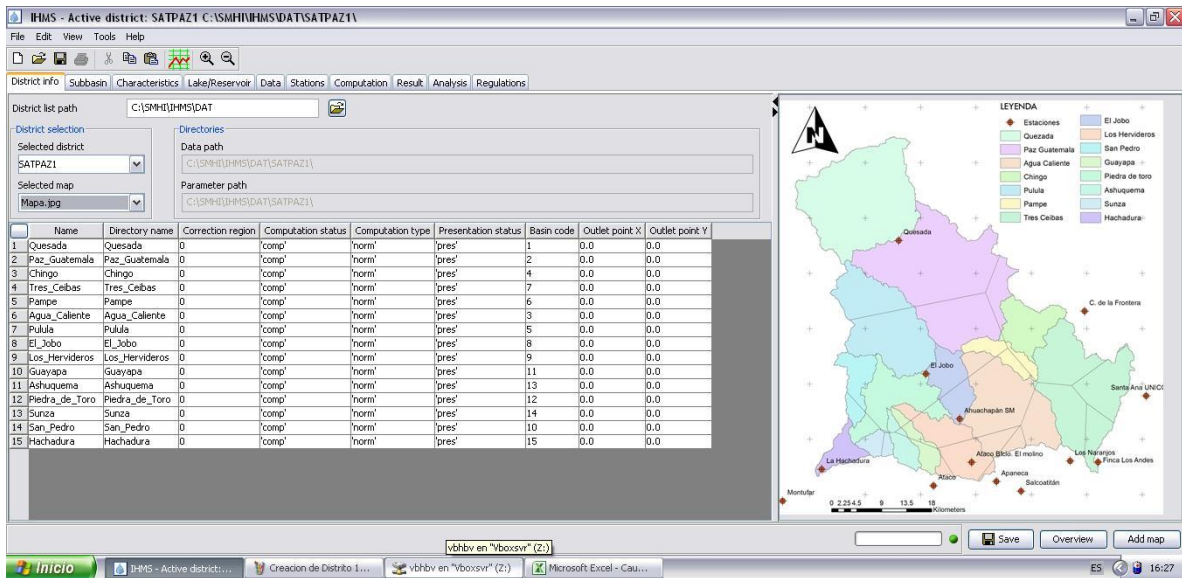


Figura No. 5.12: Creación del distrito con 15 subcuencas

Fuente: Propia

Entre las características principales de este distrito se tiene que: al igual que el distrito con dos subcuencas se crearon puntos de control para las estaciones existentes sobre el cauce principal y adicionalmente se creó un punto de control similar en la parte alta de la cuenca donde se ubica la estación hidrométrica de Quezada; se crearon además otras subcuencas tomando como base los criterios descritos en cuanto a los puntos de control dejando claro que actualmente no existe estaciones hidrométricas pero que a futuro se puedan incorporar, esto significa que mediante esta incorporación puedan definirse nuevos niveles de alerta en dichas subcuencas con el fin de fortalecer el Sistema de Alerta Temprana por Inundaciones.

5.9.2 CREACION DE SUBCUENCAS

En la figura anterior se puede observar la generación de las 15 subcuencas para este escenario; este proceso se realizó en la pestaña denominada subbasin incluida en el software, donde se define cada una de las subcuencas que pertenecen a los escenarios, dicha definición abarca: Creación y establecimiento del nombre por subcuenca, ingreso de las coordenadas del punto de salida, ordenamiento de las subcuencas y configuración de la topología de la cuenca, etc. Ver Figura No. 5.13

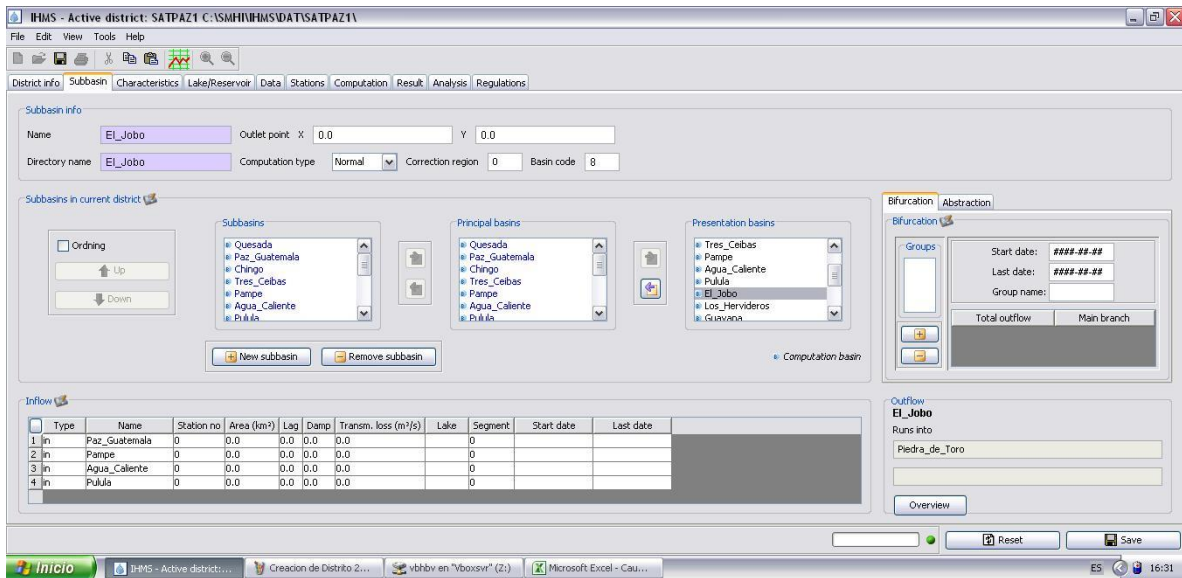


Figura No. 5.13: Pestaña de la configuración de Subcuencas

Fuente: Propia

En cuanto a la Topología de la cuenca se puede decir que es la representación gráfica de la forma en que drenan las diferentes subcuencas hacia su punto de salida, para este caso la topología se definió en base al drenaje de las quince subcuencas que se ven directamente influenciado por la topografía de la cuenca, de manera resumida la topología se muestra en la Figura No. 5.14

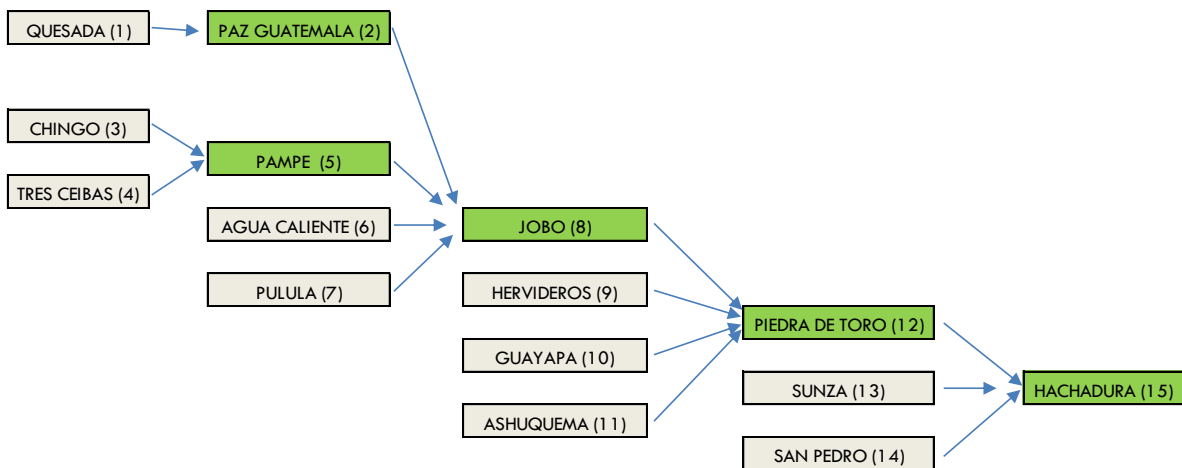


Figura No. 5.14: Topología de la cuenca del Río Paz para escenario con 15 subcuencas

Fuente: Propia

En la figura anterior se muestra la estructura de la topología de la cuenca, las subcuencas en color gris son aquellas que son cabecera y las subcuencas en color verde son aquellas que reciben una o más cabeceras.

5.9.3 CARACTERISTICAS

Una vez generadas las subcuencas para cada escenario dentro del modelo, se procedió a definir las características que tendrá cada subcuenca, dentro de ellas están los parámetros del modelo HBV aplicables para áreas tropicales y el ingreso a cada subcuenca de las zonas geográficas que existientes según su cobertura.

5.9.3.1 INGRESO DE PARAMETROS DE CALIBRACION

En la Tabla 4.15 se presentó una lista de los parámetros del modelo, los cuales se ingresaron en ambos escenarios calibrados, cabe mencionar que dichos parámetros fueron seleccionados de acuerdo a la aplicabilidad de los mismos para zona tropicales como El Salvador (Ver Figura No. 5.15)

Cada uno de los parámetros listados se ingresaron a cada una de las subcuencas de ambos distritos, puede apreciarse en la figura mostrada que en la parte izquierda se encuentran las subcuencas para el distrito presentado; al seleccionar cada subcuenca se pueden ver los parámetros con sus valores por defecto ingresados para todo el distrito, estos se incluyen para cada subcuenca de manera automática.

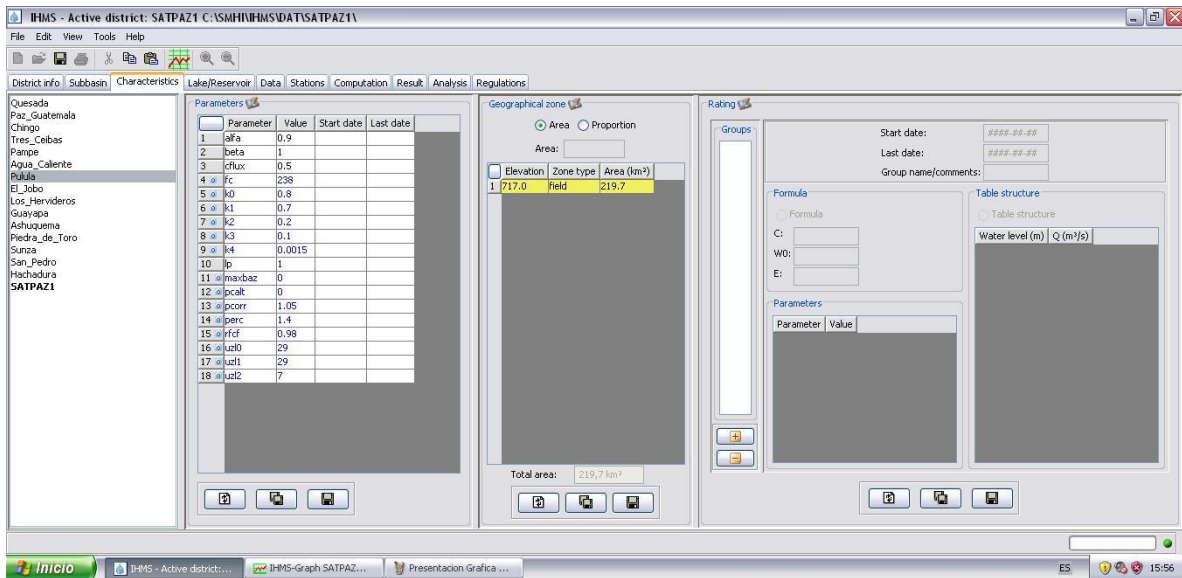


Figura No. 5.15: Ingreso de Parámetros de Calibración del Modelo HBV

Fuente: Propia

En este caso, dado que se crearon dos escenarios, se utilizaron los mismos valores de los parámetros por defecto sin modificar el número de parámetros involucrados, haciendo un total de 18 parámetros; este proceso se abordará a detalle más adelante en este mismo capítulo.

5.9.3.2 CREACION DE ZONAS

El Modelo HBV reconoce cinco tipos de áreas o zonas; cada subcuenca puede dividirse en varias zonas según el tipo de cobertura que posea acorde a la clasificación que se presenta en los próximos literales:

- **Forest:** Zona de bosques
- **Field:** Zona sin bosques (campos)
- **Glac:** Zona con de glaciares
- **llake:** La suma de todos los lagos (agua de superficie)
- **Olake:** Salida lago / embalse (sólo una por subcuenca)

Dado que se cuenta con dos distritos o escenarios creados para esta investigación, resulta conveniente aclarar que para el primer escenario se crearon un total de 15 subcuencas, para las cuales hubo que definir el tipo de zona a la cual pertenecen; así mismo para el escenario con solamente 2 subcuencas, por lo tanto para el distrito creado para 15 subcuencas, al igual que el distrito utilizado con 2 subcuencas se utilizó solamente un tipo de zona denominado **Field** (Campo). (Ver tabla No. 5.63 y 5.64) debido a que la mayor parte de la zona está constituida por zonas de campos, cultivos y/o similar cobertura.

Cabe mencionar que para ambos distritos se usaron las mismas áreas, sin embargo la diferencia existente entre ambos radica en el hecho de que para el primero (15 Subcuencas) se usó un área por subcuenca, y para el segundo (2 subcuencas) se utilizaron varias zonas dentro de las 2 subcuencas creadas, así: de la subcuenca 1 hasta la No. 8 forman parte de la subcuenca El Jobo y el resto (9-15) forman parte de la subcuenca Hachadura constituyendo así las distintas zonas. (Ver Tabla No. 5.63)

No. DE SUBCUENCA	NOMBRE	AREA (km²)	TIPO DE ZONA	ELEVACION (m)
1	Quezada	322.1	Field	1209
2	Paz Guatemala	417.1	Field	907
3	Agua Caliente	219.9	Field	782
4	Chingo	76.3	Field	898
5	Pulula	219.7	Field	717
6	Pampe	42.6	Field	611
7	Tres Ceibas	268.4	Field	851
8	El Jobo	72.2	Field	548
9	Los Hervideros	107.5	Field	914
10	San Pedro	51.7	Field	756
11	Guayapa	33.3	Field	734
12	Piedra de Toro	116.2	Field	526
13	Ashuqema	31.3	Field	756
14	Sunza	22.8	Field	610
15	Hachadura	34.8	Field	191

Tabla No. 5.63: Tipos de Zonas usadas para calibración

Fuente: Propia

5.9.4 INGRESO DE ESTACIONES

El siguiente paso es el ingreso de las estaciones de lluvia, evapotranspiración y de caudal al modelo HBV, en este caso, estas estaciones ya se definieron anteriormente, el ingreso de dichas estaciones se explicara a continuación.

5.9.4.1 ESTACIONES DE LLUVIA

Las estaciones de lluvia juegan un papel fundamental en la cuantificación y distribución de la lluvia que cae sobre la cuenca, por tal razón es que su ingreso es de vital importancia; ya que su análisis se realizó anteriormente se puede determinar que existen un total de 13 estaciones disponibles para ser utilizadas en los 2 sistemas de calibración propuestos, cabe mencionar que del total de estaciones, 6 son Telemétricas y las restantes son estaciones convencionales distribuidas en El Salvador y Guatemala..

El proceso inicia seleccionando la pestaña *Stations* dentro del Modelo, se selecciona la opción *Add Station* para agregar cada estación, luego se ingresan los datos del nombre y código previamente definido, posteriormente se define el tipo de estación, en este caso es (p) indicando que se trata de una estación de lluvia, y finalmente se ingresa la estación de reemplazo con su respectivo factor de corrección, este proceso se resume en la Figura No. 5.16

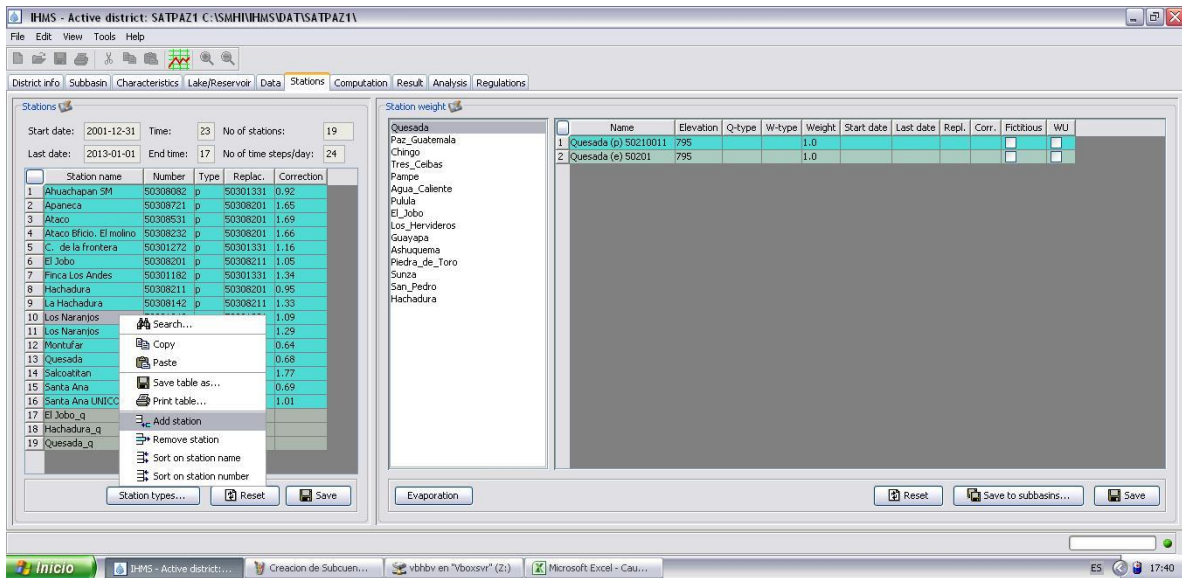


Figura No. 5.16: Ingreso de Estaciones de Lluvia al modelo HBV

Fuente: Propia

5.9.4.2 ESTACIONES DE EVAPOTRANSPIRACION

Para el ingreso de las estaciones de Evapotranspiración el proceso inicia con la selección de la opción *Evaporation* ubicada en la pestaña *Stations* parte inferior de la sección *Station Weight* (Ver Figura No. 5.16), al seleccionar esta opción se abre una nueva ventana donde se pueden ingresar tales estaciones (Ver Figura No. 5.17).

Como puede apreciarse en la parte inferior izquierda se encuentran las opciones para agregar o remover estaciones, en la parte superior de dicha ventana se encuentran las casillas donde se define el nombre y el código para cada estación, finalmente en la parte central se encuentra la tabla donde se ingresan los valores de ETP para cada una de las 7 estaciones utilizadas que se han calculado anteriormente en la sección 5.6 de este capítulo (Ver Tabla No. 5.53)

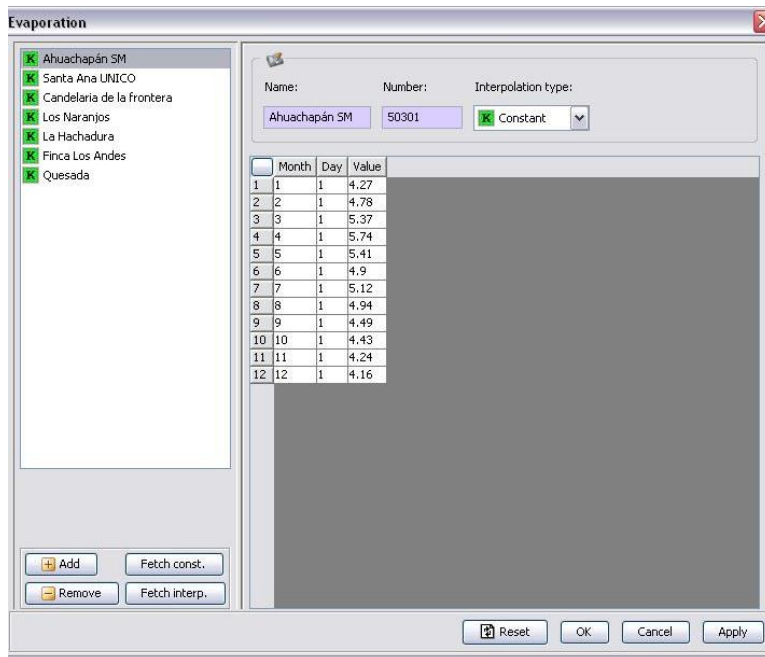


Figura No. 5.17: Ingreso de Estaciones de Evapotranspiración

Fuente: Propia

5.9.4.3 ESTACIONES DE CAUDAL

Para el ingreso de las estaciones de caudal se sigue un proceso similar al de las estaciones de lluvia, con la variante del tipo de estación, que para este caso se colocó (q) para darle a entender al modelo que son estaciones de caudal. (Ver Figura No. 5.16)

5.9.4.4 CORRELACION ENTRE ESTACIONES Y DISTRIBUCION DE PESOS

Luego de ingresadas cada una de las estaciones, se procedió al análisis de correlación entre estas, dicho análisis es de mucha importancia ya que define un factor de reemplazo que tendrá cada estación en caso de no contar con un registro completo, o por ser estaciones del tipo convencional.

Este tema se abordó en secciones anteriores, sin embargo cabe aclarar que la calibración es horaria y por ende las estaciones utilizadas fueron Telemétricas, de manera que las

correlaciones se hicieron para estaciones telemétricas cuando no se poseía un periodo homogéneo de registro y para las estaciones convencionales dado que estas no registran datos de igual manera que las estaciones telemétricas. Los resultados obtenidos de estas correlaciones fueron presentados en la Tabla No. 5.62 para todas las estaciones analizadas; sin embargo luego de su respectivo análisis y selección se presenta la Tabla No. 5.65 con las correlaciones finales utilizadas para las estaciones, que finalmente fueron ingresadas al Modelo HBV.

ESTACION	CODIGO	TIPO	REEMPLAZO		FACTOR
Ahuachapán SM	50308082	p	Santa Ana	50301331	0.92
Apaneca	50308721	p	El Jobo	50308201	1.65
Ataco	50308531	p	El Jobo	50308201	1.69
Ataco Bficio. El molino	50308232	p	El Jobo	50308201	1.66
C. de la frontera	50301272	p	Santa Ana	50301331	1.16
El Jobo	50308201	p	Hachadura	50308211	1.05
Finca Los Andes	50301182	p	Santa Ana	50301331	1.34
Hachadura	50308211	p	El Jobo	50308201	0.95
La Hachadura	50308142	p	Hachadura	50308211	1.33
Los Naranjos	50321242	p	Santa Ana	50301331	1.09
Los Naranjos	50321581	p	Santa Ana	50301331	1.29
Montufar	50210021	p	Hachadura	50308211	0.64
Quesada	50210011	p	El Jobo	50308201	0.68
Salcoatitán	50321212	p	Santa Ana	50301331	1.77
Santa Ana	50301331	p	El Jobo	50308201	0.69
Santa Ana UNICO	50301372	p	Santa Ana	50301331	1.01
El Jobo_q	50308203	q	-	-	-
Hachadura_q	50308213	q	-	-	-
Quesada_q	50210013	q	-	-	-

Tabla No. 5.64: Correlaciones finales entre estaciones de lluvia

Fuente: Propia

Además de la correlación, en la pestaña *Stations* se definió la cantidad de estaciones de lluvia por cada subcuenca, dentro de los dos escenarios calibrados (Ver Figura No. 5.15). Según puede apreciarse en la figura, es acá donde se definió el peso de aportación (Weight) para cada estación dentro de cada subcuenca, cabe mencionar que estos pesos

fueron calculados mediante el Método del Polígono de Thiessen en la sección 5.5.5 de este capítulo. (Ver Tablas No. 5.33 a la 5.48)

5.9.5 INGRESO DE DATOS

Para el ingreso de datos de lluvia y caudal el proceso es similar, primeramente se ordenaron los registros de acuerdo al formato admitido por el modelo (Ver Figura No. 5.3), luego los registros fueron adjuntados al modelo a través de la pestaña *Data*, luego seleccionar *Import Data*, y en la ventana de *Import Data* se seleccionó la opción Importar archivos existentes (*Import to existing ptqw.dat*), después la opción Adjuntar Archivo (*Add File*) y finalmente Aceptar (OK). Ver Figura No. 5.17

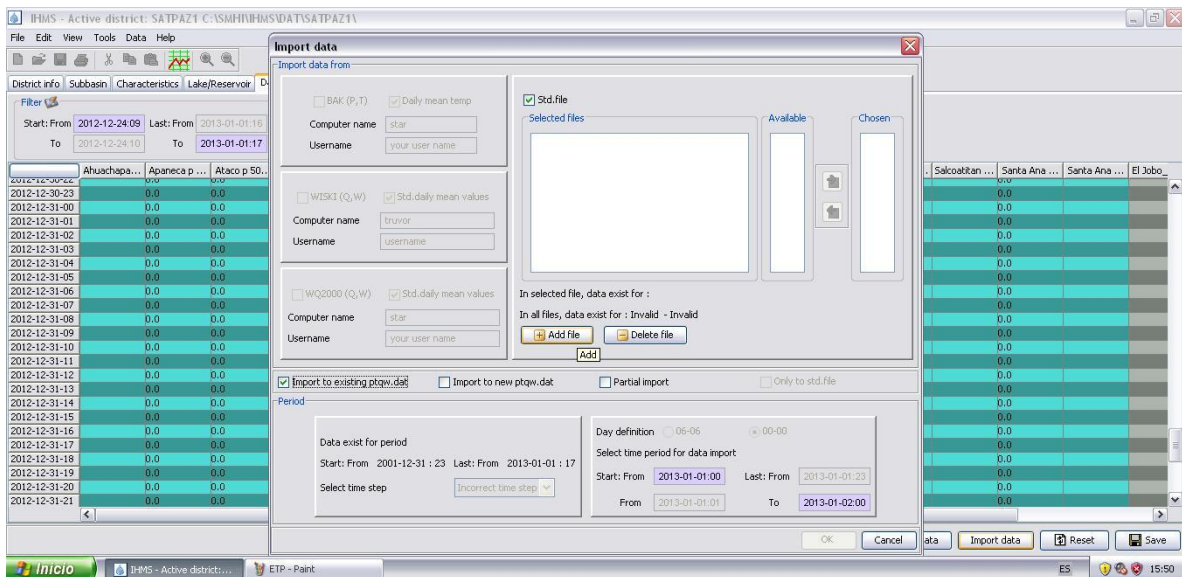


Figura No. 5.18: Ingreso de Datos al Modelo HBV.

Fuente: Propia

Este proceso se repitió para cada una de las estaciones de lluvia y caudal utilizadas en la calibración del modelo en ambos escenarios.

5.9.6 DEFINICION DE CONDICIONES INICIALES

Antes de iniciar el proceso de calibración, teniendo ya definido cada uno de los dos escenarios se procedió al establecimiento de las condiciones iniciales, tales condiciones definen los niveles de humedad del suelo (SM), las alturas de los depósitos superior e inferior (UZ y LZ) respectivamente, para ello se siguió el siguiente proceso.

5.9.6.1 CONDICIONES INICIALES

Para el establecimiento de las condiciones iniciales, es necesario aclarar que el modelo posee un patrón bien definido de comportamiento, esto significa que deben modificarse las condiciones de humedad el suelo y las alturas de los depósitos para iniciar con el proceso de calibración hasta obtener un ajuste adecuado que produzca los resultados deseados.

La modificación de estas variables se realizó creando un Estado Inicial, en la pestaña *Computation*, seleccionando la opción *Edit State*, la cual abre la ventana mostrada en la Figura No. 5.19

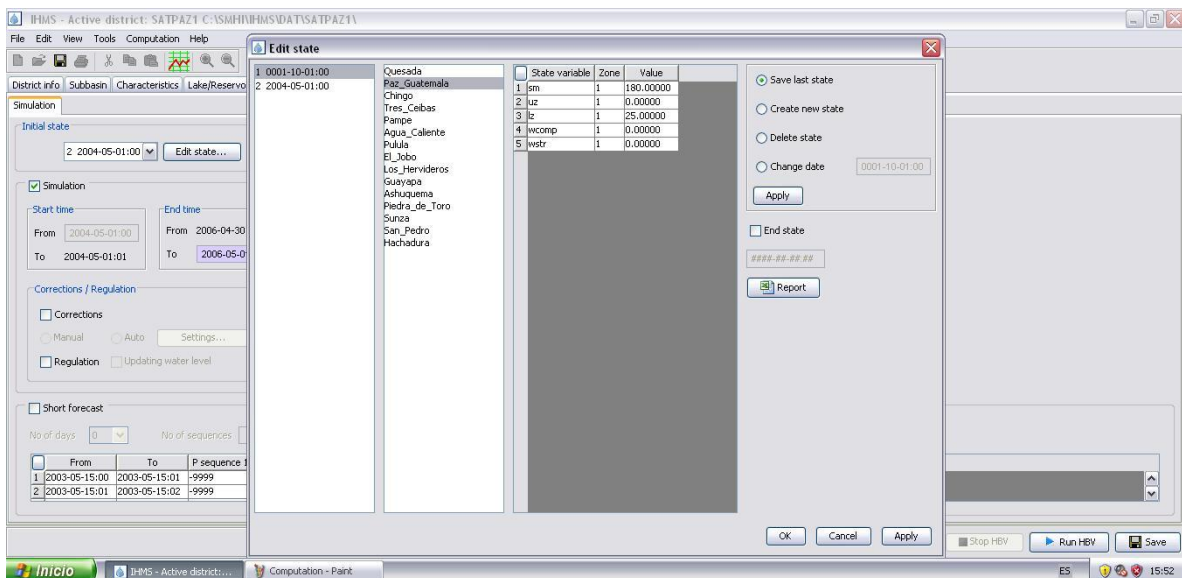


Figura No. 5.19: Edición del Estado Inicial

Fuente: Propia

Esta ventana permite la creación y edición de estados iniciales, por defecto el modelo no posee ningún estado inicial por tanto es necesario crear uno seleccionando la opción *Create New State*, cuando este proceso se realiza el modelo crea un estado inicial de fecha 0001-10-01:00, bajo estas condiciones se puede efectuar una corrida con un periodo conveniente de datos que permite la modificación de las condiciones iniciales antes descritas cuyo valor por defecto es cero. Como recomendación el manual del Modelo establece que dicho periodo debe ser mayor a un año para calibraciones diarias, sin embargo se tomó el mismo periodo para esta calibración.

La corrida preliminar para este periodo se realiza en la pestaña *Computation*, eligiendo primeramente el estado 0001-10-01:00 y definiendo una fecha que abarque el periodo de datos destinados a la creación del estado inicial del modelo (periodo de calentamiento), luego se corre el modelo con la opción *Run* (Correr); una vez corrido el periodo, se selecciona la opción *Graph* (Grafico) y luego la subcuena donde se tiene estación de caudal, acá se hace una inspección visual de la curva del Hidrograma Simulado y Observados de tal manera que el caudal base al final del periodo sea bastante similar al Hidrograma Observado, ya que este final del periodo, será el inicio del periodo de calibración, al cumplir esta condición se guarda el estado seleccionando la opción *Save Last State* Ver Figura No. 5.18. Creando dicho estado con la fecha de final de periodo usado para el establecimiento del estado inicial.

Este proceso se puede repetir cuantas veces sea necesario incluso cuando ya se poseen parámetros calibrados, y sirve de ayuda en el establecimiento de condiciones más reales en el estado inicial y posterior calibración del modelo.

Para el establecimiento del estado inicial en ambos escenarios utilizados se tomó como base el periodo 2003/05/01 00:00 al 2004/05/01 00:00 dejando el resto de los datos anteriores a este periodo en desuso y los posteriores utilizados para el periodo de calibración y validación respectivamente.

5.9.6.2 VARIABLES DE ESTADO INICIAL

Como ya se mencionó anteriormente dentro de las variables del estado inicial se encuentran la Humedad del Suelo (SM) que corresponde a cada una de las diferentes zonas dentro de las subcuencas y las alturas del depósito superior e inferior (UZ y LZ) correspondientes a cada subcuenca; iniciando con el escenario de 2 subcuencas (Ver Tablas No. 5.65 a la No. 5.66) se presentan los valores de estas variables luego de crear el estado inicial.

SUBCUENCA	VARIABLES DE ESTADO	ZONA	VALOR
EL JOBO	sm	1	45.99641
	sm	2	36.74754
	sm	3	32.86804
	sm	4	36.46843
	sm	5	30.81058
	sm	6	27.45741
	sm	7	35.01043
	sm	8	25.46155
	uz	-	1.48351
	lz	-	41.3815

Tabla No. 5.65: Resultados de las variables de estado inicial Subcuenca El Jobo

Fuente: Propia

SUBCUENCA	VARIABLES DE ESTADO	ZONA	VALOR
HACHADURA	sm	1	57.07838
	sm	2	50.85444
	sm	3	49.99092
	sm	4	41.56128
	sm	5	50.86360
	sm	6	44.99094
	sm	7	27.44836
	uz	-	2.24134
	lz	-	50.48176

Tabla No. 5.66: Resultados de las variables de estado inicial Subcuenca Hachadura

Fuente: Propia

Luego se finalizó el proceso con el establecimiento de las condiciones iniciales del escenario con 15 subcuencas, estos resultados se presentan en la Tabla No. 5.67:

SUBCUENCA	VARIABLES DE ESTADO	ZONA	VALOR
QUEZADA	sm	1	32.28003
	uz	1	2.0778
	lz	1	149.17075
PAZ GUATEMALA	sm	1	37.47287
	uz	1	2.86218
	lz	1	160.8105
CHINGO	sm	1	64.35571
	uz	1	3.58063
	lz	1	159.60757
TRES CEIBAS	sm	1	98.84267
	uz	1	3.29103
	lz	1	147.91237
PAMPE	sm	1	126.17617
	uz	1	7.45196
	lz	1	166.50134
AGUA CALIENTE	sm	1	109.59003
	uz	1	6.18141
	lz	1	157.03136
PULULA	sm	1	40.20597
	uz	1	3.49374
	lz	1	158.44997
EL JOBO	sm	1	87.75013
	uz	1	6.63138
	lz	1	162.43893
LOS HERVIDEROS	sm	1	103.49738
	uz	1	9.24725
	lz	1	38.77016
GUAYAPA	sm	1	48.13472
	uz	1	0.98101
	lz	1	17.06656
ASHUQUEMA	sm	1	21.6886
	uz	1	0.00000
	lz	1	5.15871
PIEDRA DE TORO	sm	1	82.7256
	uz	1	4.95915
	lz	1	38.09595
SUNZA	sm	1	35.27988
	uz	1	0.00000
	lz	1	26.36921
SAN PEDRO	sm	1	68.56727
	uz	1	3.25764
	lz	1	38.15185
HACHADURA	sm	1	13.148
	uz	1	0.00000
	lz	1	34.43645

Tabla No. 5.67: Resultados de las variables de estado inicial escenario de 15 subcuencas

Fuente: Propia

5.10 CALIBRACIÓN DEL MODELO HBV

De manera paralela se trabajaron los 2 escenarios de calibración para la cuenca del Rio Paz, sin embargo para el proceso mismo de calibración se operó primeramente el escenario de 2 subcuencas, esperando obtener resultados que pudieran ser usados en la calibración del escenario con 15 subcuencas. Esto se hizo debido a la complejidad del sistema con 15 subcuencas.

Para ello se utilizaron los datos de las pruebas realizadas en campo y laboratorio, especialmente los datos de Capacidad de Campo que fueron asignados a áreas cercanas o similares a los sitios de prueba y los datos de infiltración y conductividad hidráulica que sirvieron para dar una idea del comportamiento de los valores de Percolación y los Coeficientes de recesión utilizados en el modelo.

Así mismo se utilizó para ambas calibraciones un periodo de datos de 2 años comprendidos entre el 01 de Mayo de 2004 al 01 de Mayo del 2006 a las 01 horas, debido a que las condiciones de humedad son adecuadas para obtener una buena apreciación del Hidrograma generado.

En orden ascendente se calibro primeramente la subcuenca El Jobo y posteriormente La Hachadura; así mismo para el escenario de 15 subcuencas se siguió un proceso similar transportando los resultados de la calibración con 2 subcuencas a cada una de las subcuencas asociadas a la calibración con 15 subcuencas. (Ver Tabla No. 5.68)

No. DE SUBCUENCA	ESCENARIO 15 SUBCUENCAS	AREA (km ²)	ESCENARIO 2 SUBCUENCAS	AREA (km ²)
1	Quezada	322.1	El Jobo	1638.3
2	Paz Guatemala	417.1		
3	Agua Caliente	219.9		
4	Chingo	76.3		
5	Pulula	219.7		
6	Pampe	42.6		
7	Tres Ceibas	268.4		
8	El Jobo	72.2		
9	Los Hervideros	107.5	La Hachadura	397.6
10	San Pedro	51.7		
11	Guayapa	33.3		
12	Piedra de Toro	116.2		
13	Ashuquema	31.3		
14	Sunza	22.8		
15	Hachadura	34.8		
	AREA TOTAL	2035.9	AREA TOTAL	2035.9

Tabla No. 5.68: Subcuencas calibradas

Fuente: Propia

Para ambos distritos se usaron los parámetros que se presentan en la tabla No. 5.69, acá se pueden apreciar los valores por defecto para cada parámetro dentro de las rutinas de Humedad de Suelo, Respuesta y Transformación ingresados a la calibración de ambos escenarios.

PARAMETRO	VALOR POR DEFECTO
alfa	0.9
beta	1
cflux	0.5
fc	350
k0	0
k1	0
k2	0
k3	0
k4	0.01
lp	1
maxbaz	0
pcalt	0.1
pcorr	1
perc	0.5
rfcf	1
uzl0	0
uzl1	0
uzl2	0

Tabla No. 5.69: Parámetros por defecto usados en la calibración del Modelo HBV

Fuente: Propia

5.10.1 CALIBRACIÓN DE DISTRITO CON 2 SUBCUENCAS

El proceso seguido para la calibración del distrito con 2 subcuencas se abordara en los numerales siguientes:

5.10.1.1 CALIBRACION

Como ya se mencionó, resulta conveniente que primero se calibren las subcuencas pertenecientes a las partes altas de las cuencas, esto se debe a que estas drenan a las que están ubicadas en las partes bajas, por ende cuanto mejor resultado se obtenga para las subcuencas en partes altas será mejor el resultado obtenido para las partes bajas.

En este escenario existen solo dos subcuencas, la primera denominada **El Jobo** y una segunda denominada **Hachadura**, de estas dos, la última recibe los aportes de escurrimiento de la primera, lo que significa que se deben calibrar en este orden.

Para ello se creó el distrito con esta configuración y se crearon los estados iniciales ya presentados en la Tabla No. 5.65 y 5.66, y se procedió a la modificación de los parámetros de las distintas rutinas, obedeciendo al orden presentado en el capítulo dos de esta investigación; esto significa que se revisaron los Parámetros de ajuste de volumen de agua, luego Parámetros de ajuste de la Humedad del suelo, y finalmente los Parámetros de ajuste de la forma del Hidrograma.

Es conveniente aclarar que en cuanto a la Capacidad de Campo se poseen datos provenientes de las pruebas realizadas, por lo tanto se ubicaron estas pruebas dentro de la cuenca y se la asociaron estos valores a cada subcuenca generada en el caso del escenario con 15 subcuencas y finalmente en cuanto al escenario con 2 subcuencas se calculó un valor ponderado para este parámetro tal como se muestra en las tablas No. 5.70 y 5.71, donde:

- $fc (\text{El Jobo}) = (648735.58/1638.30) = 396 \text{ mm}$
- $fc (\text{Hachadura}) = (189614.94/397.60) = 477 \text{ mm.}$

No.	SubCuenca	Area (Km2)	Fc (mm)	Area*fc
1	Quezada	322.10	238	76498.75
2	Paz Guatemala	417.10	238	99061.25
3	Agua Caliente	219.90	467	102607.98
4	Chingo	76.30	416	31777.88
5	Pulula	219.70	608	133474.34
6	Pampe	42.60	608	25880.78
7	Tres Ceibas	268.40	543	145745.22
8	El Jobo	72.20	467	33689.38
		1638.30		648735.58

Tabla No. 5.70: Capacidad de campo por subcuencas (El Jobo)

Fuente: Propia

No.	SubCuenca	Area (Km2)	Fc (mm)	Area*fc
9	Los Hervideros	107.50	579	62290.88
10	San Pedro	51.70	474	24505.80
11	Guayapa	33.30	474	15784.20
12	Piedra de Toro	116.20	474	55078.80
13	Ashuquema	31.30	474	14836.20
14	Sunza	22.80	297	6776.30
15	Hachadura	34.80	297	10342.77
		397.60		189614.94

Tabla No. 5.71: Capacidad de campo por subcuencas (Hachadura)

Fuente: Propia

5.10.1.2 AJUSTE DE PARAMETROS (METODO DE MONTECARLO)

Partiendo de los parámetros ingresados según la tabla No. 5.69 y de lo establecido en cuanto a la calibración y el orden de modificación de los parámetros, se procedió a la comparación de hidrogramas y a la verificación de la diferencia acumulada y la varianza; de estos valores se determinó que no fue conveniente la modificación de los valores por defecto de los parámetros de volumen de agua debido a que la diferencia acumulada fue bastante baja, sin embargo se ajustaron los demás parámetros hasta obtener resultados bastante buenos a través del método Montecarlo lo que significa que se hizo variar un parámetro a la vez mientras los demás se mantuvieron estáticos.

Los resultados finales de los parámetros para este escenario provenientes del ajuste se muestran en la Tabla No. 5.72:

PARAMETRO	EL JOBO	HACHADURA
alfa	0.9	0.9
beta	1	1
cflux	0.5	0.5
fc	396	477
k0	0.9	0.9
k1	0.3	0.3
k2	0.05	0.05
k3	0	0
k4	0.007	0.007
lp	1	1
maxbaz	0	0
pcalt	0.1	0.1
pcorr	1	1
perc	1.6	1.6
rfcf	1	1
uzl0	10	10
uzl1	9	9
uzl2	1	1

Tabla No. 5.72: Parámetros finales de calibración escenario de 2 Subcuencas

Fuente: Propia

5.10.1.3 INSPECCIÓN VISUAL Y COMPARACIÓN DE HIDROGRAMA SIMULADO Y OBSERVADO

Como resultado de la calibración se muestran los hidrogramas de las subcuencas de El Jobo y La Hachadura cuyos puntos de control son las estaciones que llevan el mismo nombre y de estas, la estación Hachadura es el último punto de control en la cuenca. (Ver Figura No. 5.20 y 5.21)

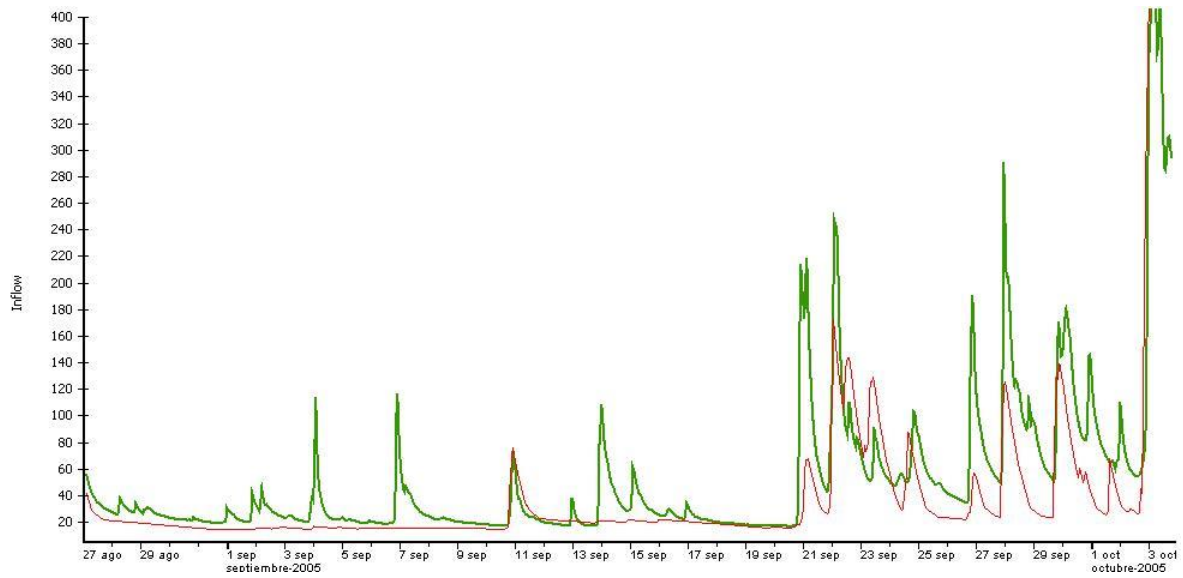


Figura No. 5.20: Hidrograma para calibración de subcuenca El Jobo escenario de 2 Subcuencas

Fuente: Propia

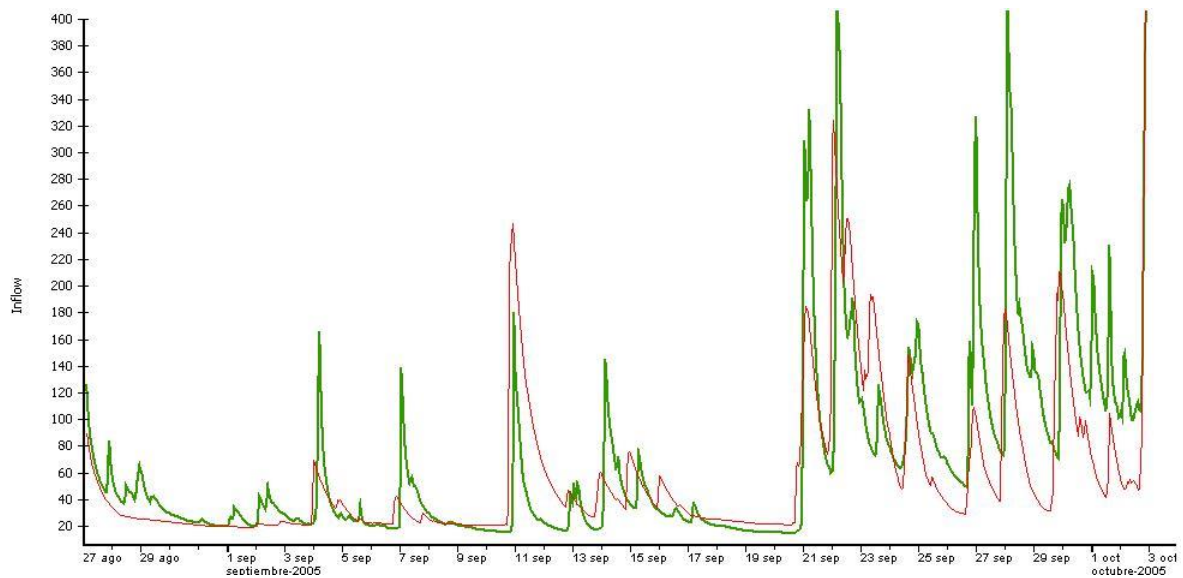


Figura No. 5.21 Hidrograma para calibración de subcuenca Hachadura escenario de 2 Subcuencas

Fuente: Propia

En las figuras presentadas se puede ver que existe un ajuste parcialmente bueno de ambas gráficas tomando en cuenta que la calidad de los datos de lluvia y caudales ingresados no es lo suficientemente buena para describir el comportamiento de ambas subcuencas, sin

embargo se obtuvieron valores bastante buenos de varianza y diferencia acumulada según se puede observar a continuación.

5.10.1.4 CALCULO DE LA VARIANZA Y DIFERENCIA ACUMULADA

Desde el establecimiento de los estados iniciales se encontraron diferencias acumuladas con valores bajos tal como se mencionó en párrafos anteriores, y luego del ajuste de los parámetros se pudo ver una tendencia al alza de la varianza del periodo seleccionado para la calibración y una mejora significativa del ajuste de los hidrogramas mediante la modificación de los parámetros, los resultados se muestran en la Tabla No. 5.74

SUBCUENCA	r²	Acc Diff
EL JOBO	0.76796	0.04798
HACHADURA	0.82557	-52.17171

Tabla No. 5.73: Valores de Varianza y diferencia acumulada en calibración con escenario de 2 subcuencas
Fuente: Propia

Estos resultados obtenidos según la Tabla No. 5.74 definen que la calibración está dentro del rango que es aceptable según se mostró en el capítulo 2, donde se especificó que la varianza debe estar entre 0.70 a 1.00 para que la calibración sea aceptable y que la diferencia acumulada sea lo más baja posible. Además se puede observar que es mucho mayor el valor de varianza para la subcuenca Hachadura y esto es congruente con lo dicho en párrafos anteriores; confirmando que tanto mejor es el resultado de la calibración de subcuencas altas así se mejorara el resultado para subcuencas bajas que reciben las contribuciones de las primeras.

5.10.1.5 VALIDACION DE LA CALIBRACIÓN

Para la validación con este escenario, se corrió todo el periodo de datos restantes que estaban disponibles (desde el 01 de mayo del 2006 hasta el 31 de diciembre de 2013), sin embargo se pudo observar que los valores de diferencia acumulada y varianza poseen

una tendencia diferente a la del periodo de calibración, donde la diferencia acumulada para El Jobo se conserva en un rango similar al de la calibración y, la de La Hachadura se reduce drásticamente desde -52.17171 hasta -0.09872 lo que es muy bueno; pese a estos resultados la varianza disminuye considerablemente. (Ver Tabla No. 5.74)

SUBCUENCA	r^2	Acc Diff
EL JOBO	0.43083	-0.07779
HACHADURA	0.30870	-0.09872

Tabla No. 5.74: Valores de Varianza y diferencia acumulada en validación con escenario de 2 subcuencas

Fuente: Propia

Sin embargo, se da por aceptada la validación debido a que gráficamente se observa una tendencia aceptable del comportamiento de los hidrogramas (Ver Figura No. 5.22), en esta figura se muestra el periodo de 29 de Junio al 6 de Agosto de 2009.

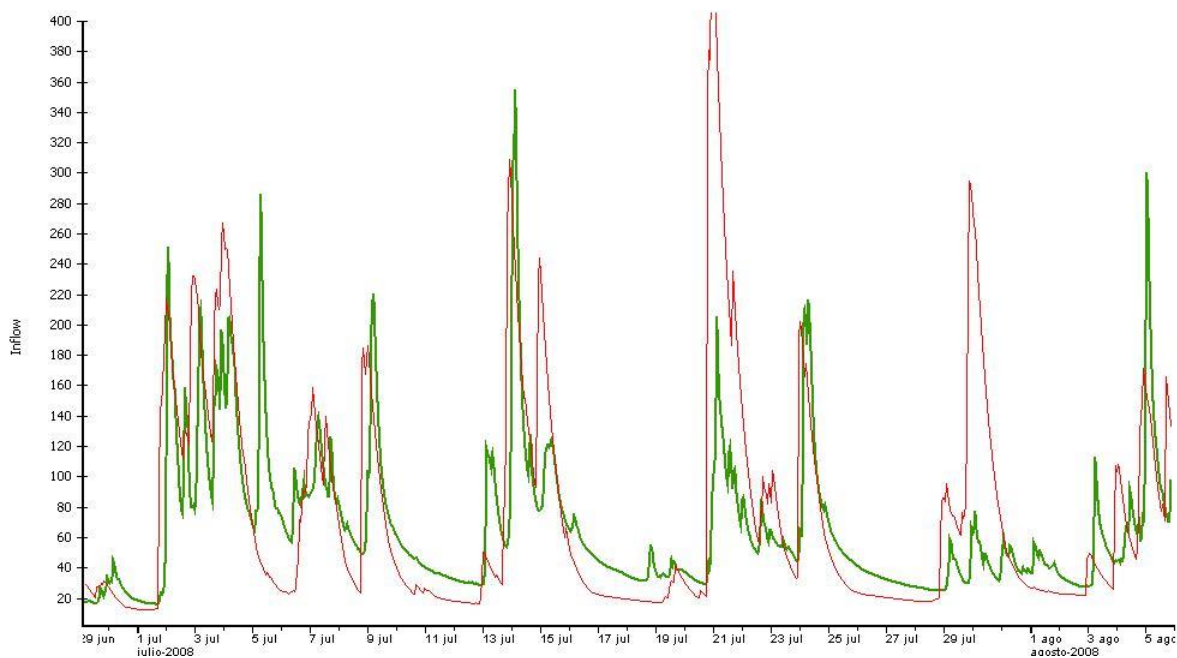


Figura No. 5.22: Hidrograma para validación de subcuena Hachadura escenario de 2 Subcuencas

Fuente: Propia

5.10.2 CALIBRACIÓN DE DISTRITO CON 15 SUBCUENCAS

Para este escenario con 15 subcuencas se implementó una metodología similar para el ajuste de los parámetros de calibración, iniciando por el ingreso de los resultados de parámetros obtenidos de la calibración con el escenario de 2 subcuencas exceptuando el valor de la capacidad de campo que se extrajo de las Tabla No. 5.70 y No. 5.71, se procedió a la modificación de este escenario ingresando los valores de Capacidad de Campo, precedido del ajuste de los demás parámetros, y como resultado de dicho ajuste de parámetros por Montecarlo se obtuvo la Tabla No. 5.75, donde se muestran los parámetros obtenidos para las subcuencas aguas arriba de la estación El Jobo y la Tabla No. 5.76 para las subcuencas que drenan aguas abajo de la misma estación hasta llegar a la estación La Hachadura.

PARAMETRO	QUEZADA	PAZ GUATEMALA	CHINGO	TRES CEIBAS	PAMPE	AGUA CALIENTE	PULULA	EL JOBO
alfa	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
beta	1	1	1	1	1	1	1	1
cflux	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
fc	238	238	416	543	607	537	238	467
k0	0	0	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
k1	0	0	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
k2	0	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
k3	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
k4	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.0015	0.0015
lp	1	1	1	1	1	1	1	1
maxbaz	0	0.09	0	0	0.09	0	0	0.11
pcalt	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
pcorr	1	1	1	1	1	1	1	1
perc	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	2
rfcf	1	1	1	1	1	1	1	1
uzl0	29	29	53	45	125	85	29	29
uzl1	29	29	53	45	125	85	29	29
uzl2	7	7	38	25	75	85	7	7

Tabla No. 5.75: Parámetros finales de calibración escenario de 15 Subcuencas parte 1

Fuente: Propia

PARAMETRO	LOS HERVIDEROS	GUAYAPA	ASHUQUEMA	PIEDRA DE TORO	SUNZA	SAN PEDRO	HACHADURA
alfa	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
beta	1	1	1	1	1	1	1
cflux	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
fc	474	474	474	474	474	474	297
k0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
k1	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
k2	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
k3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
k4	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
lp	1	1	1	1	1	1	1
maxbaz	0	0	0	0.06	0	0	0
pcalt	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
pcorr	1	1	1	1	1	1	1
perc	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
rfcf	1	1	1	1	1	1	1
uzl0	10	10	10	10	10	10	10
uzl1	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
uzl2	5	5	5	5	5	5	5

Tabla No. 5.76: Parámetros finales de calibración escenario de 15 Subcuencas parte 2

Fuente: Propia

Como resultado de la calibración para el periodo seleccionado se obtuvieron los valores de varianza y diferencia acumulada presentados a continuación. (Ver Tabla No. 5.77)

SUBCUENCA	r²	Acc Diff
EL JOBO	0.70901	0.18288
HACHADURA	0.78219	-4.00836

Tabla No. 5.77: Valores de Varianza y diferencia acumulada escenario de 15 subcuencas

Fuente: Propia

Al igual que para el escenario anterior se obtuvieron valores de varianza dentro de los límites aceptables (mayores a 0.70), que comparados con los de la Tabla No. 5.73, son mucho menores que los obtenidos para el dicho escenario, se presentan únicamente las subcuencas de El Jobo y Hachadura debido a que estas subcuencas son las únicas que poseen estación de caudal en su punto de salida lo cual significa que son las únicas dentro de esta configuración que pueden presentar resultados para comparación mediante hidrogramas.

Se puede observar el Hidrograma para subcuenca El Jobo y la estación de caudal que lleva el mismo nombre, que existe un ajuste parcialmente bueno de ambos hidrogramas (simulado y observado), esto significa que podrían realizarse ajustes a futuro en los parámetros de las subcuencas si se incluyen nuevas estaciones de registro para los caudales en las subcuencas que drenan a este punto. En otras palabras si se pudiera revisar cada una de las subcuencas de manera más detallada se obtendrían mejores resultados para la calibración de esta subcuenca.

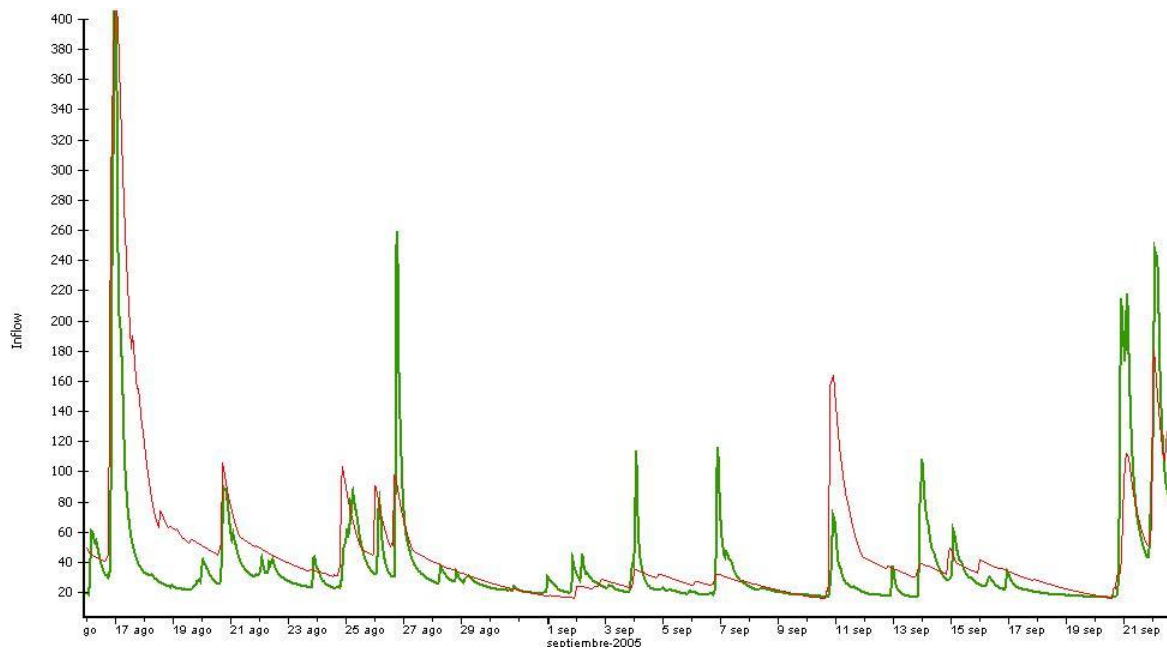


Figura No. 5.23: Hidrograma para calibración de subcuena El Jobo, escenario de 15 Subcuencas

Fuente: Propia

En cuanto al Hidrograma determinado para la estación La Hachadura, se observa una mejor simulación de las condiciones reales del Hidrograma observado para esta estación, en el mismo periodo de observación de la figura No. 5.23, puede verse que un mejor ajuste.

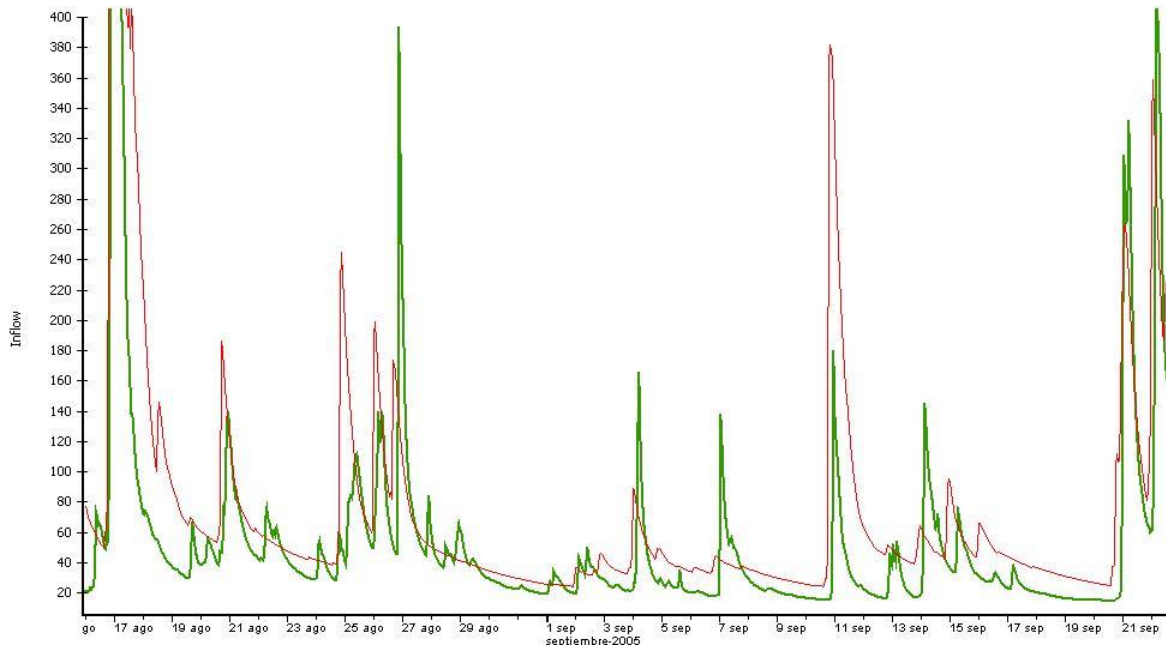


Figura No. 5.24: Hidrograma para calibración de subcuenca Hachadura, escenario de 2 Subcuencas

Fuente: Propia

Finalmente para el periodo de validación, se usaron las mismas condiciones de periodo usadas para el otro escenario planteado, puede verse claramente en la Figura No. 5.25, que los resultados son bastante buenos para esta validación en términos gráficos, no obstante al inspeccionar los valores de varianza comparados con los obtenidos en el escenario con 2 subcuencas son mucho mejores los obtenidos con este escenario ya que son mayores, no así en el caso de la diferencia acumulada que es todo lo contrario ya que hay un ligero aumento, por supuesto no es un aumento significativo, por lo tanto se puede decir que para el periodo de validación estos resultados son mejores a los del otro escenario.

SUBCUENCA	r^2	Acc Diff
EL JOBO	0.5403	0.40176
HACHADURA	0.38342	0.35062

Tabla No. 5.78: Valores de Varianza y diferencia acumulada en validación con escenario de 15 subcuencas

Fuente: Propia

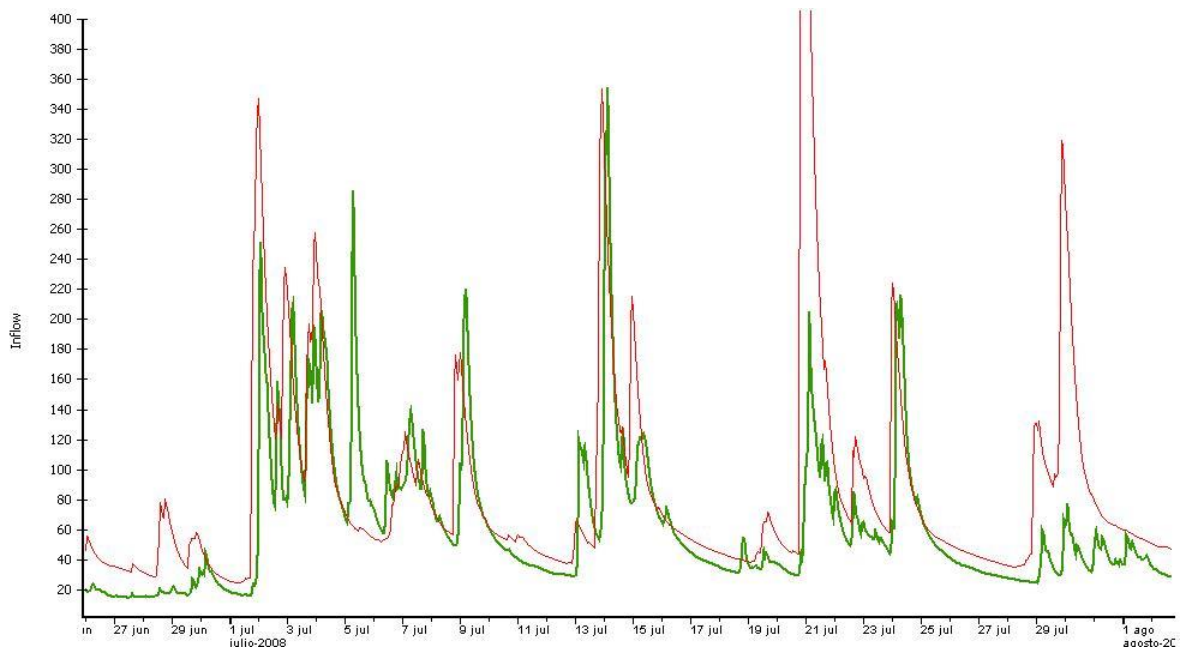


Figura No. 5.25: Hidrograma para validación de subcuenca Hachadura, escenario de 15 Subcuencas

Fuente: Propia

5.10.3 ANALISIS DE RESULTADOS DE LA CALIBRACION

Como parte final de la calibración del Modelo HBV para la Cuenca del Río Paz, se analizaron los resultados obtenidos en los numerales anteriores, y se revisaron las condiciones bajo las cuales se implementará el Modelo dentro del Sistema de Alerta Temprana por Inundaciones, y se pudo observar que:

- Resulta conveniente que el escenario dentro del modelo HBV se pueda actualizar y modificar fácilmente.
- Que el escenario debe ser de fácil comprensión e implementación para los técnicos de Monitoreo involucrados en el manejo del SAT.
- Así mismo, que el escenario seleccionado provea al SAT los resultados confiables para utilizarlo dentro de su funcionamiento

Es por estas razones es que se revisó cada escenario minuciosamente y finalmente se pudo determinar que el escenario con 2 subcuencas resulto más adecuado para la implementación, debido a que cumple con las condiciones anteriormente descritas, ya que

resulta mucho más fácil actualizarlo y/o modificarlo ya que solo posee dos subcuencas, así mismo resulta fácil de comprender e implementar por su sencillez en cuanto a la conexión entre las subcuencas y su forma de drenaje; finalmente se observa que los resultados en cuanto a la varianza y la diferencia acumulada son relativamente mejores en comparación con el escenario con 15 subcuencas y que por lo tanto puede proveer resultados de pronóstico con una buena aceptación para su uso dentro del SAT.

En cuanto al escenario de 15 subcuencas, se puede observar que posee un grado de complejidad mayor en cuanto a su forma de conexión entre subcuencas comparado con el otro escenario, lo cual vuelve demasiado complicada su actualización y en caso de presentar discrepancias en el hidrograma resulta muy complejo el ajuste de parámetros debido a la cantidad de subcuencas y a que solo dos de estas poseen estación de control de caudales; finalmente se puede decir que este escenario podría ser utilizado cuando se posea una red mucho más densa de estaciones hidrométricas que permitan una mejor calibración dentro del SAT o con propósitos de investigaciones referentes a las crecidas generadas en las zonas que comprende la cuenca.

***CAPITULO 6: IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO
HBV CALIBRADO AL SAT DE LA CUENCA DEL
RÍO PAZ.***

6.1 INTRODUCCIÓN

La parte más importante de esta investigación radica en la implementación de los resultados obtenidos mediante la modelación de la cuenca a través del Modelo HBV a situaciones propias del Sistema de Alerta Temprana por Inundaciones que funciona en la cuenca del Río Paz. Esta implementación incluye la generación de pronósticos de crecidas a través del modelo y la definición del protocolo de funcionamiento del SAT incluyendo esta herramienta.

6.2 PRONOSTICO DE CRECIDAS

Una vez que se ha calibrado el modelo, este puede ser utilizado para el pronóstico de crecidas u otro tipo de pronósticos, ya sea a corto plazo o largo plazo según sea requerido; para esta investigación se ha propuesto desde un principio el uso del Modelo HBV como una herramienta de Pronóstico a Corto Plazo, ya que este se pretende implementar en el Sistema de Alerta Temprana por Inundaciones de la cuenca del Río Paz, de tal manera que el modelo pronostique a corto plazo aquellas avenidas que puedan causar inundaciones en la parte baja de la cuenca a partir de un evento lluvioso pronosticado.

Además de la implementación del modelo HBV como herramienta principal de pronóstico y generación de avenidas se pretende implementar otros programas usados como herramientas adicionales para la generación de pronóstico, tal es el caso de Microsoft Excel, que es un software muy utilizado en el manejo de datos y generación de cálculo a través de tablas.

Para que estas herramientas funcionen adecuadamente será necesario que se satisfagan algunas condiciones para su uso adecuado, estas se describirán en los numerales siguientes:

6.2.1 CONDICIONES PARA REALIZAR PRONÓSTICO

Una de las condiciones más importantes para realizar un pronóstico de caudales con el modelo HBV que hay que tomar en cuenta, es el hecho de tener calibrado el modelo hasta la fecha y hora anterior al primer día del pronóstico que se desea generar, ya que el pronóstico inicia a partir del día anterior donde el modelo tenga una buena calibración, por otro lado, en el caso de que exista una discrepancia entre los hidrogramas observados y los calculados por el modelo en la calibración, se debe de considerar una actualización del modelo, esto se logra realizando un ligero ajuste del estado actual de los parámetros del Modelo HBV y los datos ingresados, este es un proceso iterativo manual en el que generalmente el Hidrograma calculado es aceptado después de unos pocos ajustes y unas pocas corridas.

Es importante aclarar que el proceso de actualización del modelo se hace principalmente con el propósito de poseer las condiciones idóneas antes descritas además de disminuir las discrepancias entre los Hidrogramas; sin embargo, se debe de tener cuidado en la actualización ya que cada actualización podría introducir incertidumbres adicionales en el modelo.

6.2.2 DATOS DE ENTRADA

Para generar el pronóstico hidrológico a corto plazo, se requiere de datos de entrada, en este caso los datos de entrada son la lluvia (mm) y la temperatura (°C) para el periodo de pronóstico, los cuales vienen dados en base a pronósticos meteorológicos que se basan en las condiciones climáticas futuras de una determinada zona para un determinado tiempo, y que generalmente son de pocos días; bajo esta modalidad de pronóstico el Modelo HBV admite hasta un máximo de 10 días de pronóstico.

El ingreso de los datos de entrada se realiza en la pestaña **Computation** dentro del modelo, previa selección de la opción **Short Forescat**, que habilita la opción **Forecats regions** en la cual se crean las regiones de pronóstico, es aca donde se selecciona la subcuenca a la que

corresponde la región en la que se desea el pronóstico, en esta etapa anterior se define también el nombre de la región y la elevación promedio que tiene la región para el pronóstico.

Una vez creada la región se procede a seleccionar el periodo de pronóstico que varía de cero a los diez días de pronóstico, luego se ingresa el pronóstico de la lluvia y temperatura y finalmente se corre el modelo con la opción **Run** hasta la fecha donde termina el pronóstico.

Una manera simple de comprobar si el modelo trabaja adecuadamente bajo la modalidad de pronóstico es verificando que mientras el modelo corre en modo de simulación, calcula la varianza y la diferencia acumulada y otros valores mostrados en la ventana, pero mientras genera pronóstico estas variables no son calculadas y por ende sus valores resultantes son cero.

6.2.3 RESULTADOS DEL PRONÓSTICO

El modelo puede presentar como parte del pronóstico los caudales computados y los observados, los valores de humedad del suelo S_m , caudales registrados y computados de salida en depósitos y otras múltiples variables de salida en cada región de pronóstico o por cada subcuenca, bajo la modalidad **locmean** y **totmean (local y total)**.

Los resultados del pronóstico son presentados en forma de tabla y se pueden observar en la pestaña **Result**, donde primeramente se definen las fechas de inicio y finalización del periodo que se desea visualizar; para este caso se cargan los parámetros de salida del modelo que son de interés, que en este caso es **qcout totmean** (Caudal Total Promedio Computado de salida) que es el caudal pronosticado a la salida de cada subcuenca, luego del ajuste de la cantidad de decimales que se desean mostrar se selecciona la subcuenca donde se pretende realizar el análisis y finalmente el modelo muestra en una tabla el periodo de calibración y pronóstico con su respectivos datos.

Si se desea ver el pronóstico en forma gráfica se elige la opción **Graph**, y luego se selecciona la opción **Latest computation** y finalmente se da clic en la subcuenca que se quiere ver gráficamente ajustando la visualización de gráficos y la escala según se desee.

6.2.4 EJEMPLO DE PRONOSTICO A CORTO PLAZO

Para ejemplificar cómo funciona el pronóstico a través del Modelo HBV, se seleccionó un periodo de diez días de lluvia, y niveles registrados ya transformados a caudales para las un escenario de dos subcuencas, con la finalidad de comprobar si el comportamiento del modelo es acorde a situaciones reales en cuanto al pronóstico de caudales de avenida, y si es factible usarlo para el SAT de la cuenca.

Para ello se seleccionó un periodo que incluyo un total de diez días de datos horarios de precipitación, iniciando el día 10 de Octubre de 2011 a las 00:00 horas y finalizando el 20 de Octubre de 2011 a las 00:00 horas, los cuales serán ingresados al modelo para simular un pronóstico de lluvia y que este a su vez pueda generar un pronóstico de caudales que pueda compararse con los caudales simulados por el modelo en este mismo periodo.

Es importante aclarar que los datos usados para este pronóstico son datos reales, los cuales fueron registrados por las diferentes estaciones pertenecientes a la cuenca durante la Depresión Tropical DT-12E, y fueron computados por el modelo HBV y finalmente se extrajeron solo para realizar comparaciones de resultados entre caudales computados versus caudales pronosticados con la finalidad de validar el pronóstico y verificar la tendencia y el comportamiento de los resultados.

Cabe mencionar que el modelo es capaz de reproducir varias secuencias de datos para realizar el pronóstico que pueden formar parte de un análisis de sensibilidad mediante el planteamiento de varios escenarios, sin embargo para este ejemplo solo se utilizaron datos para una secuencia.

6.2.4.1 CREACION DE REGIONES DE PRONÓSTICO

Otra parte fundamental en la realización de pronósticos es la creación y preparación de las regiones de pronóstico; una región de pronóstico representa un área dentro de la cuenca para la cual se realiza el pronóstico meteorológico y para la cual se pretende obtener el pronóstico hidrológico de caudales mediante el uso del Modelo HBV, cada región de pronóstico posee una determinada elevación y un nombre específico para su identificación.

Dentro de la pestaña **Computation**, teniendo habilitada la opción de pronóstico a corto plazo (**Short Forecast**), se pueden crear las distintas regiones de pronóstico, seleccionando la **Opcion Forecast Regions**, esta opción abre la ventana mostrada en la Figura No. 6.1

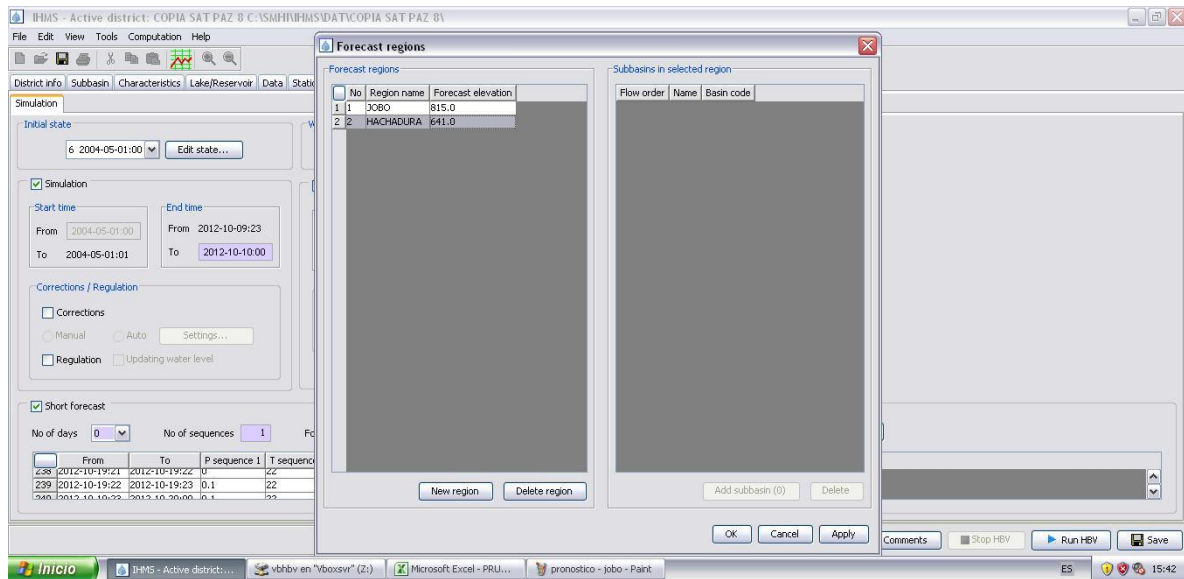


Figura No. 6.1: Ventana de creación de Regiones de Pronóstico

Fuente: Propia

En la ventana de la Figura No. 6.1 se pueden ver las dos regiones creadas para este pronóstico en particular, las regiones son: **EL JOBO** con una elevación de 815 msnm y **HACHADURA** con una elevación de 641 msnm, estas elevaciones corresponden a las elevaciones medias de las Subcuencas El Jobo y Hachadura que forman parte del escenario utilizado.

Estas regiones creadas se asociaron a cada subcuenca respectivamente antes de realizar la corrida con modalidad de pronóstico en la misma ventana mostrada en la Figura No. 6.1

6.2.4.2 PREPARACION DE DATOS PARA PRONÓSTICO

El Modelo HBV fue calibrado tal como se mostró en el capítulo anterior de esta investigación, dicha calibración tuvo como final del periodo el día 01 de Enero de 2013 a las 00 horas que corresponde al último dato ingresado en las estaciones, debido a esto se realizó una copia del distrito con 2 subcuencas ya calibrado hasta esta fecha y se recortó el periodo de calibración hasta el día 10 de Octubre de 2011 a las 00:00 horas, con el propósito de ocupar el periodo de lluvia y caudal de los diez días siguientes como dato de pronóstico y comparación respectivamente, este recorte se hizo para todas las estaciones utilizadas de precipitación y caudal que se usaron en la modelación de la cuenca con el escenario de 2 subcuencas y fueron preparados para su uso dentro del pronóstico como lo muestran los literales siguientes.

a. DATOS DE PRECIPITACION

Para este caso en particular no se generó un pronóstico de precipitación meteorológico, dado que los datos usados para simular el pronóstico para ambas subcuencas fueron extraídos de la calibración del modelo sin el recorte de datos; dicha extracción de datos puede ser realizada en la pestaña de análisis de resultados (**Result**), para ello se selecciona la variable de salida **cprec totmean** que es la precipitación total promedio calculada o computada para cada subcuenca, y **qcout totmean** que es el caudal computado por cada subcuenca dentro del periodo definido, esto se logra seleccionando el periodo de datos con las fechas (2011-10-10:00 hasta 2011-10-20:00) y la subcuenca respectiva.

Posteriormente, se tabularon los datos de precipitación que sirvieron para simular un pronóstico de precipitación, en la Tabla No. 6.1 se muestran los datos usados para la

región de la subcuenca El Jobo y en la Tabla No. 6.2 los datos usados para la región Hachadura.

HORA	DÍA 10	DÍA 11	DÍA 12	DÍA 13	DÍA 14	DÍA 15	DÍA 16	DÍA 17	DÍA 18	DÍA 19
0	0.00	0.09	13.52	0.98	0.10	0.49	6.22	9.00	0.40	0.18
1	0.00	0.02	17.31	0.96	0.10	0.03	7.14	5.65	0.11	0.18
2	0.00	0.00	11.20	0.44	0.04	1.16	4.54	1.79	0.17	1.59
3	0.00	0.00	7.06	1.77	0.18	0.33	5.60	2.94	0.31	2.49
4	0.00	0.00	6.65	0.09	0.01	0.68	3.03	1.68	0.34	3.44
5	0.00	0.00	12.18	0.05	0.00	0.43	3.33	0.88	0.12	6.55
6	0.00	0.00	8.69	0.19	0.00	0.02	1.90	1.10	0.25	7.86
7	0.00	0.05	2.44	1.31	0.04	0.03	2.89	1.19	0.12	15.71
8	0.00	0.12	7.17	0.46	0.14	0.00	2.17	1.43	0.22	10.10
9	0.00	0.06	5.02	0.12	0.17	0.02	7.22	0.84	0.31	5.48
10	0.00	0.00	4.47	0.45	0.12	0.12	17.67	1.43	0.22	2.82
11	0.08	0.00	6.03	1.88	0.02	0.26	4.78	1.40	0.17	1.09
12	0.08	0.61	2.02	0.89	0.11	0.02	7.94	4.24	0.43	1.37
13	0.26	1.15	2.66	1.19	0.23	0.05	3.50	2.38	0.23	1.75
14	0.00	2.85	0.99	0.35	0.02	0.31	0.50	0.71	0.33	1.36
15	0.00	4.07	1.64	0.14	0.16	0.22	0.88	0.80	0.06	0.98
16	0.00	3.82	3.73	0.44	0.66	1.69	0.64	0.92	0.06	0.34
17	0.00	1.63	0.72	0.06	1.68	3.84	0.19	0.76	0.14	0.16
18	0.02	9.72	1.76	0.10	0.66	4.74	2.57	0.40	0.48	0.00
19	0.00	16.95	1.53	0.14	1.57	6.56	1.25	0.37	1.10	0.00
20	0.00	20.42	0.42	0.04	0.88	15.91	3.75	0.44	0.77	0.00
21	0.00	12.58	0.42	0.04	1.10	4.99	1.17	0.28	0.09	0.00
22	0.00	5.38	0.86	0.09	1.40	5.25	6.11	0.42	0.34	0.00
23	0.00	8.11	0.33	0.03	0.48	6.18	7.97	0.25	0.52	0.00

Tabla No. 6.1: Datos de Precipitación para subcuenca El Jobo

Fuente: Propia

HORA	DIA 10	DIA 11	DIA 12	DIA 13	DIA 14	DIA 15	DIA 16	DIA 17	DIA 18	DIA 19
0	0.00	0.42	13.85	0.90	0.09	0.53	6.22	9.54	0.36	0.28
1	0.00	0.06	17.66	0.87	0.09	0.04	6.74	5.74	0.10	0.52
2	0.00	0.00	11.00	0.41	0.04	1.10	4.37	2.36	0.18	2.13
3	0.00	0.00	7.02	1.58	0.16	0.37	5.65	3.32	0.31	3.34
4	0.00	0.00	6.23	0.09	0.01	0.73	3.06	1.80	0.42	4.09
5	0.00	0.00	11.68	0.05	0.00	0.42	3.51	1.09	0.15	6.31
6	0.00	0.12	8.69	0.28	0.00	0.03	2.07	1.20	0.28	7.88
7	0.00	0.05	2.77	1.56	0.04	0.03	3.42	1.25	0.17	15.99
8	0.00	0.13	6.90	0.61	0.12	0.00	2.28	1.40	0.18	10.82
9	0.00	0.05	4.73	0.22	0.17	0.02	7.49	1.01	0.28	6.67
10	0.00	0.00	4.30	0.68	0.11	0.19	17.69	1.42	0.20	3.42
11	0.06	0.13	6.02	2.20	0.01	0.27	4.58	1.87	0.18	1.83
12	0.07	0.91	2.03	1.01	0.10	0.08	8.03	4.59	0.45	2.13
13	0.48	2.12	2.56	1.21	0.19	0.14	3.72	2.55	0.22	2.01
14	0.54	3.64	1.15	0.38	0.01	0.37	0.55	0.73	0.31	1.42
15	0.00	5.14	1.65	0.17	0.13	0.35	0.84	0.98	0.05	1.09
16	0.05	3.91	3.63	0.41	0.59	1.77	0.78	0.86	0.11	0.38
17	0.31	2.48	1.06	0.06	1.48	3.93	0.25	0.69	0.89	0.16
18	0.86	11.19	1.58	0.09	0.64	5.18	2.68	0.43	0.69	0.00
19	1.25	18.46	1.41	0.12	1.63	6.72	1.22	0.36	1.34	0.00
20	1.43	20.90	0.39	0.04	0.91	16.14	3.46	0.49	0.76	0.00
21	2.82	12.70	0.38	0.04	1.15	4.98	1.47	0.30	0.14	0.00
22	1.38	5.65	0.78	0.08	1.43	5.12	6.54	0.50	0.45	0.00
23	1.28	9.23	0.30	0.03	0.54	6.25	8.90	0.29	0.57	0.00

Tabla No. 6.2: Datos de Precipitación para subcuenca El Jobo

Fuente: Propia

b. DATOS DE TEMPERATURA:

Los datos de temperatura se eligieron con base a los rangos de temperatura propios de las subcuencas seleccionadas, ya que según registros que posee el MARN en estaciones ubicadas en las cercanías o dentro de las zonas, las temperaturas varían entre los valores mostrados en la Tabla No. 6.3

SUBCUENCA	ESTACION	POR ESTACION		POR SUBCUENCA		POR SUBCUENCA	
		MIN (°C)	MAX (°C)	MIN (°C)	MAX (°C)	MIN (°C)	MAX (°C)
EL JOBO	Finca Los Andes	13.9	20.3	13.9	30.4	17.3	26.8
	Candelaria de la Frontera	19.9	30.4				
	Santa Ana UNICO	18.9	30.0				
	Los Naranjos	14.4	23.7				
	Ahuachapán SM	19.3	29.4				
HACHADURA	Ahuachapán SM	19.3	29.4	19.3	33.6	21.3	31.5
	La Hachadura	23.3	33.6				

Tabla No. 6. 3: Valores promedio de Temperatura registrados en la Cuenca del Río Paz para el mes de octubre de varios años

Fuente: MARN

Estos valores de la Tabla No. 6.3 son para las estaciones ubicadas dentro de la cuenca, para el mes de octubre y para un periodo de varios años, tales estaciones fueron utilizadas dentro de la calibración del modelo, donde se pueden apreciar los valores promedio mínimo y máximo por estación, los mínimos y máximos por subcuenca y el promedio mínimo y máximo por subcuenca.

Debido al comportamiento de la temperatura se utilizaron dos rangos de temperaturas para ambas subcuencas o regiones de pronóstico, los cuales varían entre los 17 a los 27 grados centígrados para El Jobo y de los 21 a los 32 grados centígrados para Hachadura, donde los valores máximos se ubican entre las 11:00 a las 16:00 horas y los mínimos entre las 21:00 a las 05:00 horas. (Ver Tabla No. 6.4)

HORA	JOBO	HACHADURA
0	18.00	22.00
1	17.20	21.20
2	17.30	21.30
3	17.80	21.80
4	17.10	21.10
5	17.00	21.00
6	17.20	21.20
7	17.80	21.80
8	20.10	24.10
9	21.90	25.90
10	24.30	28.30
11	26.40	30.40
12	27.00	31.00
13	27.90	31.90
14	28.00	32.00
15	26.70	30.70
16	24.70	28.70
17	22.20	26.20
18	20.80	24.80
19	18.80	22.80
20	18.30	22.30
21	18.00	22.00
22	17.86	21.86
23	17.54	21.54

Tabla No. 6.4: Temperatura de un día promedio en octubre

Fuente: Propia

Finalmente, estos datos de precipitación y temperatura se ingresaron en el distrito creado para realizar el pronóstico, como dato de entrada para todos los días de simulación de pronóstico iniciando el 10 de Octubre a las 00 horas (Ver Figura No. 6.2)

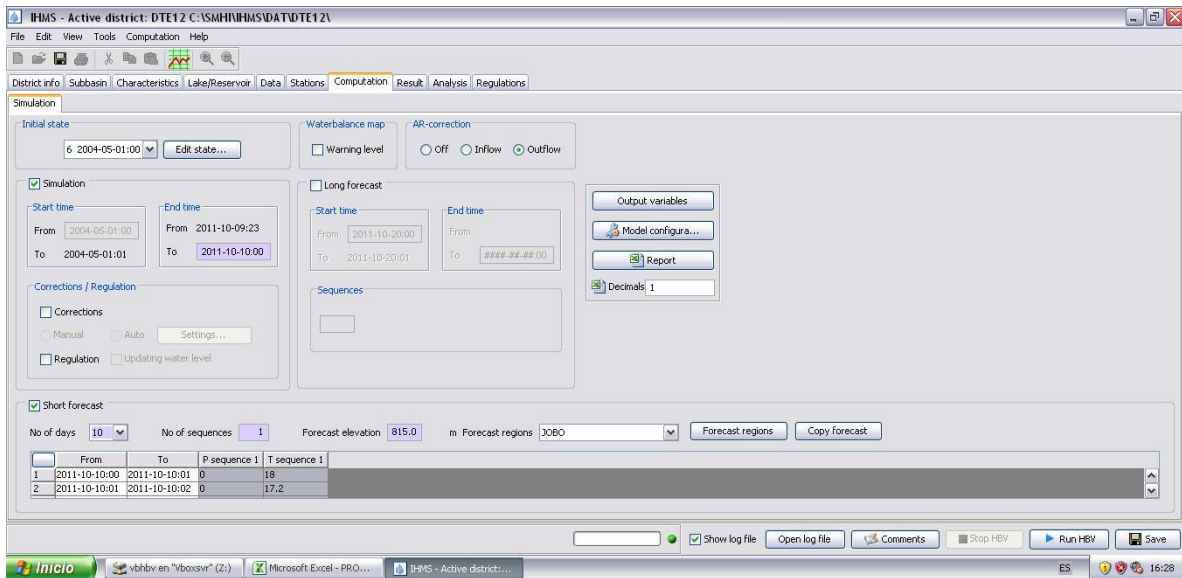


Figura No. 6.2: Pantalla de Ingreso de datos para pronostico

Fuente: Propia

6.2.4.3 REALIZACION DEL PRONÓSTICO

Luego de preparado el escenario e ingresados los datos necesarios, se procedió a la corrida del Modelo HBV con modalidad de Pronostico a corto plazo, esta corrida genero la pantalla mostrada en la Figura No. 6.3, como puede verse en la figura los datos de la varianza, la diferencia acumulada y demás cálculos que realiza el modelo en cada corrida no se efectuaron, por lo que mostraron su valor en 0.0000, lo cual es congruente con lo dicho anteriormente y da a entender que el pronóstico hidrológico se está realizando correctamente.

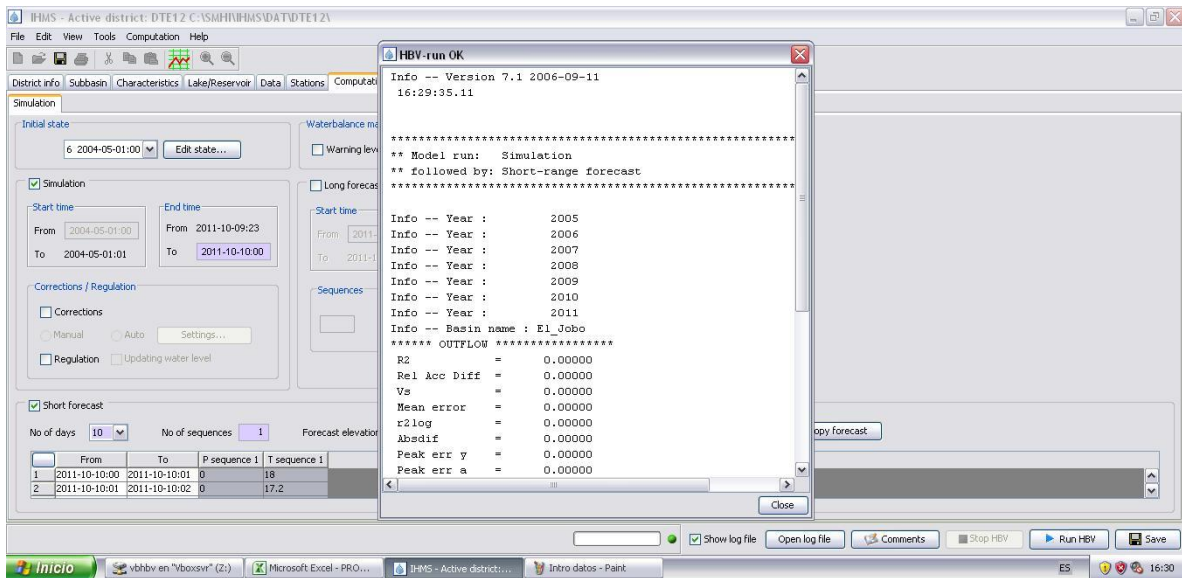


Figura No. 6.3: Corrida del Modelo HBV en Modalidad de Pronostico a Corto Plazo

Fuente: Propia

Cuando se realizó esta corrida con modalidad de pronóstico el modelo muestra en pantalla el mensaje **Model Run: Simulation** que indica que el modelo se está corriendo y abajo de este mensaje se muestra **followed by: Short-Range Forecast** lo cual indica que se está corriendo en la modalidad de pronóstico a corto plazo.

6.2.4.4 EVALUACION Y COMPARACION DE RESULTADOS DEL PRONÓSTICO

Posterior a la realización de la corrida del modelo en modalidad de pronóstico se verificaron los resultados obtenidos de caudal para cada subcuenca analizada, esto se realizó en la pestaña **Result** seleccionando el pronóstico a corto plazo, y ajustando el periodo de datos deseado, se seleccionó la variable **qcout totmean** para que el modelo pudiera mostrar los resultados del pronóstico de caudales a partir de los datos ingresados de precipitación y temperatura por cada subcuenca asociada a cada región de pronóstico.

Como ejemplo se muestra la Subcuenca El Jobo y Hachadura, donde se pueden apreciar parte de los resultados obtenidos. (Ver Figura No. 6.3 y No. 6.4)

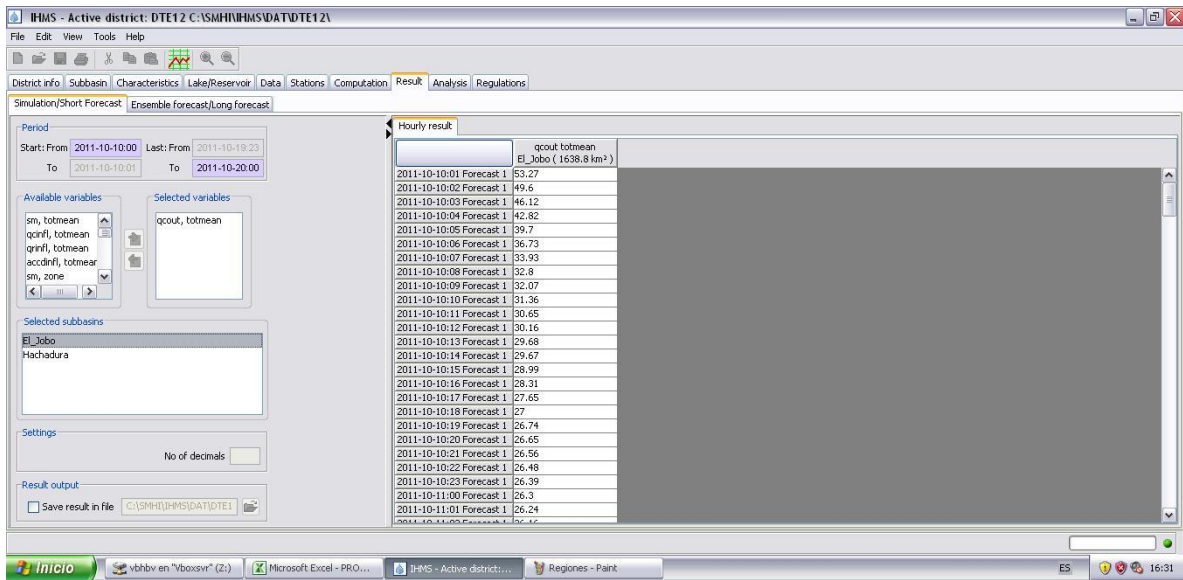


Figura No. 6.4: Resultados del Pronóstico de caudales Subcuenca El Jobo

Fuente: Propia

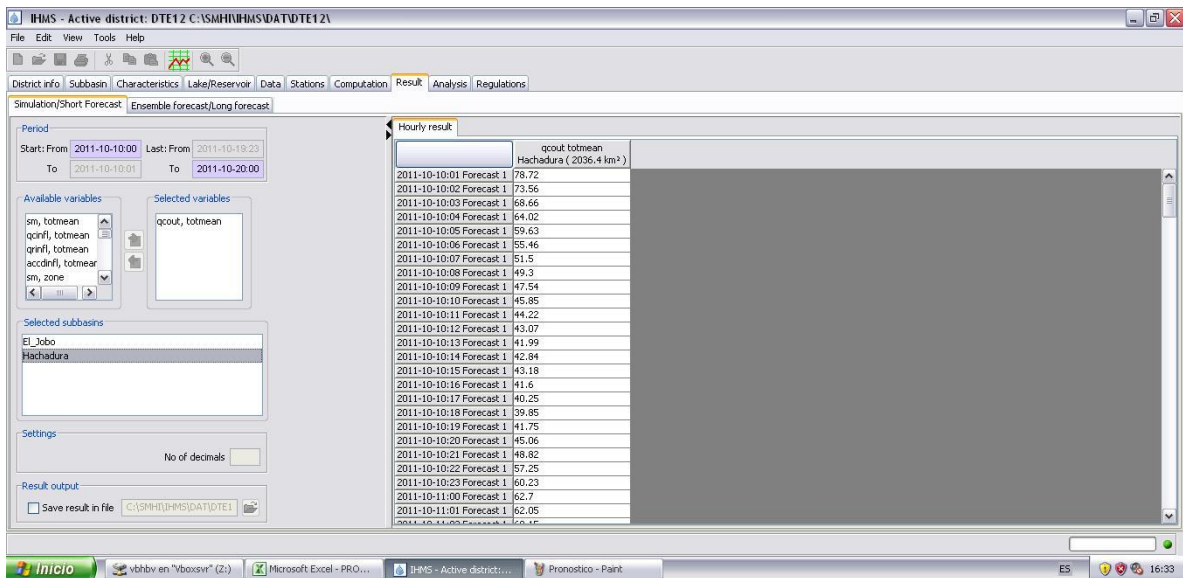


Figura No. 6.5: Resultados del Pronóstico de caudales Subcuenca Hachadura

Fuente: Propia

Como puede observarse en ambas figuras, el pronóstico fue realizado correctamente debido a que el modelo presenta el periodo de pronóstico acompañado del Rotulo **Forecast 1** que indica que el pronóstico fue realizado para la secuencia 1.

Luego de realizado el pronóstico se realizó una comparación de los caudales obtenidos como resultado del pronóstico, versus los caudales reales computados mediante la calibración, como producto de esta comparación se obtuvieron los análisis siguientes:

a. RESULTADOS DE SUBCUENCA EL JOBO:

Los resultados del Pronóstico fueron analizados y comparados gráficamente para ambas subcuencas; en el Grafico No. 6.1 se presenta el resultado de esta comparación para la subcuenca El Jobo, donde puede observarse un buen ajuste en su parte inicial, sin embargo en las partes subsiguientes, especialmente en los picos del gráfico, existen ligeras diferencias que podrían considerarse significativas si la modelación fuese únicamente para esta zona.

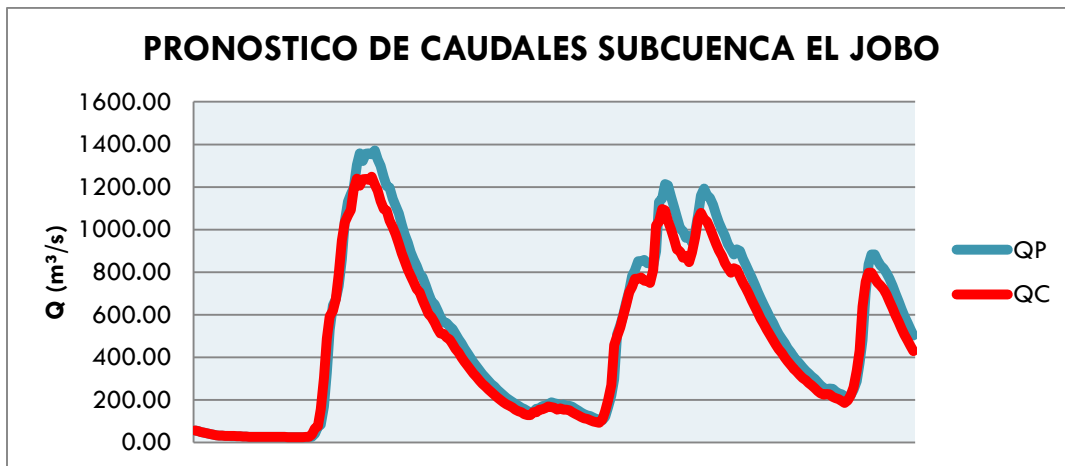


Grafico No. 6.1: Comparación de Caudales Resultantes de pronóstico para Subcuenca El Jobo

Fuente: Propia

Dónde:

QP: Caudal pronosticado

QC: Caudal Computado

b. RESULTADOS DE SUBCUENCA HACHADURA:

Como puede apreciarse en el gráfico No. 6.2 que correspondiente a la subcuenca Hachadura, el comportamiento de los caudales pronosticados es mucho más ajustado a los caudales computados en comparación a la gráfica obtenida para el Jobo, esto significa que los resultados son bastante confiables y que pueden utilizarse de la manera prevista dentro del SAT de la cuenca del Río Paz.

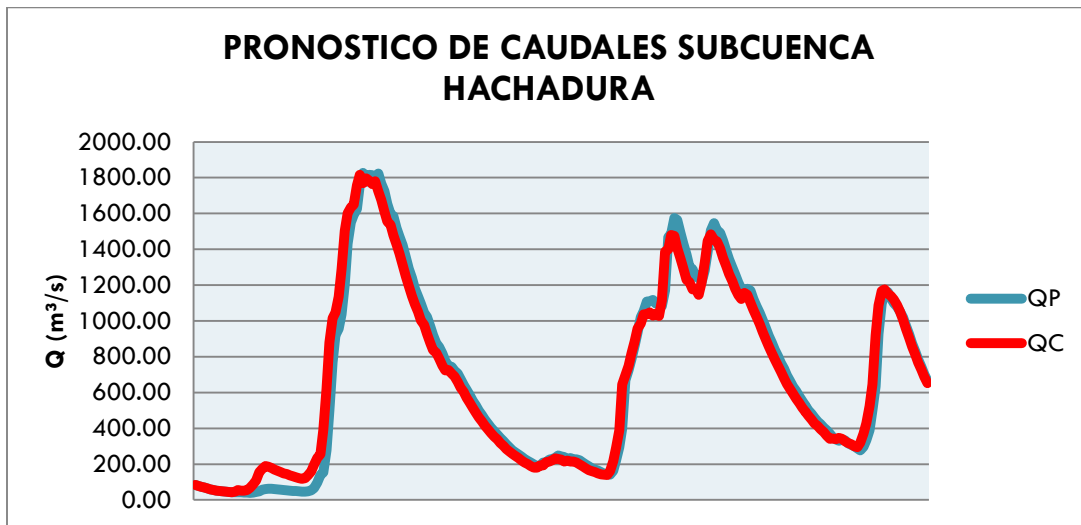


Gráfico No. 6. 2: Comparación de Caudales Resultantes de pronóstico para Subcuenca Hachadura

Fuente: Propia

Dónde:

QP: Caudal pronosticado

QC: Caudal Computado

6.3 IMPLEMENTACION DEL MODELO HBV A LA CUENCA DEL RÍO PAZ

Como producto final de todo el proceso de calibración y análisis de pronósticos mediante el Modelo HBV, se pretende la implementación de estos resultados, y su utilización dentro de las diferentes etapas que experimenta el SAT por inundaciones establecido en la Cuenca.

6.3.1 DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

Como se abordó en el Capítulo tres de esta investigación, el SAT por inundaciones del Río Paz funciona bajo la modalidad de pronóstico de Nivel – Nivel, que se trata de la observación de los niveles registrados aguas arriba del punto de salida de la cuenca y la predicción de un nivel aguas abajo del mismo cauce en un tiempo determinado; este tiempo utilizado es el tiempo de tránsito, el cual es variable dependiendo del tipo de crecida conforme a la Tabla No. 3.5 mostrada en ese mismo capítulo, donde se observa que el tiempo de transido disminuye mientras la crecida es mayor; a su vez esto significa que existe un tiempo similar para que las zonas con vulnerabilidad a inundación sean alertadas adecuadamente y puedan tomar las medidas respectivas.

En vista de este tipo de situaciones, se ha implementado en otros países una aplicación del sistema de información en tiempo real, estructurado y planteado para facilitar la toma de decisiones en la previsión de avenidas, donde los datos hidrológicos son captados y transmitidos a través de una red de comunicación al centro de proceso o de toma de decisiones donde son actualizadas en periodos convenientes de tiempo incluyendo además, la actualización y el despliegue de alertas.

Como un componente adicional, los sistemas incluyen herramientas de generación de pronósticos de caudales, para emisión de alertas basados en pronósticos Meteorológicos. La finalidad primordial de este tipo de sistemas (Sistema de Pronóstico Hidrológico) es poder predecir en forma rápida y oportuna los caudales de crecientes en los sitios donde están ubicadas las estaciones de control y en las comunidades en riesgo por inundaciones, además informar, suministrando automáticamente datos en tiempo real sobre las variables hidrometeorológicas de cada cuenca, ampliando así la red de información permanente. Además, el Modelo posee una ventaja muy significativa en cuanto a la generación de pronóstico la cual radica en el hecho de que se pueden plantear diferentes escenarios con la finalidad de generar un de análisis de sensibilidad de la lluvia pronosticada y de la humedad del suelo en la cuenca del Río Paz y así obtener mejores resultados.

Finalmente la necesidad de emitir alertas por inundación, y el pronóstico de los caudales ante avenidas extremas ha estimulado el uso operacional de modelos hidrológicos, entre ellos el modelo HBV el cual es uno muy utilizado.

6.3.2 ACTUALIZACIÓN DE UMBRALES DE LOS PUNTOS DE CONTROL

En cuanto a los umbrales de alerta generados en la cuenca, se presentó la Tabla No. 3.6 dentro del capítulo tres, que corresponde a los niveles que fueron registrados y actualizados hasta el año 2011, basados en la ocurrencia de la Depresión Tropical 12E; se presentan las Figuras No. 6.6 y No. 6.7 que corresponden a las secciones transversales en las estaciones El Jobo y La Hachadura respectivamente. Según se observa en cada una de las dos figuras mostradas, los niveles máximos para la DT-12 E estuvieron arriba de los 5.00 metros que es el nivel arriba del cual se declara oficialmente estado de alerta en la cuenca.

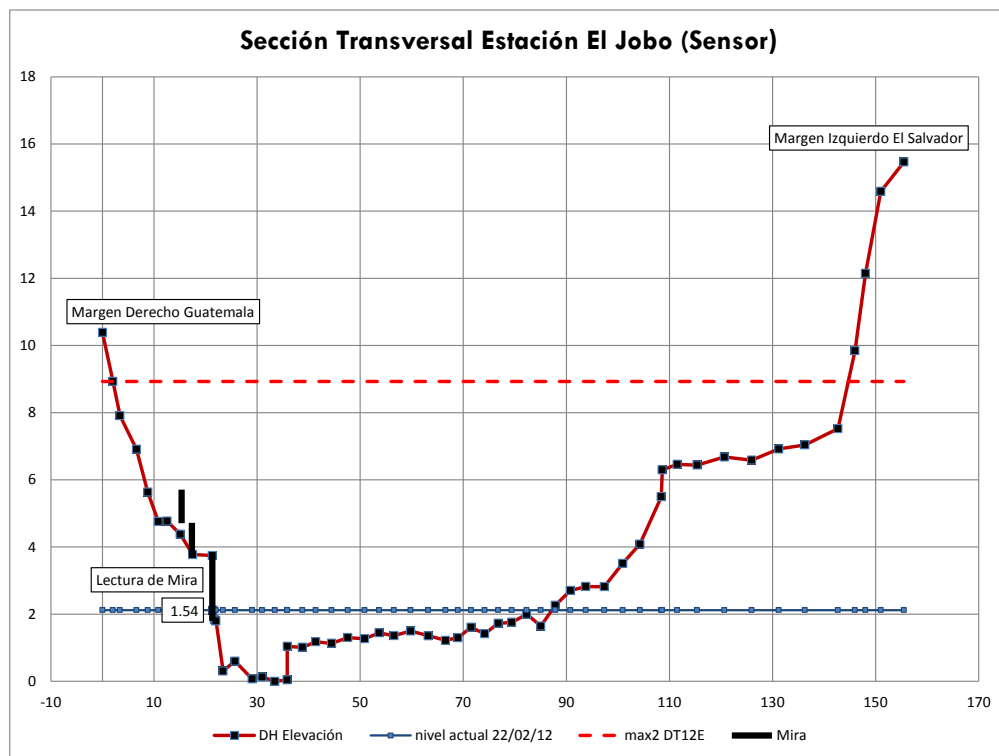


Figura No. 6.6: Sección transversal en punto de control de la estación telemétrica El Jobo

Fuente: MARN

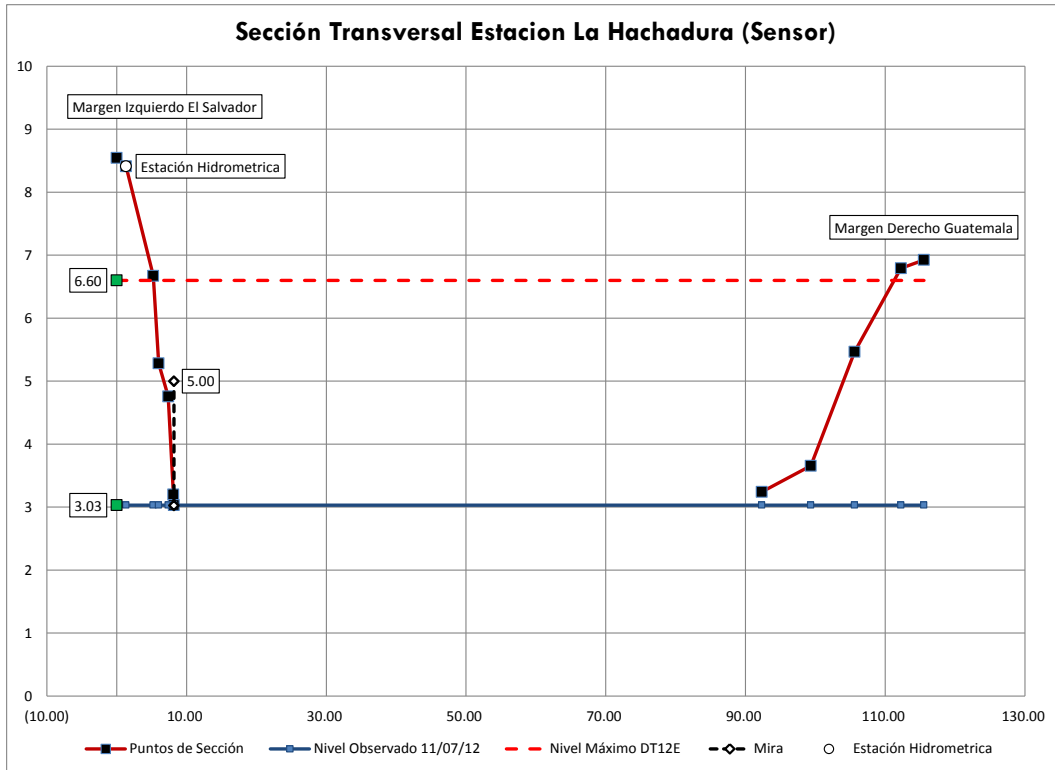


Figura No. 6.7: Sección transversal en punto de control de la estación telemétrica La Hachadura

Fuente: MARN

En el caso particular de la sección transversal a la altura de la estación telemétrica La Hachadura se muestra incompleta debido a que no es posible la medición de la misma debido a la profundidad de su sección y requiere equipo especializado no disponible en el país.

Resulta conveniente aclarar que durante el año 2012 no se registraron inundaciones similares ni niveles mayores a estos, y desde el año 2002 la sección transversal del río ha venido experimentando cambios de forma a la altura de ambas estaciones, este cambio se puede ver en la Figura No. 6.8 para la estación El Jobo.

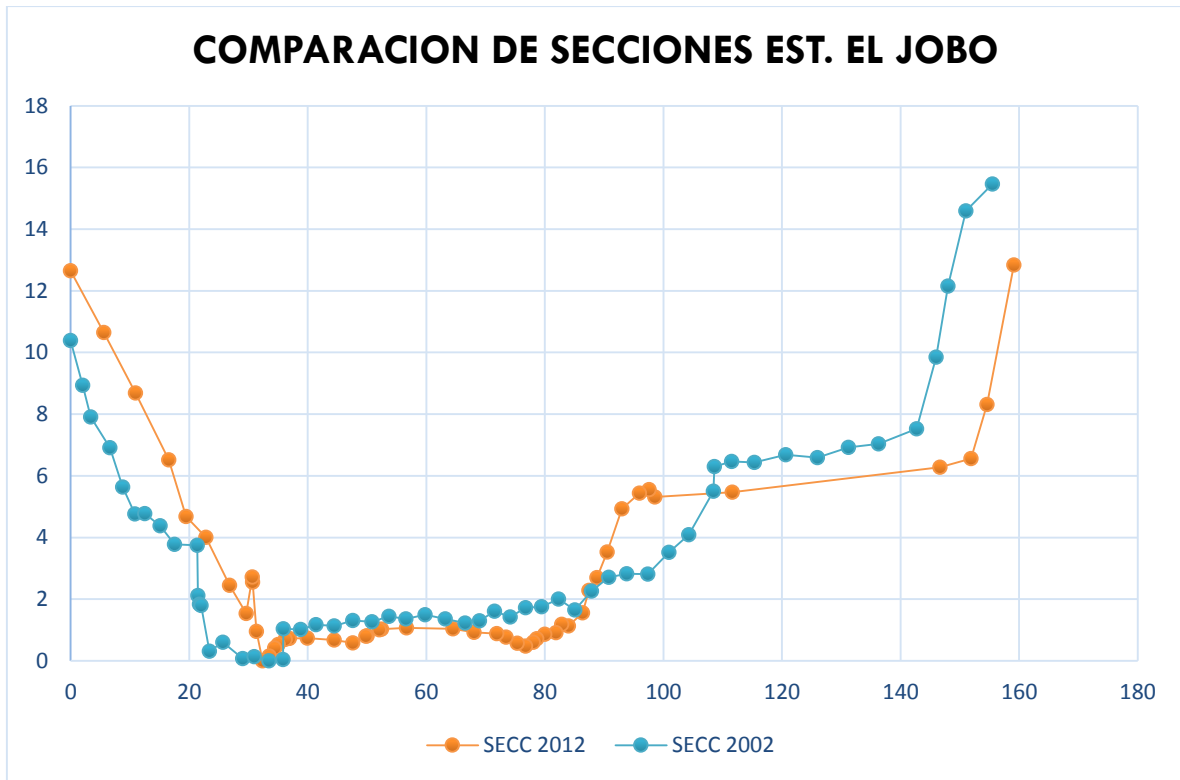


Figura No. 6.8: Comparación de secciones El Jobo años 2002 y 2012

Fuente: Propia

Así mismo en la Figura No. 6.9 para la estación Hachadura, se muestran las secciones transversales del Río Paz donde se pueden identificar tres secciones diferentes: la primera que corresponde al año 2012 que fue tomada aguas arriba de la estación telemétrica, una segunda que fue tomada el mismo año en el sitio donde se ubica la estación (corresponde a la Figura No. 6.7) y finalmente una sección tomada el año 2002 en este mismo sitio.

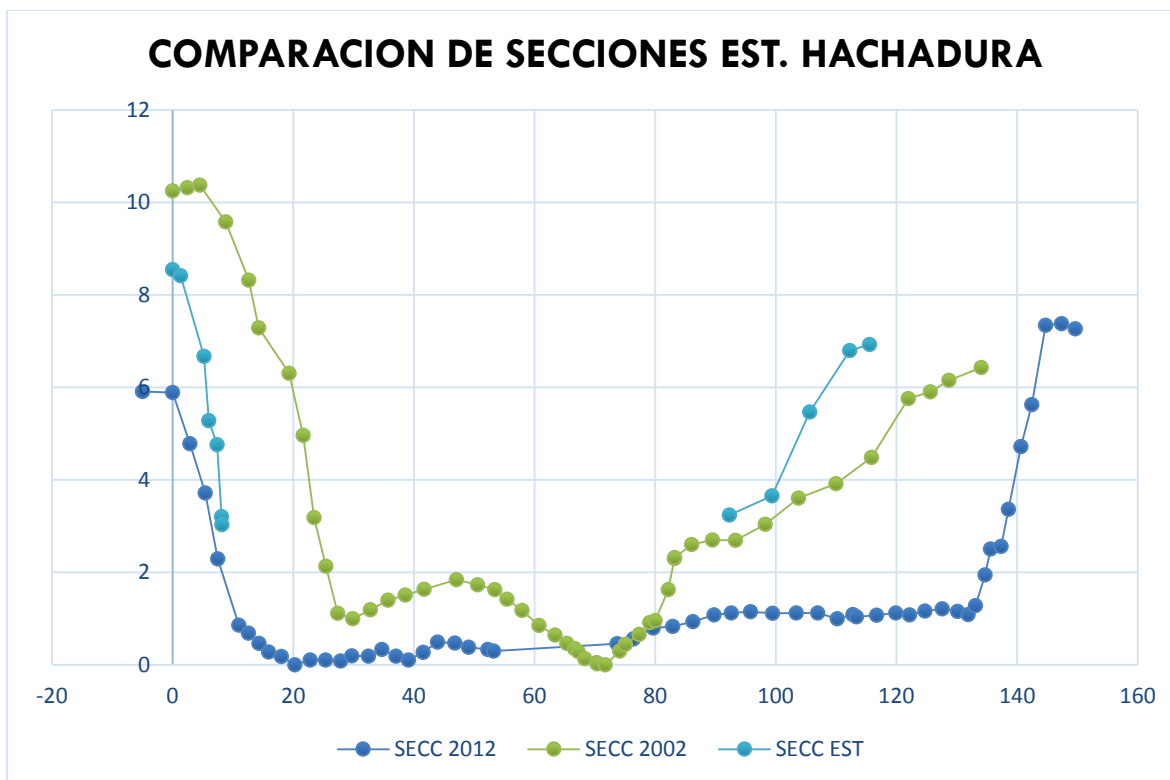


Figura No. 6. 9: Comparación de secciones El Jobo años 2002 y 2012

Fuente: Propia

Para ambos casos presentados se pueden observar diferencias entre las secciones tomadas en años anteriores lo que significa que los umbrales pudieron haber variado con dichas modificaciones, siendo así que el nivel de desborde varíe, sin embargo hasta la fecha de finalización de esta investigación no se logró obtener la información pertinente y necesaria para lograr actualizar de los umbrales de alerta para las estaciones El Jobo y La Hachadura quedando como nivel de alerta y desbordamiento el determinado por la ocurrencia de la DT-12E que corresponde a un nivel de 5.00 metros el cual pertenece al estado de alerta que corresponde a la Emergencia.

6.3.3 COMPARACION DE LOS RESULTADOS DEL MODELO CON EL SISTEMA ACTUAL

La comparación más importante que se puede plantear dentro del SAT mediante la implementación del Modelo HBV o sin esta, radica en la diferencia en cuanto al tiempo de

respuesta necesario para enfrentar fenómenos meteorológicos que provoquen inundaciones en la parte baja de la cuenca. Como era de esperarse, mediante el uso del Modelo HBV como herramienta de pronóstico, es capaz de agregar en el SAT mucho más tiempo de respuesta ante situaciones de inundación en la cuenca, sin embargo el principal inconveniente derivado del uso del modelo se debe a la incertidumbre de los pronósticos a realizarse (Meteorológico e Hidrológico).

Dado que el Modelo HBV permite el ingreso de hasta 10 días de pronóstico horario, se puede decir que el tiempo de respuesta ante eventos que generen inundaciones está condicionado por el número de días de pronóstico y por la certeza y confiabilidad del mismo, así también está condicionado por la certeza del comportamiento de la calibración del Modelo HBV, por tales razones se sugieren con base a implementaciones de este mismo tipo de sistemas en otros países, los siguientes periodos de pronóstico como una alternativa de facilitación del manejo y reducción de la cantidad de datos a pronosticar.

Por tanto el pronóstico puede ser de dos tipos en cuanto a su duración:

- Pronóstico a muy corto plazo (2 a 12 horas)
- Pronóstico a corto plazo (12 horas a 3 días o mas según se requiera)

Estos son los tipos de pronósticos utilizados por la Comisión Nacional de Emergencias, a través de sus comités locales para la activación del protocolo de emergencia en Costa Rica.

6.4 PROPUESTA DE PROTOCOLO DE FUNCIONAMIENTO DEL SAT EN BASE A LA IMPLEMENTACION DEL MODELO HBV

Puede definirse a un protocolo como un conjunto de procedimientos destinados a estandarizar un comportamiento humano o de un sistema frente a una situación específica; para el caso que ocupa esta investigación, puede definirse un protocolo de funcionamiento para el SAT de la Cuenca el Río Paz como una secuencia de pasos en orden lógico para un uso adecuado del Modelo HBV como una herramienta de pronóstico hidrológico a corto plazo.

6.4.1 ACTORES INVOLUCRADOS EN EL PROTOCOLO

Entre los actores involucrados en la generación de pronóstico a través del Modelo HBV para el Sistema de Alerta Temprana por Inundaciones de la Cuenca del Río Paz, se tienen:

- Técnico de Monitoreo Hidrológico: Responsable de la solicitar el pronóstico meteorológico, y de realizar y analizar el pronóstico hidrológico.
- Técnico del área de Meteorología. Responsable de realizar y analizar el pronóstico Meteorológico.

6.4.2 CONDICIONES DE USO

Dentro de las condiciones que se deben satisfacer para habilitar el uso del Modelo HBV como Herramienta de pronóstico están las siguientes:

- El modelo HBV debe de estar calibrado y validado hasta el día anterior en el que se realizara el pronóstico, para ello se debe de efectuar una actualización del modelo a diario tanto en época seca como lluviosa por el personal técnico responsable.
- Se debe hacer un respaldo de los Distritos, por si en el uso del modelo HBV se daña algún archivo.
- Que se encuentre declarada la etapa Hidrológica de **AVISO** en territorio Salvadoreño o específicamente en la zona perteneciente a la cuenca en territorio Salvadoreño/Guatemalteco.
- Que las zonas pertenecientes a la cuenca o sus cercanías se encuentren afectadas por algún Sistema o Fenómeno Meteorológico con la posibilidad de que su desarrollo aumente y se estime que pueda causar daños mayores en la zona.
- Bajo condiciones que el Técnico responsable del Monitoreo considere adecuadas para la utilización de esta herramienta.

6.4.3 ACTUALIZACION DEL MODELO

La actualización del Modelo HBV previo a su uso como herramienta de generación de pronóstico de caudales se debe realizar diariamente como ya se mencionó anteriormente abarcando la época lluviosa y seca por el personal técnico, la actualización incluye:

- La Actualización de datos de las estaciones de lluvia utilizadas en la calibración del Modelo, y
- La Actualización de datos de las estaciones de caudal utilizadas en la calibración del Modelo.

6.4.3.1 ACTUALIZACION DE ESTACIONES

Una de las etapas principales concernientes a la actualización del Modelo consiste en la actualización de los datos de las estaciones incluidas desde la calibración, este proceso será llevado a cabo por el Técnico de Monitoreo en turno, lo cual incluye:

- Verificación de la última actualización de datos que ha experimentado el modelo HBV para todas las estaciones incluyendo estaciones de precipitación y caudales.
- El ingreso de datos de precipitación horaria para cada una de las estaciones utilizadas dentro del modelo, esto significa que se deben ingresar los datos en el formato adecuado hasta la fecha y hora anteriores al primer día de pronóstico.
- Ingreso de los caudales registrados para cada estación de igual manera que los datos de precipitaciones.

6.4.3.2 REAJUSTE DE PARAMETROS

En el caso que al modelo se adicionen más estaciones telemétricas de lluvia, se deberá realizar una nueva calibración lo implica un reajuste de parámetros, ya que la distribución de las estaciones es diferente y por lo tanto los pesos de aportación son distintos, para ello

se deberá ejecutar el orden establecido para la calibración, esto indica que se debe iniciar con el cálculo de los pesos de aportación, correlaciones, y finalmente el ajuste de los parámetros según la clasificación mostrada:

- Parámetros de Volumen de Agua
- Parámetros de Humedad del Suelo
- Parámetros de Forma del Hidrograma, hasta lograr un ajuste aceptable de los hidrogramas

6.4.4 REALIZACION DEL PRONÓSTICO METEOROLOGICO

Deberá realizarse un pronóstico Meteorológico que debe abarcar la generación de los datos de precipitación Media por cada región de pronóstico dentro de la cuenca según los escenarios planteados o según el análisis de sensibilidad requerido, el responsable de la solicitud de este pronóstico será el Técnico de Monitoreo que se encuentre en turno al momento de requerir el uso del Modelo HBV para generar el pronóstico de Caudales; este solicitara al área de Meteorología el pronóstico de acuerdo a la clasificación siguiente:

- Pronostico a Muy Corto Plazo (0 a 12 Horas)
- Pronostico a Corto Plazo (de 12 horas a 3 días o mas según se requiera)

El pronóstico Meteorológico deberá realizarse por el Técnico de turno, y deberá ser entregado a la brevedad posible para generar el pronóstico Hidrológico, a su vez debe incluir dentro de los resultados: Los datos de Precipitación y Temperatura pronosticados cada hora a partir de una fecha y hora definidas.

6.4.4.1 DATOS DE PRECIPITACION

Los datos de Precipitación serán definidos para cada una de las dos zonas o regiones de pronóstico dentro de la cuenca, para ello se hará un formato de tabla en Microsoft Excel

con la fecha (Año, Mes, y día) y hora de inicio del pronóstico en la cual se identificara cada una de las dos zonas de pronóstico, El Jobo y Hachadura.

6.4.4.2 DATOS DE TEMPERATURA

Al igual que la precipitación, se hará un formato de tabla en Microsoft Excel que contenga la fecha (Año, Mes, y día) y hora con las temperaturas pronosticadas para cada región de pronóstico dentro existente dentro del Modelo HBV.

6.4.5 REALIZACION DE PRONOSTICO HIDROLOGICO

El pronóstico Hidrológico se iniciará luego de recibir los datos generados en el Pronóstico Meteorológico, obedeciendo a la siguiente secuencia lógica:

- Se verificara que la fecha de finalización del periodo calibrado sea la misma fecha de inicio de pronóstico Meteorológico de tal manera que exista continuidad en la información.
- Se revisara el contenido del Pronóstico Meteorológico de tal manera que este sea congruente con series de datos registrados en años anteriores y en periodos similares.
- Se ingresaran los datos de temperatura y precipitación para cada región de pronóstico iniciando en orden correlativo iniciando en EL JOBO y finalizando en HACHADURA para cada secuencia de análisis.
- Finalizado el ingreso de los datos de precipitación y temperatura se guardan cambios efectuados y se procederá a la realización de la corrida del Modelo HBV en modo de Pronóstico a corto plazo (**Short Forecast**)
- Se verificaran los resultados obtenidos dentro del Modelo HBV para cada región de pronóstico y se trasladaran a la hoja de pronóstico para ser analizados.

6.4.6 ANALISIS DE RESULTADOS Y EMISION DE ALERTA

Una vez realizado el Pronóstico Meteorológico se procederá al análisis de resultados que consiste en el análisis de caudales y niveles, acompañados de un análisis de comportamiento gráfico, cuya finalidad es determinar si se generaran inundaciones en la parte baja de la cuenca, para lo cual se procederá a la emisión de la alerta respectiva.

6.4.6.1 ANALISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en forma de caudales ya sea para una secuencia única o para varias secuencias, serán analizados en una hoja de cálculo especialmente diseñada para esta labor. (Ver Figura No. 6.6); esta hoja posee dos secciones en las cuales se deberá completar la información respectiva.

La sección izquierda de la hoja de cálculo servirá para ingresar los datos de Precipitación y temperatura provenientes del Pronóstico Meteorológico, así mismo se ingresaran los caudales calculados a través del Modelo HBV; con esta información ingresada se procederá al cálculo de los Niveles esperados con base a las Curvas de Gasto vigentes para el año hidrológico anterior al año del periodo de pronóstico.

MES	DIA	HORA	TEMP (°C)	PREC (mm)	Q (m³/s)	NIVEL (m)	TEMP (°C)	PREC (mm)	Q (m³/s)	NIVEL (m)	nivel en DESBORDE
10	10	0	18.00	3.10	57.14	2.13	22.00	3.40	84.16	2.31	5.00
10	10	1	17.20	0.90	53.27	2.09	21.20	1.20	78.72	2.27	5.00
10	10	2	17.30	0.30	49.60	2.06	21.30	0.30	73.56	2.22	5.00
10	10	3	17.80	0.20	46.12	2.03	21.80	0.10	68.66	2.18	5.00
10	10	4	17.10	0.00	42.82	1.99	21.10	0.00	64.02	2.14	5.00
10	10	5	17.00	0.00	39.70	1.96	21.00	0.00	59.63	2.10	5.00
10	10	6	17.20	0.10	36.73	1.93	21.20	0.20	55.46	2.06	5.00
10	10	7	17.80	0.00	33.93	1.90	21.80	0.00	51.50	2.02	5.00
10	10	8	20.10	0.00	32.80	1.89	24.10	0.00	49.30	1.99	5.00
10	10	9	21.90	0.00	32.07	1.88	25.90	0.00	47.54	1.98	5.00
10	10	10	24.30	0.00	31.36	1.87	28.30	0.00	45.85	1.96	5.00
10	10	11	26.40	0.00	30.65	1.86	30.40	0.00	44.22	1.94	5.00
10	10	12	27.00	0.20	30.16	1.86	31.00	0.20	43.07	1.93	5.00
10	10	13	27.90	0.40	29.68	1.85	31.90	0.30	41.99	1.91	5.00
10	10	14	28.00	0.70	29.67	1.85	32.00	1.00	42.84	1.92	5.00
10	10	15	26.70	1.60	28.99	1.84	30.70	2.90	43.18	1.93	5.00
10	10	16	24.70	0.00	28.31	1.83	28.70	0.10	41.60	1.91	5.00
10	10	17	22.20	0.20	27.65	1.82	26.20	0.20	40.25	1.89	5.00
10	10	18	20.80	0.20	27.00	1.82	24.80	0.20	39.85	1.89	5.00
10	10	19	18.80	0.00	26.74	1.81	22.80	0.00	41.75	1.91	5.00
10	10	20	18.30	0.60	26.65	1.81	22.30	0.60	45.06	1.95	5.00
10	10	21	18.00	0.00	26.56	1.81	22.00	0.00	48.82	1.99	5.00
10	10	22	17.86	0.00	26.48	1.81	21.86	0.00	57.25	2.07	5.00

FECHA DE PRONOSTICO					
INICIO			FINAL		
MES	DIA	HORA	MES	DIA	HORA
10	10	0	10	20	0

CURVAS DE GASTO VIGENTES A FECHA DE PRONOSTICO					
JOGO			HACHADURA		
a	b	c	a	b	c
-1.0851	2.1087	52.3331	-0.9334	2.0544	43.6993
NIVEL MIN	1.44	mts	NIVEL MIN	1.39	mts
NIVEL MAX	7.16	mts	NIVEL MAX	5.00	mts

NIVELES PRONOSTICADOS					
JOGO			HACHADURA		
NIVEL MIN	mts	NIVEL MAX	mts	NIVEL MIN	mts
1.79	mts	5.79	mts	1.89	mts
5.79	mts	7.09	mts	7.09	mts

NIVELES DE ALERTA					
MON. Y PREAVISO	ALERTA Y EMERG.	MON. Y PREAVISO	ALERTA Y EMERG.	MON. Y PREAVISO	ALERTA Y EMERG.
3.70	4.50	5.00	3.60	4.40	5.00

TIPO DE ALERTA	
EMERGENCIA	EMERGENCIA

Figura No. 6.10: Hoja de Pronóstico Hidrológico

Fuente: Propia

Con la información de la parte izquierda ya ingresada se ingresara la información requerida en la parte derecha, la cual se muestra en texto coloreado en rojo en la Tabla No. 6.5. En esta tabla, se deberá ingresar la fecha de pronóstico, los coeficientes de la Curva de Gasto vigente para el periodo anterior al pronóstico, y los niveles máximos y mínimos para cada una de las curvas de gasto de la región El Jobo y Hachadura, finalmente se ingresaran los umbrales de alerta vigentes para cada región.

Como resultado esta hoja calculara los niveles para cada una de las regiones de pronóstico basado en la curva de gasto respectiva y determinara los niveles máximos y mínimos esperados (Niveles Pronosticados) los cuales comparara de forma automática y mostrara el tipo o nivel de alerta que se puede generar coloreándolo de acuerdo a la clave de colores ya establecida.

- MONITOREO Y PREAVISO (VERDE)
- AVISO (AMARILLO)
- ALERTA Y EMERGENCIA (ROJO)

FECHA DE PRONOSTICO					
INICIO			FINAL		
MES	DIA	HORA	MES	DIA	HORA
10	10	0	10	20	0

CURVAS DE GASTO VIGENTES A FECHA DE PRONOSTICO					
JOBO			HACHADURA		
a	b	c	a	b	c
-1.0851	2.1087	52.3331	-0.9334	2.0544	43.6993
NIVEL MIN	1.44	mts	NIVEL MIN	1.39	mts
NIVEL MAX	7.16	mts	NIVEL MAX	5.00	mts

NIVELES PRONOSTICADOS					
JOBO			HACHADURA		
NIVEL MIN	1.79	mts	NIVEL MIN	1.89	mts
NIVEL MAX	5.79	mts	NIVEL MAX	7.09	mts

NIVELES DE ALERTA					
MON. Y PREAVISO	AVISO	ALERTA Y EMERG.	MON. Y PREAVISO	AVISO	ALERTA Y EMERG.
3.70	4.50	5.00	3.60	4.40	5.00

TIPO DE ALERTA	
EMERGENCIA	EMERGENCIA

Tabla No. 6.5: Ingreso de información complementaria para generación de Pronóstico

Fuente: Propia

La parte final del análisis de datos consistirá en la realización de un análisis gráfico, para ello se seleccionara la hoja denominada GRAFICO, dentro del mismo libro lo cual desplegara el gráfico mostrado a continuación. (Ver Gráfico No. 6.3)

En esta gráfica muestra los niveles para las estaciones El Jobo y La Hachadura y se grafica el Nivel de desborde de la estación La Hachadura con el fin de establecer la fecha aproximada de igualación de niveles pronosticados con el nivel de desborde, ya que el tiempo antecedente a este nivel esperado servirá para la emisión de alertas en la zona de acuerdo al mapa semáforo presentado en el próximo numeral.

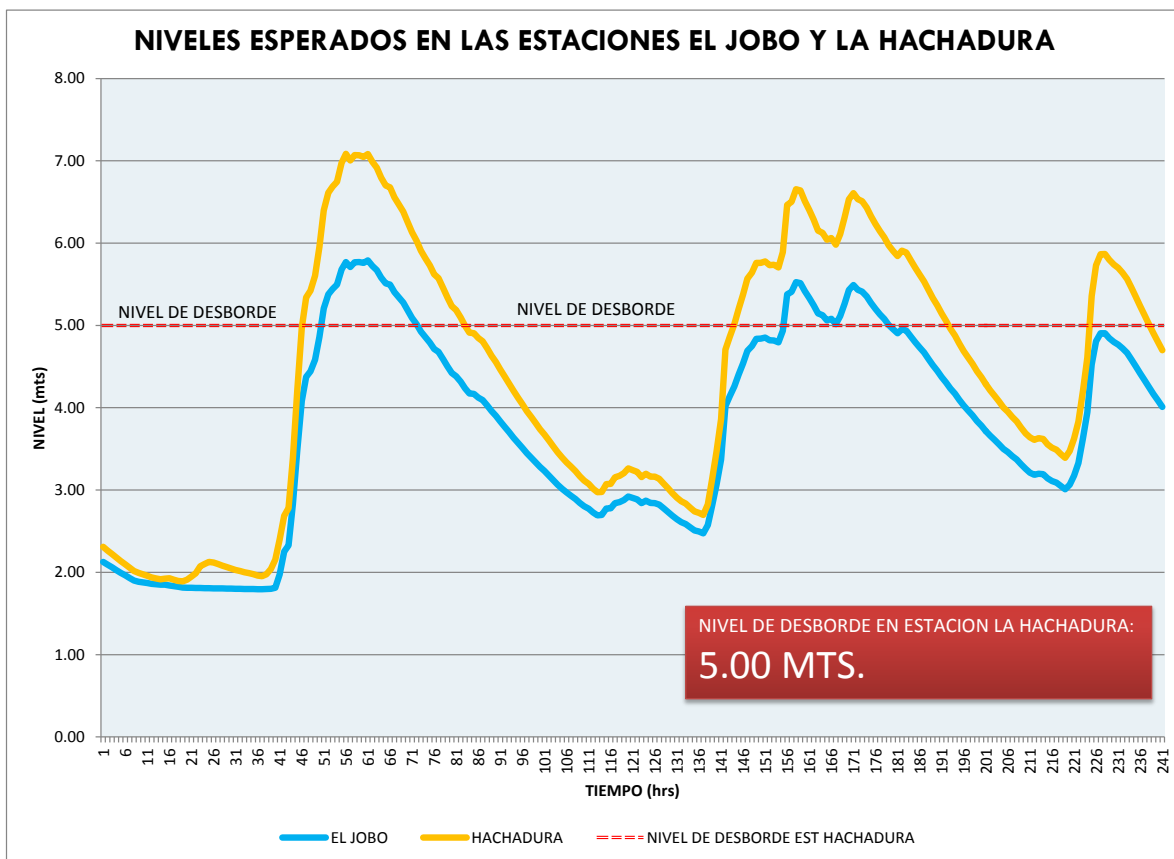
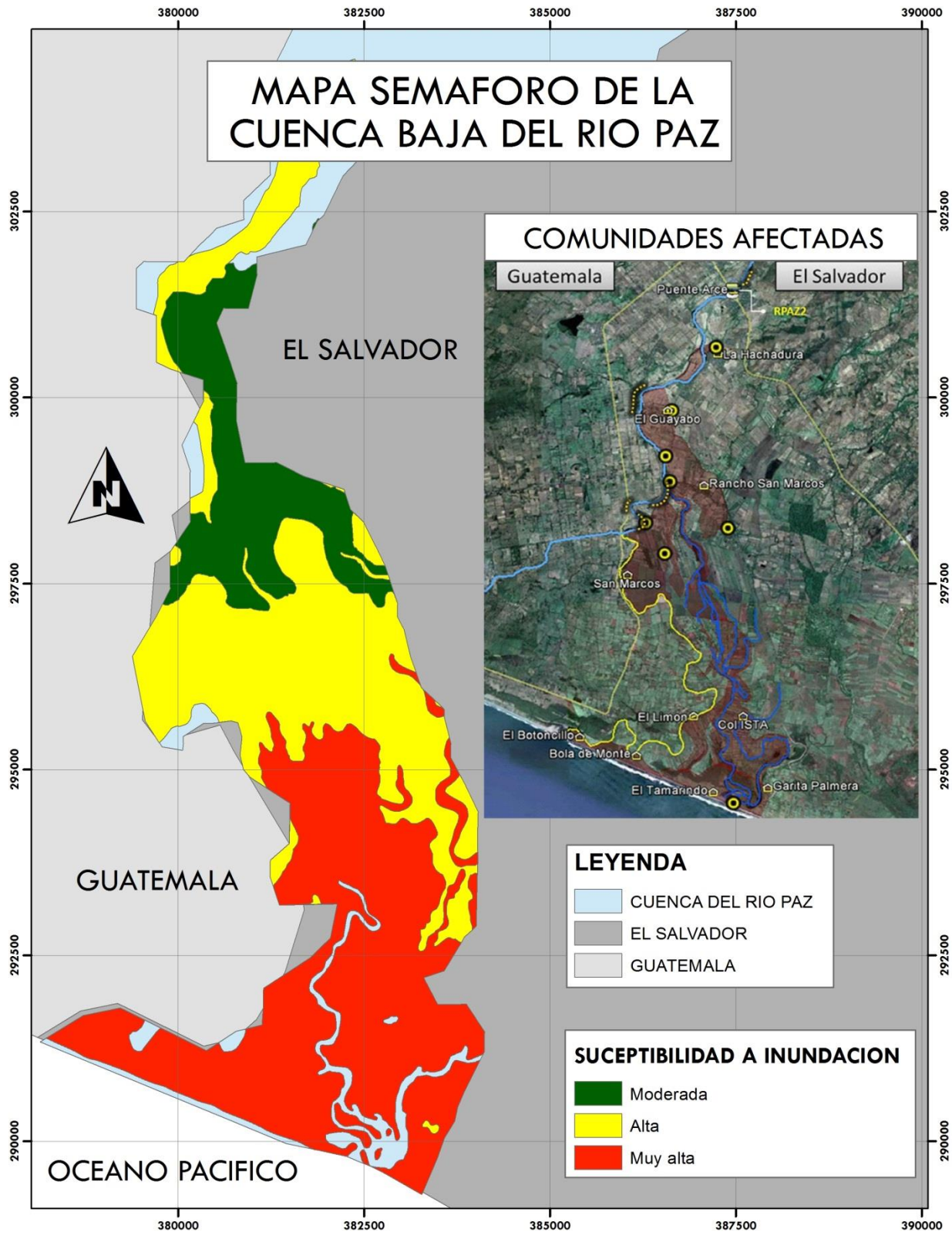


Grafico No. 6.3: Grafico de Análisis de Niveles esperados El Jobo y Hachadura

Fuente: Propia

6.4.6.2 MAPAS SEMAFORO

Finalmente según los resultados obtenidos mediante el análisis dentro del pronóstico que realiza con el Modelo HBV y se completa con la hoja de cálculo para pronósticos se propone un mapa semáforo que identifica las áreas susceptibles a inundaciones en la parte baja de la cuenca y que establece el nivel de prioridad para declarar el estado de emergencia por inundaciones y el nivel de prioridad para realizar evacuaciones. (Ver Mapa No. 6.1)



Mapa No. 6.1: Mapa Semáforo de la Cuenca Baja del Río Paz

Fuente: Propia

***CAPITULO 7: CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES.***

CONCLUSIONES

- Como parte de la calibración del Modelo HBV en la cuenca del Río Paz, se plantearon dos escenarios, con dos y quince subcuencas respectivamente, con un periodo de calibración a partir del año 2003 al año 2006 y desde el año 2006 hasta el año 2012 para su validación, obteniendo el mejor resultado para el escenario de dos subcuencas, dado que para la Subcuenca El Jobo se obtuvo una varianza (r^2) de 0.76796 con una diferencia acumulada de 0.04798 y para la subcuenca Hachadura una varianza (r^2) de 0.82557 con una diferencia acumulada de -52.17171 y gráficamente se tiene un buen ajuste de los hidrogramas observados con los calculados; en cuanto a la validación se obtuvo para El Jobo una varianza (r^2) de 0.43083 con una diferencia acumulada de -0.07779 y para Hachadura una varianza r^2 de 0.30870 con una diferencia acumulada de -0.09872 donde gráficamente se tiene un buen ajuste de los hidrogramas observados con los calculados, se puede observar estadísticamente que esta validación no es buena dado que presenta valores de varianza por debajo de los valores admitidos pero gráficamente se puede observar un ajuste aceptable de los hidrogramas; finalmente la calibración para este escenario se implementó dentro del SAT para el pronóstico de crecidas a corto plazo con el fin de prever anticipadamente las inundaciones en la parte baja de la cuenca obteniendo resultados satisfactorios. En cuanto al escenario de 15 subcuencas se obtuvieron resultados menos satisfactorios en la calibración del Modelo HBV comparado con el escenario de dos subcuencas debido a que la red de estaciones de control no es adecuada para realizar ajustes que muestren una mejor calibración, y finalmente se determinó que la relación de conexión entre subcuencas resulto muy complicada para su implementación dentro del SAT
- Para la calibración del Modelo HBV en la cuenca del Río Paz se utilizaron dieciocho parámetros aplicables a zonas tropicales como El Salvador y que influyen de manera directa en la modelación de los hidrogramas computados obteniendo resultados satisfactorios.

- Basados en la información hidrogeológica propia de la cuenca y en la determinación experimental de la Capacidad de Campo, Infiltración, Conductividad Hidráulica, y la textura de suelo de ocho sitios analizados, mediante los resultados obtenidos se plantean dos conclusiones, la primera parte del hecho de que de todos los sitios estudiados solamente el sitio del Cantón El Copinol en Atiquizaya presenta un dato de Infiltración que no es congruente con los demás sitios visitados por lo que este dato no es representativo para el análisis, y la segunda radica en el uso de los resultados obtenidos donde solamente la Capacidad de Campo se incluyó de manera directa dentro del modelo HBV, sin embargo el resto de parámetros sirvieron para dar la idea del comportamiento que experimenta la cuenca en la parte media alta la cual contribuye a la generación de la escorrentía subsuperficial, y a la vez contribuye al almacenamiento de humedad y recarga hídrica de la cuenca.

- Para el cálculo de la lluvia media se homogeneizaron los registros utilizados a un solo periodo que va desde el año 2003 al 2012 para la mayoría de estaciones, aclarando que en el caso de las estaciones de Guatemala para la estación Quezada se utilizó un promedio anual años anteriores, mientras que para la estación Montufar el valor fue interpolado del mapa de isoyetas generado, y se obtuvieron los valores de lluvia promedio en la Cuenca del Río Paz los cuales varían de los 1010 mm/año y los 2549 mm/año en la cuenca, observando la mayores lluvias registradas corresponden a territorio salvadoreño en casi toda la cadena volcánica perteneciente a la cuenca.

- El Sistema de Alerta Temprana por Inundaciones en la cuenca del Río Paz utiliza las estaciones El Jobo y La Hachadura como parte importante en el registro de los niveles del río y la emisión de alertas, sin embargo para la calibración del modelo HBV se utilizaron los registros de niveles en ambas estaciones y se transformaron a caudales a través de las Curvas de Gasto ya calculadas por MARN debido a que se obtuvieron resultados aceptables para utilizarlos como datos dentro de la calibración e implementación del Modelo, los periodos usados fueron a partir del

2003 al 2012 en el caso de El Jobo y para La Hachadura del año 2003 al 2010 ya que no se tienen aforos a partir del 2010 para esta estación.

- Actualmente el SAT de la cuenca del Río Paz cuenta con valores de niveles de Alerta que no se han actualizado desde el año 2011, por tal razón se realizó un análisis de los cambios que han sufrido las secciones de El Jobo y Hachadura desde el año 2002 al 2012, para ambos casos presentados se pueden observar diferencias entre las secciones tomadas en años anteriores lo que significa que los umbrales pudieron haber variado con dichas modificaciones, siendo así que el nivel de desborde varíe, sin embargo hasta la fecha no se ha logrado obtener la información adecuada y necesaria para lograr una actualización de los umbrales de alerta para las estaciones El Jobo y La Hachadura quedando como nivel de alerta y desbordamiento el determinado por la ocurrencia de la DT-12E que corresponde a un nivel de 5.00 metros el cual pertenece al estado de alerta que corresponde a la Emergencia.
- Mediante los resultados derivados de la calibración se pudo observar que el escenario con dos subcuencas resulto adecuado para ser implementado en el SAT, y mediante dicha implementación se propuso un protocolo de funcionamiento que rige los pasos a seguir para el correcto desarrollo de las diferentes actividades que incluye el uso del Modelo HBV como herramienta de Pronostico Hidrológico de manera que este produzca los resultados deseados.

RECOMENDACIONES

- Es recomendable que en el futuro se implemente dentro del SAT el escenario de quince subcuencas, ya que el comportamiento de la cuenca es muy complejo y este escenario podría brindar aportes significativos para el estudio de la cuenca, sin embargo esto implica que por cada subcuenca se tenga una estación de control como mínimo para que la calibración sea adecuada, esto conlleva a ampliar la red de estaciones hidrométricas en la cuenca tanto en la parte guatemalteca y salvadoreña, con lo cual se puede obtener una mejor distribución de la lluvia y el registro de niveles del río en la cuenca, ya que actualmente solo se tienen dos estaciones de lluvia y una de nivel en la parte guatemalteca la cual representa el 65 % de área total de la cuenca del Río Paz.
- En el caso de que no se amplié la red de estaciones de lluvia en la parte guatemalteca para ambos escenarios, se puede utilizar imágenes satelitales las cuales muestran la lluvia pronosticada en base a un hidroestimador por área o estación.
- La calibración del modelo HBV en la cuenca del Río Paz se realizó con un listado de dieciocho parámetros aplicables a zona tropicales como El Salvador, sin embargo debido a que el modelo permite aplicaciones adicionales en áreas de investigación podría utilizarse más parámetros de calibración, lo cual implicaría realizar una nueva calibración del modelo en la cuenca, para ello se recomienda respetar el rango de valores y las condiciones bajo las cuales se utilizaran dichos parámetros adicionales para obtener buenos resultados al momento de calibrar el modelo y en su implementación.
- Para obtener una calibración del modelo HBV más apegada a datos propios de la cuenca del Río Paz se analizaron ocho sitios de pruebas de campo, uno en Guatemala y el resto en El Salvador, realizando las pruebas de Capacidad de Campo, Infiltración, Conductividad Hidráulica y Textura del Suelo, sin embargo de todos los resultados, el sitio del Cantón El Copinol Atiquizaya se obtuvo un valor alto

de Infiltración, por lo cual se recomienda primero repetir la prueba en sitio antes mencionado las veces necesarias hasta obtener un datos representativo del sitio, además se propone como recomendación adicional que se puedan realizar muestreos en la zona guatemalteca para tener una mejor idea del comportamiento hidrogeológico de la cuenca; finalmente es recomendable iniciar labores de estudio de la percolación en los suelos de la cuenca a través de métodos adecuados ya que este parámetro controla en gran medida el caudal base del río Paz.

- Para determinar la lluvia media en la cuenca se debe homogeneizados los datos de lluvia, sin embargo para esta investigación fue necesario el relleno de datos en varias estaciones y algunos promedios se obtuvieron de un registro histórico que no corresponden al mismo periodo de análisis, lo cual influyo en la distribución de la lluvia en la cuenca, por lo tanto se recomienda utilizar periodos de años con menor cantidad de datos faltantes en las estaciones de lluvia y que además incluyan los datos de las estaciones de Guatemala para ese nuevo periodo de tal forma que los resultados obtenidos sean mejores.

- Es recomendable realizar aforos para todo el año hidrológico en la época seca y lluviosa en las estaciones hidrométricas El Jobo y La Hachadura, con el objetivo de generar Curvas de Gastos para cada periodo del año y así estudiar el comportamiento del río a lo largo del año hidrológico con lo cual podrían mejorarse los resultados de la modelación hidrológica con el modelo HBV.

- Es importante que para cada año se realice una actualización de los niveles de alerta, sobre todo en aquellos años en los que se tengan eventos de gran magnitud que han influido en el cambio de sección de los puntos de control, esto con la finalidad de conocer el cambio que experimenta la sección y la forma en que este fenómeno influye en el desbordamiento del río en dichos puntos de control y aguas debajo de los mismos, para ello se recomienda actualizar los umbrales de alerta de El Jobo y La Hachadura en un futuro evento lluvioso que afecte la cuenca, donde se lleve un registro histórico de los niveles que se produzca desbordamiento de río.

- Es recomendable que el protocolo sea validado por el MARN para que se respeten y apliquen adecuadamente los pasos incluidos como parte del protocolo de funcionamiento del Modelo HBV dentro del Sistema de Alerta Temprana por Inundaciones, ya que esto puede mejorar los resultados del SAT ante fenómenos lluviosos que afecten la cuenca.

BIBLIOGRAFÍA

- Ing. Msc. José Mauricio Martínez García. (2010). *Red de Observadores Locales: Una Componente de los Sistemas de Alerta Temprana por Inundaciones*. San Salvador: SNET
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2011). *SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA CUENCA DEL RIO LEMPA*. San Salvado. DGOA.
- Ing. Jorge Antonio Castaneda Cerón. (2010). *Calibración del modelo Hydrologiska Byråns Vattenbalans (HBV) en la cuenca del Río Jiboa como herramienta para el Sistema de Alerta Temprana por Inundaciones*. Guatemala: ERIS-USAC
- Ing. Adriana María Erazo Chica. (Abril 2004). *ANÁLISIS HIDROLÓGICOS EN CUENCA DEL RIO PAZ PARA MEJORA DE SAT DE LA CUENCA, SERVICIO HIDROLÓGICO NACIONAL - ÁREA INVESTIGACIÓN HIDROLÓGICA*.
- Servicio Nacional de Estudios Territoriales (2005). *BALANCE HÍDRICO INTEGRADO Y DINÁMICO EN EL SALVADOR, COMPONENTE EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS*. San Salvador. SNET
- Germán Monsalve Sáenz (1999). *Hidrología en la Ingeniería*. Bogotá (2ª. Edición): ALFA OMEGA.
- J.M. de Azevedo Neto (1976). *Manual de hidráulica* (6ta Edición). México, D.F.: HARLA
- JJ. Gómez-Cadenas (2005), *El Método de Monte Carlo Curso De Estadística TAE*
Maikel Fuentes Rodríguez y Gabriel J. Gil Pérez (8 de Enero de 2010) *Método de Monte Carlo*.
- SMHI (2006). *INTEGRATED HYDROLOGICAL MODELLING SYSTEM Manual v.5.1*, Suecia. SMHI

- Ing. Agrónomo José Mauricio Tejada Master en Ingeniería en Regadíos (Junio de 2004). *Infiltración del agua en el suelo*. El Salvador: Universidad de El Salvador Facultad de Ciencias Agronómicas departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente.
- Dra. Lourdes Flores Delgadillo y Tec. Jorge René Alcalá Martínez (n.d.). *Manual de Procedimientos Analíticos: Laboratorio de Física de Suelos*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Departamento de Edafología.
- María Valdés y Nora Medina Jaritz (2005). *Ecología Microbiana del Suelo: Compendio Practico*. Consultado el día Miércoles 05 de Mayo de 2012 de la pagina <http://www.publicaciones.ipn.mx/WPS/WCM/CONNECT/A3217800425C01408C1EBF5A5EBC1AE/13893BCD.PDF?MOD=AJPERES>
- Autor Desconocido (n.d.). *Análisis de Laboratorio: Estudio de Suelo*. Consultado el día Miércoles 02 de Mayo de 2012 de la página http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/marquezronald/wp-content/uploads/An_341lisis-Laboratorio.pdf
- Autor Desconocido (n.d.). *Método del Hidrómetro de Bouyoucos*. Consultado el día Miércoles 02 de Mayo de 2012 de la página http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/marquezronald/wp-content/uploads/An_341lisis-Laboratorio.pdf
- Autor Desconocido (n.d.). *ANÁLISIS DE LABORATORIO: Estudio de Suelo*. Consultado el día Miércoles 02 de Mayo de 2012 de la página http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/marquezronald/wp-content/uploads/An_341lisis-Laboratorio.pdf

- Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. *RELACION AGUA-SUELO-PLANTAS*. Consultado 11 de Octubre de 2012 de la Página: http://www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_hidr/Tema14.pdf
- José María Artero García (1975). *La Vida en nuestro Planeta*. España (1ª Edición): EVEREST, S. A.
- Carlos E. Aguilar (1978). *Apuntes de Geología General*. UES Facultad de Ciencias Agronómicas Departamento de Suelos. San Salvador.
- Autor Desconocido (n.d). *Geología de El Salvador*. San Salvador. Consultado el día Jueves 31 de Mayo de 2012 de la página <http://www.snet.gob.sv/ver/geologia/geologia+de+el+salvador/>
- Servicio Nacional de Estudios Territoriales (2005). *BALANCE HÍDRICO INTEGRADO Y DINÁMICO EN EL SALVADOR, COMPONENTE EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS*. San Salvador. SNET
- Autor: SNET, consultado el día Martes 03 de Abril de 2012 <http://www.snet.gob.sv/ver/hidrologia/monitoreo+hidrologico/>
- Plan de Acción VII en El Salvador de Ayuda Obrera Suiza (AOS), Oxfam Solidaridad de Bélgica y Cruz Roja Española (Abril 2011). *Lineamientos Generales para el Diseño Participativo y Operación de Sistemas Comunitarios de Alerta Temprana ante deslizamientos provocados por lluvias en El Salvador*
- Ing. Roberto Cerón, (2012). *Sistemas de Alerta Temprana por Inundaciones en El Salvador*. San Salvador: DGOA.
- Servicio Nacional de Estudios Territoriales (2005). *BALANCE HÍDRICO INTEGRADO Y DINÁMICO EN EL SALVADOR, COMPONENTE EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS*. San Salvador. SNET

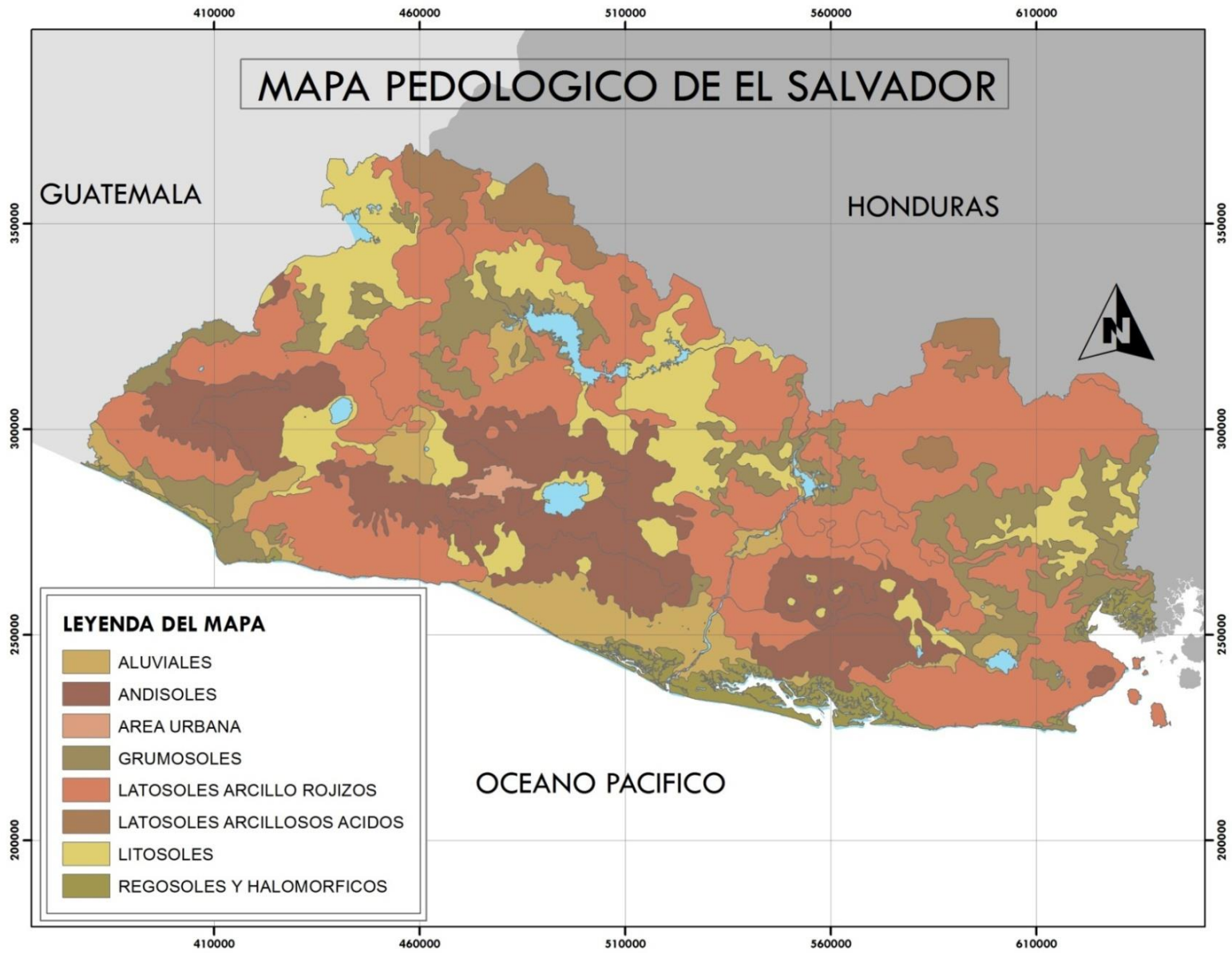
- Melibea Gallo y Eduardo Rodríguez (Diciembre 2010), *HUMEDALES Y MEDIOS DE VIDA EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO PAZ*, Proyecto: Gestión integrada de recursos hídricos y medios de vida en el río Paz El Salvador – Guatemala
- Melibea Gallo y Eduardo Rodríguez (Diciembre 2010), *HUMEDALES Y MEDIOS DE VIDA EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO PAZ*, Proyecto: Gestión integrada de recursos hídricos y medios de vida en el río Paz El Salvador – Guatemala
- Ileana Gómez con colaboración de Margarita García (2002), *FORMAS DE GESTIÓN Y USO DE RECURSOS EN LA CUENCA DEL RÍO PAZ EN EL SALVADOR*, Programa Salvadoreño de Investigación Sobre Desarrollo y Medio Ambiente
- Ing. Adriana María Erazo Chica. (Abril 2004). *ANÁLISIS HIDROLÓGICOS EN CUENCA DEL RIO PAZ PARA MEJORA DE SAT DE LA CUENCA*, SERVICIO HIDROLOGICO NACIONAL - AREA INVESTIGACIÓN HIDROLOGICA.
- Ing. Roberto Cerón, (2012). *EVALUACIÓN DEL SAT DURANTE LA DEPRESIÓN TROPICAL 12*. San Salvador: DGOA.
- MARN (Febrero 2012), *CUENCA BAJA DEL RIO PAZ Y ZONAS INUNDABLES*, DGOA.
- Ing Ana Deysi López e Ing José Roberto Cerón, (Marzo 2008), *SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR INUNDACIONES EN EL RIO GRANDE DE SAN MIGUEL EL SALVADOR* - Servicio Hidrológico Nacional
- Ing. Agro. Msc. José Mauricio Tejada Asencio (n.d). *Programa para el análisis de la Infiltración del agua en el suelo*. San salvador: Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la UES
- Ing. Ms. Agrónomo José Mauricio Tejada Asencio y Ing. Agrónomo Jairo Sanchez (2012). *Programa para el cálculo de la Conductividad Hidraulica Kfs, utilizando el*

Permeámetro de Guelph. San Salvador: Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la UES.

- Ing. Adriana María Erazo Chica. (Abril 2004). ANALISIS HIDROLÓGICOS EN CUENCA DEL RIO PAZ PARA MEJORA DE SAT DE LA CUENCA, SERVICIO HIDROLOGICO NACIONAL - AREA INVESTIGACIÓN HIDROLOGICA.
- FAO (2003). Manual Curso Análisis Espacial ARCVIEW 8.2.Chile. (n.d): n.d
- Ing. MSc. Adriana María Erazo Chica (2011). *RELACIÓN DE LÁMINAS DE LLUVIA PARA DETERMINACIÓN DE HIETOGRAMAS DE DISEÑO DE DIFERENTES DURACIONES EN EL SALVADOR*. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. San Salvador.

ANEXOS

ANEXO 1: MAPA PEDOLOGICO DE EL SALVADOR



Anexo No. 1. 1: Mapa Pedológico de El Salvador

Fuente: Propia

ANEXO 2: DATOS DE CAMPO DE PRUEBA DE INFILTRACION

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS
DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE

CALCULO DE VELOCIDAD DE INFILTRACION (I) Y LAMINA ACUMULADA (D)

POR: Ing Agr. Msc. José Mauricio Tejada

LUGAR: **La Geo, Ahuachapán**
 FECHA: **23 de Abril de 2012**

PROYECTO **hbv rio paz**
 RESPONSABLE **felipe-ruben**

HORA	TIEMPO (min)		LECTURAS (cm)		LAMINA (cm)		INFILTRACION (cm/h)	
	Parcial	Acumulado	antes	despues	Periodo	Acumulada	Periodo	Acumulada
11:42	0	0		161.00		0.00		-
					0.50		15.00	
11:44	2	2	161.50			0.50		15.00
					0.50		10.00	
11:47	3	5	162.00			1.00		12.00
					1.00		15.00	
11:51	4	9	163.00			2.00		13.33
					1.00		12.00	
11:56	5	14	164.00	160.00		3.00		12.86
					1.50		15.00	
12:02	6	20	161.50			4.50		13.50
					1.50		12.86	
12:09	7	27	163.00			6.00		13.33
					1.50		11.25	
12:17	8	35	164.50	160.40		7.50		12.86
					1.80		12.00	
12:26	9	44	162.20			9.30		12.68
					1.70		10.20	
12:36	10	54	163.90	160.00		11.00		12.22
					2.10		11.45	
12:47	11	65	162.10			13.10		12.09

Anexo No. 2. 1: Prueba de Infiltración de La Geo Ahuachapán

Fuente: Propia

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS
DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE

CALCULO DE VELOCIDAD DE INFILTRACION (I) Y LAMINA ACUMULADA (D)

POR: Ing Agr. Msc. José Mauricio Tejada

LUGAR: Sn Jn de Dios
 FECHA: 23 de Abril de 2012

PROYECTO: hbv rio paz
 RESPONSABLE: felipe-ruben

HORA	TIEMPO (min)		LECTURAS (cm)		LAMINA (cm)		INFILTRACION (cm/h)	
	Parcial	Acumulado	antes	despues	Periodo	Acumulada	Periodo	Acumulada
03:53	0	0		161.00		0.00		-
					5.50		165.00	
03:55	2	2	166.50	160.00		5.50		165.00
					6.90		138.00	
03:58	3	5	166.90	160.00		12.40		148.80
					8.30		124.50	
04:02	4	9	168.30	160.00		20.70		138.00
					8.80		105.60	
04:07	5	14	168.80	160.00		29.50		126.43
					8.00		96.00	
04:12	5	19	168.00	159.90		37.50		118.42
					7.20		86.40	
04:17	5	24	167.10	159.90		44.70		111.75
					6.90		82.80	
04:22	5	29	166.80	159.70		51.60		106.76
					6.30		75.60	
04:27	5	34	166.00	159.80		57.90		102.18
					6.90		69.00	
04:33	6	40	166.70	159.80		64.80		97.20
					7.30		62.57	
04:40	7	47	167.10			72.10		92.04

Anexo No. 2. 2: Prueba de Infiltración del Cantón San Juan de Dios, Juayúa

Fuente: Propia

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS
DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE

CALCULO DE VELOCIDAD DE INFILTRACION (I) Y LAMINA ACUMULADA (D)

POR: Ing Agr. Msc. José Mauricio Tejada

LUGAR: **cton El Nispero**
 FECHA: **24 de Abril de 2012**

PROYECTO **hbv rio paz**
 RESPONSABLE **felipe-ruben**

HORA	TIEMPO (min)		LECTURAS (cm)		LAMINA (cm)		INFILTRACION (cm/h)	
	Parcial	Acumulado	antes	despues	Periodo	Acumulada	Periodo	Acumulada
11:25	0	0		159.60		0.00		-
					1.90		57.00	
11:27	2	2	161.50			1.90		57.00
					1.60		48.00	
11:29	2	4	163.10	159.50		3.50		52.50
					2.60		52.00	
11:32	3	7	162.10	159.30		6.10		52.29
					4.60		55.20	
11:37	5	12	163.90	159.60		10.70		53.50
					4.00		40.00	
11:43	6	18	163.60	159.60		14.70		49.00
					4.10		35.14	
11:50	7	25	163.70	159.50		18.80		45.12
					4.80		36.00	
11:58	8	33	164.30	159.70		23.60		42.91
					5.00		33.33	
12:07	9	42	164.70	159.70		28.60		40.86
					5.10		30.60	
12:17	10	52	164.80	159.40		33.70		38.88
					6.00		32.73	
12:28	11	63	165.40			39.70		37.81

Anexo No. 2. 3: Prueba de Infiltración del Cantón El Nispero, Tacuba

Fuente: Propia

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS
DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE

CALCULO DE VELOCIDAD DE INFILTRACION (I) Y LAMINA ACUMULADA (D)

POR: Ing Agr. Msc. José Mauricio Tejada

LUGAR: **Atiquizaya**
 FECHA: **1 de Abril de 201**

PROYECTO **hbv rio paz**
 RESPONSABLE **felipe-ruben**

HORA	TIEMPO (min)		LECTURAS (cm)		LAMINA (cm)		INFILTRACION (cm/h)	
	Parcial	Acumulado	antes	despues	Periodo	Acumulada	Periodo	Acumulada
15:38	0	0		160.50		0.00		-
					5.60		168.00	
15:40	2	2	166.10	160.80		5.60		168.00
					5.90		177.00	
15:42	2	4	166.70	159.60		11.50		172.50
					6.80		204.00	
15:44	2	6	166.40	159.60		18.30		183.00
					6.10		183.00	
15:46	2	8	165.70	160.00		24.40		183.00
					6.10		122.00	
15:49	3	11	166.10	160.10		30.50		166.36
					8.30		124.50	
15:53	4	15	168.40	159.90		38.80		155.20
					10.10		151.50	
15:57	4	19	170.00	159.80		48.90		154.42
					9.60		144.00	
16:01	4	23	169.40	159.90		58.50		152.61
					9.90		148.50	
16:05	4	27	169.80	159.40		68.40		152.00
					2.70		32.40	
16:10	5	32	162.10			71.10		133.31

Anexo No. 2. 4: Prueba de Infiltración del Caserío El Copinol, Atiquizaya

Fuente: Propia

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS
DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE

CALCULO DE VELOCIDAD DE INFILTRACION (I) Y LAMINA ACUMULADA (D)

POR: Ing Agr. Msc. José Mauricio Tejada

LUGAR: San José, Chalchuapa

PROYECTO

hbv rio paz

FECHA: 25 de Abril de 2012

RESPONSABLE

felipe-ruben

HORA	TIEMPO (min)		LECTURAS (cm)		LAMINA (cm)		INFILTRACION (cm/h)	
	Parcial	Acumulado	antes	despues	Periodo	Acumulada	Periodo	Acumulada
10:54	0	0		160.00		0.00		-
					1.90		57.00	
10:56	2	2	161.90			1.90		57.00
					0.50		15.00	
10:58	2	4	162.40			2.40		36.00
					1.00		30.00	
11:00	2	6	163.40	159.70		3.40		34.00
					0.80		24.00	
11:02	2	8	160.50			4.20		31.50
					1.20		24.00	
11:05	3	11	161.70			5.40		29.45
					1.60		19.20	
11:10	5	16	163.30	156.60		7.00		26.25
					4.40		52.80	
11:15	5	21	161.00			11.40		32.57
					1.30		15.60	
11:20	5	26	162.30			12.70		29.31
					1.10		13.20	
11:25	5	31	163.40			13.80		26.71
					1.00		12.00	
11:30	5	36	164.40	159.60		14.80		24.67

Anexo No. 2. 5: Prueba de Infiltración del Cantón San José, Chalchuapa

Fuente: Propia

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS
DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE

CALCULO DE VELOCIDAD DE INFILTRACION (I) Y LAMINA ACUMULADA (D)

POR: Ing Agr. Msc. José Mauricio Tejada

LUGAR: **Cton El Paste**
 FECHA: **25deAbril de2012**

PROYECTO
 RESPONSABLE

hbv rio paz
felipe-ruben

HORA	TIEMPO (min)		LECTURAS (cm)		LAMINA (cm)		INFILTRACION (cm/h)	
	Parcial	Acumulado	antes	despues	Periodo	Acumulada	Periodo	Acumulada
04:15	0	0		159.50		0.00		-
					4.30		129.00	
04:17	2	2	163.80	159.80		4.30		129.00
					3.60		108.00	
04:19	2	4	163.40	159.90		7.90		118.50
					3.10		93.00	
04:21	2	6	163.00	159.20		11.00		110.00
					3.10		93.00	
04:23	2	8	162.30	159.50		14.10		105.75
					2.80		84.00	
04:25	2	10	162.30	159.80		16.90		101.40
					2.80		84.00	
04:27	2	12	162.60	159.30		19.70		98.50
					4.30		129.00	
04:29	2	14	163.60	158.60		24.00		102.86
					4.00		80.00	
04:32	3	17	162.60	160.30		28.00		98.82
					4.50		90.00	
04:35	3	20	164.80	161.00		32.50		97.50
					3.90		78.00	
04:38	3	23	164.90	161.30		36.40		94.96

Anexo No. 2. 6: Prueba de Infiltración del Cantón El Paste, Chalchuapa

Fuente: Propia

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS
DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE

CALCULO DE VELOCIDAD DE INFILTRACION (I) Y LAMINA ACUMULADA (D)

POR: Ing Agr. Msc. José Mauricio Tejada

LUGAR: **La Hachadura**
 FECHA: **13 de Julio de 2012**

PROYECTO
 RESPONSABLE

hbv rio paz
felipe-ruben

HORA	TIEMPO (min)		LECTURAS (cm)		LAMINA (cm)		INFILTRACION (cm/h)	
	Parcial	Acumulado	antes	despues	Periodo	Acumulada	Periodo	Acumulada
10:29	0	0		98.50		0.00		-
					0.50		15.00	
10:31	2	2	99.00			0.50		15.00
					0.70		14.00	
10:34	3	5	99.70			1.20		14.40
					0.80		12.00	
10:38	4	9	100.50			2.00		13.33
					1.20		14.40	
10:43	5	14	101.70			3.20		13.71
					0.30		3.00	
10:49	6	20	102.00	99.20		3.50		10.50
					1.30		11.14	
10:56	7	27	100.50			4.80		10.67
					0.60		4.50	
11:04	8	35	101.10			5.40		9.26
					1.40		10.50	
11:12	8	43	102.50	98.50		6.80		9.49
					1.00		6.00	
11:22	10	53	99.50			7.80		8.83
					1.50		8.18	
11:33	11	64	101.00			9.30		8.72

Anexo No. 2. 7: Prueba de Infiltración del Cantón La Hachadura

Fuente: Propia

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS
DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE**

CALCULO DE VELOCIDAD DE INFILTRACION (I) Y LAMINA ACUMULADA (D)

POR: Ing Agr. Msc. José Mauricio Tejada

LUGAR: **Jutiapa**
FECHA: **23deOctubrede2012**

PROYECTO **hbv rio paz**
RESPONSABLE **felipe-ruben**

HORA	TIEMPO (min)		LECTURAS (cm)		LAMINA (cm)		INFILTRACION (cm/h)	
	Parcial	Acumulado	antes	despues	Periodo	Acumulada	Periodo	Acumulada
13:48	0	0		9.95		0.00		-
					0.45		13.50	
13:50	2	2	10.40			0.45		13.50
					1.20		24.00	
13:53	3	5	11.60			1.65		19.80
					1.60		24.00	
13:57	4	9	13.20	9.40		3.25		21.67
					1.60		19.20	
14:02	5	14	11.00			4.85		20.79
					1.70		17.00	
14:08	6	20	12.70	8.90		6.55		19.65
					2.10		18.00	
14:15	7	27	11.00			8.65		19.22
					2.10		15.75	
14:23	8	35	13.10	9.50		10.75		18.43
					2.20		14.67	
14:32	9	44	11.70	9.10		12.95		17.66
					2.40		14.40	
14:42	10	54	11.50	9.20		15.35		17.06
					2.10		11.45	
14:53	11	65	11.30			17.45		16.11

Anexo No. 2. 8: Prueba de Infiltración de Jutiapa, Guatemala

Fuente: Propia

ANEXO 3: DATOS DE CAMPO DE PRUEBA DE CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA

**REGISTRO DE DATOS DE CAMPO
PERMEAMETRO DE GUELPH**

Lugar: **La Geo, Ahuachapan**

Fecha y hora: **23/04/2012**

Características del suelo y estado de humedad **Zona verde, seco**

FORMULARIO

Características del agujero de infiltración: **Suelo franco arcilloso**

Profundidad: **35 cm**

Diámetro: **6 cm**

CALCULO

Reservorios utilizados: **combimados Interior**

Responsables: **Prueba 1**
Mauricio Tejada, Jairo Sanchez, Roberto Colucho y Manuel Mendoza

NIVEL DEL AGUA EN EL AGUJERO h1= 5 cm					NIVEL DEL AGUA EN EL AGUJERO h2 10 cm				
TIEMPO t (min)	Δt (min)	Lectura h(cm)	Δh (cm)	Tasa de inf. (cm/min)	TIEMPO t (min)	Δt (min)	Lectura h(cm)	Δh (cm)	Tasa de inf. (cm/min)
0		9			0		25.8		
	2		1.1	0.55		2		1.7	0.85
2		10.1			2		27.5		0.85
	2		1.1	0.55		2		1.7	0.85
4		11.2			4		29.2		
	2		0.3	0.15		2		1.5	0.75
6		11.5			6		30.7		
	2		0.9	0.45		2		1.6	0.8
8		12.4			8		32.3		
	2		0.7	0.35		2		1.7	0.85
10		13.1			10		34		
	2		0.7	0.35		2		1.3	0.65
12		13.8			12		35.3		
	2		0.7	0.35		2		1.4	0.7
14		14.5			14		36.7		
	2		0.7	0.35		2		1.5	0.75
16		15.2			16		38.2		
						2		1.3	0.65
					18		39.5		
						2		1.3	0.65
					20		40.8		
Tasa de infiltración régimen permanente R1 (cm/min) =				0.35	Tasa de infiltración régimen permanente R2 (cm/min) =				0.65

Anexo No. 3. 1: Prueba de Conductividad Hidráulica de La Geo Ahuachapán

Fuente: Propia

**REGISTRO DE DATOS DE CAMPO
PERMEAMETRO DE GUELPH**

Lugar: **Sn Juan de Dios, Juayua**

Fecha y hora: **23/04/2012**

Características del suelo y estado de humedad **Zona verde, humedo**

FORMULARIO

Características del agujero de infiltracion: **Suelo compactado, Ripio**

Profundidad: **35 cm**

Diámetro: **6 cm**

CALCULO

Reservorios utilizados: **combimados Interior**

Responsables: **Prueba 1**
Mauricio Tejada, Jairo Sanchez, Roberto Colucho y Manuel Mendoza

NIVEL DEL AGUA EN EL AGUJERO h1= 5 cm					NIVEL DEL AGUA EN EL AGUJERO h2 10 cm				
TIEMPO t (min)	Δt (min)	Lectura h(cm)	Δh (cm)	Tasa de inf. (cm/min)	TIEMPO t (min)	Δt (min)	Lectura h(cm)	Δh (cm)	Tasa de inf. (cm/min)
0		7.1			0		17.3		
	2		1.1	0.55		2		2	1
2		8.2			2		19.3		
	2		1	0.5		2		2.1	1.05
4		9.2			4		21.4		
	2		1	0.5		2		2.1	1.05
6		10.2			6		23.5		
	2		1	0.5		2		2.1	1.05
8		11.2			8		25.6		
	2		1	0.5		2		2.1	1.05
10		12.2			10		27.7		
Tasa de infiltracion regimen permanente R1 (cm/min) =				0.5	Tasa de infiltracion regimen permanente R2 (cm/min) =				1.05

Anexo No. 3. 2: Prueba de Conductividad Hidráulica del Cantón San Juan de Dios, Juayúa

Fuente: Propia

**REGISTRO DE DATOS DE CAMPO
PERMEAMETRO DE GUELPH**

Lugar: **Cton El Nispero, Tacuba**

Fecha y hora: **23/04/2012**

Características del suelo y estado de humedad **Cafetal, humedo**

FORMULARIO

Características del agujero de infiltración: **Suelo con mat. Organica**

Profundidad: **35 cm**

Diámetro: **6 cm**

CALCULO

Reservorios utilizados: **combimados Interior**

Responsables: **Prueba 1**
Mauricio Tejada, Jairo Sanchez, Roberto Colucho y Manuel Mendoza

NIVEL DEL AGUA EN EL AGUJERO h1= 5 cm					NIVEL DEL AGUA EN EL AGUJERO h2 10 cm				
TIEMPO t (min)	Δt (min)	Lectura h(cm)	Δh (cm)	Tasa de inf. (cm/min)	TIEMPO t (min)	Δt (min)	Lectura h(cm)	Δh (cm)	Tasa de inf. (cm/min)
0		6.6			0		23.9		
	2		1.9	0.95		2		3.9	1.95
2		8.5			2		27.8		
	2		1.8	0.9		2		4.1	2.05
4		10.3			4		31.9		
	2		1.9	0.95		2		3.9	1.95
6		12.2			6		35.8		
	2		1.8	0.9		2		4	2
8		14			8		39.8		
	2		1.9	0.95		2		3.9	1.95
10		15.9			10		43.7		
	2		1.8	0.9		2		4	2
12		17.7			12		47.7		
Tasa de infiltración regimen permanente R1 (cm/min) =				0.95	Tasa de infiltración regimen permanente R2 (cm/min) =				1.95

Anexo No. 3. 3: Prueba de Conductividad Hidráulica del Cantón El Nispero, Tacuba

Fuente: Propia

**REGISTRO DE DATOS DE CAMPO
PERMEAMETRO DE GUELPH**

Lugar: **Atiquizaya**

Fecha y hora: **24/04/2012**

Características del suelo y estado de humedad **Zona verde, humedo**

FORMULARIO

Características del agujero de infiltración: **Suelo franco arcilloso**

Profundidad: **30 cm**

Diámetro: **6 cm**

CALCULO

Reservorios utilizados: **combimados Interior**

Responsables: **Prueba 1**
Mauricio Tejada, Jairo Sanchez, Roberto Colucho y Manuel Mendoza

NIVEL DEL AGUA EN EL AGUJERO h1= 5 cm					NIVEL DEL AGUA EN EL AGUJERO h2 10 cm				
TIEMPO t (min)	Δt (min)	Lectura h(cm)	Δh (cm)	Tasa de inf. (cm/min)	TIEMPO t (min)	Δt (min)	Lectura h(cm)	Δh (cm)	Tasa de inf. (cm/min)
0		10.6			0		29		
	2		2.3	1.15		2		6	3
2		12.9			2		35		
	2		2.2	1.1		2		5.5	2.75
4		15.1			4		40.5		
	2		2.2	1.1		2		5.5	2.75
6		17.3			6		46		
	2		2.2	1.1		2		5.5	2.75
8		19.5			8		51.5		
	2		2.2	1.1		2		5.5	2.75
10		21.7			10		57		
Tasa de infiltración regimen permanente R1 (cm/min) =				1.1	Tasa de infiltración regimen permanente R2 (cm/min) =				2.75

Anexo No. 3. 4: Prueba de Conductividad Hidráulica del Caserío El Copinol, Atiquizaya

Fuente: Propia

**REGISTRO DE DATOS DE CAMPO
PERMEAMETRO DE GUELPH**

Lugar: **cton Sn Jose, Chalchuapa**

Fecha y hora: **25/04/2012**

Características del suelo y estado de humedad: **Zona cafetalera, semi hum**

FORMULARIO

Características del agujero de infiltración: **Suelo compactado, Ripio**

Profundidad: **30 cm**

Diámetro: **6 cm**

CALCULO

Reservorios utilizados: **combimados Interior**

Responsables: **Prueba 1**
 Mauricio Tejada, Jairo Sanchez, Roberto Colucho y Manuel Mendoza

NIVEL DEL AGUA EN EL AGUJERO h1= 5 cm					NIVEL DEL AGUA EN EL AGUJERO h2 10 cm				
TIEMPO t (min)	Δt (min)	Lectura h(cm)	Δh (cm)	Tasa de inf. (cm/min)	TIEMPO t (min)	Δt (min)	Lectura h(cm)	Δh (cm)	Tasa de inf. (cm/min)
0		15.9			0		10.7		
	2		3.8	1.9		2		10.7	5.35
2		19.7			2		21.4		5.35
	2		3.7	1.85		2		10.7	5.35
4		23.4			4		32.1		
	2		3.8	1.9		2		11.2	5.6
6		27.2			6		43.3		
	2		3.6	1.8		2		11.1	5.55
8		30.8			8		54.4		
	2		3.7	1.85		2		11.6	5.8
10		34.5			10		66		
	2		3.9	1.95					
12		38.4							
	2		3.6	1.8					
14		42							
	2		3.8	1.9					
16		45.8							
	2		4	2					
18		49.8							
	2		3.6	1.8					
20		53.4							
Tasa de infiltración regimen permanente R1 (cm/min) =				1.8	Tasa de infiltración regimen permanente R2 (cm/min) =				5.35

Anexo No. 3. 5: Prueba de Conductividad Hidráulica del Cantón San José, Chalchuapa

Fuente: Propia

**REGISTRO DE DATOS DE CAMPO
PERMEAMETRO DE GUELPH**

Lugar: **cton El Paste Chalchuapa**

Fecha y hora: **25/04/2012**

Características del suelo y estado de humedad **Zona verde, humedo**

FORMULARIO

Características del agujero de infiltración: **Suelo compactado, Ripio**

Profundidad: **30 cm**

Diámetro: **6 cm**

CALCULO

Reservorios utilizados: **combimados Interior**

Responsables: **Prueba 1**
 Mauricio Tejada, Jairo Sanchez, Roberto Colucho y Manuel Mendoza

NIVEL DEL AGUA EN EL AGUJERO h1= 5 cm					NIVEL DEL AGUA EN EL AGUJERO h2 10 cm				
TIEMPO t (min)	Δt (min)	Lectura h(cm)	Δh (cm)	Tasa de inf. (cm/min)	TIEMPO t (min)	Δt (min)	Lectura h(cm)	Δh (cm)	Tasa de inf. (cm/min)
0		6			0		12.6		
	2		0.5	0.25		2		1.1	0.55
2		6.5			2		13.7		
	2		0.5	0.25		2		1.2	0.6
4		7			4		14.9		
	2		0.5	0.25		2		1.1	0.55
6		7.5			6		16		
	2		0.5	0.25		2		1.2	0.6
8		8			8		17.2		
	2		0.5	0.25		2		1.1	0.55
10		8.5			10		18.3		
						2		1	0.5
					12		19.3		
						2		1.1	0.55
					14		20.4		
						2		1.1	0.55
					16		21.5		
Tasa de infiltración regimen permanente R1 (cm/min) =				0.25	Tasa de infiltración regimen permanente R2 (cm/min) =				0.55

Anexo No. 3. 6: Prueba de Conductividad Hidráulica del Cantón El Paste, Chalchuapa

Fuente: Propia

REGISTRO DE DATOS DE CAMPO
PERMEAMETRO DE GUELPH

Lugar: **cton La Hachadura**
 Características del suelo y estado de humedad
 Características del agujero de infiltración: **Suelo arcilloso**
 Profundidad: **30 cm**
 Reservorios utilizados: **combimados Interior**

Fecha y hora: **13/07/2012**

Zona verde en estado hum

FORMULARIO

Diámetro: **6 cm**

CALCULO

Responsables: **Prueba 1**

Mauricio Tejada, Jairo Sanchez, Roberto Colucho y Manuel Mendoza

NIVEL DEL AGUA EN EL AGUJERO h1= 5 cm					NIVEL DEL AGUA EN EL AGUJERO h2 10 cm				
TIEMPO t (min)	Δt (min)	Lectura h(cm)	Δh (cm)	Tasa de inf. (cm/min)	TIEMPO t (min)	Δt (min)	Lectura h(cm)	Δh (cm)	Tasa de inf. (cm/min)
0		7.9			0		36		
	2		3.6	1.8		2		4.1	2.05
2		11.5			2		40.1	4	2
	2		3.1	1.55		2		4.1	2.05
4		14.6			4		44.1		
	2		3.3	1.65		2		4.1	2.05
6		17.9			6		48.2		
	2		3	1.5		2		4.1	2.05
8		20.9			8		52.3		
	2		3.2	1.6					
10		24.1							
	2		3	1.5					
12		27.1							
	2		3.21	1.61					
14		30.31							
Tasa de infiltracion regimen permanente R1 (cm/min) =				1.5	Tasa de infiltracion regimen permanente R2 (cm/min) =				2.05

Anexo No. 3. 7: Prueba de Conductividad Hidráulica del Cantón La Hachadura

Fuente: Propia

ANEXO 4: CALCULO DE TEXTURAS DE SUELO

PRUEBA DE LABORATORIO PARA DETERMINAR TEXTURA DE SUELOS

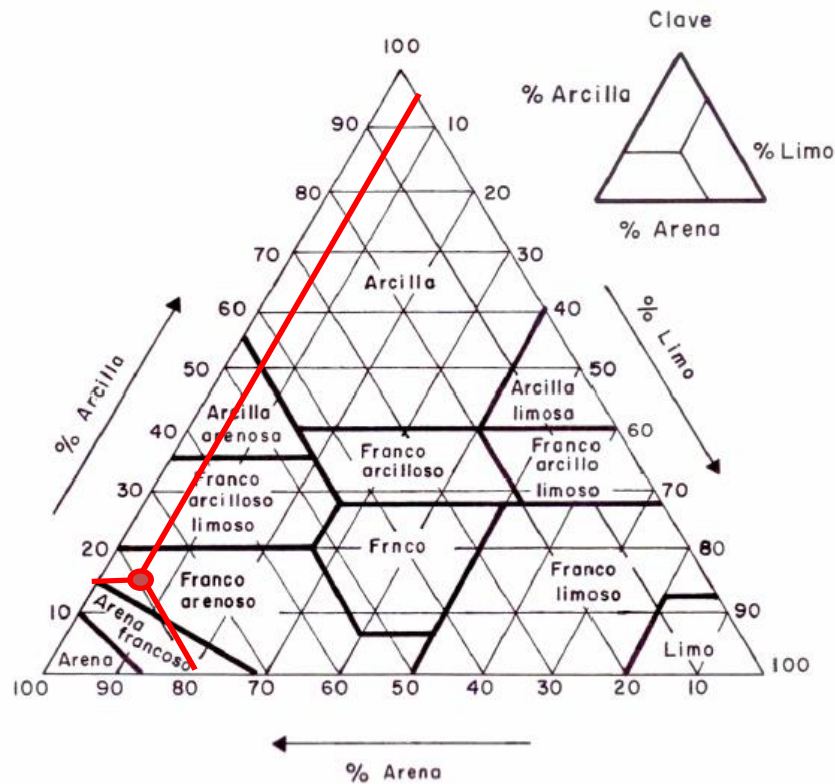
PROYECTO "DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO HBV
EN LA CUENCA DEL RÍO PAZ Y SU USO EN EL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR
INUNDACIONES"

SITIO DE MUESTREO:

La Geotermica - Ahuachapan

TIEMPO DE LECTURA (t)	LECTURA DEL HIDROMETRO (g/l)	LECTURA DE TEMPERATURA (°C)	EXCEDENTE DE TEMPERATURA (°C)	LECTURA DE BLANCO (g/l)	LECTURA CORREGIDA (g/l)
40"	13.00	26.00	6.00	6.1	9.90
4'	11.00	26.40	6.40	6.1	8.10
1 h	8.00	26.50	6.50	6.1	5.15
2 h	6.10	26.50	6.50	6.1	3.25

CALCULO DE PORCENTAJES			TEXTURA
LIMO + ARCILLA	L + C =	19.80	FRANCO ARENOSO
% ARCILLA	C =	16.20	
% LIMO	L =	3.60	
% ARENA	a =	80.20	



Anexo No. 4. 1: Prueba de Textura de La Geo Ahuachapán

Fuente: Propia

PRUEBA DE LABORATORIO PARA DETERMINAR TEXTURA DE SUELOS

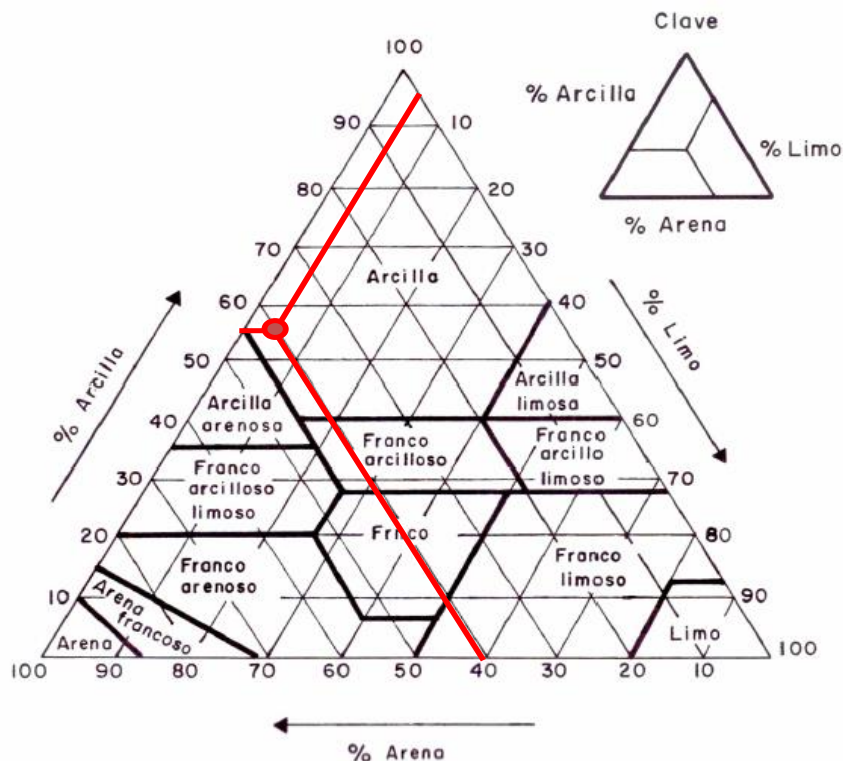
PROYECTO "DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO HBV
EN LA CUENCA DEL RÍO PAZ Y SU USO EN EL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR
INUNDACIONES"

SITIO DE MUESTREO:

Finca San Juan de Dios - Juayúa

TIEMPO DE LECTURA (t)	LECTURA DEL HIDROMETRO (g/l)	LECTURA DE TEMPERATURA (°C)	EXCEDENTE DE TEMPERATURA (°C)	LECTURA DE BLANCO (g/l)	LECTURA CORREGIDA (g/l)
40"	33.00	26.00	6.00	6.1	29.90
4'	31.00	26.00	6.00	6.1	27.90
1 h	24.50	26.50	6.50	6.1	21.65
2 h	22.50	26.50	6.50	6.1	19.65

CALCULO DE PORCENTAJES			TEXTURA
LIMO + ARCILLA	L + C =	59.80	ARCILLA
% ARCILLA	C =	55.80	
% LIMO	L =	4.00	
% ARENA	a =	40.20	



Anexo No. 4. 2: Prueba de Textura del Cantón San Juan de Dios, Juayúa

Fuente: Propia

PRUEBA DE LABORATORIO PARA DETERMINAR TEXTURA DE SUELOS

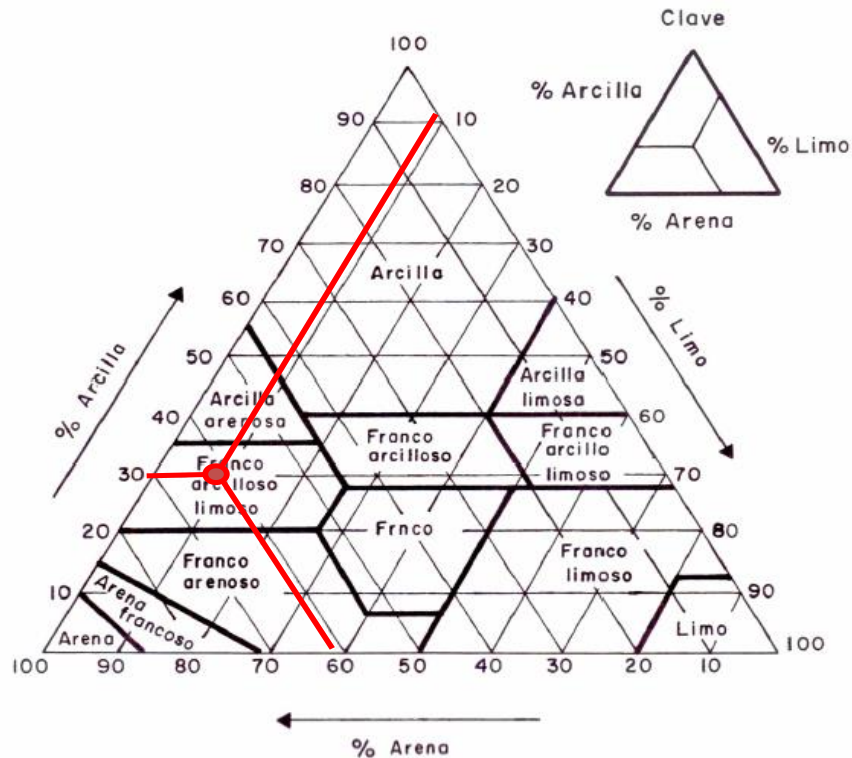
PROYECTO "DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO HBV
EN LA CUENCA DEL RÍO PAZ Y SU USO EN EL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR
INUNDACIONES"

SITIO DE MUESTREO:

Tacuba - Ahuachapan

TIEMPO DE LECTURA (t)	LECTURA DEL HIDROMETRO (g/l)	LECTURA DE TEMPERATURA (°C)	EXCEDENTE DE TEMPERATURA (°C)	LECTURA DE BLANCO (g/l)	LECTURA CORREGIDA (g/l)
40"	23.00	26.00	6.00	6.1	19.90
4'	18.00	26.20	6.20	6.1	15.00
1 h	12.80	26.30	6.30	6.1	9.85
2 h	11.00	26.50	6.50	6.1	8.15

CALCULO DE PORCENTAJES			TEXTURA
LIMO + ARCILLA	L + C =	39.80	FRANCO ARCILLOSO LIMOSO
% ARCILLA	C =	30.00	
% LIMO	L =	9.80	
% ARENA	a =	60.20	



Anexo No. 4. 3: Prueba de Textura del Cantón El Nispero, Tacuba

Fuente: Propia

PRUEBA DE LABORATORIO PARA DETERMINAR TEXTURA DE SUELOS

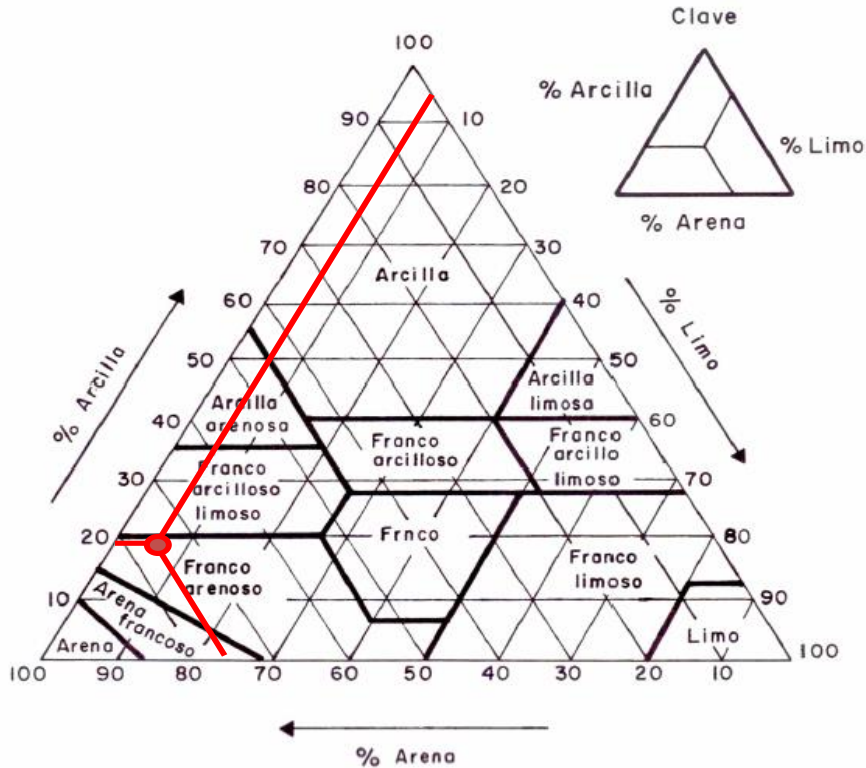
PROYECTO "DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO HBV
EN LA CUENCA DEL RÍO PAZ Y SU USO EN EL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR
INUNDACIONES"

SITIO DE MUESTREO:

San Lorenzo - Atiquizaya

TIEMPO DE LECTURA (t)	LECTURA DEL HIDROMETRO (g/l)	LECTURA DE TEMPERATURA (°C)	EXCEDENTE DE TEMPERATURA (°C)	LECTURA DE BLANCO (g/l)	LECTURA CORREGIDA (g/l)
40"	16.00	26.10	6.10	6.1	12.95
4'	12.50	26.20	6.20	6.1	9.50
1 h	12.00	26.30	6.30	6.1	9.05
2 h	7.60	26.60	6.60	6.1	4.80

CALCULO DE PORCENTAJES			TEXTURA
LIMO + ARCILLA	L + C =	25.90	FRANCO ARENOSO
% ARCILLA	C =	19.00	
% LIMO	L =	6.90	
% ARENA	a =	74.10	



Anexo No. 4. 4: Prueba de Textura del Caserío El Copinol, Atiquizaya

Fuente: Propia

PRUEBA DE LABORATORIO PARA DETERMINAR TEXTURA DE SUELOS

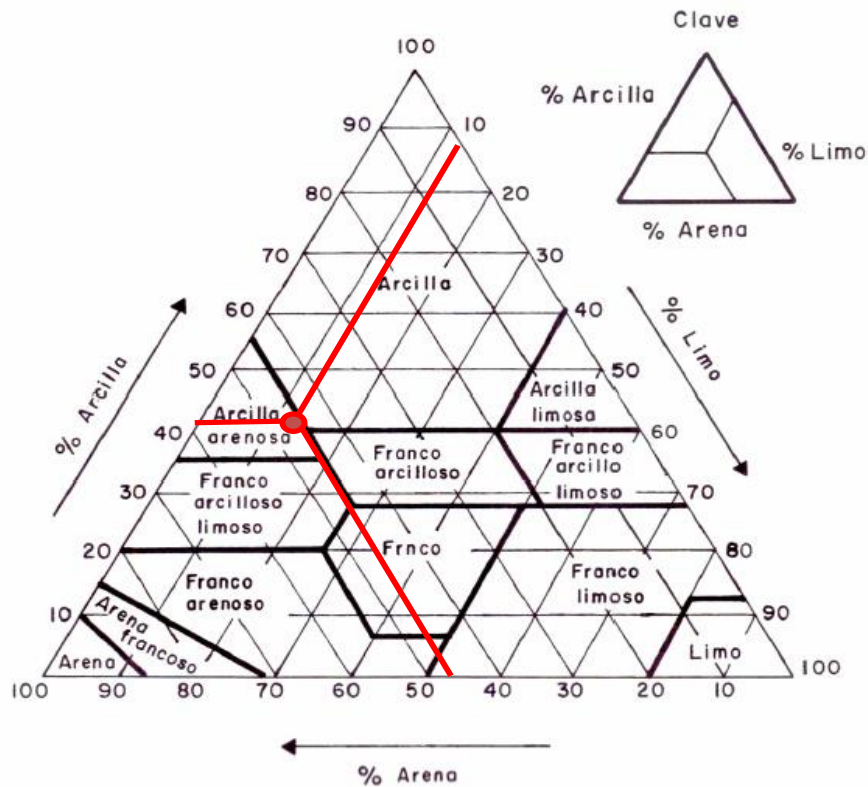
PROYECTO "DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO HBV
EN LA CUENCA DEL RÍO PAZ Y SU USO EN EL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR
INUNDACIONES"

SITIO DE MUESTREO:

San Sebastian Salitrillo - Chalchuapa

TIEMPO DE LECTURA (t)	LECTURA DEL HIDROMETRO (g/l)	LECTURA DE TEMPERATURA (°C)	EXCEDENTE DE TEMPERATURA (°C)	LECTURA DE BLANCO (g/l)	LECTURA CORREGIDA (g/l)
40"	30.00	26.10	6.10	6.1	26.95
4'	23.80	26.40	6.40	6.1	20.90
1 h	16.50	26.40	6.40	6.1	13.60
2 h	10.00	26.60	6.60	6.1	7.20

CALCULO DE PORCENTAJES			TEXTURA
LIMO + ARCILLA	L + C =	53.90	ARCILLA ARENOSA
% ARCILLA	C =	41.80	
% LIMO	L =	12.10	
% ARENA	a =	46.10	



Anexo No. 4. 5: Prueba de Textura del Cantón San José, Chalchuapa

Fuente: Propia

PRUEBA DE LABORATORIO PARA DETERMINAR TEXTURA DE SUELOS

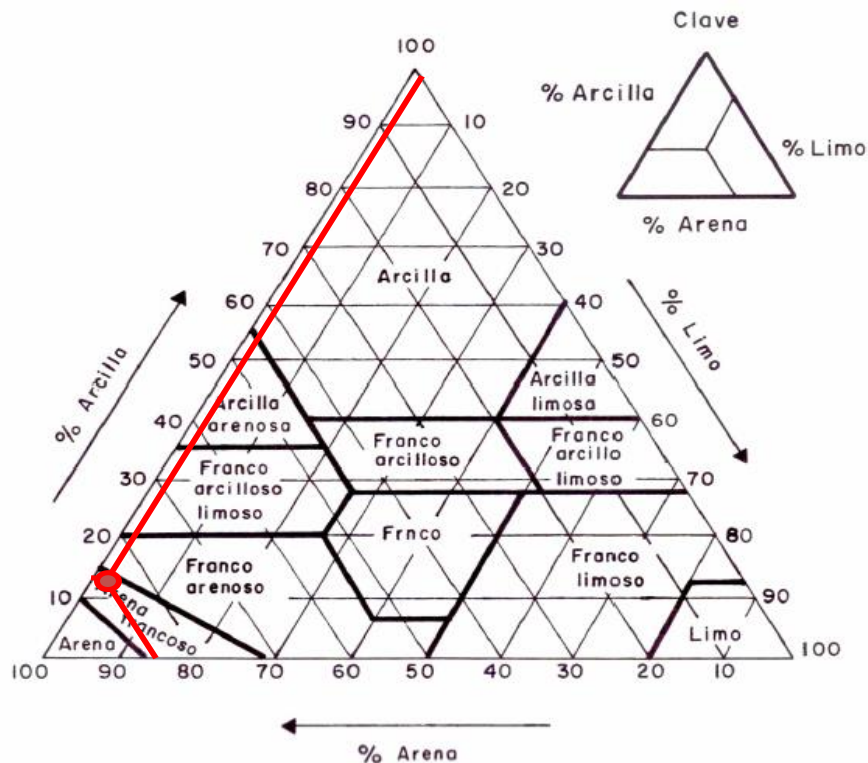
PROYECTO "DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO HBV
EN LA CUENCA DEL RÍO PAZ Y SU USO EN EL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR
INUNDACIONES"

SITIO DE MUESTREO:

San Francisco Menendez - Hachadura

TIEMPO DE LECTURA (t)	LECTURA DEL HIDROMETRO (g/l)	LECTURA DE TEMPERATURA (°C)	EXCEDENTE DE TEMPERATURA (°C)	LECTURA DE BLANCO (g/l)	LECTURA CORREGIDA (g/l)
40"	11.00	26.00	6.00	6.1	7.90
4'	10.00	26.10	6.10	6.1	6.95
1 h	7.20	26.60	6.60	6.1	4.40
2 h	6.90	26.50	6.50	6.1	4.05

CALCULO DE PORCENTAJES			TEXTURA
LIMO + ARCILLA	L + C =	15.80	ARENA FRANCOSE
% ARCILLA	C =	13.90	
% LIMO	L =	1.90	
% ARENA	a =	84.20	



Anexo No. 4. 7: Prueba de Textura del Cantón La Hachadura

Fuente: Propia

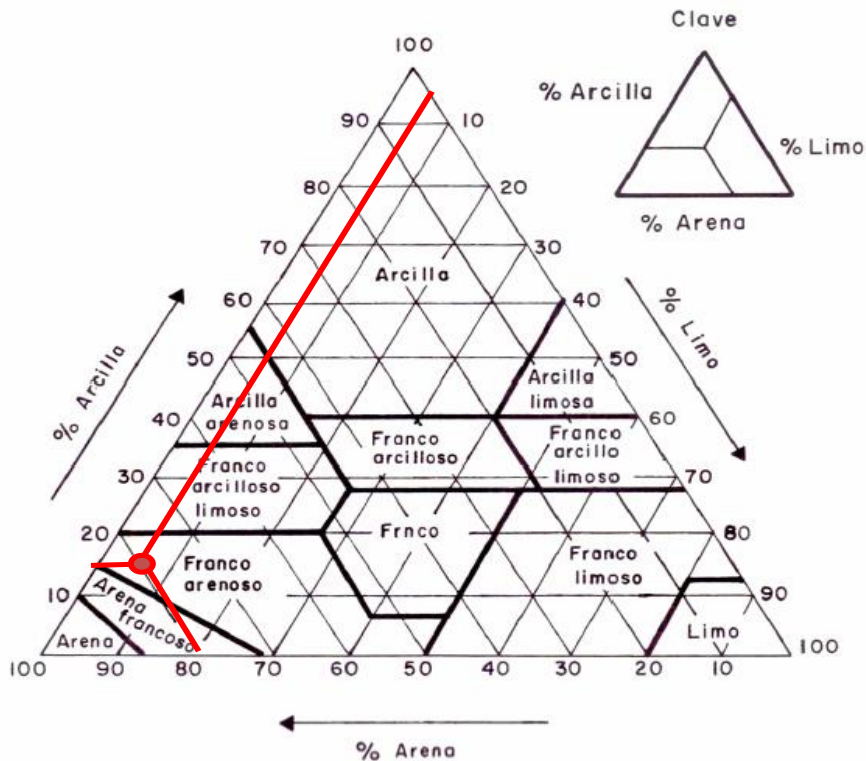
PRUEBA DE LABORATORIO PARA DETERMINAR TEXTURA DE SUELOS

PROYECTO "DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO HBV
EN LA CUENCA DEL RÍO PAZ Y SU USO EN EL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR
INUNDACIONES"

SITIO DE MUESTREO:
Jutiapa - Guatemala

TIEMPO DE LECTURA (t)	LECTURA DEL HIDROMETRO (g/l)	LECTURA DE TEMPERATURA (°C)	EXCEDENTE DE TEMPERATURA (°C)	LECTURA DE BLANCO (g/l)	LECTURA CORREGIDA (g/l)
40"	13.50	26.00	6.00	6.1	10.40
4'	10.50	26.10	6.10	6.1	7.45
1 h	8.50	26.50	6.50	6.1	5.65
2 h	7.50	26.60	6.60	6.1	4.70

CALCULO DE PORCENTAJES			TEXTURA
LIMO + ARCILLA	L + C =	20.80	FRANCO ARENOSO
% ARCILLA	C =	14.90	
% LIMO	L =	5.90	
% ARENA	a =	79.20	



Anexo No. 4. 8: Prueba de Textura de Jutiapa, Guatemala
Fuente: Propia