

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA PARACENTRAL
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS AGRONOMICAS



**Caracterización de zonas potenciales de recarga acuífera en el
Municipio de San Jorge, San Miguel, El Salvador**

Presentado por:

José Darío Chávez Gómez

Jorge Abel Flores Martínez

Edgar José Paiz Saravia

Trabajo de Graduación

Presentado como requisito para obtener el Grado de:

Ingeniero Agrónomo

San Vicente, El Salvador, Centro América, 2017

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

LIC. M. Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

LIC. CRISTÓBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ

FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA PARACENTRAL

DECANA:

LICDA. M. Sc. YOLANDA CLEOTILDE JOVEL PONCE

SECRETARIA:

LICDA. M. Sc. ELIDA CONSUELO FIGUEROA DE FIGUEROA

JEFE DEL DEPARTAMENTO DE CIENCIAS AGRONOMICAS

ING. AGR. M. Sc. RENÉ FRANCISCO VÁSQUEZ

DOCENTES ASESORES

ING. AGR. M. Sc. LOURDES MARÍA HERNÁNDEZ HERRADOR

ING. AGR. M. Sc. EDGAR ANTONIO MARINERO ORANTES

ASESORES ESPECIALISTAS

ING. AGR. IRVIN DAVID CÁCERES CRUZ

ING. AGR. ALIRIO NAPOLEON HERNÁNDEZ LEIVA

**COORDINADOR GENERAL DE PROCESOS DE GRADUACIÓN DE LA CARRERA
DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**

ING. AGR. EDGARD FELIPE RODRÍGUEZ

AGRADECIMIENTOS

A nuestra familia: por ser el apoyo sin condiciones y base moral en nuestra vida y sobre todo por su dedicación y comprensión en todos los momentos de nuestra carrera.

A la Universidad de El Salvador nuestra Alma Mater: por permitir nuestra formación profesional y darnos la obligación moral y social de contribuir al desarrollo de nuestro país.

A los asesores: Ing. Agr. M. Sc. Lourdes Herrador, Ing. Agr. Irvin Cáceres, Ing. Agr. Alirio Hernández, Ing. Agr. Edgar Marinero, por su valioso tiempo y dedicación aportando sus conocimientos a la elaboración de esta investigación.

A nuestros docentes: que con su habilidad tuvieron que compartir sus conocimientos y apoyar en nuestra formación.

A la Cooperación Suiza en América Central (COSUDE): que a través de su Programa Universitario Centroamericano de Reducción de Riesgo y Adaptación al Cambio Climático (PRIDCA), apoyo en la investigación.

Agradecimientos especiales: a todas las personas mujeres y hombres que apoyaron de manera incondicional en las distintas fases de esta investigación, esencialmente a Don Miguel “Miguelón” Granados, Don Fidel Campos, Don Marvin Aparicio, Don Jesús “Chungo” Saravia, Don Diego Ruiz, Miguel “Miguelón” Rivera (ADES), por ofrecernos su tiempo, conocimientos y apoyo en la fase logística de campo.

Este trabajo de Investigación fue hecho con el mayor de los esmeros gracias a todos ustedes.

**José Darío Chávez Gómez
Jorge Abel Flores Martínez
Edgar José Paiz Saravia**

DEDICATORIA

A mi madre: Juana Gómez por infundir en mí el sentido de lo correcto y ser mi particular ejemplo de inquebrantable sacrificio y avance siempre incondicional y darme su apoyo en todo momento, especialmente de mi formación profesional.

A mi padre: Juan José Chávez (QDDG).

A mis hermanos: Carlos, Carolina, Ceci y Ramiro por todo su apoyo.

A Laura: por su amor incondicional e infinita paciencia, por ser mi confianza, compañera y por apoyarme en todo momento.

A los profesores: del Departamento de Ciencias Agronómicas, especiales agradecimientos (más a unos que a otros) por brindarme su amistad, apoyo y consejos en esta noble profesión. Especialmente a la Ing. Lourdes Herrador por su incondicional apoyo en este trabajo.

A mis compañeros: de promoción y, a todas y todos las y los colegas estudiantes.

A todos las y los amigos: que me acompañaron y formaron parte de mi vida universitaria

Por último, pero no menos importante: a Edgar Paiz y Abel Flores por haber aceptado ser compañeros de trabajo de grado, al primero por haberse unido y ser el motorista de esta misión como a su poco aporte y al segundo por no hacernos desmoralizar; a Irvin, Alirio y Manuel “Mamuel” Rodríguez consejeros SIG. A Minchito, Analy, Fabricio, Carlos “porito”, Carlos “Toro”, Luis “Avatar”, Javier “Kaly”, Sebastian “Mask”, Marcela, etc.

José Darío Chávez Gómez

DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso: Por darme la fortaleza, la salud para poder salir adelante con mis estudios y culminar una meta.

A mis Padres: Santos Dinora Martínez, por el apoyo económico y moral y gracias al sacrificio mi objetivo ha sido logrado, y a mi padre, Hugo Antonio Flores (Q.E.P.D.)

A mis Hermanos: Amílcar, óscar, Gerson, Flor y Estefany por su apoyo y comprensión durante mis estudios.

A mis Tíos: Yanira Flores, Rosa Cándida, Teresa Flores, Arcenio Flores y Walter Flores por su apoyo, para poder realizar mis estudios y por sus consejos que rindieron sus frutos.

A mi novia: Karla Vanessa Carbajal; por su comprensión, apoyo y consejos; que me sirvieron mucho para salir adelante con este proyecto.

A mis compañeros de Tesis: Darío Chávez y Edgar Paiz, por su comprensión y la amistad que me brindaron, por sus ganas de hacer un trabajo, que sea de mucho provecho para las personas interesadas.

A mis Docentes: A todos los profesores del Departamento de Ciencias Agronómicas de la Facultad Multidisciplinaria Paracentral (UES), Por haber contribuido en mi formación y en especial al Lic. Neslus Turcios, por sus consejos y motivación a salir adelante.

A mis amigos: A todos los compañeros y compañeras con los que compartimos momentos buenos y malos durante el transcurso de la carrera; y a mis amigos Joaquín Méndez y Pedro Acevedo, y a todos mis demás amigos, que gracias a su amistad y apoyo pude realizar una meta más en mi vida.

Jorge Abel Flores Martínez

DEDICATORIA

A **DIOS**, todopoderoso que desde pequeño ha estado conmigo y en el estudio me brindo la sabiduría y la actitud necesaria para desarrollar con mayor facilidad mi potencial y ser el creador de todo esto, en el pasado, presente y en lo que hare a partir de esto.

A **MI PADRE**: Rodolfo Paiz por ser más que mi padre mi amigo, mi ejemplo laborioso y compañero de tantas aventuras, mi apoyo incondicional cuando extendí la mano con necesidad, y por ser el que me dio la vida, que con su carácter me formo, gracias por eso y por mucho más.

A **MI MADRE**: por ser la persona que me pario y dio la vida, una mujer ejemplo en todo momento con sus detalles de amor y ternura que ninguna mujer en esta vida me dará, el amor más puro y sincero hasta mi muerte, te agradezco mama eres mi apoyo en todo y mi mejor consejera la que más comprendió mis detalles a lo largo de mi carrera, padres esto es un pequeño fruto de lo que ustedes mismos cosecharon, LOS AMO.

A **MIS HERMANOS**: Por todo su apoyo y amistad a lo largo de mi existencia, Roció y Analy las que nunca han dejado de tenderme la mano hasta el sol de hoy no sabré como pagarles todo lo que me han dado, pero de momento se los agradezco infinitamente; Henry desde la distancia siempre me apoyaste y el menor de todos Rudy, espero no ser una inspiración, pero si un ejemplo a seguir de que se cumple lo que uno se propone.

A **MIS SOBRINOS**: Que tanta alegría trajeron a la familia, Jenny, Maury, Kendrick y Alexandra.

A **GABRIELA**: Por su infinito amor, por ser mi confidente, amiga y ahora mi esposa, por apoyarme en todos los retos que faltan por vivir juntos, la que nunca le dio asco el olor a estiércol en mis botas y la ropa sudada que ahora lava, por creer siempre en mí y darme ánimos cuando ya no lo tenía. Por ser la madre de mi hija.

A **ZOÉ**: la sorpresa y el regalo más grande que la vida me dio, es un motivo más por que luchar por el resto de mis días, te amo hija linda.

A **MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS UES**: Quienes me acompañaron y formaron parte de mi vida universitaria, Bea, Laura, Marce, Benja, Inocente, Fabricio y en la tesis Darío y Abel.

Edgar Paiz.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	16
ABSTRACT	17
I. INTRODUCCION	18
II. MARCO TEORICO	19
2.1 Hidrología.....	19
2.2 El ciclo hidrológico	19
2.2.1 Precipitación	20
2.2.2 Evapotranspiración	20
2.2.3 Evapotranspiración potencial.....	20
2.2.4 Evapotranspiración real	21
2.2.5 Escorrentía.....	21
2.2.6 Infiltración	21
2.3 Polígonos de Thiessen	21
2.4 Geología.....	22
2.4.1 Geología regional.....	22
2.4.2 Formación geológica existente en la zona de estudio.....	23
2.5 Hidrogeología	24
2.6 Unidades hidrogeológicas	24
2.7 Aguas subterráneas	25
2.8 Acuíferos	25
2.8.1 Parámetros que definen un acuífero.....	25
2.8.2 Zonas que definen un acuífero.....	26
2.9 Recarga del acuífero	26
2.10 Tipos de recarga del acuífero.....	27
2.11 Métodos de estimación de la recarga del acuífero	27
2.11.1 Método de balance de aguas	27
2.11.2 Método hidroquímico	27
2.11.3 Método participativo	28
2.11.4 Método del balance hídrico de suelos.....	29
2.11.5 Método de la Recarga de Agua Subterránea (RAS).....	29
2.12 Balance hidrológico	29
2.13 Variables biofísicas del balance hídrico	30

2.13.1	Topografía.....	30
2.13.2	Textura del suelo	30
2.13.3	Capacidad de campo	31
2.13.4	Punto de marchitez permanente	31
2.13.5	Disponibilidad de agua en el suelo	31
2.13.6	Cobertura del suelo	31
2.14	Sensores remotos	32
2.14.1	Imágenes Landsat 8.....	32
III.	METODOLOGIA	34
3.1	Descripción del área de estudio.....	34
3.2	Cartografía utilizada	35
3.2.1	Mapa geológico.....	35
3.2.2	Cuadrantes topográficos.....	35
3.2.3	Red hídrica.....	36
3.2.4	Hidrogeología	36
3.2.5	Cobertura y usos del suelo.....	36
3.3	Precipitación.....	37
3.4	Evapotranspiración potencial	38
3.5	Textura del suelo	39
3.6	Tasa de infiltración por miembro geológico	40
3.7	Conductividad hidráulica	41
3.8	Capacidad de campo y punto de marchitez permanente	42
3.9	Determinación de coeficientes.....	42
3.10	Coefficiente de infiltración por textura (K _{fc})	43
3.11	Coefficientes de uso de suelo (K _v)	43
3.12	Coefficiente de Pendiente (K _p).....	43
3.13	Cálculo de la recarga	44
3.14	Mapa de zonas potenciales de recarga acuífera.....	44
IV.	RESULTADOS Y DISCUSION	46
4.1	Evapotranspiración potencial	46
4.2	Textura del suelo	46
4.3	Infiltración básica en miembros geológicos.....	47
4.4	Conductividad hidráulica en miembros geológicos	47

4.5	Cobertura vegetal y uso del suelo.....	48
4.6	Identificación de Áreas de Recarga Hídrica (ARH)	49
4.7	Determinación de parámetros para el balance hídrico de suelos	50
4.7.1	Coeficiente de infiltración por textura (K _{fc}).....	50
4.7.2	Coeficiente de infiltración por cobertura de suelo (K _v)	51
4.7.3	Coeficiente de pendiente (K _p).....	51
4.8	Recarga potencial por infiltración	52
4.8.1	Miembro s ₂	53
4.8.2	Miembro s ₃ 'a	54
4.8.3	Miembro s ₅ 'a	55
4.8.4	Miembro s ₅ 'b.....	55
4.8.5	Miembro s ₅ 'c	56
4.9	Balance hídrico total y climatológico de la zona	57
4.10	Mapa de recarga potencial al acuífero	58
4.11	Categorización de las zonas potenciales de recarga acuífera	59
V.	CONCLUSIONES	61
VI.	RECOMENDACIONES.....	62
VII.	BIBLIOGRAFIA.....	63
VIII.	ANEXOS.....	71

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación esquemática del ciclo hidrológico.....	19
Figura 2. Representación del trazado de polígonos de Thiessen.....	22
Figura 3. Materiales geológicos que forman El Salvador.....	23
Figura 4. Representación del agua subterránea.....	25
Figura 5. Representación esquemática del método participativo.....	28
Figura 6. Representación esquemática del triángulo textural.....	30
Figura 7. Ubicación geográfica del Municipio de San Jorge.....	35
Figura 8. Validación de datos de precipitación.....	38
Figura 9 a y b. Determinación de la textura del suelo.....	40
Figura 10 a y b. Pruebas de infiltración, método del infiltrómetro de doble anillo.....	40
Figura 11 a y b. Medición de la conductividad hidráulica con el permeámetro de Guelph.	41
Figura 12 a y b. Cambios en la cobertura vegetal y usos del suelo.....	49
Figura 13. Zonas consideradas de Recarga hídrica.....	49
Figura 14. Grafica de coeficientes de Infiltración, por miembro.....	51
Figura 15. Distribución de las pendientes en la zona de estudio.....	52
Figura 16. Comportamiento del Recurso hídrico, a nivel anual, para el miembro geológico s2, en unidades de Mm3.....	54
Figura 17. Comportamiento del Recurso hídrico, a nivel anual, para el miembro geológico s3'a, en unidades de Mm3.....	54
Figura 18. Comportamiento del Recurso hídrico, a nivel anual, para el miembro geológico s5'a, en unidades de Mm3.....	55
Figura 19. Comportamiento del Recurso hídrico, a nivel anual, para el miembro geológico s5'b, en unidades de Mm3.....	56
Figura 20. Comportamiento del Recurso hídrico, a nivel anual, para el miembro geológico s5'c, en unidades de Mm3.....	56
Figura 21. Balance hídrico de suelos promedio de la zona de estudio.....	57
Figura 22. Balance hídrico climatológico promedio del Municipio de San Jorge.....	58
Figura 23. Mapa de recarga potencial (mm) de la zona de estudio.....	59

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Cronología de la geología de El Salvador.....	23
Cuadro 2. Miembros de la formación San Salvador.....	24
Cuadro 3. Características de la imagen Landsat 8 en resolución espectral y espacial.....	33
Cuadro 4. Estaciones en la zona de estudio.....	37
Cuadro 5. Precipitación de las estaciones.....	38
Cuadro 6. Ecuaciones de correlación mensual.....	39
Cuadro 7. Valores de Kfs.....	42
Cuadro 8. Punto de marchites permanente y capacidad de campo.....	42
Cuadro 9. Valores de kv.....	43
Cuadro 10: Valores de Kp.....	44
Cuadro 11. Capas utilizadas para generar el mapa de recarga en SIG.....	45
Cuadro 12. Valores de evapotranspiración potencial.....	46
Cuadro 13. Clases texturales de la zona de estudio.....	46
Cuadro 14. Infiltración básica de los miembros en estudio.....	47
Cuadro 15. Conductividad hidráulica Kfs.....	48
Cuadro 16: Tipos de cobertura de suelo.....	48
Cuadro 17. Zonas de recarga acuífera de San Jorge.....	50
Cuadro 18: Coeficientes de infiltración con base a la textura del suelo.....	50
Cuadro 19: Coeficientes asignados por cobertura de suelo.....	51
Cuadro 20. Coeficientes por efectos de la pendiente.....	51
Cuadro 21. Recarga potencial al acuífero en cada miembro geológico.....	53
Cuadro 22. Categorización de las zonas de recarga potencial.....	60

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Mapa geológico de la zona de estudio.....	72
Anexo 2. Mapa de cuadrantes topográficos.....	73
Anexo 3. Mapa de red hídrica.....	74
Anexo 4. Mapa de subcuenca El Tránsito.....	75
Anexo 5. Mapa de hidrogeología de la zona de estudio.....	76
Anexo 6. Mapa de polígonos de Thiessen.....	77
Anexo 7. Precipitación ponderada por miembro geológico.....	78
Anexo 8. Evapotranspiración potencial ponderada por miembro geológico.....	78
Anexo 9. Guía método de Bouyoucos.....	79
Anexo 10. Hoja de cálculo para tratamiento de la información de textura de suelo.....	86
Anexo 11. Método de cilindros infiltrómetro.....	87
Anexo 12. Hoja de cálculo para determinar la Infiltración básica (Fc), miembro s2 de la formación San Salvador.....	89
Anexo 13. Hoja de cálculo para determinar la Infiltración básica (Fc), miembro s3'a de la formación San Salvador.....	91
Anexo 14. Hoja de cálculo para determinar la Infiltración básica (Fc), miembro s5'a de la formación San Salvador.....	94
Anexo 15. Hoja de cálculo para determinar la Infiltración básica (Fc), miembro s5'b de la formación San Salvador.....	96
Anexo 16. Hoja de cálculo para determinar la Infiltración básica (Fc), miembro s5'c de la formación San Salvador.....	98
Anexo 17. Guía de conductividad hidráulica.....	99
Anexo 18. Hoja de cálculo para determinar conductividad hidráulica (Kfs) del miembro s2 de la formación San Salvador.....	107
Anexo 19. Hoja de cálculo para determinar conductividad hidráulica (Kfs) del miembro s3'a de formación San Salvador.....	108
Anexo 20. Hoja de cálculo para determinar conductividad hidráulica (Kfs) del miembro s5'a de la formación San Salvador.....	109
Anexo 21. Hoja de cálculo para determinar conductividad hidráulica (Kfs) del miembro s5'b de la formación San Salvador.....	110
Anexo 22. Hoja de cálculo para determinar conductividad hidráulica (Kfs) del miembro s5'c de la formación San Salvador.....	111
Anexo 23. Mapa de pedología según clasificación USDA.....	112
Anexo 24. Mapa de coberturas y uso del suelo de la zona de estudio.....	113
Anexo 25. Mapa de pendientes en porcentaje de la zona de estudio.....	114
Anexo 26. Balance hídrico del miembro s2.....	115

Anexo 27. Balance hídrico del miembro s3'a.....	116
Anexo 28. Balance hídrico del miembro s5'a.....	117
Anexo 29. Balance hídrico del miembro s5'b.....	118
Anexo 30. Balance hídrico del miembro s5'c.....	119
Anexo 31. Mapa de la recarga potencial (Balance hídrico de suelos).....	120
Anexo 32. Mapa de la recarga de agua subterránea (Junker 2005).....	121
Anexo 33: Mapa de categorías de la recarga acuífera potencial.....	122

RESUMEN

El presente estudio se realizó en el Municipio de San Jorge, Departamento de San Miguel, con un área de 37.55 km², en el periodo comprendido de marzo a octubre de 2015. El objetivo principal fue caracterizar las principales zonas potenciales de recarga al acuífero, como también cuantificar su recarga, utilizando la metodología del balance hídrico de suelos propuesto por Schosinsky (2006), aplicado a la unidad de análisis que la constituye cada miembro geológico presente en la zona de estudio. Los datos generados corresponden a los coeficientes de las variables: infiltración básica por textura de suelo (K_{fc}), pendiente (K_p) y tipo de cobertura vegetal (K_v).

Se realizaron pruebas de infiltración utilizando el método del doble anillo para caracterizar la infiltración básica en cada miembro geológico, además se recolectaron muestras de suelo para análisis físico de textura, densidad, punto de marchitez y capacidad de campo, desarrolladas en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador.

El comportamiento de la recarga potencial, según los resultados del balance hídrico de suelos, demostró mayor recarga al acuífero para el miembro geológico s5'b de 454.40 mm y menor capacidad para el miembro geológico s3'a de 322.68 mm anuales.

Con el uso de cartografía digital, procesada en un Sistema de Información Geográfica (SIG), ArcMap 10.1 de ESRI, se compusieron mapas que representan la pendiente, áreas consideradas de recarga hídrica (miembros geológicos), uso del suelo y precipitación. Estas capas se superpusieron con el fin de obtener el mapa de la recarga potencial, a su vez se categorizó en tres clases que son: Baja (≤ 200 mm), Media (200 – 400 mm) y Alta (≥ 400 mm), obteniendo así un mapa de categorías con base a su potencial para recargar al acuífero.

En el Municipio de San Jorge se estimó una recarga equivalente a 44.26 Mm³, la que ocurre de manera directa por precipitación. Este resultado puede variar en el espacio y tiempo, ya que las características físicas, uso del suelo y la escorrentía pueden provocar una disminución en la recarga. En el contexto de cuencas, la zona de estudio se encuentra dentro de la subcuenca de la quebrada El Tránsito, que desemboca en el río grande de San Miguel.

Palabras clave: acuífero, balance hídrico, miembro geológico, Municipio de San Jorge, recarga acuífera.

ABSTRACT

The present study was conducted in the Municipality of San Jorge, Department of San Miguel, with an area of 37.55 km², in the period from March to October 2015. The main objective was to characterize the main potential zones of recharge to the aquifer, such as also to quantify recharge, using the soil water balance methodology proposed by Schosinsky (2006), applied to the unit of analysis that constitutes each geological member present in the study area. The data generated correspond to the coefficients of the variables: basic infiltration by soil texture (K_{fc}), slope (K_p) and type of vegetation cover (K_v).

Infiltration tests were performed using the double ring method to characterize the basic infiltration in each geological member. Also, soil samples were collected for physical analysis of texture, density, wilting point and field capacity, developed in the soil laboratory of The Faculty of Agronomic Sciences of the University of El Salvador.

The behavior of the potential recharge, according to the results of the water balance of soils, showed greater recharge to the aquifer for the geological member s⁵b of 454.40 mm and less capacity for the geological member s³a of 322.68 mm annually.

With the use of digital cartography, processed in an ESRI ArcMap 10.1 Geographic Information System (GIS), maps representing slope, areas of water recharge (geological members), land use and precipitation were compiled. These layers were overlay in order to obtain the map of the potential recharge, in turn was categorized into three classes which are: Low (≤ 200 mm), Medium (200 - 400 mm) and High (≥ 400 mm), obtaining Thus a category map based on its potential to recharge the aquifer.

In the Municipality of San Jorge, a recharge equivalent to 44.26 Mm³ was estimated, that occurs directly by precipitation. This result can vary in space and time, as the physical characteristics, land use and runoff can cause a decrease in recharge. In the context of basins, the study area is located within the sub-basin of the El Tránsito stream, which flows into the large river of San Miguel.

Keywords: aquifer, water balance, geological member, Municipality of San Jorge, aquifer recharge.

I. INTRODUCCION

La creciente demanda del recurso hídrico en El Salvador genera una importante presión en este y en todos sus usos, este factor se acentúa debido a la forma ineficiente en que se aprovecha, estas ineficiencias suceden principalmente en el uso agrícola y doméstico (MARN 2014). Como resultado de ello, aumenta la demanda de agua, a la vez que disminuye la disponibilidad local del recurso, por el impacto mismo de la urbanización que a su vez impulsa el proceso de deforestación, reducción de áreas de recarga (zonas urbanas construidas sobre importantes áreas de acuíferos) y contaminación (FUSADES 2007).

La recarga es una importante componente del ciclo hidrológico, pues de esa depende el volumen de recursos hídricos subterráneos renovables. Según Schosinsky (2006) este potencial se estima mediante la recarga al acuífero el cual se determina conociendo en primer lugar, la fracción de lluvia que es interceptada por el follaje; en segundo lugar, se requiere conocer la infiltración del agua de lluvia hacia el suelo; en tercer lugar, se debe realizar un balance de suelos, el cual nos permitirá estimar el agua que drena del suelo hacia el acuífero.

La presente investigación sobre Caracterización de zonas potenciales de recarga acuífera en el municipio de San Jorge, San Miguel, pretende contribuir al conocimiento técnico-científico, como una herramienta de planificación para el ordenamiento del territorio y la gestión integrada del recurso hídrico; ya que en la actualidad la información disponible en la zona en cuanto a este tema es escasa y de poco detalle.

Se describen las características biofísicas de las zonas con potencial de recarga acuífera como: topografía, precipitación, evapotranspiración, usos y cobertura del suelo. Se detalla de manera breve la metodología para la obtención del mapa de la recarga acuífera, de manera que se enriquece el conocimiento sobre el recurso hídrico que infiltra hacia el acuífero de manera espacial.

Se realiza un análisis de las condiciones para infiltrar al acuífero por cada miembro geológico en estudio, a través del balance hídrico de suelos propuesto por Schosinsky, para conocer el volumen de recarga anual al acuífero de la zona.

II. MARCO TEORICO

2.1 Hidrología

Hidrología es la ciencia que trata de las aguas sobre la tierra, su ocurrencia, circulación y distribución, sus propiedades químicas y físicas y su reacción con el medio ambiente, incluyendo su relación con los seres vivos (Villón 2002). En una forma más estricta, puede definirse como el estudio del ciclo hidrológico, es decir, la circulación ininterrumpida del agua entre la Tierra y la atmósfera (Chow *et al.* 1994). A la vez, estudia variaciones espaciales y temporales del agua en las etapas terrestre, oceánica y atmosférica del sistema hídrico global y el movimiento del agua debajo de la superficie terrestre (Breña y Jacobo 2006).

2.2 El ciclo hidrológico

Se define como la secuencia de fenómenos por medio de los cuales el agua pasa de la superficie terrestre, en la fase de vapor, a la atmosfera y regresa en sus fases líquida y sólida (figura 1) (Fattorelli y Fernández 2011). Desde el punto de vista de aprovechamiento de los recursos hídricos, representa una continua renovación, una presencia permanente de la disponibilidad de agua en la tierra, así de su importancia y escasez surge la necesidad de planificar su uso (Valverde 1998). Para Bateman (2007), lo más importante es tener en cuenta la interrelación del hombre con la naturaleza y su influencia en el ciclo hidrológico.

En ese sentido, es necesario tener conocimiento, que determine el estado actual del recurso hídrico, así como la presión por la demanda del mismo, teniendo en cuenta su distribución espacio-temporal, que permita establecer lineamientos a seguir para su protección, y que sirva de base a los usuarios del recurso y planificadores, para considerar su uso y disponibilidad en proyectos actuales y futuros (Ordoñez 2011a). De los muchos procesos supuestos en el ciclo hidrológico, los más importantes son: Precipitación, evaporación, transpiración y escurrimiento superficial (SNM 2008).



Figura 1. Representación esquemática del ciclo hidrológico (fuente: Martínez *et al.* 2005)

2.2.1 Precipitación

La lluvia, la llovizna, la nieve y el granizo se designan en conjunto con el nombre de *precipitación*, y se producen cuando grandes masas de aire experimentan un descenso uniforme de la temperatura por debajo del punto de rocío, en cuyo caso se genera una rápida condensación del vapor de agua en el interior de las nubes (Heuveloop *et al.* 1986). Desde el punto de vista de la hidrología, la precipitación es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre, y sus mediciones y análisis, forman el punto de partida de los estudios concernientes al uso y control del agua (Villón 2002).

2.2.2 Evapotranspiración

Es la suma total de agua que se evapora por el suelo y por la transpiración de los vegetales que están sobre el (Ledesma 2000). Sin embargo, la evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos (FAO 2006).

Para Martínez *et al.* (2005) este es un parámetro difícil de estimar con precisión pues depende de factores ligados a la meteorología (precipitación, radiación solar, y humedad del aire), de factores ligados a la vegetación (densidad, tipo y grado de desarrollo) y de factores ligados al suelo (textura y estructura), que condicionan su capacidad de almacenamiento.

2.2.3 Evapotranspiración potencial

Según Heuveloop *et al.* (1986) este término ha sido ampliamente discutido y luego de varias modificaciones, también es conocido como evapotranspiración de referencia y se concibe como la evapotranspiración de una superficie cubierta de hierba verde de 8 a 15 cm de altura, en fase activa de crecimiento que cubre completamente el suelo, en el que, en todo momento, existe la humedad suficiente para su uso máximo por estas plantas. Para SNET (2005) su determinación se realiza a partir de datos climáticos, empleando diferentes fórmulas empíricas, cuya elección para el cálculo depende del tipo de datos climáticos disponibles en la zona y las más utilizadas en diferentes regiones son las de Penman, Penman-Montheith, Hargraves, Blaney-Criddle, calibradas localmente en algunos sitios. Goyal y Ramírez (s.f.) recomienda emplear la que mayor número de elementos climáticos incluya para su cálculo, pero existen zonas donde no se cuenta con dicha información, entonces se trabaja con la que se ajuste a las condiciones, o la cantidad de información disponible.

2.2.4 Evapotranspiración real

Heuvel dop *et al.* (1986) la define como la evapotranspiración de un cultivo u otra vegetación bajo las condiciones ambientales existentes. Por este motivo, por ejemplo, la demanda de riego se ha de basar en la evapotranspiración real (Etr), la cual toma en consideración el agua disponible en el suelo y las condiciones ambientales en las que se desarrolla un determinado cultivo (Cahuana y Yugar 2009).

2.2.5 Escorrentía

Es la fracción del agua recibida por un ecosistema que no se evapora directamente y que por diversas razones no logra penetrar el suelo, escurre en el sentido de la pendiente. En los casos en los cuales el agua penetra en las capas inferiores de la superficie del suelo, puede producirse escorrentía subsuperficial si el agua se encuentra con una capa impermeable (Heuvel dop *et al.* 1986).

2.2.6 Infiltración

Es el movimiento del agua desde la superficie hacia el interior del suelo por efecto de la gravedad, se acumula en los poros del suelo y así puede ser utilizada por las plantas, o puede desplazarse a capas más profundas del suelo, donde alimenta a los mantos acuíferos (Matus *et al.* 2009). La capacidad de infiltración de un suelo puede ser influenciada por la condición y las características físicas del suelo. Además, está la vegetación, las características de la lluvia, la topografía del terreno, la estratificación, la temperatura del agua, suelo y el estado fisicoquímico del mismo (Noriega, 2005).

2.3 Polígonos de Thiessen

Villón (2002) menciona que, para desarrollar este método es necesario conocer la localización de las estaciones en la zona bajo estudio, ya que, para su aplicación se requiere delimitar la zona de influencia de cada estación, dentro del conjunto de estaciones (figura 2). Según Chow *et al.* (1994) este procedimiento establece que, en cualquier punto de la cuenca, la lluvia es igual a la que se registra en el pluviómetro más cercano; luego la profundidad registrada en un pluviómetro dado se aplica hasta la mitad de la distancia a la siguiente estación pluviométrica en cualquier dirección.

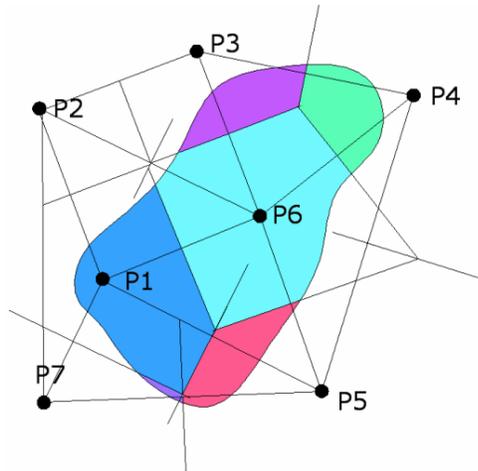


Figura 2. Representación del trazado de polígonos de Thiessen (fuente: Bateman 2007)

2.4 Geología

Según MARN (2007) El Salvador es un país extremadamente joven en cuanto a su geología; una cuarta parte del territorio nacional es de edad pleistocénica y tres cuartas partes están cubiertas por rocas de edad terciaria, predominando la época pliocénica. MARN (2016) menciona que los materiales que constituyen las diferentes formaciones y grupos consisten básicamente en una secuencia de unidades, casi exclusivamente terciaria y cuaternaria continental con origen volcánico y con intercalaciones de sedimentos fluviales, lacustres y aluviales; también se encuentran sedimentos aluviales con distribución sensiblemente superior a lo largo de los ríos más importantes, grandes depresiones y llanuras litorales.

2.4.1 Geología regional

Geológicamente, en el área solo afloran materiales volcánicos finos a gruesos, denominados piroclastos y lavas jóvenes originarios en su mayoría del Volcán de San Miguel, la edad de los piroclastos y lavas corresponden a la base del Holoceno o Cuaternario Medio y en el área conforman la formación geológica denominada San Salvador, donde las lavas son más recientes o contemporáneas a la edad geológica, los piroclastos consisten de potentes mantos no compactados de lapilli, cenizas volcánicas de diferente granulometría, polvo y tobas ligeramente compactadas color café, en resumen esta formación, aflora y ocupa toda el área de estudio (Núñez 1995).

Los materiales geológicos que forman el país (figura 3) han estado descritos por varios autores. La secuencia litológica del mesozoico, el terciario y las unidades cuaternarias más recientes han sido clasificadas por DÜRR (1960), Weisemann (1975), Weisemann *et al.* (1978) y Weber

(1979). A continuación (cuadro 1), se muestran las diferentes unidades litológicas (Baxter citado por SNET 2002).

Cuadro 1. Cronología de la geología de El Salvador

CRONOLOGÍA	WIESEMANN
Unidades sedimentarias terciarias – cuaternarias	Formación San Salvador
	Formación Cuscatlán
	Formación Bálsamo
	Formación Chalatenango
	Formación Morazán
Unidades sedimentarias mesozoicas – terciarias	Grupo Valle de Ángeles
	Grupo Yojoa
	Formación todos Santos-Formación Metapán

Fuente: Baxter citado por SNET (2002)

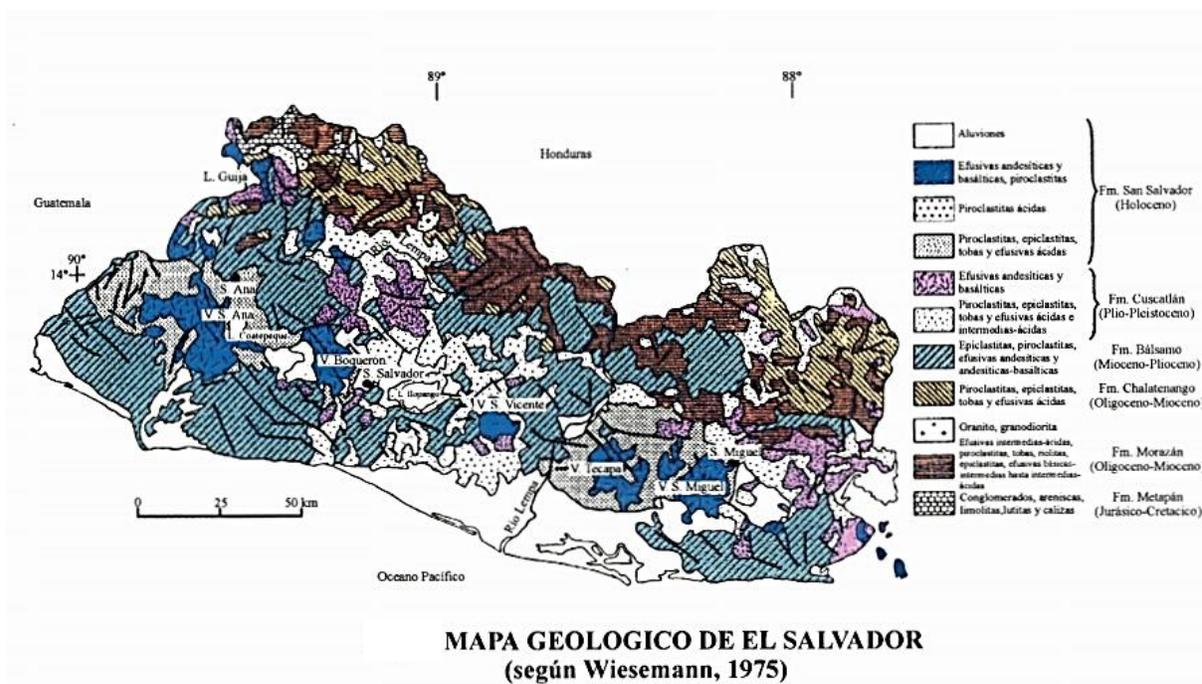


Figura 3. Materiales geológicos que forman El Salvador (fuente: Wiesemann citado por Losilla *et al.* 1998)

2.4.2 Formación geológica existente en la zona de estudio

La Formación San Salvador de edad comprendida entre el pleistoceno superior y Holoceno, está constituida por productos extrusivos volcánicos: corrientes de lava, tobas, pómez, escoria y cenizas volcánicas, a veces intercaladas con sedimentos lacustres (SNET 2002).

De acuerdo con el mapa geológico de El Salvador escala 1:100000, hecho por la Misión Geológica Alemana en El Salvador (Weber 1978) y en el Léxico estratigráfico de El Salvador

(Baxter 1984), en el área de estudio afloran los siguientes miembros geológicos: s2, s3'a, s5'a, s5'c y se resumen en el cuadro siguiente.

Cuadro 2. Miembros de la formación San Salvador

Formación	Miembro	Litología
Formación San Salvador	s2	Rocas volcánicas básicas-intermedias, piroclastitas subordinadas
	s3'a	Piroclastitas acidas y epiclastitas volcánicas (tobas color café)
	s5'a	Rocas efusivas básicas intermedias
	s5'b	Acumulación de escorias, tobas de lapilli y cinder
	s5'c	Cenizas y tobas de lapilli

Fuente: Baxter (1984)

2.5 Hidrogeología

Davis y de Wiest citado por Pulido (2014) definen a la Hidrogeología de manera breve y acertada, como el estudio de las aguas subterráneas, cuyo énfasis especial recae sobre su aspecto químico, circulación y circunstancias geológicas. Para Custodio *et al.* (2013) además, tiene en cuenta los aspectos económicos, de gestión, sociales y éticos de la explotación de las aguas subterráneas, su conservación y su papel ecológico.

Para Chow *et al.* (1994) el análisis de información hidrogeológica consiste en describir el movimiento de las aguas subterráneas dentro de las diferentes unidades hidrogeológicas de la zona de estudio, siendo necesario estudiar la presencia de manantiales, su caudal con asociación a las fallas geológicas presentes.

Hoy en día, el estudio del agua subterránea y su movimiento se ha vuelto cada vez más importante a medida que la demanda de agua potable de usuarios agrícolas, industriales y domésticos ha llegado al punto más alto de todos los tiempos (Wicander y Monroe 1999).

2.6 Unidades hidrogeológicas

Se entiende como unidad hidrogeológica, a la conjunción de los distintos materiales de miembros geológicos con similares propiedades o características hidráulicas que conllevan a la unificación en un mismo agrupamiento, se determinan por el tipo de material geológico, manantiales presentes y el fallamiento (Wicander y Monroe 1999).

Esta agrupación de formaciones es relativamente subjetiva, depende de la escala y de los objetivos del trabajo y puede subdividirse en unidades menores (Ordoñez 2011b).

2.7 Aguas subterráneas

Según Collazo y Montaña (2012), es la que se aloja y circula en el subsuelo, conformando los acuíferos. Ordoñez (2011b), menciona que la fuente de aporte principal es el agua de lluvia, mediante el proceso de infiltración, otras fuentes de alimentación localizada pueden ser los ríos, arroyos, lagos y lagunas. Collazo y Montaña (2012) señala que esta se sitúa por debajo del nivel freático y está saturando completamente los poros y/o fisuras del terreno y fluye a la superficie de forma natural a través de vertientes o manantiales o cauces fluviales (figura 4). Ordoñez (2011b), indica que su movimiento en los acuíferos es desde zonas de recarga a zonas de descarga, con tiempos de residencia largos resultando grandes volúmenes de almacenamiento, aspectos característicos del agua subterránea.

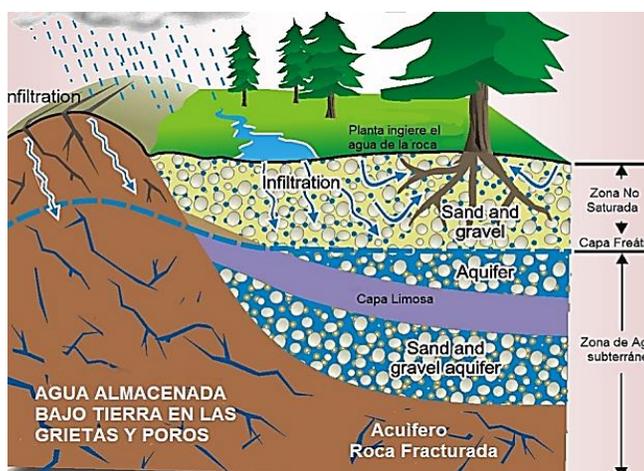


Figura 4. Representación del agua subterránea (fuente: Ordoñez 2011b)

2.8 Acuíferos

Se denomina acuífero a aquel estrato o formación geológica que, permitiendo la circulación del agua por sus poros y grietas, hace que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciables para subvenir a sus necesidades (Noriega 2005).

Un acuífero debe ser capaz de almacenar y transmitir agua en cantidad susceptible de ser explotada económicamente; la capacidad de almacenamiento de este viene determinada por su volumen (definido por su extensión y espesor) y por su porosidad y fisuración (Fuentes s.f.).

2.8.1 Parámetros que definen un acuífero

La capacidad de almacenar y transmitir el agua por parte de un acuífero debe ser cuantificada para evaluar las formaciones desde el punto de vista hidrológico; por ello se asocian a las formaciones cuatro parámetros básicos: porosidad y coeficiente de almacenamiento, permeabilidad y transmisividad (González *et al.* 2002).

Porosidad: Determina la capacidad de almacenar agua de un acuífero, se define como el cociente entre el volumen de huecos y el volumen total de la roca (Ordoñez 2011b).

Coefficiente de almacenamiento: se define como el volumen de agua que es capaz de liberar un prisma de base unitaria y de altura la del acuífero cuando desciende 1 m el nivel piezométrico, por lo que es un parámetro físico referido a volumen cedido por unidad de volumen y es adimensional (González *et al.* 2002).

Permeabilidad: También denominada como conductividad hidráulica, es la facilidad que un cuerpo ofrece para ser atravesado por un fluido en este caso el agua y esto depende del tamaño de los poros (Ordoñez 2011b).

2.8.2 Zonas que definen un acuífero

Si admitimos que los acuíferos reciben agua de la precipitación (aunque puede recibirla por otras vías), se pueden definir tres zonas: zona de alimentación o recarga, zona de circulación y zona de descarga. La zona de alimentación es aquella donde el agua de precipitación se infiltra. La zona de descarga es la zona donde el agua sale del acuífero, como puede ser un manantial o la descarga al mar o a un río. La zona de circulación es la parte comprendida entre la zona de alimentación y la zona de descarga (Morell 2008).

2.9 Recarga del acuífero

Es el proceso a través del cual un acuífero recupera su nivel de agua normal, debido a la percolación del agua precipitada que llega a la zona saturada del acuífero, esta es muy variable y es la que geológicamente ha originado la existencia de los acuíferos.

Según Guzmán y Díaz (2007) al hablar de un acuífero nos estamos refiriendo a una o más capas subterráneas de roca o de otros elementos geológicos saturados que tienen la suficiente porosidad y permeabilidad capaz de almacenar y transmitir agua subterránea y que puede ser aprovechada para uso humano.

Noriega (2005). Menciona que, la cantidad de recarga de un acuífero depende en cierto modo de la extensión del área de entrada o de captación, de echo los acuíferos más productivos son los lechos permeables situados en áreas extensas.

2.10 Tipos de recarga del acuífero

Según Lerner citado por Vélez y Vásquez (s.f.), propone una clasificación similar pero un poco más completa sobre las fuentes de recarga:

1. Recarga directa o recarga difusa, proveniente del agua lluvia.
2. Recarga concentrada o indirecta, producto de cauces permanentes, estacionales y efímeros.
3. Flujos laterales, procedentes de otros acuíferos.
4. Retorno de riegos, excesos de riegos o las pérdidas en los canales de distribución.
5. Recarga Urbana, producto de fugas de redes de abastecimiento y redes de alcantarillado.

2.11 Métodos de estimación de la recarga del acuífero

2.11.1 Método de balance de aguas

Para hacer el balance hídrico se aplica el principio de la conservación de masa a una cierta región de volumen conocido (volumen de control), definida por unas condiciones de frontera, durante un período de tiempo. La diferencia en las entradas y las salidas debe ser igual al cambio en el almacenamiento de agua. La mayor parte de los métodos de balance de agua determinan la recarga a partir de los demás componentes, este tipo de balances se puede hacer en la zona superficial, en la no saturada y en la saturada (Samper 1997).

2.11.2 Método hidroquímico

La recarga por la lluvia a los acuíferos por el balance del ion cloruro, es uno de los métodos de cálculo que se puede emplear en la determinación de la misma, este investiga el aporte atmosférico para llegar a la estimación y la discusión de su valor (Faustino *citado por* Rodríguez y Pérez 2014).

Según Alcalá (2005) en régimen estacionario, el agua subterránea freática recibe un flujo másico de Cl⁻, igual al aporte por la lluvia, después de restar el flujo que escapa por escorrentía directa y aunque esta metodología aporta un valor de la tasa de recarga por la lluvia esperable en un lugar, no calcula el volumen almacenado, ya que este concepto depende del tiempo medio de residencia del agua subterránea.

Las aguas superficiales y las subterráneas que yacen a poca profundidad se encuentran en equilibrio dinámico con la atmósfera, la posibilidad de determinar la recarga por estos métodos, se calcula por la correspondencia entre el tiempo de vida y los parámetros físico-químicos de las aguas (Rodríguez y Pérez 2014).

2.11.3 Método participativo

Este método elabora una propuesta metodológica práctica y de aplicación simple por parte de actores locales, para identificar zonas con potencial de recarga hídrica, e intenta conjugar el conocimiento técnico y científico con el conocimiento y experiencia local de las comunidades en subcuencas hidrográficas, mediante talleres participativos con los pobladores de las comunidades y especialistas que trabajan en la zona (figura 5) (Rodríguez y Pérez 2014).

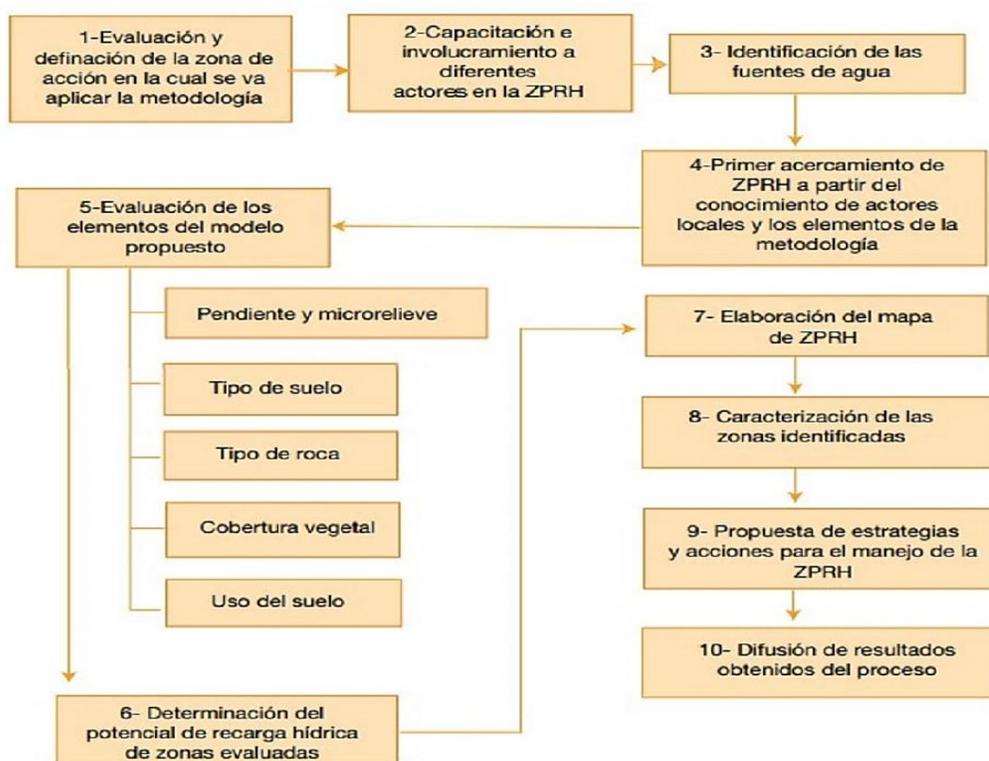


Figura 5. Representación esquemática del método participativo (fuente: Matus *et al.* 2009)

En este el potencial de la recarga hídrica se estima empleando la ecuación siguiente; en ella se sustituyen cada uno de los elementos del modelo por los valores respectivos obtenidos en campo (Matus *et al.* 2009):

$$ZR=[0.27(\text{pend})+0.23(\text{Ts})+0.12(\text{Tr})+0.25(\text{Cve})+0.13(\text{Us})]$$

Donde:

Pend: Pendiente y microrelieve

Ts: Tipo de suelo

Tr: Tipo de roca

Cve: Cobertura vegetal permanente

Us: Usos del suelo

2.11.4 Método del balance hídrico de suelos

Se basa en el principio de la conservación de la materia; es decir, el agua que entra a un suelo, es igual al agua que se almacena en el suelo, más el agua que sale de él; las entradas son debidas a la infiltración del agua hacia el suelo, y las salidas se deben a la evapotranspiración de las plantas, más la descarga de los acuíferos (Schosinsky 2006).

Para evaluar la infiltración de lluvia que penetra al suelo en una zona, se determinan: la precipitación mensual de la zona, los diferentes valores de infiltración básica de los suelos, la cobertura vegetal del suelo y su pendiente; a partir de estos valores se evalúa la infiltración mediante la ecuación propuesta por Schosinsky y Losilla (2000). Conocida la infiltración, se puede realizar un balance hídrico de suelos para estimar el agua que queda libre para recargar el acuífero que se encuentra debajo del suelo analizado; para poder realizar el balance, se determinan: la infiltración de lluvia que penetra al suelo, la cobertura vegetal, la profundidad de las raíces extractoras del agua, la capacidad de campo, el punto de marchitez del suelo, la evapotranspiración potencial y la humedad del suelo al inicio del análisis (Schosinsky 2006).

2.11.5 Método de la Recarga de Agua Subterránea (RAS)

Es un método científico, teórico para elaborar el mapa de la recarga de agua subterránea, que puede servir como una herramienta para apoyar a tomar decisiones en la protección y el manejo sostenible del recurso hídrico, como también en el ordenamiento territorial (Junker 2005). Esta es una metodología que no necesita muchos datos detallados y para determinar el coeficiente de infiltración básica (C), usa una modificación del modelo analítico propuesto por Schosinsky y Losilla (2000), para los diferentes coeficientes, modificados y adaptados para El Salvador.

2.12 Balance hidrológico

Un balance hídrico es la cuantificación tanto de los parámetros involucrados en el ciclo hidrológico, como de los consumos de agua de los diferentes sectores de usuarios, en un área determinada, cuenca, y la interrelación entre ellos, dando como resultado un diagnóstico de las condiciones reales del recurso hídrico en cuanto a su oferta, disponibilidad y demanda en dicha área (SNET 2005). De tal forma que bajo el punto de vista agrícola e hidrológico el balance hídrico representa la evaporación y la evapotranspiración potencial ETP y la precipitación de un lugar ya sea mensual, estacional o anual (Ledesma 2000).

2.13 Variables biofísicas del balance hídrico

2.13.1 Topografía

Múltiples autores coinciden en que la topografía constituye uno de los factores que controla la humedad del suelo y quizá es el elemento que ha sido más estudiado, dando lugar a la generación de índices topográficos e hidrológicos para predecir la humedad del suelo en función del relieve, además destacan la distinta influencia de los atributos topográficos en función del ambiente, principalmente, bajo estados secos o húmedos; estas razones hacen que los modelos digitales de elevación (MDE) constituyan una fuente de datos con alto potencial para caracterizar el relieve en forma cuantitativa, siendo un insumo importante para relacionarlo con factores edáficos y climáticos (Gutiérrez 2012).

2.13.2 Textura del suelo

La textura del suelo determina la proporción en tres tamaños (figura 6) de partículas del suelo (arena (grande), limo (medio) y arcilla (pequeño)) las partículas del suelo, a su vez, afecta tanto a los rasgos del suelo como a la capacidad de retención de agua y a la aireación (Plaster 2000). Por lo tanto, es una de las características físicas más importantes, pues a través de ella, se puede predecir el comportamiento físico del suelo, haciendo inferencias acerca del movimiento del agua en el perfil, la facilidad de manejo y la cantidad de nutrientes (Flores y Alcalá 2010).

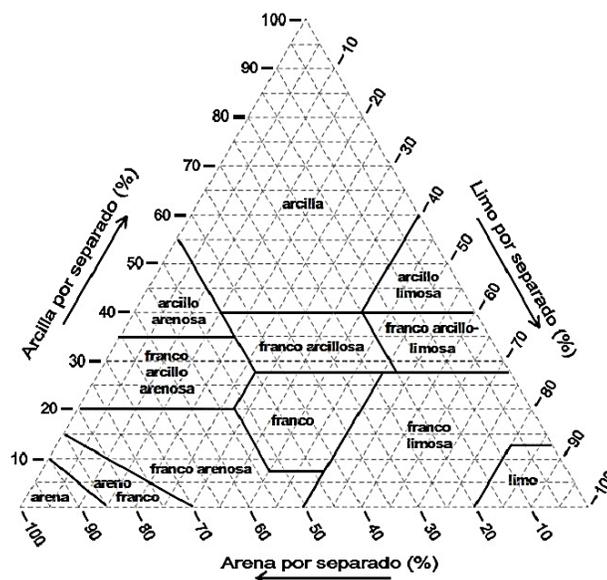


Figura 6. Representación esquemática del triángulo textural (fuente: Plaster 2000)

2.13.3 Capacidad de campo

Se refiere al contenido de humedad presente en un suelo en contra de las fuerzas de gravedad, dos o cuatro días después de una lluvia fuerte o un riego abundante y de que ha drenado el agua gravitacional; depende de la textura, contenido de materia orgánica y compactación del suelo (Valverde 1998). En el cálculo de la infiltración eficaz, definida como la lámina de agua que alcanza la zona saturada, la capacidad de campo juega un papel muy importante ya que solo después de que el suelo alcance una humedad igual a esta capacidad se produce una recarga hacia la capa saturada (Vélez 1999).

2.13.4 Punto de marchitez permanente

Es el contenido de humedad retenido por las partículas de suelo que las plantas no pueden utilizar para satisfacer sus necesidades y recuperar la turgencia, lo que provoca una marchitez irreversible, pues no pueden recuperarse, aunque se sometan a un ambiente húmedo (Valverde 1998). Según Vélez (1999) la poca agua que la planta adquiere se debe a altas tensiones de succión por las raíces lo cual incide en bajos rendimientos de producción de follaje.

2.13.5 Disponibilidad de agua en el suelo

El suelo está formado por partículas que, a su vez, pueden formar agregados. Entre estas partículas y los agregados se encuentran espacios que tienen agua y aire. Específicamente, el tamaño de las partículas y agregados influye de modo notable en el movimiento y las características del agua en el suelo, por consiguiente, en el efecto que produce en la planta dado que tanto el agua como el aire son elementos esenciales para su desarrollo (Trillas 2006).

2.13.6 Cobertura del suelo

Según el INAB (2011) esta disminuye la escorrentía superficial, permitiendo mayor contacto del agua con la superficie y facilitando el proceso de infiltración, por otro lado, gran parte de la lluvia que cae es depositada en la cobertura vegetal como intersección; en este factor es necesario considerar la profundidad radicular y la capacidad de retención vegetal. Para Nina (2015) los estudios sobre cambio y cobertura de uso de suelo, actualmente son el centro de atención de la investigación ambiental.

2.14 Sensores remotos

De todas las fuentes de información usadas en el SIG (Sistemas de Información Geográfica), una de las más importantes es sin duda la de los sensores remotos, también llamada percepción remota o teledetección (Eastman 2012). Esta técnica nos permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre (Chuvieco 2008). Obteniéndose a través del uso de satélites, ahora tenemos un programa continuo de adquisición de datos para el mundo entero; también tenemos acceso a imágenes de sensores remotos en formato digital, lo que permite una integración rápida de los resultados de análisis de sensores remotos al SIG (Eastman 2012). Los productos disponibles en la actualidad pueden detectar diversos parámetros: temperatura, lluvia, elevación, uso de la tierra, calidad del agua, parámetros biológicos entre otros (Medina 2009).

UPRA (2014) señala que actualmente existen una gran variedad de satélites capaces de extraer de la superficie de la tierra información idónea que, bajo una adecuada interpretación y manipulación, se ajustan a los requerimientos de la clasificación del uso actual y la cobertura de las tierras; al mismo tiempo menciona que los sensores con mayor potencial para ejercer este trabajo son aquellos instalados en las plataformas satelitales como la serie Landsat, el sistema SPOT, y más recientemente los sensores MODIS, ASTER o RapidEye.

2.14.1 Imágenes Landsat 8

Las imágenes Landsat 8 obtenidas por el sensor (OLI) y (TIRS) constan de nueve bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros para las bandas de 1 a 7 y 9; una banda nueva (1) (azul profundo) es útil para estudios costeros y aerosoles; la nueva banda (9) es útil para la detección de cirrus, la resolución para la banda 8 (pancromática) es de 15 metros; dos bandas térmicas 10 y 11 son útiles para proporcionar temperaturas más precisas de la superficie y se toman a 100 metros de resolución, haciendo un total de 11 bandas (cuadro 3) (IGAC 2013). De esta manera la información espectral obtenida por el proyecto Landsat permite cuantificar los cambios sutiles en el tiempo, como por ejemplo la disminución del área de un espejo de agua o la respuesta de una cubierta vegetal a la sequía, el cambio de reflectancia en la cubierta forestal a lo largo del tiempo o la evolución de los cultivos extensivos entre tantos ejemplos que se podrían citar (Schomwandt 2015).

Cuadro 3. Características de la imagen Landsat 8 en resolución espectral y espacial.

Bandas	Longitud de onda (micrómetros)	Resolución (metros)
Banda 1 – Aerosol costero	0.43 – 0.45	30
Banda 2 – Azul	0.45 - 0.51	30
Banda 3 – Verde	0.53 – 0.59	30
Banda 4 – Rojo	0.64 – 0.67	30
Banda 5 – Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 – 0.88	30
Banda 6 – SWIR 1	1.57 – 1.65	30
Banda 7 – SWIR 2	2.11 – 2.29	30
Banda 8 – Pancromático	0.50 – 0.68	15
Banda 9 – Cirrus	1.36 – 1.38	30
*Banda 10 – infrarrojo térmico (TIR) 1	10.60 – 11.19	100
*Banda 11 – infrarrojo térmico (TIR) 2	11.50 – 12.51	100

Fuente: USGS citado por IGAC (2013)

* Las bandas TIRS se adquieren a una resolución de 100 metros, pero se vuelven a remuestrear a 30 metros.

III. METODOLOGIA

3.1 Descripción del área de estudio

El estudio se realizó en el Municipio de San Jorge, del distrito de Chinameca, Departamento de San Miguel (figura 7), está limitado por los siguientes Municipios: al norte, por Chinameca; al este, por San Miguel; al sur, por San Rafael Oriente y al oeste por Chinameca (AMSJ 2014). Se encuentra ubicado entre las coordenadas geográficas siguientes: 13°26'44" LN (extremo septentrional), 13°23'48" LN (extremo meridional); 88°17'32" LWG (extremo oriental) y 88°22'51" LWG (extremo occidental) (CNR s.f.). Los elementos hidrográficos con los que cuenta el municipio son las quebradas: San Jorge, Limbo o La Quebradona, La Piedra, La Quebradona, La Piedrita, La Piedrona, El Zope, De Arena, Las Moritas, Las Piletas, Los Pozos, La Joya, Batres, La Ceiba y Los Amaya (AMSJ 2014). Su área total es de 37.72 km², de los cuales 0.96 km² pertenecen al área urbana, el área rural tiene 36.76 km², está constituida por 5 cantones y 8 caseríos.

Entre las agroindustrias importantes que todavía hay en el municipio se encuentra la elaboración de dulce de panela, talleres de madera y otras. En el comercio local existen varias tiendas, unas grandes y otras pequeñas, tres centros escolares, una Unidad de Salud, una iglesia católica y ocho iglesias evangélicas, el comercio del municipio se realiza con las ciudades de San Rafael Oriente y El Tránsito del departamento de San Miguel, con la ciudad de Usulután y con la ciudad de San Miguel. Estas ciudades se unen mediante carreteras pavimentadas y una red de caminos vecinales, enlazando la cabecera municipal con sus cantones y caseríos.

El clima del municipio es cálido en la mayor parte de su territorio, en la parte este presenta un clima fresco, debido a la proximidad del volcán de San Miguel o Chaparrastique; pertenece a los tipos de tierra caliente y templada; el monto pluvial anual oscila entre los 1,600 y 2,000 milímetros; en cuanto a la edafología los tipos de suelo que se encuentran en el municipio son: i) Regosoles y Aluviales, en terrenos casi a nivel, a ligeramente inclinados; ii) Andosoles y Regosoles, en terrenos de ondulados, a alomados; iii) Regosoles, Latosoles Arcillo Rojizos y Andosoles, en terrenos alomados, a montañosos muy accidentados; iv) Litosoles Regosoles, en terrenos ondulados, a montañosos muy accidentados (CNR s.f.).

Es importante hacer notar que para el desarrollo del presente estudio se tomó en cuenta un área de influencia de dos kilómetros fuera del límite municipal, con el fin de comprender de mejor manera los procesos que afectan o benefician de manera directa o indirecta en la recarga potencial en la zona de estudio.

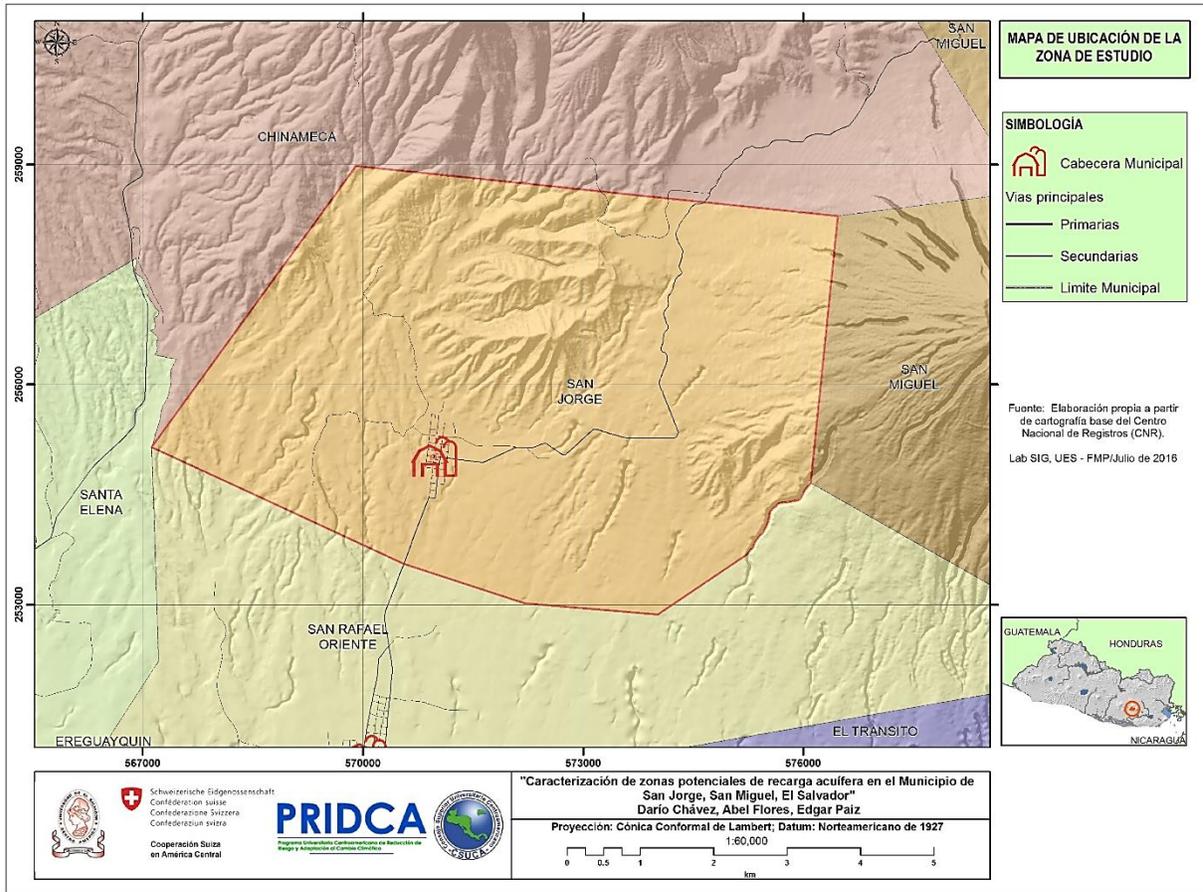


Figura 7. Ubicación geográfica del Municipio de San Jorge (Elaboración propia)

3.2 Cartografía utilizada

La cartografía utilizada se describe a continuación, teniendo en cuenta que se obtuvieron en formato digital y en el caso del mapa geológico también en físico.

3.2.1 Mapa geológico

Se usó el mapa geológico de El Salvador a escala 1:100.000, elaborado por la Misión Geológica Alemana en El Salvador en colaboración con el Centro de Investigaciones Geotécnicas (Weber 1978), con la finalidad de ubicar de manera espacial los diferentes miembros geológicos que afloran en la zona de estudio (anexo 1). Constituyendo los miembros geológicos la unidad de análisis principal en este estudio.

3.2.2 Cuadrantes topográficos

Las hojas topográficas utilizadas fueron: 2556 III SW-USULUTAN, 2556 III SE-EL TRÁNSITO, 2556 III NW-SANTIAGO DE MARIA, 2556 III NE-VOLCAN DE SAN MIGUEL, todas a escala 1:25000 y proporcionadas por el Instituto Geográfico Nacional "Ing. Pablo Arnoldo Guzmán" del Centro Nacional de Registros (CNR 1990) (anexo 2).

3.2.3 Red hídrica

A partir de las hojas topográficas a escala 1:25000 mencionadas en el apartado anterior, se obtuvo la red hídrica (anexo 3) de la zona de estudio.

En el contexto de cuencas, la subcuenca de la quebrada El Tránsito tiene su cabecera en los cráteres de los volcanes de San Miguel y Laguna Seca del Pacayal (anexo 4). En el primero estaría orientada hacia el W y en el segundo hacia el sur. Posteriormente recibe las quebradas que desaguan del cerro Chambala y manteniendo su dirección hacia el sur, pasa por los pueblos de San Jorge, San Rafael Oriente y El Tránsito, en su camino hacia el río Grande de San Miguel (Geólogos del Mundo s.f.).

El área de estudio se caracteriza por una topografía quebrada, en donde al este de la carretera que une San Rafael Oriente con San Jorge, los rasgos geomorfológicos están determinados por las faldas del Volcán San Miguel o Chaparrastique. Al oeste de la carretera citada y al norte de San Jorge, la topografía es más quebrada, con un profundo drenaje dendrítico de cárcavas o valles relativamente profundos de las quebradas afluentes del río Batres (Núñez 1995).

3.2.4 Hidrogeología

Haciendo uso del mapa hidrogeológico de El Salvador a escala 1:100000, elaborado por ANDA/COSUDE (2008), en formato digital, se conoció que: La hidrogeología presente en el área de estudio corresponde a la “Unidad Acuífero Volcánico Fisurado de Gran Extensión y Posiblemente Alta Producción” (anexo 5), unidad que la constituyen, principalmente, rocas volcánicas de carácter andesítico y basáltico, con ciertas intercalaciones de materiales piroclásticos. Entre las rocas volcánicas se pueden distinguir flujos y coladas de lavas que provienen de los centros de erupción volcánica de la zona. Dichos materiales pueden presentar conductividades hidráulicas de medianas a altas, como consecuencia de su porosidad secundaria (fallamiento existente).

3.2.5 Cobertura y usos del suelo

Con base en el mapa de usos del suelo del 2002 (SI 2004), se realizó una actualización especialmente para el área de estudio, a una escala de mayor detalle 1:25000 para el año 2015. Se utilizó una imagen satelital Landsat 8 del mes de mayo de 2015, proporcionada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), con el objetivo de adquirir información actualizada de la zona. Se utilizó la combinación de bandas 5-4-3; la banda 5 (infrarrojo medio) permite evaluar el contenido de humedad de la vegetación y suelo; la banda 4 (infrarrojo

cercano) útil para la delimitación de cuerpos de agua, determinar contenido de biomasa; la banda 3 (roja) permite determinar la absorción de clorofila, por ello es muy útil en la clasificación de la cobertura vegetal, agricultura y uso del suelo (Schomwandt 2015).

Se usó la metodología Corine Land Cover adaptada al Istmo Centroamericano, y se asignó para las diferentes clases de cobertura vegetal presentes, su respectivo coeficiente “Kv” el cual representa la fracción infiltrada por acción de la cobertura vegetal, haciendo uso de los coeficientes utilizados en la Metodología Recarga de Agua Subterránea (Junker 2005).

3.3 Precipitación

Para la variable precipitación, se utilizaron los registros de información disponible de las estaciones que tienen influencia en la zona de estudio (cuadro 4), y de las cuales se obtuvieron las series de datos necesarios para este trabajo y son las estaciones San Jorge y Pacayal, cuyos registros van del año 2005 al 2014 y fueron proporcionados por la Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA), del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). La estación Pacayal cuenta con un registro completo de los datos a diferencia de la estación San Jorge, en la cual la serie presenta datos faltantes.

Cuadro. 4. Estaciones en la zona de estudio.

Estación	X	Y	Elevación (msnm)
San Jorge	571003.73	255152.42	337
Pacayal	573303.35	261138.78	1065

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar la consistencia de los datos se realizó el análisis de Doble Masa, el cual consiste en validar los datos obtenidos de una estación comparando la serie pluviométrica de la estación problema con la misma serie medida de la estación base (Martínez *et al.* 2005). Considerando como estación base Pacayal, y la estación San Jorge como problema, se procedió a realizar la validación de datos, observándose una relación que se ajusta a una ecuación lineal (figura 8), con lo que se puede afirmar que la información es consistente, dado que su coeficiente de correlación es de 0.9532.

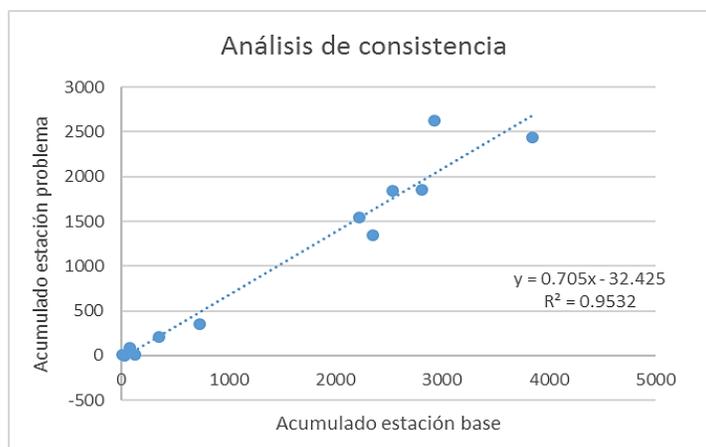


Figura 8. Validación de datos de precipitación (fuente: elaboración propia)

Luego se estimaron los datos faltantes de la estación San Jorge, utilizando los datos de la estación Pacayal (cuadro 5), y su correspondiente ecuación lineal $y = 0.705x - 32.425$.

Cuadro 5. Precipitación de las estaciones

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Pacayal	0.34	3.04	7.39	34.52	222.98	253.39	235.46	281.38	385.08	292.70	73.12	12.41	1801.80
San Jorge	0.50	0.00	8.83	20.75	169.77	229.59	162.01	262.62	330.58	295.41	58.40	1.87	1540.33

Fuente: Elaboración propia.

Con las estaciones que se trabajó por considerar buena la calidad de sus datos, se realizó una interpolación, empleando Sistemas de Información Geográfica (ArcMap 10.1) obteniendo un mapa de polígonos de Thiessen para la zona de estudio. Villón (2002) describe el método así: ubicar las estaciones dentro y fuera de la cuenca, unir estaciones formando triángulos, procurando en lo posible que estos sean acutángulos, trazar las mediatrices de los lados de los triángulos formando polígonos, definir el área de influencia de cada estación, así cada estación quedará rodeada por las líneas del polígono, el área encerrada por los polígonos de Thiessen será el área de influencia de la estación correspondiente (anexo 6).

Para la elaboración de los balances hídricos por cada miembro geológico, se realizó una interpolación de las capas de polígonos de Thiessen con sus valores de precipitación y evapotranspiración, con la capa de geología para obtener valores para cada miembro geológico en estudio. Obteniendo de esta manera los datos de precipitación ponderada para cada uno (anexo 7).

3.4 Evapotranspiración potencial

Para la obtención de esta variable, se procedió a utilizar la metodología desarrollada por SNET (2005), en la que analizaron la relación existente entre Altitud y Evapotranspiración de

Referencia (la cual fue calculada por el método de Hargreaves) y se determinaron ecuaciones de correlación mensual entre las dos variables, obteniéndose muy buenos coeficientes de correlación (cuadro 6). Esto debido a que las estaciones analizadas no cuentan con datos como radiación solar extraterrestres, brillo solar y fotoperiodo, para poder calcular evapotranspiración por otro método.

Cuadro 6. Ecuaciones de correlación mensual

MES	ECUACION DE CORRELACION	R ²
ENERO	$y = -7E-06x^2 - 0.017x + 152.95$	R2 = 0.8791
FEBRERO	$y = -8E-06x^2 - 0.0164x + 156.04$	R2 = 0.8707
MARZO	$y = -1E-05x^2 - 0.0171x + 190.42$	R2 = 0.8206
ABRIL	$y = -9E-06x^2 - 0.0202x + 194.52$	R2 = 0.8298
MAYO	$y = -7E-06x^2 - 0.0237x + 186.89$	R2 = 0.8378
JUNIO	$y = -7E-06x^2 - 0.0181x + 165.79$	R2 = 0.8871
JULIO	$y = -9E-06x^2 - 0.0127x + 175.28$	R2 = 0.8311
AGOSTO	$y = -8E-06x^2 - 0.0122x + 170.12$	R2 = 0.8481
SEPTIEMBRE	$y = -8E-06x^2 - 0.0126x + 150.42$	R2 = 0.8832
OCTUBRE	$y = -1E-05x^2 - 0.0094x + 149.56$	R2 = 0.8791
NOVIEMBRE	$y = -9E-06x^2 - 0.0119x + 142.18$	R2 = 0.8836
DICIEMBRE	$y = -7E-06x^2 - 0.0168x + 144.91$	R2 = 0.8928

Fuente: SNET (2005).

Para la elaboración de los balances hídricos por cada miembro geológico, se realizó una interpolación de las capas de polígonos de Thiessen (precipitación y ETP), con la capa de geología para obtener valores para cada miembro geológico en estudio. Obteniendo de esta manera los datos de ETP ponderada para cada uno (anexo 8).

3.5 Textura del suelo

Tomando como partida la determinación de la textura del suelo (figura 9 a y b) de los datos arrojados por el método de Bouyoucos (anexo 9), se procedió a un análisis utilizando tablas de Excel de todas y cada uno de los ensayos realizados en el laboratorio (anexo 10).



Figura 9 a y b. Determinación de la textura del suelo en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador, 2015

3.6 Tasa de infiltración por miembro geológico

Para la estimación de la infiltración básica del suelo se utilizó el método del doble anillo (anillos concéntricos), el cual consiste en insertar el cilindro exterior de manera uniforme hasta una profundidad de 10 cm, de la misma manera insertar el cilindro interior y llenarlos de agua (figura 10 a y b) (anexo 11). De esta manera después de un tiempo se inician las lecturas apuntando las diferencias de altura, las cuales sirven para encontrar la f_c expresada en mm/día. Se utilizó la hoja de cálculo elaborada por el Ing. M. Sc. José Mauricio Tejada (Docente de la Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de El Salvador), para calcular de manera automática la infiltración básica en los miembros geológicos presentes en la zona de estudio (anexo 12 al 16).



Figura 10 a y b. Pruebas de infiltración, método del infiltrómetro de doble anillo, Cantón La Morita, San Jorge, San Miguel, El Salvador, 2015

3.7 Conductividad hidráulica

Las pruebas de conductividad hidráulica se ejecutaron con ayuda del permeámetro de Guelph (anexo 17), realizando tres repeticiones en cada miembro geológico presente, con cargas de cinco y 10 cm de altura en la zona de estudio. Para llegar hasta las zonas definidas fue necesario utilizar un GPS (Sistema de Posicionamiento Global) y el mapa geológico, a manera de encontrar el lugar donde se realizó la prueba.

Este se basa en el método del pozo o agujero a nivel constante. Consiste en excavar un agujero cilíndrico de radio y profundidad constante, en el cual se realizan ensayos de infiltración manteniendo la altura del agua dentro del agujero constante, lo que permite obtener conductividad hidráulica (K_{fs}) 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 conocido como Permeámetro de Guelph (figura 11 a y b).



Figura 11 a y b. Medición de la conductividad hidráulica con el permeámetro de Guelph, Fca. Cancy, Chinameca, San Miguel, El Salvador, 2015

Se utilizó la hoja de cálculo elaborada por el Ing. Msc. José Mauricio Tejada (anexo 18 al 22), para calcular de manera automática la conductividad hidráulica en los miembros geológicos presentes en la zona de estudio con la formula $K_{fs} = 0.0041(C)(R2) - 0.0054(C)(R1)$ y comparar con los propuestos por la FAO citado por Tejada (2012) (cuadro 7).

$$K_{fs} = 0.0041(C)(R2) - 0.0054(C)(R1)$$

Donde:

C = Coeficiente para reservorios combinados

R1 = Tasa de infiltración en régimen permanente (cm/min) (lámina de agua de 5 cm)

R2 = Tasa de infiltración en régimen permanente (cm/min) (lámina de agua de 10 cm)

Cuadro 7. Valores de Kfs

Evaluación de la Kfs según FAO (1963)		
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

Fuente: FAO citado por Tejada (2012)

3.8 Capacidad de campo y punto de marchitez permanente

Establecidas considerando el tipo de textura, definido por el método de Bouyoucos en el laboratorio; con base a esto se utilizó la tabla propuesta por el USDA citado por SNET (2005), usada para el desarrollo del Balance Hídrico Integrado Y Dinámico en El Salvador (cuadro 8).

Cuadro 8. Punto de marchitez permanente y capacidad de campo.

Textura	Punto de Marchitez Permanente, Capacidad de Campo y Capacidad de Agua Disponible para suelos de varias Texturas								
	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

Fuente: USDA citado por SNET (2005)

3.9 Determinación de coeficientes

Este apartado comprende los coeficientes referidos a infiltración, pendiente y cobertura vegetal. La sumatoria de estos equivale al coeficiente C_i , de la infiltración del suelo (propiedades físicas del suelo), se utiliza la fórmula de correlación estadística desarrollada por Schosinsky y Losilla (2000).

El coeficiente C_i está dado por: $C_i = K_p + K_v + K_{fc}$

Donde:

C_i = Coeficiente de infiltración

K_p = Coeficiente de pendiente

K_v = Cobertura vegetal

K_{fc} = Coeficiente e infiltración por textura de suelo

3.10 Coeficiente de infiltración por textura (Kfc)

Para obtener este parámetro, se tomó como base la infiltración básica del suelo en cada miembro geológico en estudio, realizando tres repeticiones con la prueba de anillos y homogenizando los resultados. Para realizar el cálculo de Kfc, se tomaron en cuenta las siguientes condiciones formuladas por Schosinsky (2006), usando la fórmula propuesta por Schosinsky y Losilla (2000).

$$Kfc = 0,267\ln(fc) - 0,000154fc - 0,723$$

Donde:

Kfc [adimensional] = Coeficiente de infiltración (fracción que infiltra por textura del suelo)

fc [mm/día] = Infiltración básica del suelo.

Condiciones:

Si fc se encuentra entre 16 y 1568 mm/día; $Kfc = 0,267\ln(fc) - 0,000154fc - 0,723$

Si fc es menor a 16 mm/día; $kfc = 0,0148fc/16$

Si fc es mayor de 1568 mm/día; $kfc = 1$

3.11 Coeficientes de uso de suelo (Kv)

Se realizó un mapa de uso de suelo, actualizado con escala de 1: 25,000 utilizando una imagen LANDSAT del mes de junio del año 2015 (USGS 2015), con el objetivo de poseer información más detallada y poder asignar el valor del coeficiente Kv (Cuadro 9).

Cuadro 9. Coeficientes por cobertura vegetal.

Por Cobertura vegetal	Kv
Cuerpos de agua	0
Salinas	0.05
Playa, dunas y arena	0.07
Pasto natural, zonas urbanas discontinuas, caña, granos básicos, etc.	0.1
Coníferas, palmeras, zonas urbanas verdes, etc.	0.15
Vegetación arbustiva, platanales y bananeras, tejido urbano, zonas comerciales, aeropuertos, etc.	0.18
Bosque de café	0.19
Bosque, lava reciente, etc.	0.2
Vegetación esclerófila o espinoso, cultivo de piña	0.3

Fuente: Junker (2005)

3.12 Coeficiente de Pendiente (Kp)

Se elaboró un mapa de pendientes, para poder asignar este coeficiente, procesando las curvas de nivel con un intervalo entre curva de 10m, obteniendo un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), el cual nos da una visión digital de cómo está el relieve de la zona, este estudio requería obtener las pendientes y con el objetivo de tener mejor definición de estas, se identificaron

rangos de pendiente expresados en porcentaje (cuadro 10), estos con base a Schosinsky y Losilla (2000), modificados y adaptados a la zona y el país por Junker (2005).

Cuadro 10. Valores de k_p

Por pendiente	K_p
<15%	0.15
15-30%	0.1
30-50%	0.07
50-70%	0.05
>70%	0.01

Fuente: Junker (2005)

3.13 Cálculo de la recarga

Para el cálculo de la recarga se utilizó el balance hídrico de suelos propuesto por Schosinsky (2006), se cuantificó el valor de la recarga potencial para cada miembro geológico en unidades de mm, debido a que en la zona de estudio se encuentran cinco zonas de recarga acuífera, las que se establecieron a partir de su geología, en función de sus condiciones fisiográficas, usos del suelo, topografía; cada una de estas contempla un balance hídrico de suelos, considerando que después de que el agua precipitada satisface la evapotranspiración potencial y la capacidad de campo, la sobrante de ésta es la que recarga al acuífero, calculada mediante la fórmula:

$$R_p = P_i + h_{Si} - h_{Sf} - ETR$$

Donde:

R_p = Recarga potencial mensual en mm/mes.

P_i = Precipitación que infiltra en mm/mes.

h_{Si} = humedad del suelo al inicio del mes en mm.

h_{Sf} = humedad del suelo al final del mes en mm.

ETR = Evapotranspiración real en mm/mes

3.14 Mapa de zonas potenciales de recarga acuifera

Para determinar las zonas de recarga, se tomó en cuenta el tipo de cobertura vegetal, la pendiente, geología y los polígonos de Thiessen (cuadro 11) con su respectivo dato de entrada y coeficiente; el resultado representado con ArcMap 10.1 de Esri, para su respectivo mapa.

Cuadro 11: Capas utilizadas para generar el mapa de recarga en SIG

Capas utilizadas	Datos y coeficientes asociados
Cobertura vegetal	Profundidad de raíces, Fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal (K_v), Coeficiente de follaje (C_{fo}).
Geología	Capacidad de campo, Punto de marchitez permanente, Precipitación que infiltra, Fracción que infiltra por textura de suelo (K_{fc}), densidad del suelo.
Polígonos de Thiessen	Precipitación, Evapotranspiración
Pendiente	Fracción que infiltra por efecto de la pendiente (K_p)

Fuente: Elaboración propia.

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

La caracterización de las zonas de recarga al acuífero se realizó con el fin de demostrar la ejecución del objetivo general y cuantificación de la recarga en cumplimiento a objetivos específicos, con el fin de clasificar las zonas de acuerdo con su potencial de recargar al acuífero. Con la información colectada en campo, las pruebas de infiltración y conductividad hidráulica y su procesamiento en laboratorio, se procedió a la interpretación de los datos obtenidos, de manera que se lograron los presentes resultados para las zonas de recarga acuífera.

4.1 Evapotranspiración potencial

El resultado obtenido por este procedimiento para la evapotranspiración media anual fue de 138.87 mm/mes y 158.70 mm/mes (cuadro 12), en función de la estación a la que corresponde la zona de estudio, Pacayal y San Jorge respectivamente. Observándose que la evapotranspiración es fuertemente influenciada por la altura, debido al efecto que ejerce la temperatura.

Cuadro 12. Valores de evapotranspiración potencial en mm

Estación	Altura	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Pacayal	1065.0	126.91	129.50	160.87	162.80	153.71	138.57	151.55	148.05	127.93	128.21	119.30	119.08	1666.47
San Jorge	337.0	146.43	149.60	183.52	186.69	178.11	158.90	169.98	165.10	145.27	145.26	137.15	138.45	1904.45

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Textura del suelo

Con base a que la textura es una de las propiedades físicas más importantes del suelo, a continuación, se detallan los resultados obtenidos para este parámetro utilizando la metodología de Bouyoucos, realizada en el Laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador (cuadro 13).

Cuadro 13. Clases texturales de la zona de estudio.

Miembro geológico	% arena	% limo	% arcilla	Clase textural
s2	74.4	20.1	5.5	Franco arenoso
s3'a	74	21.2	4.8	Franco arenoso
s5'a	74.7	20.8	4.5	Franco arenoso
s5'b	74.5	20.5	5	Franco arenoso
s5'c	74.6	20.9	4.5	Franco arenoso

Fuente: Elaboración propia.

Estos resultados se corresponden con el Mapa de Clasificación General de Suelos - USDA, de la Dirección General de Recursos Naturales Renovables del Ministerio de Agricultura y Ganadería, año 1985, a escala 1: 300,000, debido a que en la zona de estudio se encuentra suelos de los órdenes: Entisoles e inceptisoles (anexo 23), los cuales son suelos minerales de formación

reciente y las texturas superficiales como del subsuelo de ambos varían de arena franca hasta arcillosa (SNET 2005).

4.3 Infiltración básica en miembros geológicos

En la zona de estudio aflora la formación San Salvador y sus miembros s2, s3'a, s5'a, s5'b y s5'c. Los resultados de las pruebas de infiltración (cuadro 14), nos muestran que el miembro s2, es el que presenta la mayor tasa con un valor de 1867.5 mm/día, con una presencia del 32.9% en el área de estudio, caso contrario al miembro s5'b que presenta la menor tasa de infiltración con un valor de 420.43 mm/día, y una presencia del 5.5%. El promedio de infiltración para la zona es de 941.4 mm/día.

Cuadro 14. Infiltración básica de los miembros en estudio

Formación	Miembro	Área (%)	fc (cm/hora)	fc (mm/día)
San Salvador	s2	32.9	7.78	1867.5
San Salvador	s3'a	54.5	2.07	496.72
San Salvador	s5'a	3.0	2.35	563.38
San Salvador	s5'b	5.5	1.75	420.43
San Salvador	s5'c	4.1	5.66	1358.91

Fuente: Elaboración propia.

La zona en estudio se encuentra dentro de la depresión central, que según Losilla *et al.* (1998) es una unidad acuífera compuesta de materiales volcánicos, sumamente permeables y que son áreas importantes de infiltración. Para MARN (2016) esto contribuye a la recarga acuífera y por tanto, al aumento de las reservas de aguas subterráneas, así como a la amortiguación de los picos de escorrentía superficial generadores de inundaciones y de procesos de erosión de suelos.

4.4 Conductividad hidráulica en miembros geológicos

Para Amoozegar citado por Gómez *et al* (2008), la tasa de infiltración instantánea decrece en el tiempo hasta un valor constante llamado infiltración básica, controlado por la conductividad hidráulica saturada; esta es una medida del flujo que atraviesa una sección del sistema poroso del suelo saturado; para Sobieraj (2004) esta es variable espacialmente en el mismo tipo de suelo a distancias cortas, de manera que con un conjunto pequeño de valores difícilmente se represente la conductividad hidráulica en un área.

Los resultados (cuadro 15), fueron obtenidos mediante pruebas de conductividad a diferente altura utilizando el instrumento Permeámetro de Guelph. Estos reflejan el movimiento del agua en el suelo para cada miembro geológico en estudio.

Cuadro 15. Conductividad hidráulica Kfs

Área de recarga	L (cm)	Lámina de agua en agujero 1 (cm)	Tasa de infiltración (cm/min) 1	Lámina de agua en agujero 2	Tasa de infiltración (cm/min) 2	Kfs (cm/h)	Kfs (m/día)
s2	60	5	0.038	10	0.061	0.095	0.02
s3a	60	5	0.38	10	0.51	0.082	0.02
s5a	60	5	0.24	10	0.51	1.68	0.40
s5b	60	5	0.24	10	0.54	1.94	0.47
s5c	60	5	0.22	10	0.43	1.22	0.29

Fuente: Elaboración propia.

Estos valores evaluados con los propuestos por la FAO citados por Tejada (2012) demuestran que en la zona de estudio tienen una tendencia de muy lenta a lenta, los datos obtenidos en la presente investigación no concuerdan con lo mencionado por Plaster (2000), que para suelos de textura franco-arenosa la conductividad hidráulica es alta. Sin embargo, es de tomar en cuenta que las condiciones de saturación del suelo, en las cuales se realizaron las pruebas pudieron influir en la obtención de estos resultados, ya que los suelos con altos contenidos de arena tienden a hincharse y disminuir la capacidad de transmitir el agua hacia otros estratos por la disminución de su espacio poroso.

4.5 Cobertura vegetal y uso del suelo

En el área de estudio se comprenden todas aquellas actividades agropecuarias que se desarrollan y la forma en que el suelo es utilizado (anexo 24). Se identificó que el mayor porcentaje de cobertura vegetal (cuadro 16), pertenece al mosaico de cultivos y pastos que comprende el 56.2%, lo que demuestra un intensivo uso de la tierra en actividades agrícolas, seguido de la cobertura de café con un 17.8% y bosques 14.4%.

Cuadro 16. Tipos de Cobertura del suelo.

Cobertura y uso del suelo	Área (km ²)	%
Bosques	19.07	14.4
Café	23.51	17.8
Espacios con vegetación escasa	4.37	3.3
Mosaico de cultivos pastos	74.26	56.2
Roqueda, Lavas	1.63	1.2
Tejido urbano continuo	1.31	1.0
Tejido urbano discontinuo	8.07	6.1
Total	132.2	100.0

Fuente: Elaboración propia

Se ha identificado la ampliación de la frontera agrícola, hacia la zona norte, sustituyendo en gran medida el bosque caducifolio por cultivos de granos básicos y el cultivo de café en menor medida (figura 12 a y b).

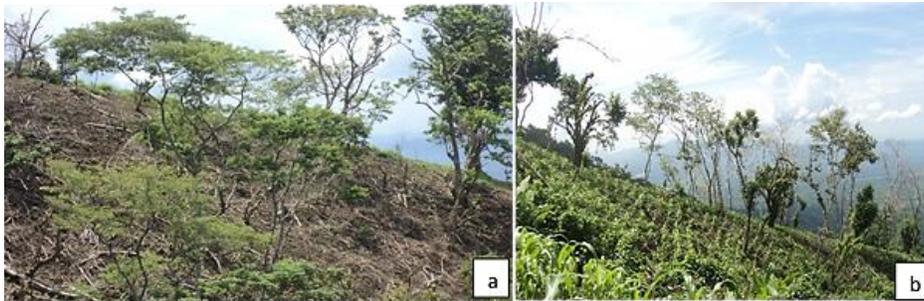


Figura 12 a y b. Cambios en la cobertura vegetal y usos del suelo en la zona alta del Cantón. La Morita, San Jorge, San Miguel, El Salvador, 2015

4.6 Identificación de Áreas de Recarga Hídrica (ARH)

El cálculo de la recarga potencial al acuífero se realizó para cada miembro geológico, cada uno a su vez fue considerado área de recarga hídrica (ARH) obteniendo así, cinco áreas (figura 13). En las cinco ARH identificadas (cuadro 17), se aplicó el balance hídrico de suelos propuestos por Schosinsky (2006).

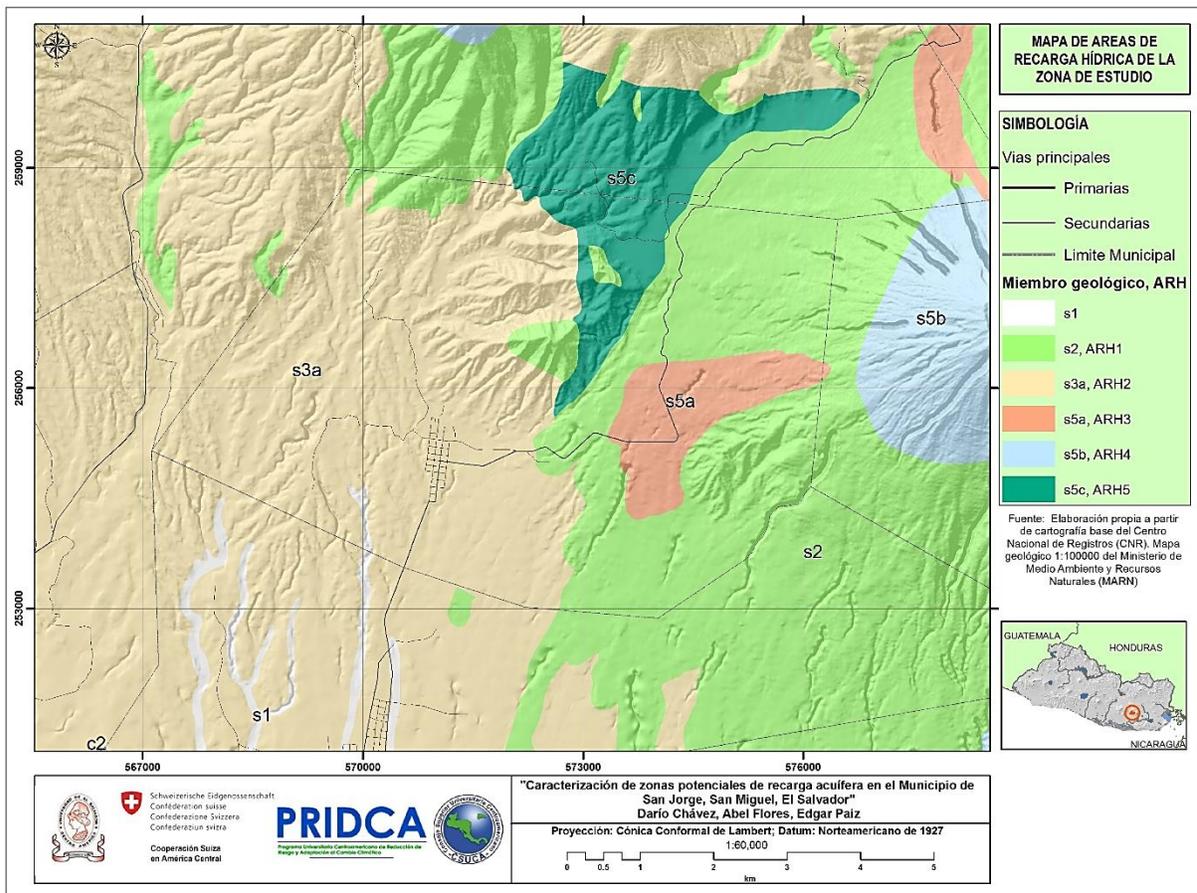


Figura 13. Zonas consideradas de Recarga hídrica (fuente: Elaboración propia)

Se consideraron así, debido a que en la zona de estudio no se encuentran descargas naturales, por lo que se consideró que en estas puede cuantificarse la recarga, y en alguna medida hacer

evaluación y monitoreo de las características fisiográficas que influyen en el balance hídrico de estas, de manera que se pueden valorar cambios espaciotemporales que puedan afectar la capacidad de infiltración.

Cuadro 17: Zonas de recarga acuífera de San Jorge.

Miembro	Lugar de Muestreo	Área (km ²)
s2 (ARH 1)	El charcón (La Morita)	47.35
s3 ^ˆ a (ARH 2)	Barrio Concepción (San Jorge)	66.66
s5 ^ˆ a (ARH 3)	El Barreno (La Morita)	4.58
s5 ^ˆ b (ARH 4)	La piedra – Lacayo	6.62
s5 ^ˆ c (ARH 5)	Finca Cancy	7.01
Área total		132.22

Fuente: Elaboración Propia

4.7 Determinación de parámetros para el balance hídrico de suelos

4.7.1 Coeficiente de infiltración por textura (K_{fc})

Este coeficiente se estableció utilizando el valor de la infiltración básica, de esta manera se obtuvieron los datos presentados a continuación (cuadro 18).

Cuadro 18. Coeficiente de infiltración con base a la textura del suelo.

Miembro	fc (mm/día)	K _{fc}
s2	1867.65	1
s3 ^ˆ a	496.72	0.8580
s5 ^ˆ a	563.38	0.8814
s5 ^ˆ b	420.43	0.8253
s5 ^ˆ c	1358.91	0.9940

Fuente: Elaboración propia con base a Schosinsky y Losilla (2000).

Los valores de los coeficientes de infiltración por textura de suelo reflejan un rango de 0.8253 a 1, lo que indica que un K_{fc} con valor de 1, es referido a una infiltración perfecta, a continuación (figura 14) se aprecia con mayor facilidad la variación del coeficiente. Este indica que se está ante la presencia de un suelo con cualidades excelentes para la infiltración asociados a su textura, que es la base para la recarga de los acuíferos.

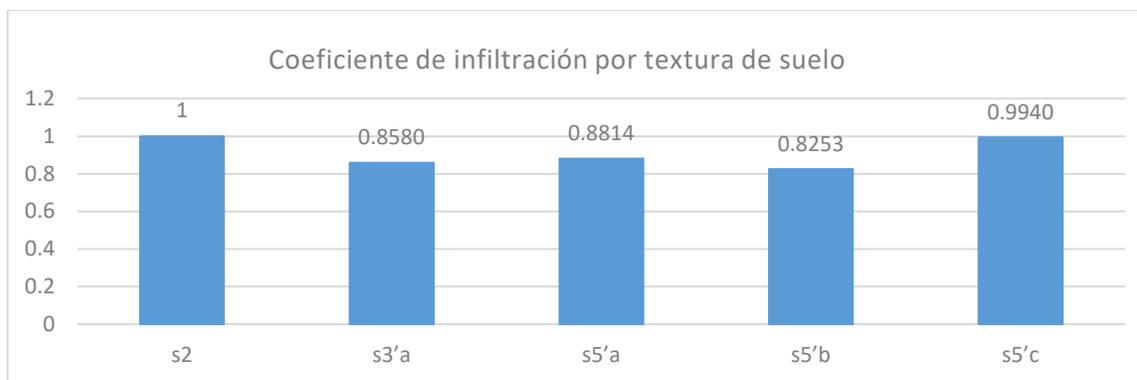


Figura 14. Grafica de coeficientes de Infiltración, por miembro.

4.7.2 Coeficiente de infiltración por cobertura de suelo (K_v)

En base a la actualización del mapa de cobertura y uso del suelo (fig. 9), de la zona de estudio, se clasificaron siete cubiertas diferentes una de otras, a las cuales se les asignó su coeficiente en relación a la transpiración vegetal (cuadro 19).

Cuadro 19: Coeficientes asignados por cobertura de suelo.

Cobertura del Suelo	K_v
Bosques caducifolios	0.20
Café	0.19
Espacios con vegetación escasa	0.07
Mosaico de cultivos y pastos, caña de azúcar, pastos naturales	0.10
Roqueda, lavas	0.20
Tejido urbano discontinuo	0.10
Tejido urbano continuo	0.18

Fuente: Elaboración Propia con base a Junker (2005)

4.7.3 Coeficiente de pendiente (K_p)

Este coeficiente se asignó, con base al mapa de pendientes realizado en la investigación (figura 15 y anexo 25), determinando así que las pendientes menores al 30% y que representan el 65.4% predominan en la zona (cuadro 20).

Cuadro 20: Coeficientes por efectos de la pendiente.

Rangos de Pendientes (%)	Área (km ²)	(%)	K_p
<15	55.27	41.80	0.15
15-30	31.21	23.61	0.10
30-50	24.11	18.24	0.07
50-70	12.46	9.42	0.05
>70	9.18	6.94	0.01
Total	132.23	100	

Fuente: Elaboración Propia con base a Junker (2005).

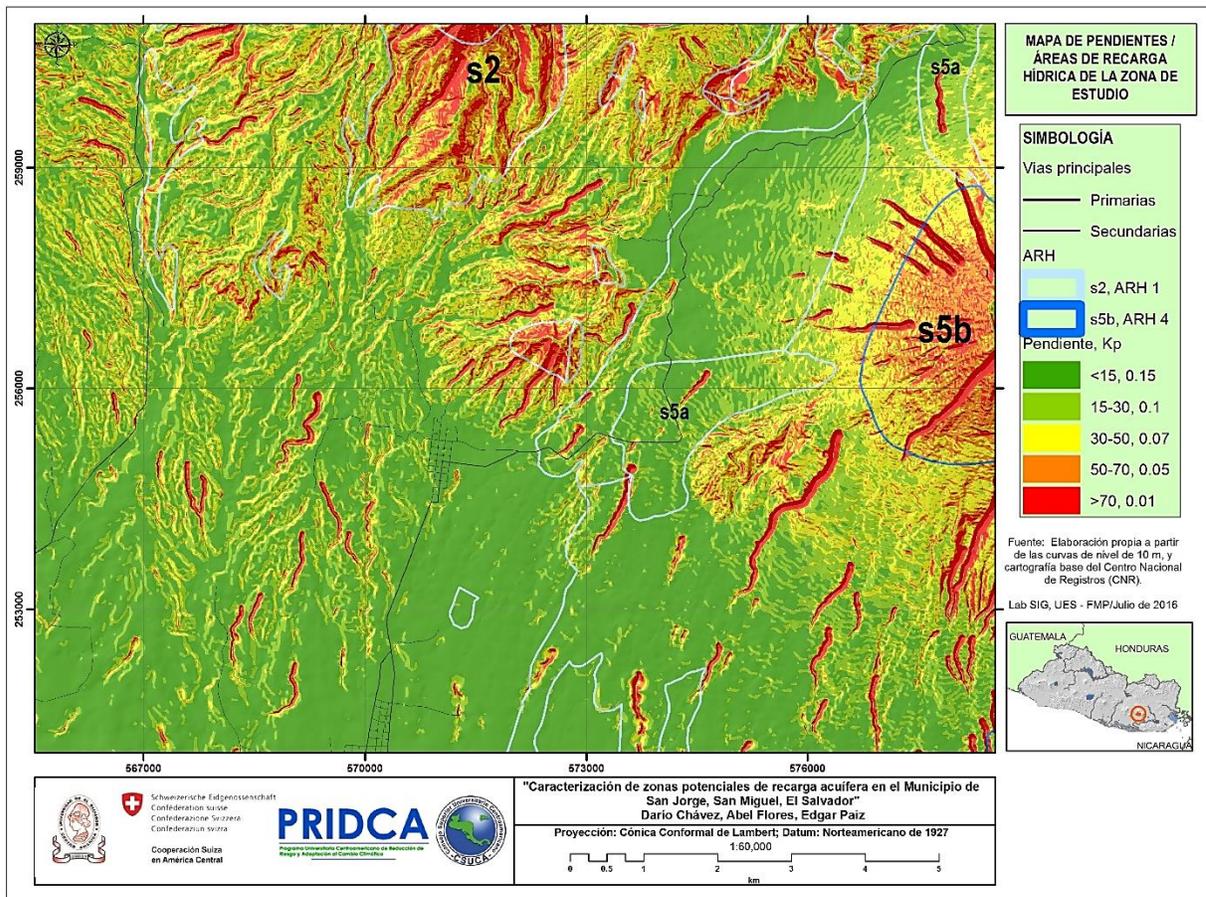


Figura 15. Distribución de las pendientes en la zona de estudio (fuente: Elaboración propia)

Es importante señalar que los miembros geológicos que se aprecian en la figura comparten las pendientes mayores al 50%, efecto que se evidencia en el balance hídrico de suelos de manera particular en el miembro geológico s5'b, ya que para dicho cálculo se tomaron promedios ponderados y este al poseer un área menor equivalente al 5% del total, refleja un claro efecto de estas en la escorrentía superficial. Caso contrario para el miembro geológico s2, que por tener un área mucho mayor equivalente al 35.8% de la zona en estudio en su balance hídrico de suelo, este efecto aparece despreciable y se registra con un valor de cero, sin embargo, esto no significa que la pendiente no tenga influencia en dicha zona y no se genere escorrentía.

4.8 Recarga potencial por infiltración

Considerando los componentes de entrada y salida de un sistema, el balance hídrico de suelos para cada uno de los miembros geológicos se muestra a continuación (cuadro 21), mostrando una síntesis de los resultados aplicado a cada ARH, que por ende son cada uno de los miembros geológicos.

Cuadro 21. Recarga potencial al acuífero en cada miembro geológico.

Miembro (ARH)		mm/m²/año
s2	El charcón (La Morita)	325.86
s3'a	Barrio Concepción (San Jorge)	322.68
s5'a	El Barreno (La Morita)	371.29
s5'b	La piedra – Lacayo	454.40
s5'c	Finca Cancy	373.97
Promedio		369.64

Fuente: Elaboración Propia

Estos resultados como los que se muestran en los apartados siguientes, están hechos en base a valores de promedios ponderados de los respectivos coeficientes y parámetros necesarios para la elaboración del balance hídrico de suelos. Estos previamente fueron asociados a su respectiva capa, las cuales fueron interceptadas para poder seleccionar los valores requeridos para cada miembro geológico. De manera que los resultados para algunas variables, específicamente el de escorrentía superficial, en algunos miembros geológicos aparentemente es despreciable ya que dentro del área de estudio poseen una extensión muy grande, lo cual no justifica que en dichas zonas las pendientes no generen valores de escorrentía superficial.

4.8.1 Miembro s2

El comportamiento del recurso hídrico sobre el miembro geológico s2, de la formación San Salvador, a nivel anual, se observa en la figura 17. En esta se puede notar que precipita un volumen aproximado de 77.22 Mm³, de esta 49.59 Mm³ (64.21%) se pierden por evapotranspiración real, 12.21 Mm³, (15.81%) se pierden por retención en el follaje y 15.43 Mm³ (19.98%) llegan a formar parte del acuífero, deduciendo así un enorme potencial para recargar al agua subterránea (anexo 26). La pérdida por escorrentía para este miembro es nula, este a su vez es similar al aducido por Acosta (2005) en la zona de la península de San Juan del Gozo, lo que indica que todo lo que precipita se evapora, evapotranspira o infiltra.

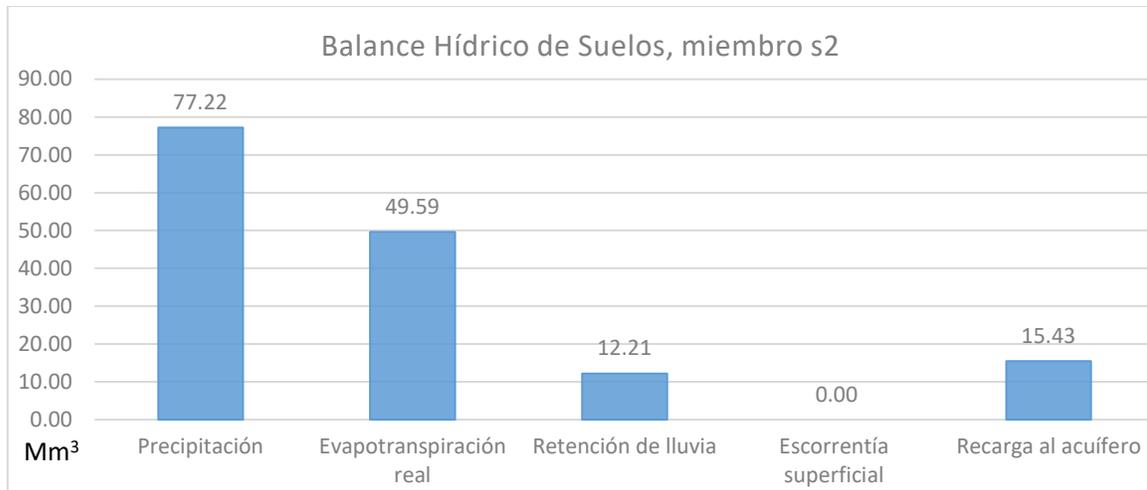


Figura 16. Comportamiento del Recurso hídrico, a nivel anual, para el miembro geológico s2, en unidades de Mm³.

4.8.2 Miembro s3'a

El comportamiento para el miembro geológico s3'a, de la formación San Salvador, a nivel anual, se observa en la figura 18. Observándose que precipita un volumen aproximado de 105.12 Mm³, de esta 69.33 Mm³ (65.96%) se pierde por evapotranspiración real, 14.28 Mm³ (13.58%) se pierden por retención en el follaje y 21.51 Mm³ (20.46%) llegan a formar parte del acuífero, deduciendo así un enorme potencial para recargar al agua subterránea (anexo 27). La pérdida por escorrentía para este miembro es nula.

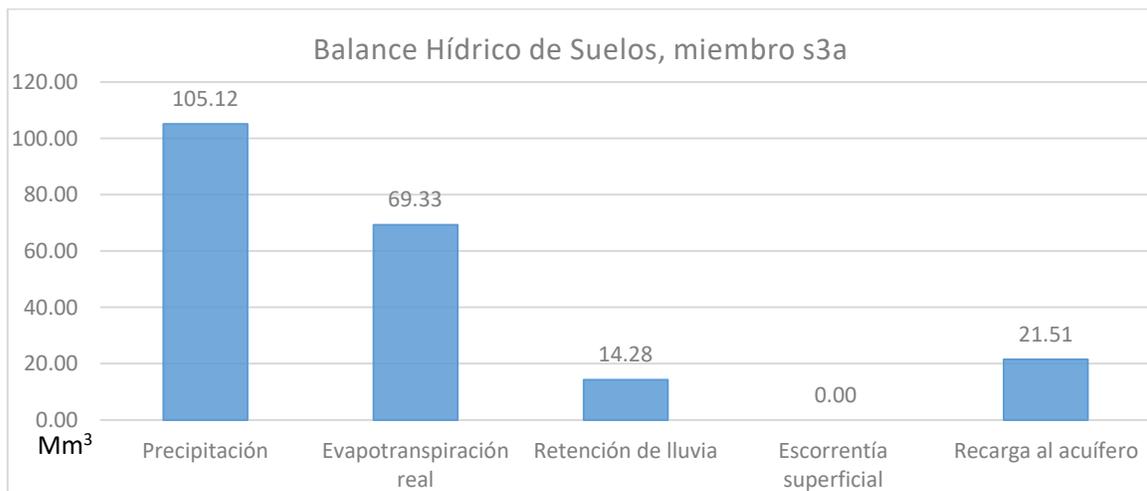


Figura 17. Comportamiento del Recurso hídrico, a nivel anual, para el miembro geológico s3'a, en unidades de Mm³.

4.8.3 Miembro s5'a

El comportamiento para el miembro geológico s5'a, de la formación San Salvador, a nivel anual, se observa en la figura 19. Observándose que precipita un volumen aproximado de 7.46 Mm³, de esta 4.68 Mm³ (63.04%) se pierde por evapotranspiración real, 1.05 Mm³ (14.11%) se pierden por retención en el follaje y 1.70 Mm³ (22.85%) llegan a formar parte del acuífero, deduciendo así un enorme potencial para recargar al agua subterránea (anexo 28). La perdida por escorrentía para este miembro es nula.

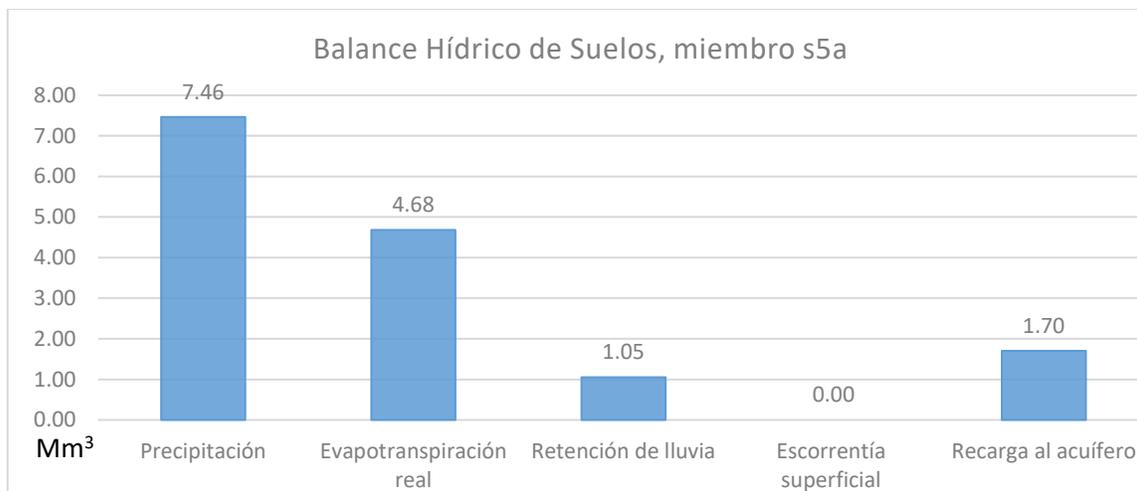


Figura 18. Comportamiento del Recurso hídrico, a nivel anual, para el miembro geológico s5'a, en unidades de Mm³.

4.8.4 Miembro s5'b

El comportamiento para el miembro geológico s5'b, de la formación San Salvador, a nivel anual, se observa en la figura 20. Observándose que precipita un volumen aproximado de 11.42 Mm³, de esta 6.55 Mm³ (57.37%) se pierde por evapotranspiración real, 1.69 Mm³ (14.86%) se pierden por retención en el follaje y 3.00 Mm³ (26.37%) llegan a formar parte del acuífero, deduciendo así un enorme potencial para recargar al agua subterránea (anexo 29). La perdida por escorrentía para este miembro es notable y equivale a 0.17 Mm³ (1.4%), debido a las características de la pendiente mencionadas en el apartado anterior.

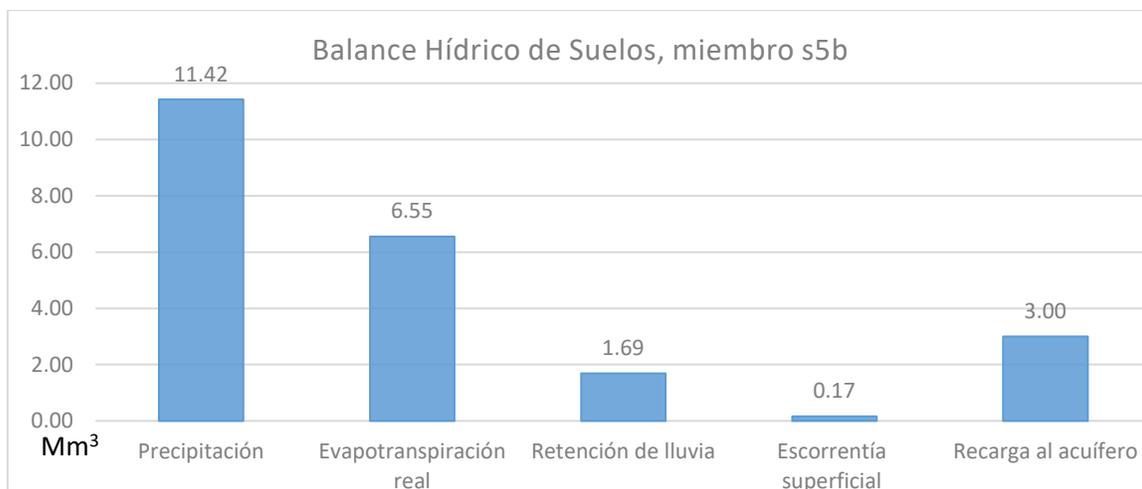


Figura 19. Comportamiento del Recurso hídrico, a nivel anual, para el miembro geológico s5'b, en unidades de Mm³.

4.8.5 Miembro s5'c

El comportamiento para el miembro geológico s5'c, de la formación San Salvador, a nivel anual, se observa en la figura 21. Observándose que precipita un volumen aproximado de 12.36 Mm³, de esta 7.49 Mm³ (60.60%) se pierde por evapotranspiración real, 2.25 Mm³ (18.20%) se pierden por retención en el follaje y 2.62 Mm³ (21.20%) llegan a formar parte del acuífero, deduciendo así un enorme potencial para recargar al agua subterránea (anexo 30). La pérdida por escorrentía para este miembro es nula.

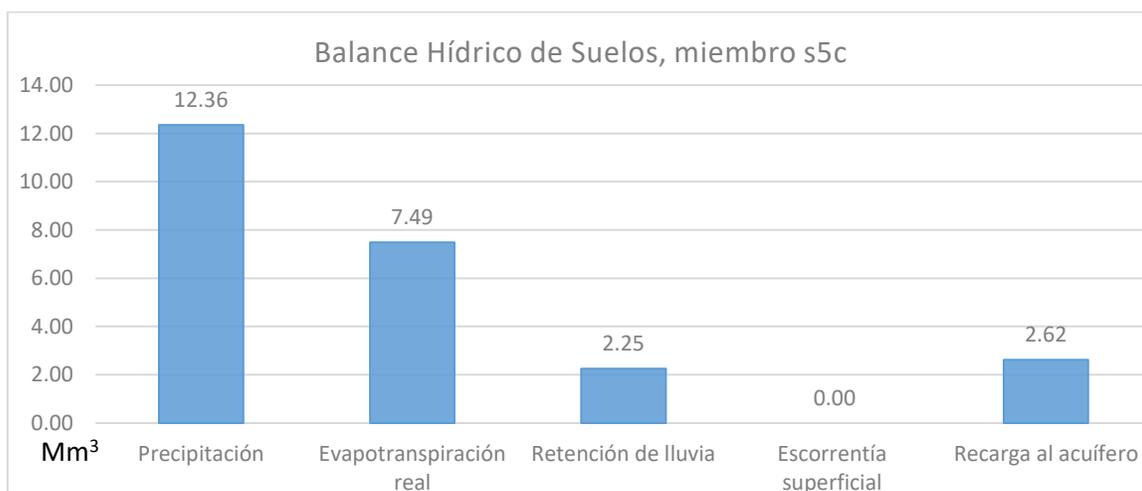


Figura 20. Comportamiento del Recurso hídrico, a nivel anual, para el miembro geológico s5'c, en unidades de Mm³.

Los resultados de la presente investigación en cuanto a recarga acuífera son congruentes a lo expresado por MARN (2015) mencionando que: La principal zona de recarga de los acuíferos identificados en la depresión central se localiza específicamente en las estructuras volcánicas de

San Salvador, Picacho, Santa Ana, San Vicente, Tecapa y San Miguel, en donde la fracturación y el carácter escoriáceo de los flujos de lava hacen posible que aproximadamente hasta el 25% de las precipitaciones que caen sobre dichas zonas infiltren.

4.9 Balance hídrico total y climatológico de la zona

Partiendo de los datos de precipitación para el periodo 2005 – 2014, a continuación, se muestra el resultado del balance hídrico de suelos promedio para la zona en estudio (figura 21). Se presenta un volumen de 213.58 Mm³ de agua que cae en forma de lluvia.

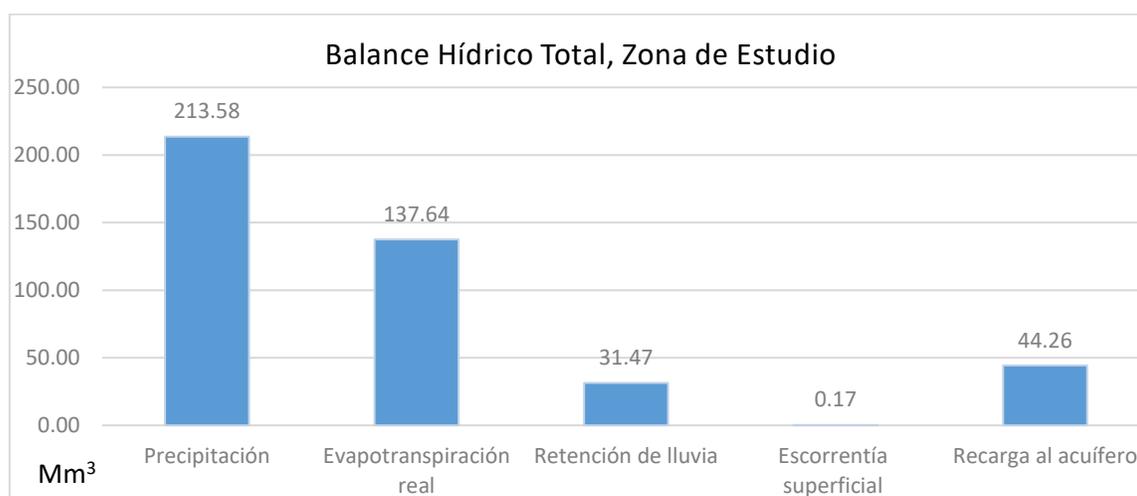


Figura 21. Balance hídrico de suelos promedio de la zona de estudio.

De manera general, el valor obtenido de recarga para la zona de estudio es eminente ya que representa el 20.72% de la precipitación, este resultado evidencia la presencia de agua subterránea en elevada cantidad. El 64.44% del agua precipitada se pierde por evapotranspiración y el 14.73% por retención de la lluvia, ambos a efectos de la cobertura vegetal y uso del suelo que se encuentra en la zona de estudio, el 0.08% se pierde por escorrentía superficial y no llega a formar parte del acuífero, quedando el 20.72% libre para formar parte de las aguas subterráneas. Se observa el valor de escorrentía de 0.17 Mm³ para la zona de estudio debido a que, según la caracterización de la textura del suelo y la infiltración básica, los miembros geológicos en análisis corresponden a la formación San Salvador compuesta principalmente según Baxter (1984) de cenizas, tobas de lapilli, acumulación de escorias y corrientes de lava intercaladas; evidenciando en la zona la predominancia de un 74% de arena en la textura del suelo. Comparando con el resultado de infiltración básica obtenida mediante pruebas de campo con anillos infiltrómetros, el suelo tiene una gran capacidad de infiltración asociado a su textura. De igual forma debe considerarse la influencia del fracturamiento de la

roca (fallas) que generan una porosidad secundaria (ANDA/COSUDE 2008) el cual aumenta el traslado del agua infiltrada a estratos inferiores.

En el gráfico de la figura 22 se muestra la precipitación, definida como la principal variable de la recarga del acuífero y la evapotranspiración como pérdida en el sistema hídrico. La precipitación total anual promedio es de 1664 mm. Observándose los meses que representan la época lluviosa con más de 200 mm por mes son: junio, agosto, septiembre y octubre; los meses más secos son: enero, febrero, marzo, abril y diciembre.

Evidenciándose la dinámica temporal de la precipitación en relación a la evapotranspiración real, se tiene que los momentos en los que se da la recarga hídrica al acuífero, es en los meses que la precipitación supera a la evapotranspiración real, siendo para la zona, los meses de mayo a octubre.

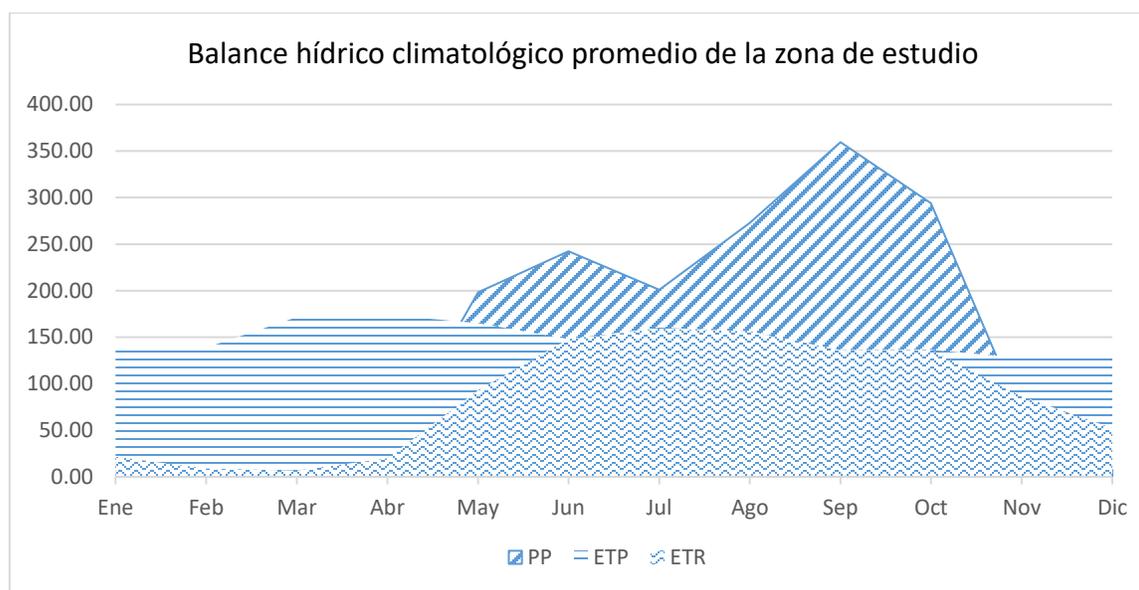


Figura 22. Balance hídrico climatológico promedio del Municipio de San Jorge, El Salvador.

4.10 Mapa de recarga potencial al acuífero

El resultado de la metodología SIG utilizada para la elaboración del mapa de recarga potencial en las diferentes áreas de recarga hídrica (figura 23 y anexo 31), nos muestra en una escala de colores la recarga potencial al acuífero en mm.

Como se puede observar los valores más altos de recarga potencial, que se encuentran en el rango de 450 a 553 mm anuales, se ubican en la cima del volcán Chaparrastique y sur este de la laguna seca el pacayal; estos resultados se corresponden con lo mencionado por Guevara *et al.* (2006) que señala que la recarga de los acuíferos más importantes del Cinturón Volcánico del

Pacífico, está relacionada a las cimas de los volcanes, compuesta por materiales lávicos y materiales balísticos gruesos (bombas y escorias), con o sin vegetación y con la incidencia de una de las mayores precipitaciones del país. MARN (2016) considera que estas áreas son de especial interés hidrogeológico por constituir zonas importantes de recarga acuífera con alto valor medioambiental y mantenimiento de gran cantidad de actividades socioeconómicas.

Comparando el resultado de la recarga potencial para la zona de estudio obtenido mediante esta investigación que es igual a 44.26 Mm^3 , con la capa del mapa de la Recarga de Agua Subterránea (anexo 32), elaborado por Junker (2005) equivalente a 36.05 Mm^3 , tenemos una diferencia de 8.21 Mm^3 , esto debido a que este último fue elaborado a escala 1:100000 y para su desarrollo se utilizan menos variables que el propuesto por Schosinsky.

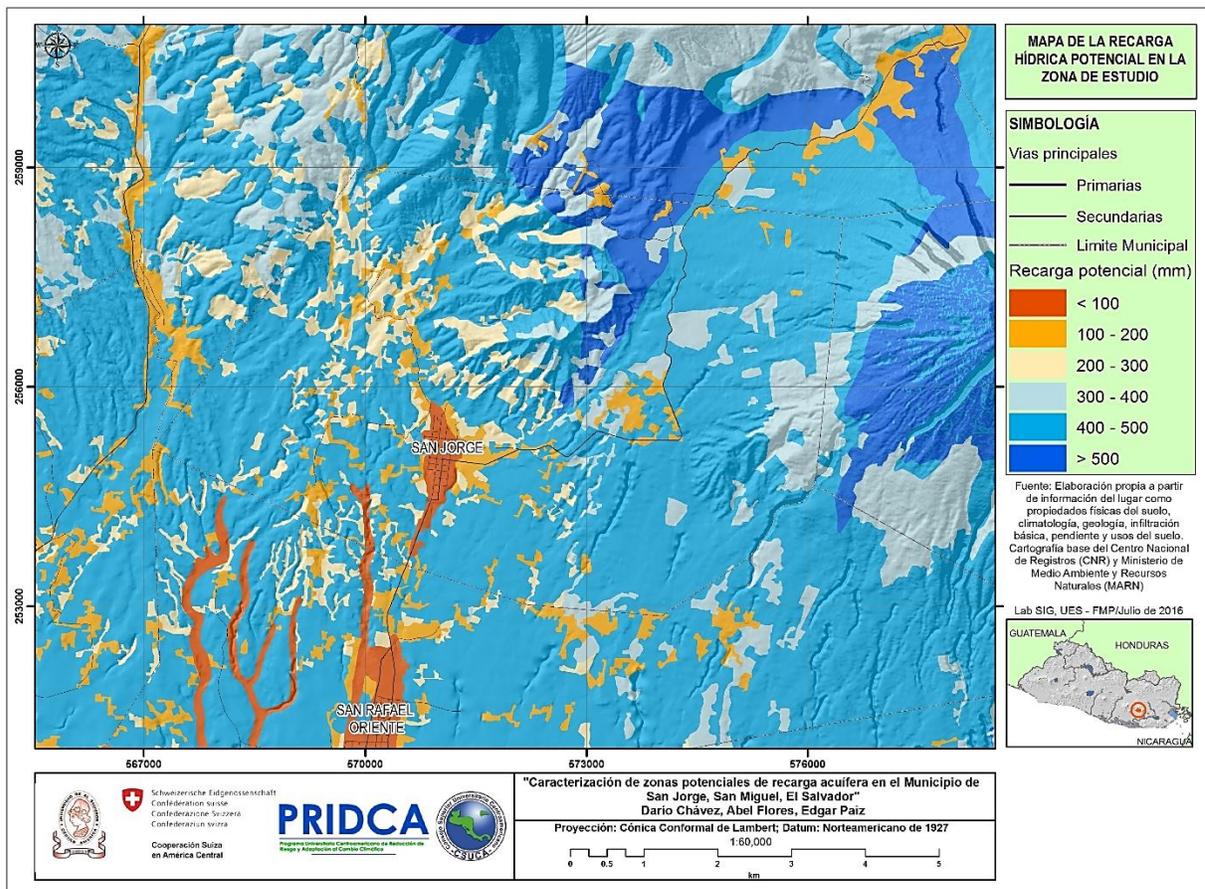


Fig. 23. Mapa de Recarga potencial (mm) de la zona de estudio (fuente: Elaboración propia).

4.11 Categorización de las zonas potenciales de recarga acuífera

En el siguiente cuadro se presenta la categorización de las zonas potenciales de recarga acuífera de la zona de estudio, según los resultados del balance hídrico de suelos desarrollado en SIG.

Cuadro 22. Categorización de las zonas de recarga potencial

Categoría	Recarga potencial			
	mm	%	Área (km ²)	%
Baja	≤ 200	8.48	10.18	7.70
Media	200 – 400	55.91	81.12	61.36
Alta	≥ 400	35.61	40.90	30.94
Total		100.00	132.20	100.0

Fuente: elaboración propia.

Se muestra que el 61.36% de la zona de estudio, pertenece a una recarga media, representando aproximadamente un 52% del volumen total de recarga. Las zonas de recarga acuífera alta representan un estimado de 18.36% del volumen total de recarga, y se distribuyen espacialmente (anexo 33) aproximadamente en el 31% del territorio en estudio.

V. CONCLUSIONES

- Al realizar los respectivos balances hídricos de suelos para cada miembro geológico, para una serie de datos históricos de precipitación de un periodo de 10 años, se concluye que la recarga al acuífero es de manera directa por precipitación. De esta manera en la zona de estudio la recarga anual alcanza los 44.26 Mm³, indicando la existencia de un buen potencial hacia la recarga del agua subterránea.
- La zona que presenta los resultados más favorables para la recarga según su balance hídrico es el miembro geológico s5b con 454.40 mm/año, el cual en la zona de estudio se encuentra distribuido espacialmente sobre el flanco sur-oeste del volcán Chaparrastique, siendo este mismo el que genera escorrentía superficial con valores de 25.24 mm/año, asociado a las pendientes que predominan dicha zona.
- En la zona alta se encuentran bosques principalmente de Café en distintos estratos y en diferentes rangos de pendientes, estos llegan a formar una capa considerable de materia orgánica, la que permite mejorar las condiciones físicas del suelo como son la textura y estructura que es muy importante para mejorar las características de permeabilidad; generando un efecto directo sobre la escorrentía superficial reduciéndola y aumentando la posibilidad que el agua infiltre hacia estratos inferiores, este efecto puede evidenciarse en el mapa de la recarga potencial de la zona de estudio.
- Al comparar el método de balance hídrico de suelos propuesto por Schosinsky (2006) con la metodología para el cálculo de la Recarga de Agua Subterránea propuesta por Junker (2005), obtenemos resultados, para el primero de 44.26 Mm³ y el segundo de 36.05 Mm³, concluyendo que los datos más confiables los tenemos para el primer método ya que este considera parámetros más específicos para las variables que se consideran dentro del balance hídrico de suelos.
- Las tecnologías SIG y el uso de cartografía de mayor detalle utilizada en esta investigación, como es el caso del mapa de cobertura y uso del suelo y el de pendientes, permitió obtener resultados de mejor detalle de la ubicación espacial de las zonas potenciales de recarga acuífera, por lo que esta investigación servirá como insumo de gran valor para la planificación y ordenamiento del territorio, en el ámbito local.

VI. RECOMENDACIONES

- Debido a que en el área de estudio más del 50% de la cobertura y uso del suelo es el Mosaico de cultivos y pastos, se debe fomentar un amplio Plan de Manejo del Suelo, específicamente en el área de conservación, de manera que se pueda aumentar el proceso de infiltración. Debe ser prioridad canalizar esfuerzos en esa área.
- Realizar investigación en cuanto a la cuantificación del uso y consumo del recurso hídrico de la población de la zona de estudio, para que puedan orientarse acciones con el fin de lograr un uso eficiente de este.
- Realizar investigación encaminada a generar lineamientos para la conservación del recurso suelo y agua, para proteger en el mediano y largo plazo estos elementos.
- Monitorear la dinámica de la cobertura del suelo, para detectar cambios que puedan generar un impacto en la recarga de los acuíferos.
- Dar prioridad al desarrollo de una agricultura que sea ecológicamente amigable al ambiente y potenciar el uso de productos biológicos y fertilizantes naturales.
- En el ámbito de subcuencas, debe hacerse monitoreo hidrometeorológico, con la finalidad de generar información local que permita un diseño y planificación con mayor confiabilidad de las acciones para el manejo de la subcuenca tanto superficial como subterránea.
- Se recomienda hacer un análisis de la intensidad y duración de la precipitación y no por régimen climático, para observar mejor el comportamiento en el tiempo de variables como la escorrentía superficial.

VII. BIBLIOGRAFIA

Acosta, JR. 2005. Evaluación de las características hidrogeoquímicas de la península San Juan del Gozo, Jiquilisco, Usulután, El Salvador. Tesis Mag. Sc. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, CR, UCR. 163 p.

IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, CO). 2013. Descripción y corrección de productos Landsat 8 (en línea). Consultado 13 nov. 2015. Disponible en <http://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>

Alcalá, G; Francisco, J. 2005. Recarga a los acuíferos españoles mediante balance hidroquímico (en línea). Tesis Ph.D. Barcelona, ES. Universidad Politécnica de Cataluña. Consultado 9 feb. 2016. Disponible en <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6240/01Fag01de04.pdf.txt;jsessionid=C383120ED1AF7F8339F3F6939E54C83E.tdx1?sequence=8>

AMSJ (Alcaldía Municipal de San Jorge, SV). 2014. Diagnóstico de la situación actual de los desechos sólidos en lo técnico, financiero y legal para el Municipio de San Jorge, Departamento de San Miguel. Ficha técnica. San Miguel, SV. 25 p.

_____. 2014. Programa de descontaminación de áreas críticas año 2014. San Jorge, SV. 23 p.

ANDA (Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados, SV), COSUDE (Cooperación Suiza en América Central). 2008. Mapa hidrogeológico de El Salvador (cuadrante B3 San Miguel).

Bateman, A. 2007. Hidrología básica y aplicada (en línea). Consultado 3 oct. 2015. Disponible en <https://www.upct.es/~minaees/hidrologia.pdf>

Baxter, S. 1984. Léxico estratigráfico de El Salvador. Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Rio Lempa (CEL). San Salvador, SV. 108 p.

Blanco, H. 2009. Identificación y manejo de las áreas de recarga hídrica en la parte media-alta de las microcuencas Palo, Marin y San Rafaelito San Carlos Costa Rica (en línea). Consultado 3 nov. 2015. Disponible en <http://www.uned.ac.cr/ecologiaurbana/wp-content/uploads/2013/01/Tesis-Harol-Blanco.pdf>

Breña AF; Jacobo MA. 2006. Principios y fundamentos de la hidrología superficial (en línea). Universidad Autónoma Metropolitana. Consultado 15 may. 2016. Disponible en http://www.uamenlinea.uam.mx/materiales/licenciatura/hidrologia/principios_fundamentos/libro-PFHS-05.pdf

Cahuana, AA; Yugar WM. 2009. Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología civ-233 (en línea). Consultado 10 feb. 2015. Disponible en <https://es.scribd.com/doc/103909115/Hidrologia-Univ-Mayor-San-Simon-Bolivia>

Chow, VT; Maidment, DR; Mays, LW. 1994. Hidrología aplicada. Trad. JG Saldarriaga. McGraw-Hill Interamericana, Santafé de Bogotá, CO. 584 p.

Chuvieco, E. 2008. Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio. Ariel. 3 ed. Barcelona, ES. 595 p.

CNR (Centro Nacional de Registros). s.f. Monografía San Miguel: San Miguel Monografía Departamental y sus Municipios. San Salvador, SV. Instituto Geográfico y del Catastro Nacional. 148 p.

Collazo, MP; Montaña, J. 2012. Manual de agua subterránea (en línea). Consultado 7 feb. 2016. Disponible en <http://www.cebra.com.uy/presponsable/adjuntos/2012/11/Manual-de-agua-subterranea-bajo.pdf><http://ing.unne.edu.ar/pub/infi.pdf>

Conu, J. 2014. Determinación de textura de suelos por el método de Bouyoucos (en línea). Consultado 10 dic. 2015. Disponible en <http://www.academia.edu/9677695/DETERMINACION%20DE%20TEXTURA%20POR%20EL%20METODO%20DE%20BOUYOUCOS>

Custodio, E; Llamas, MR; Sahuquillo, A. 2013. La investigación hidrogeológica española en el contexto mundial (en línea). Consultado 19 mar. 2016. Disponible en: <http://www.fundacionbotin.org/observatorio-contenidos/otros-libros.html>

Eastman, JR. 2012. Idirisi selva: Guía para SIG y procesamiento de imágenes (manual versión 17). Trad. L Mosca. Córdoba, AR. 321 p.

Fattorelli, S; Fernández, C. 2011. Diseño hidrológico (en línea). Consultado 10 dic. 2015. Disponible en http://www.ina.gov.ar/pdf/Libro_diseno_hidrologico_edicion_digital.pdf

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, IT). 2006. Evapotranspiración de cultivo-Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Consultado 25 jun. 2016. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-x0490s.pdf>

Flores, L; Alcalá, J. 2010. Manual de procedimientos analíticos: laboratorio de física de suelos (en línea). Consultado 19 sep. 2015. Disponible en <http://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL%20DEL%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20DE%20SUELOS1.pdf>

Fuentes, JL. s.f. Aguas subterráneas (en línea). Consultado 22 dic. 2015. Disponible en http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1992_01.pdf

GM (Geólogos del Mundo). s.f. Caracterización de amenazas geológicas en la ladera sur-occidental del volcán Chaparrastique. San Salvador, SV. 102 p.

Gómez, *et al.* 2004. Conductividad hidráulica saturada de campo: uso de un infiltrometro de carga constante y anillo sencillo (en línea). Consultado 12 ago. 2016. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/573/57313051001.pdf>

González, M. 2007. Hidrómetro base teórica para su empleo en la determinación de la distribución del tamaño de partículas de suelo (en línea). Consultado 4 nov. 2015. Disponible en <http://www.redalyc.org/pdf/932/93216305.pdf>

González, LI de; Ferrer, M; Ortuño, L; Oteo, C. 2002. Ingeniería geológica. Pearson Educación. Madrid, ES. 744 p.

Goyal, MR; Ramírez, VH. s.f. Elementos de Agroclimatología (en línea). Corporación Universitaria Santa Rosa de Cabal. Consultado 19 de jun. 2016. Disponible en http://ece.uprm.edu/~m_goyal/agroclimatologia.pdf

Guevara M; Hernández W; Rivas C; Márquez E. 2006. Estado de las aguas subterráneas en El Salvador (en línea). Consultado 25 ago. 2016. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1710872>

Gutiérrez, NL. 2012. Metodología para el cálculo de la humedad del suelo usando parámetros topográficos (MDE), climáticos y edáficos de un sector del piedemonte depositacional del municipio de Villavicencio. MSc. Tesis. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía. Bogotá, CO. 145 p.

- Guzmán, A; Díaz, A. 2007. Identificación de las áreas de recarga acuífera y zonas de protección de los manantiales del cantón Central de Cartago, Costa Rica (en línea). Consultado 22 ene. 2016. Disponible en www.cientec.or.cr/exploraciones/ponencias2007/AnaGuzman-ArnulfoDiaz.pdf
- Heuveldop, J; Pardo, J; Quirós, S; Espinoza, L. 1986. Agroclimatología tropical (en línea). EUNED. San José, CR. Consultado 7 may. 2016. Disponible en <https://books.google.com/books?id=DD05AfVeRs0C>
- IGN (Instituto Geográfico Nacional “Ingeniero Pablo Arnoldo Guzmán”, SV). s.f. Cuadrantes topográficos de El Salvador, Hoja 2556 III NE Volcán San Miguel. San Salvador, SV. Esc. 1:25,000. Color.
- _____. 1990. Cuadrantes topográficos de El Salvador, Hoja 2556 III SE El Tránsito, Hoja 2556 III SW Usulután. San Salvador, SV. Esc. 1:25,000. Color.
- _____. 1994. Cuadrantes topográficos de El Salvador, Hoja 2556 III NW Santiago de María. San Salvador, SV. Esc. 1:25,000. Color.
- INAB (Instituto Nacional de Bosques). 2011. Mapa de cobertura forestal de Guatemala 2006 y Dinámica de la cobertura forestal 2001-2006. Guatemala, GT. 99 p.
- Jáuregui, L. s.f. Introducción a la Topografía (en línea). Consultado 9 ene. 2016. Disponible en http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/iluis/publicaciones/Topograf%EDa/TEMA_1.pdf
- Jiménez, F. 2006. Balance Hídrico SAF 2005. Turrialba, CR. CATIE. 12 p.
- Junker, M. 2005. Metodología RAS para determinar la recarga de agua subterránea. San Salvador, SV. FORGAES. 40 p.
- Ledesma, M. 2000. Climatología y Meteorología Agrícola. Thomson Editores. Navarcarnero. Madrid, ES. 451 p.
- Leiva, N. 2012. Metodología para el cálculo de la humedad del suelo usando parámetros topográficos (MDE), climáticos y edáficos en un sector del piedemonte depositacional del municipio de Villavicencio. Bogotá, CO. 129 p.
- Losilla, M; Rodríguez, H; Schosinsky G; Stimson, J. 1998. Los acuíferos volcánicos y el desarrollo sostenible en Centroamérica (informe preliminar). San José, CR. 172 p.

MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería, SV). 1965. Levantamiento general de suelos, Hojas 2556 I, II III y IV. San Salvador, SV. Esc. 1:50000. Color.

MARN. (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, ES). 2007. Geología de El Salvador (en línea). Consultado 4 feb. 2016. Disponible en <http://www.snet.gob.sv/ver/geologia/geologia+de+el+salvador/>

_____. 2014. Diagnóstico de la situación actual del recurso hídrico (en línea). Consultado 28 mar. 2015. Disponible en <http://www.marn.gob.sv/marn-presenta-diagnostico-de-la-situacion-actual-del-recurso-hidrico/>

_____. 2015. Elaboración del plan nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico de El Salvador, con énfasis en Zonas Prioritarias: Producto N.º5. Inventario de aguas superficiales y subterráneas. San Salvador, SV. 230 p.

_____. 2016. Plan nacional de gestión integrada del recurso hídrico de El Salvador, con énfasis en zonas prioritarias; versión preliminar abril 2016. San Salvador, SV. 305 p.

Martínez, PE; Martínez, P; Castaño, S. 2005. Fundamentos de hidrogeología (en línea). Ediciones Mundi-Prensa. Consultado 27 ene. 2016. Disponible en <https://books.google.com.sv/books?isbn=8484762394>

Matus, O; Faustino, J; Jiménez, F. 2009. Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica: Aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua (en línea). Consultado 27 abr. 2015. Disponible en <http://biblioteca.catie.ac.cr/cursocuenca/documentos/SerieTecnicaCuenca/>

[Matus et al 2009 Guia para la identificacion participativa de zonas con potencial de recarga hidrica Aplicacion practica en la subcuenca del rio Jucuapa Nicaragua.pdf](#)

Medina, CE. 2009. Modelos numéricos y teledetección en el lago Izabal, Guatemala. Ph.D. Tesis. Cádiz, Universidad de Cádiz. 294 p.

Mendoza, M. 2005. “Propuesta de Implementación de un Sistema de Gestión Medioambiental para la Industria de Añil en El Salvador” (en línea). Consultado 3 sep. 2015. Disponible en http://ri.ues.edu.sv/2180/1/Propuesta_de_implementaci%C3%B3n_de_un_sistema_de_gestin_medioambiental_para_la_industria_de_a%C3%B1il_en_El_Salvador.pdf

- Morell, Ignacio. 2008. Curso de recursos hídricos (en línea). Valencia, ES. Consultado 17 dic. 2015. Disponible en www.agua.uji.es
- Nina, JJ. 2015. Cambios de la cobertura del suelo en la reserva nacional Salinas y Agua blanca – Arequipa, Moquegua – Perú, en relación a la variación de la temperatura y precipitación, durante el periodo 1986 – 2010 (en línea). Tesis Lic. Consultado 7 mar. 2016. Disponible en: <http://bit.ly/2iv0bW5>
- Noriega, JP. 2005. Determinación de las áreas principales de recarga hídrica natural en la microcuenca del río Sibaca, Chinique, Quiche (en línea). Tesis Lic. Ing. Consultado 2 feb. 2016. Disponible en http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/01/01_2211.pdf
- Núñez Woitschach, R. 1995. Estudio hidrogeológico del área del Municipio de San Jorge, Departamento de San Miguel. San Salvador, SV. 14 p.
- Ordoñez, JJ. 2011a. Cartilla técnica: ciclo hidrológico (en línea). Lima, PE. Consultado 17 jul. 2015. Disponible en http://www.gwp.org/Global/GWP-SAM_Files/Publicaciones/Varios/Ciclo_Hidrologico.pdf
- _____. 2011b. Cartilla técnica: aguas subterráneas - acuíferos (en línea). Lima, PE. Consultado 17 jul. 2015. Disponible en http://www.gwp.org/Global/GWP-SAM_Files/Publicaciones/Varios/Aguas_Subterranas.pdf
- Plaster, EJ. 2000. La ciencia del suelo y su manejo. Trad. P Scott. Madrid, ES. Paraninfo. 405 p.
- Pulido, A. 2014. Nociones de hidrogeología para ambientólogos. Universidad de Almería, ES. 500 p.
- Rodríguez, M; Pérez, P. 2014. Determinación de la recarga hídrica potencial en la cuenca hidrográfica guara, de Cuba (en línea). Consultado 14 dic. 2015. Disponible en http://www.unesco.org/uy/phi/aqualac/fileadmin/phi/aqualac/Numero_6_vol_2/06_Determinacion_de_la_recarga_hidrica_potencial_en_la_cuenca.pdf
- Samper, J. 1997. Evaluación de las extracciones de agua subterránea mediante balances hídricos (en línea). Disponible en http://www.igme.es/igme/publica/libros2_TH/art2/pdf/evaluacio3.pdf
- Sanchez, J. 2001. Evapotranspiración (en línea). Consultado 7 dic. 2015. Disponible en <https://fjerrer.webs.ull.es/Bibliog/Biblio/Evapotranspiracion.pdf>

Schosinsky, G; Losilla M. 2000. Modelo analítico para determinar la infiltración con base en lluvia mensual (en línea). Revista Geológica de América Central. Consultado 20 mar. 2015. Disponible en <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/geologica/article/download/8579/8102>

_____. 2006. Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos (en línea). Revista Geológica de América Central. Consultado 23 mar. 2015. Disponible en <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/geologica/article/download/8579/8102>

Schomwandt, D. 2015. Teledetección aplicada a las ciencias agronómicas y naturales. Buenos Aires, AR. 74 p.

SI (Solidaridad Internacional); ISF-Finlandia; OIKOS solidaridad; UCA (Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas). 2004. Rehabilitación y manejo de las subcuencas El Tránsito y de la vertiente sur del volcán Chaparrastique. San Salvador, SV. 211 p.

SNET (Servicio Nacional de Estudios Territoriales, SV). 2002. Diagnóstico e inventario de la susceptibilidad a las inestabilidades gravitatorias en las áreas afectadas por los terremotos del 2001 en el volcán de Usulután. San Salvador, SV. 181 p.

_____. 2005. Balance hídrico integrado y dinámico en El Salvador (en línea). Consultado 10 feb. 2016. Disponible en www.snet.gob.sv/Documentos/balanceHidrico.pdf

SNM (Servicio Nacional de Meteorología, USA). 2008. El ciclo hidrológico (en línea). Región Sur, USA. Consultado 17 jul. 2015. Disponible en http://www.srh.noaa.gov/srh/jetstream_sp/atmos/hidro.htm

Sobieraj, *et al.* 2003. Dependencia de escala en patrones espaciales de conductividad hidráulica saturada (en línea). Consultado 12 ago. 2016. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/222407064_Scale_dependency_in_spatial_patterns_of_saturated_hydraulic_conductivity

Tejada, JM. 1998. Programa para el análisis de la infiltración del agua en el suelo (Hoja de cálculo). Universidad de El Salvador.

_____. 2012. Programa para el cálculo de la conductividad hidráulica “Kfs” utilizando el permeámetro de Guelph (Hoja de cálculo). Universidad de El Salvador.

Trillas, 2006. Manuales para educación agropecuaria: Riego y drenaje. México, D.F. 83 p.

UNAD (Universidad Nacional Abierta y a Distancia, CO). s.f. Tasa de infiltración de agua en el suelo (en línea). Consultado 9 dic. 2015. Disponible en http://datateca.unad.edu.co/contenidos/30160/leccin_28_tasa_de_infiltracin_de_agua_en_el_suelo.html

UPRA (Unidad de Planificación Rural Agropecuaria, CO). 2014. Consolidación de la metodología de evaluación de tierras para zonificación con fines agropecuarios a escala semidetallada (1:25000). Bogotá, CO. 189 p.

USGS (U.S. Geological Survey). 2015. Imagen Landsat 8 (en línea). Consultada el 25 de junio de 2015. Disponible en: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Valverde, JC. 1998. Riego y drenaje. EUNED. San José, CR. 244 p.

Vélez, MV; Vásquez, LM. s.f. Métodos para determinar la recarga en acuíferos (en línea). Consultado 9 nov. 2015. Disponible en <http://www.bdigital.unal.edu.co/4442/1/EA3760.pdf>

_____. 1999. Hidráulica de aguas subterráneas. 2 ed. UNAL. Medellín, CO. 156 p.

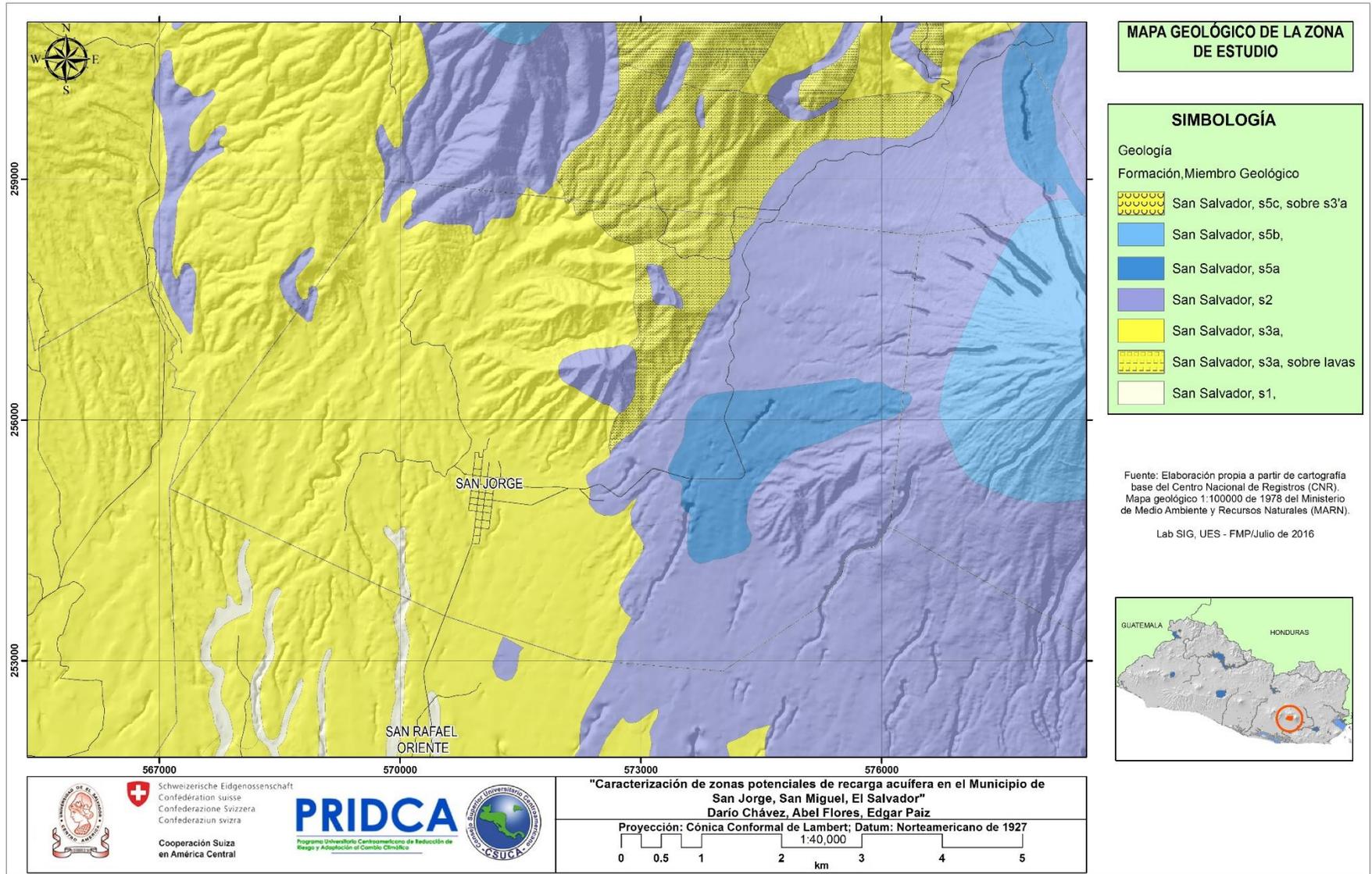
Villón, M. 2002. Hidrología (en línea). Instituto Tecnológico de Costa Rica. Consultado 11 feb. 2016. Disponible en <http://civilgeeks.com/2014/08/31/libro-de-hidrologia-maximo-villon/>

Weber, H; Wiesemann, G. 1978. Mapa Geológico de la República de El Salvador. Mapeo Geológico por la Misión Geológica Alemana en El Salvador en colaboración con el Centro de Investigaciones Geotécnicas (1967-1971). Hannover, El Salvador. Esc. 1:100,000. Color

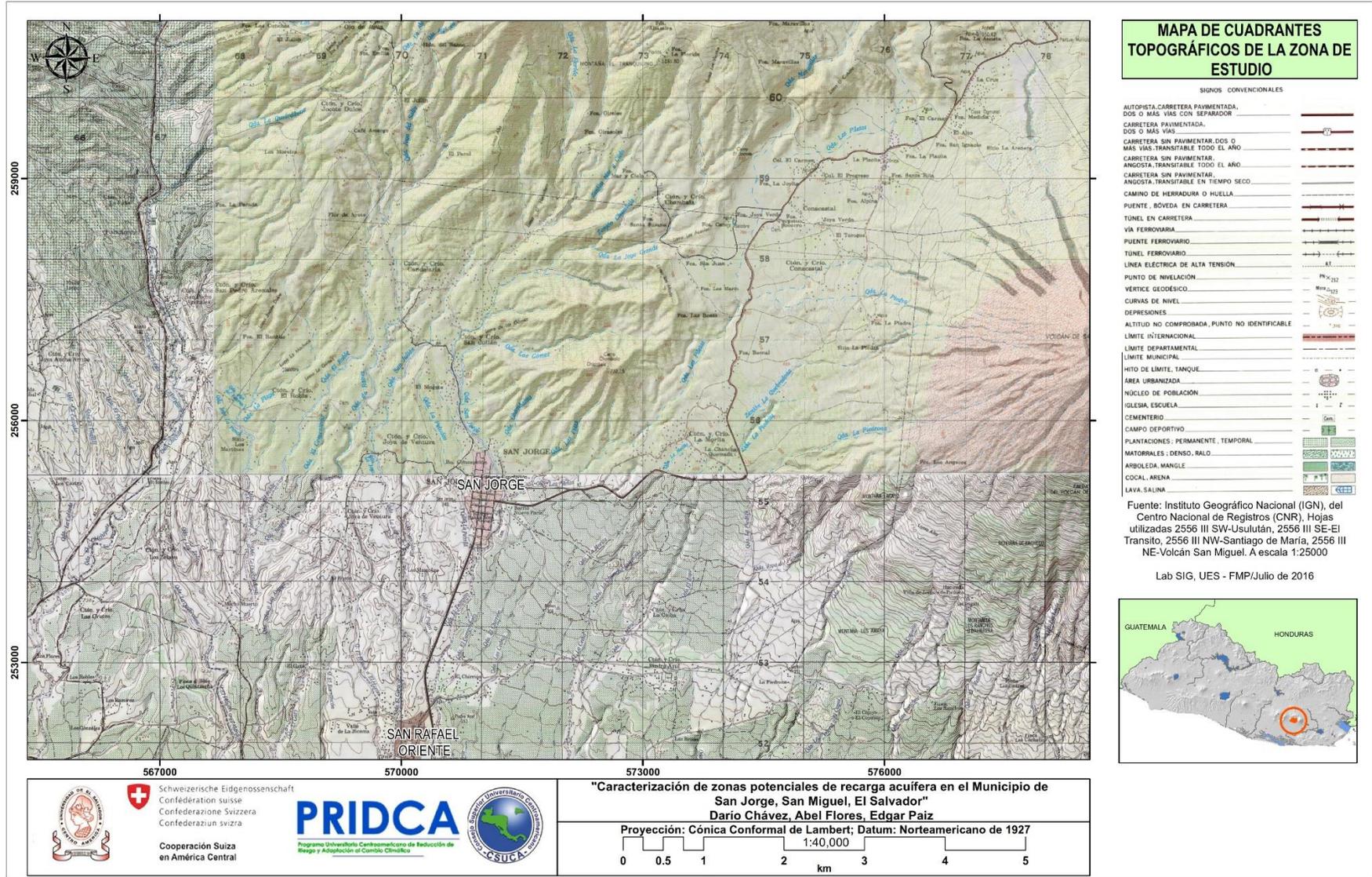
Wicander, R; Monroe, JS. 1999. Fundamentos de Geología. Eds. International Thomson. Trad. E Palos. 2 ed. México. 440 p.

VIII. ANEXOS

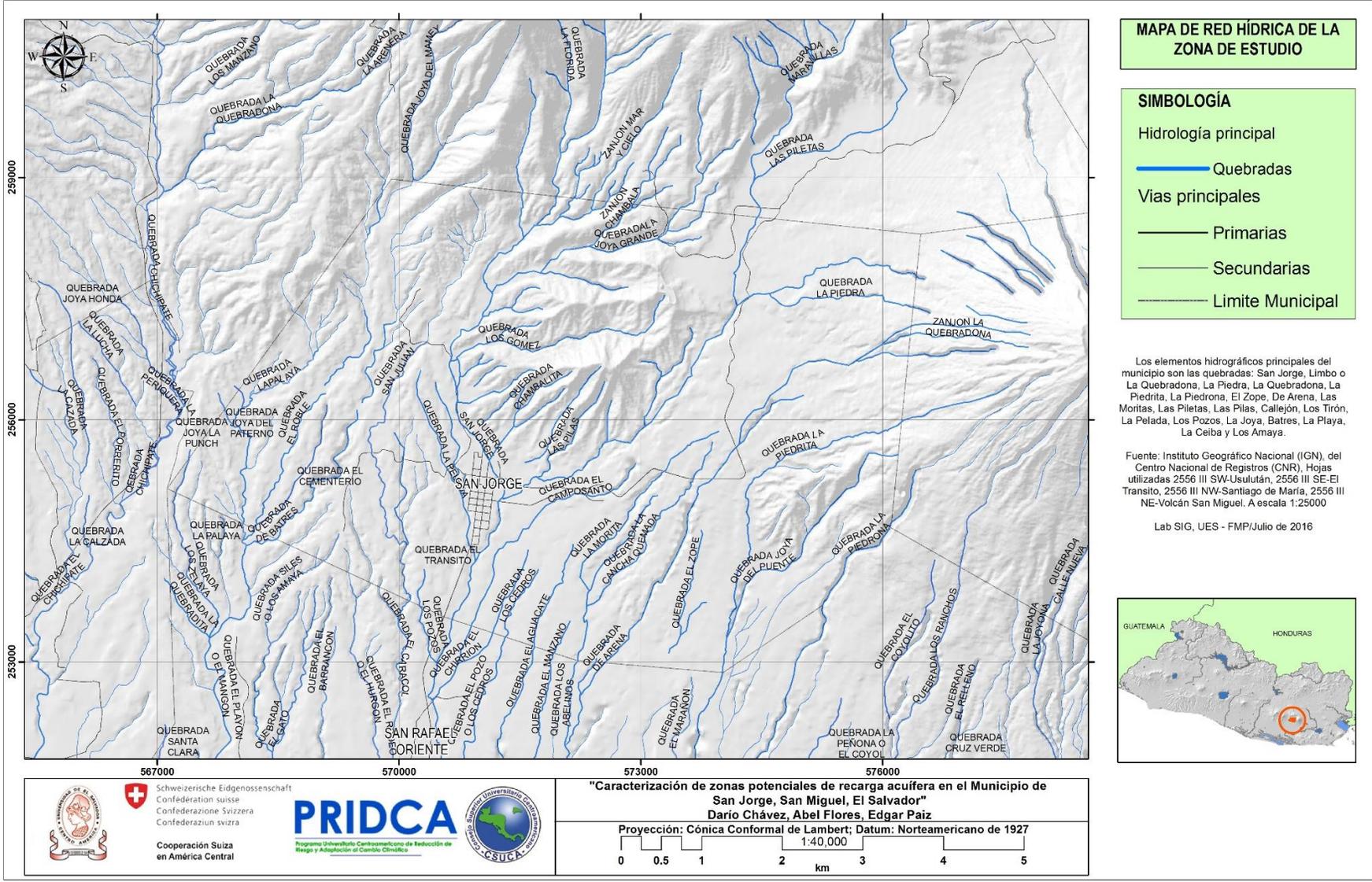
Anexo 1: Mapa geológico de la zona de estudio



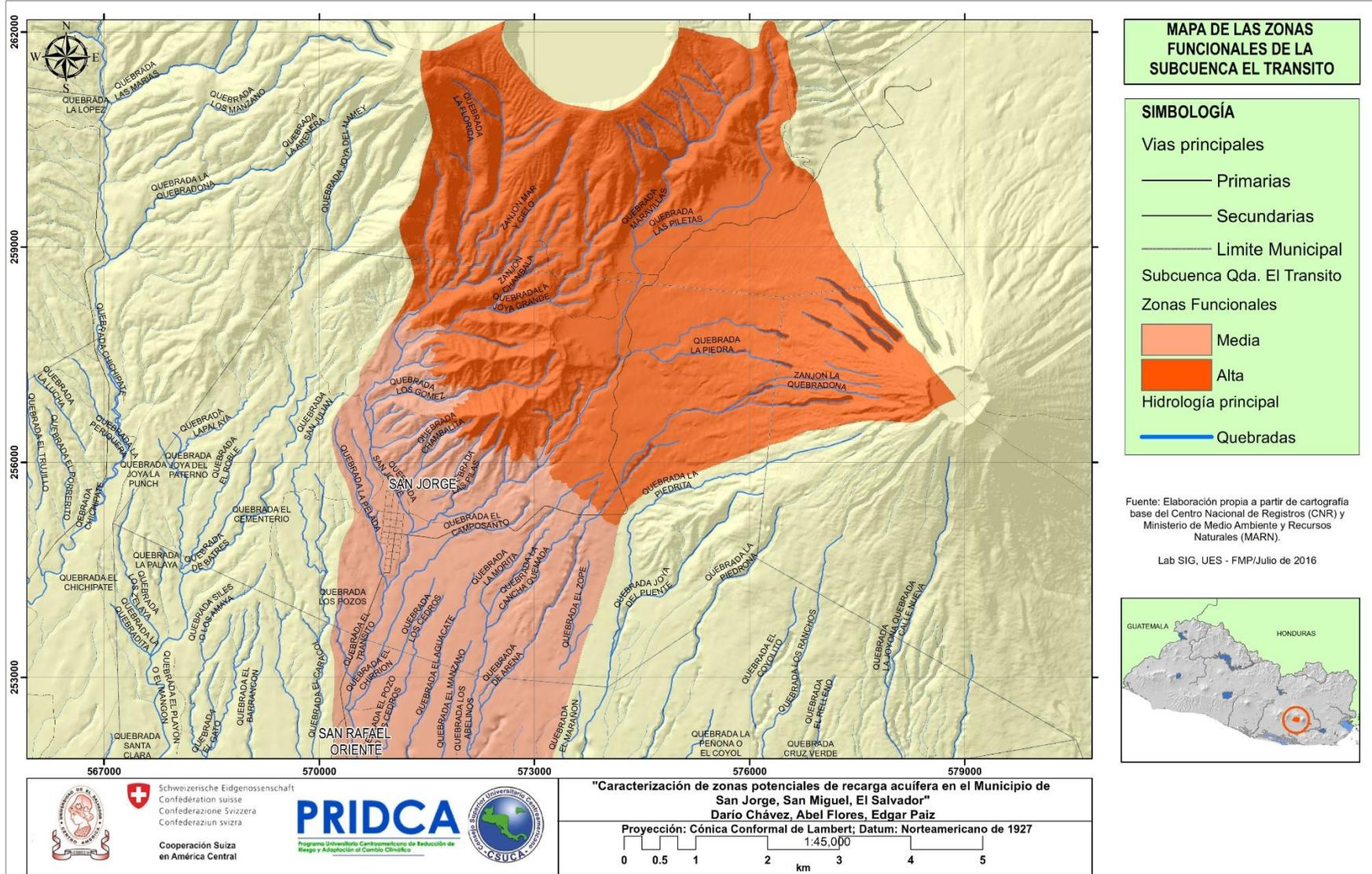
Anexo 2: Mapa de cuadrantes topográficos



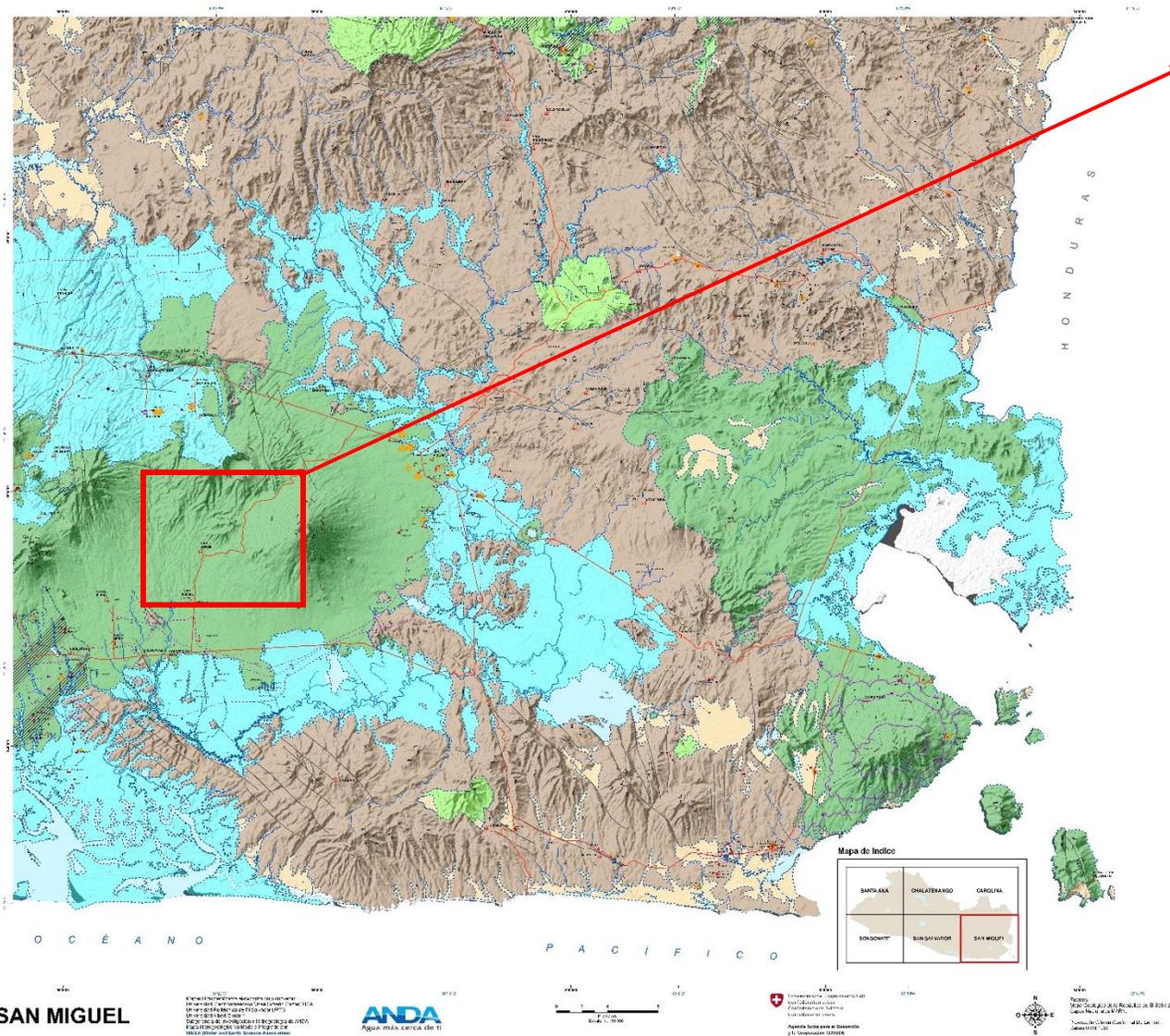
Anexo 3: Mapa de red hídrica



Anexo 4: Mapa de subcuenca El Tránsito



Anexo 5. Mapa hidrogeológico de la zona de estudio (con base a cuadrante B3 San Miguel) (Fuente: ANDA/COSUDE 2008)



Unidad Acuífero Volcánico Fisurado de Gran Extensión y Posiblemente Alta Producción

Esta unidad la constituyen, principalmente, rocas volcánicas de carácter andesítico y basáltico, con ciertas intercalaciones de materiales piroclásticos. Entre las rocas volcánicas se pueden distinguir flujos y coladas de lavas que provienen de los centros de erupción volcánica. Dichos materiales pueden presentar conductividades hidráulicas de medianas a altas como consecuencia de su porosidad secundaria (fallamiento existente).

SAN MIGUEL

Proyecto de Investigación y Desarrollo Científico y Tecnológico
 del Sistema de Agua Potable de San Miguel
 (SAPASMI) - Fase II (2007-2008)
 Elaborado por el Centro de Estudios Científicos y Tecnológicos
 del Sistema de Agua Potable de San Miguel (CECTASMI)

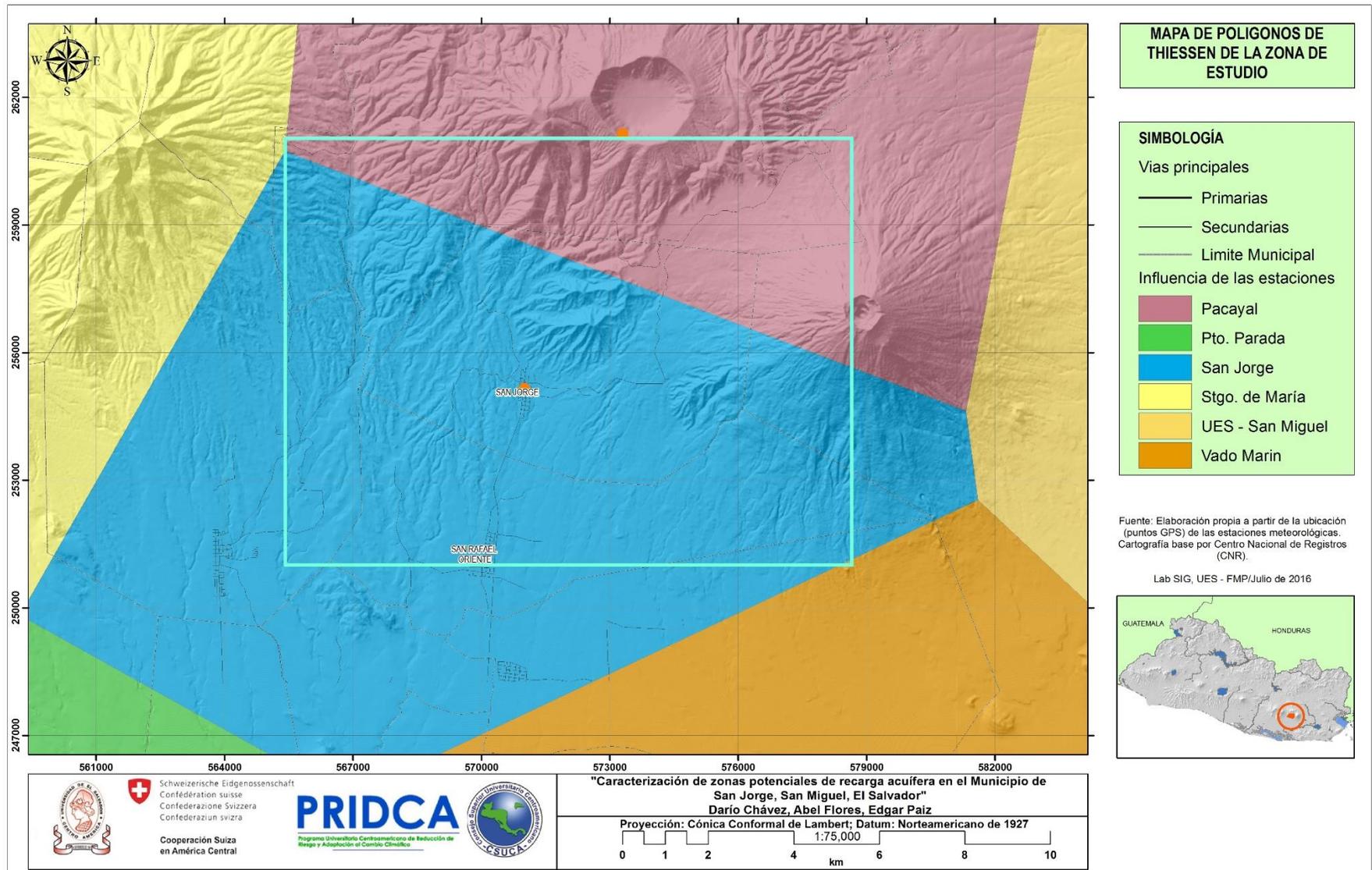
ANDA
 Agua más cerca de ti

Escala: 1:50,000

Agencia Intersectorial de Desarrollo
 Urbano y Territorial
 21, Avenida Juan Pablo II

Proyecto de Investigación y Desarrollo Científico y Tecnológico
 del Sistema de Agua Potable de San Miguel
 (SAPASMI) - Fase II (2007-2008)
 Elaborado por el Centro de Estudios Científicos y Tecnológicos
 del Sistema de Agua Potable de San Miguel (CECTASMI)

Anexo 6. Mapa de polígonos de Thiessen



Anexo 7. Precipitación ponderada por miembro geológico

MES/MIEMBRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
s2	0.44	1.05	8.33	25.51	188.17	237.82	187.41	269.11	349.43	294.47	63.49	5.51	1630.75
s3a	0.48	0.43	8.63	22.68	177.23	232.93	172.31	265.25	338.22	295.03	60.46	3.35	1576.98
s5a	0.45	0.97	8.37	25.15	186.77	237.19	185.48	268.61	347.99	294.54	63.10	5.24	1623.88
s5b	0.39	2.15	7.81	30.49	207.41	246.43	213.97	275.89	369.13	293.49	68.81	9.33	1725.30
s5c	0.36	2.58	7.61	32.45	215.00	249.82	224.44	278.57	376.90	293.11	70.91	10.83	1762.58

Anexo 8. Evapotranspiración potencial ponderada por miembro geológico

MES/MIEMBRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
s2	139.68	142.65	175.69	178.43	169.67	151.87	163.61	159.20	139.27	139.36	130.98	131.75	1822.17
s3a	143.69	146.78	180.35	183.34	174.69	156.05	167.40	162.71	142.84	142.87	134.65	135.73	1871.10
s5a	140.19	143.18	176.28	179.06	170.31	152.40	164.09	159.65	139.73	139.81	131.45	132.26	1828.42
s5b	132.62	135.38	167.50	169.79	160.85	144.52	156.94	153.04	133.00	133.20	124.52	124.75	1736.11
s5c	129.84	132.52	164.27	166.38	157.37	141.62	154.32	150.61	130.53	130.77	121.98	121.99	1702.19

Anexo 9: Guía método de Bouyoucos.

Textura de suelos

Se tomaron muestras de suelo en los diferentes miembros geológicos de la zona de estudio, debido a que la Facultad no disponía en ese momento del Muestreador de Hulland, que era el método que se tenía previsto utilizar, se simuló dicho equipo con cilindro de PVC, de dimensiones conocidas para extraer las muestras, ya que lo importante era extraerlas con buena conformación y mayor confiabilidad para evitar una pérdida de peso, dicha muestra se analizaron en el Laboratorio de Química Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador. El objetivo de este tipo de análisis es contar con los datos la textura de suelo presente en cada miembro, siendo necesario para el desarrollo del balance hídrico y para el cálculo de la recarga acuífera, el procedimiento se describe a continuación.

Recolección de muestras del suelo en el área de estudio

➤ Limpiar en área donde se sacará la muestra, colocar el cilindro de PVC en posición vertical para extraer la muestra de suelo, teniendo el cuidado de introducir de forma uniforme hasta dejar el borde a la superficie del suelo, se debe realizar una limpieza en el contorno del cilindro, y con ayuda de una pala y un cepillo metálico en forma de brocha para no forzar el retiro del mismo.



Fig. 1: Limpieza e introducción del cilindro.

- Retirar el cilindro y la muestra, con la ayuda de una navaja para cortar parte sobrante de suelo que sale del cilindro en el extremo inferior.



Fig. 2: Eliminación de porción sobrante de la muestra.

- Identificar el sitio de muestreo junto con la muestra y depositar en bolsas plásticas limpias, luego trasladarlas hasta el laboratorio. Se debe repetir esta práctica por cada punto de muestreo



Fig. 3: Extracción de las muestras identificadas y colocación en sus respectivos depósitos.

Proceso en el laboratorio.

Habiendo obtenido las muestras de suelo de cada miembro geológico de la zona de estudio, se procedió al análisis en el laboratorio.

- Calibrar la balanza semi-analítica para proceder a realizar los respectivos pesos de cada muestra obteniendo resultados del suelo húmedo.



Fig. 4: Calibración de balanza a utilizar.

- Pesar una cantidad de cada muestra y registrar cada una de ellas antes de pesar la muestra conocida.



Fig.5: Pesado de una porción de cada muestra.

- Colocar en bandejas de aluminio y dejar en reposo durante 24 horas en estufa a temperatura de 105 °C.



Fig.6: colocación en bandejas e introducción de las muestras a la estufa.

- Pesar cada muestra en balanza semi-analítica y registrar los datos en hoja de cálculo, después de secado en la estufa.



Fig. 7: Retiro de las muestras de la estufa y pesado de cada una después de secado.

Análisis de las muestras mediante el método del hidrómetro (Bouyoucos)

Este método consiste en determinar la cantidad de sólidos en suspensión, la densidad de la suspensión se mide por medio de un hidrómetro especial calibrado a 20°C para medir directamente g/L. (Conu 2014).

La densidad de una suspensión de suelo, a una profundidad determinada disminuye a medida que las partículas se asientan y su valor a diferentes tiempos está relacionado empíricamente al tamaño de las partículas, con este principio y por selección de tiempo, las lecturas de densidad pueden ser la medida de los contenidos de arcilla más limo o solamente arcilla, durante la sedimentación de partículas en el medio viscoso (aceite, agua, aire) la velocidad de la caída de las partículas depende de la resistencia ofrecida por el medio dispersado, para partículas pequeñas esta resistencia depende especialmente de la viscosidad del líquido (González 2007). En partículas grandes la resistencia parece estar controlada por el impacto de las partículas cayendo sobre las moléculas del fluido. Las partículas pequeñas (menores de 2mm.) se mueven a través del agua con velocidades dadas de acuerdo a la ley propuesta por Stoke, la cual expresa “que las partículas del suelo en un medio sedimentan a diferentes velocidades dependiendo de su peso, densidad y configuración”. Así, las partículas de arena sedimentan primero, luego las de limo y por ultimo las partículas de arcilla (Conu 2014).

Equipo y materiales

- Agitador electrónico con su copa de dispersión
- Hidrómetro de bouyoucos
- Probeta o cilindro de bouyoucos
- Termómetro

- Reloj
- Píizeta
- Balanza semi-analítica
- Beacker 250 ml
- Agitador especial para mezclar los 1000 ml. De suspensión de suelo
- Agitador de vidrio
- Agua Oxigenada
- Muestra de suelo seca y tamizada.

Reactivos

- Agua destilada
- Solución de sodio al 5% elaborada con 40g de hexametafosfato de sodio, y 10 g de carbonato de sodio anhidro y disolver hasta completar 1000ml. De agua destilada.

De esta solución dispersante, agregar 10 ml por muestra.

Procedimiento

Se pesaron 50g de suelo seco, se pasó a un Erlenmeyer adicionando 10 ml. de dispersante, se utilizó un agitador eléctrico durante dos minutos se removió la muestra, la suspensión de suelo se depositó en la probeta de 1000 ml. Se aplicó agua destilada, se llevó el nivel de agua hasta la marca inferior de la probeta, con el hidrómetro dentro se agito vigorosamente, se sumergió el hidrómetro, a los 40 segundos se tomó la primera lectura, a los dos minutos la segunda, a los cuatro minutos la tercera, luego a las dos horas y la última a las 4 horas. Las lecturas del hidrómetro y la temperatura. Se dejó el recipiente estable que no se perturbe la solución. Para hacer cada lectura.



Fig.8 y 9: Análisis de muestras en laboratorio de suelos mediante el método de bouyoucos.

Cuadro 1: Modelo de anotación de lecturas con el Hidrómetro de Bouyoucos.

Tiempo	Identificador/Muestra		
	4s5a		
	T °C	Lect. /Hidrómetro(g/l)	F/Corrección (g)
40"	26	12	3
4'	26	7	3
40'	26	3	3
2h	26.5	1.5	3.25

Corrección de lectura por temperatura

Como el hidrómetro esta calibrado a 20°C. Debe realizarse una corrección por temperatura, agregando 0.5g/Litro por cada grado que supere los 20°C, y disminuir 0.5 g/Litro por cada grado cuando la temperatura sea inferior a 20°C.

Corrección de lectura por blanco

Preparar un litro de solución al 5% de hexametáfosfato de sodio carbonato de sodio (tomar 10 ml. De la solución de hexametáfosfato o 5 ml. De solución de oxalato de sodio o silicato de sodio y llevarlo a 1lt. Con agua destilada), llévese a una temperatura de 20°C y tómesese la

densidad con el hidrómetro de Bouyoucos, el resultado de lectura se restará a la de las lecturas corregidas por temperatura

Calcule el porcentaje de arena en la muestra.

La arena se deposita en el fondo del cilindro a los 40 segundos, por lo tanto, la lectura corregida a ese tiempo de la cantidad de limo y arcilla en suspensión.

$$\% \text{ LIMO} + \text{ARCILLA} = \frac{(\text{lectura corregida a los 40 segundos}) \times 100}{\text{Peso de suelo seco}}$$

Calcule el porcentaje de arcilla en la muestra.

Al final de dos horas el limo y la arena se han sedimentado. La lectura corregida a las dos horas representa los gramos de arcilla en la muestra.

$$\% \text{Arcilla} = \frac{(\text{lectura corregida a las dos hora})}{\text{peso de suelo seco}} \times 100$$

Calcular el porcentaje de limo en la muestra

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

Calcule el porcentaje de limo en la muestra

$$\% \text{ ARENA} = 100 - (\% \text{ limo} + \% \text{ arcilla}).$$

Los porcentajes de los grupos de las diferentes partículas son:

- a. Menores de 0.05 mm.
- b. Menores de 0.02 mm.
- c. Menores de 0.005 mm.
- d. Menores de 0.002 mm

Anexo 10: Hoja de cálculo en Excel para tratamiento de la información de textura de suelo

Clave de muestra			
4S5a			
Tiempo	T °C	Lect/Hidrometro(g/l)	F/Corrección (g)
40"	26	12	3
4'	26	7	3
40'	26	3	3
2h	26.5	1.5	3.25
Corregido			
	Corr/Temp (g/l)	Lect/Blanco (g/l)	Corr/Blanco (g/l)
40"	15	2	13
4'	10	2	8
40'	6	2	4
2h	4.75	2	2.75
$L + C = \frac{\text{Lectura}}{\text{Peso suelo seco}} * 100$			
	%L+C=	26	26
Limo	%L=	20.5	
Arena	%A=	74	
Arcilla	%C=	5.5	

Anexo 11: Método de cilindros infiltrómetro.

TASA DE INFILTRACION

La tasa de infiltración de agua en el suelo determina la rapidez de infiltración del agua en el mismo y, como consecuencia, el volumen de agua que escurre sobre la superficie (UNAD S.f).

Como elemento principal de la recarga de los acuíferos y en base a la textura del suelo, esta se determinó por medio de los Cilindros infiltrómetros proporcionados por el departamento de Recursos Naturales de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador.

Después de haber identificados los puntos más representativos de los miembros geológicos de la zona de estudio, se navegó con GPS (Sistema de Posicionamiento Global) a la zona seleccionada previamente en ArcMap 10.1.

Materiales:

- Doble anillo
- Tapa
- Martillo (Almádana)
- Bolla de medición con sus respectivos anclajes y cinta métrica
- Cronometro
- Agua

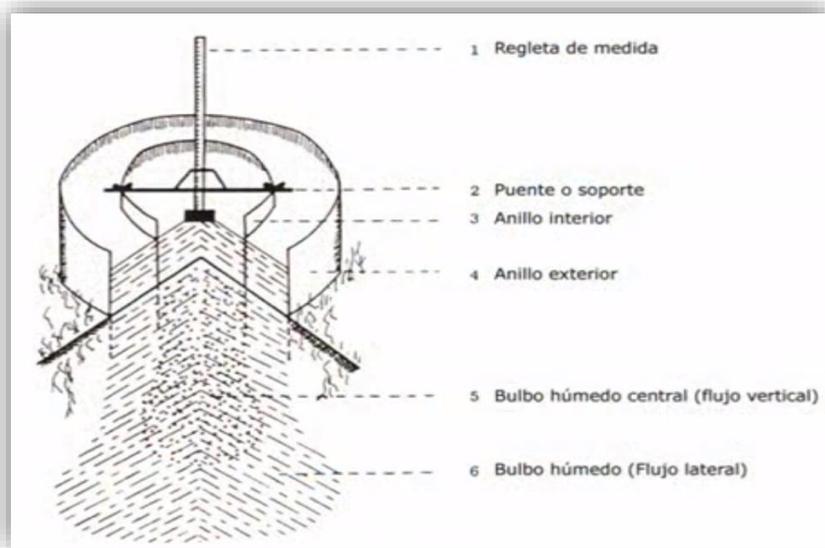


Fig. 1: Partes de anillos infiltrómetros.

El procedimiento que se realizó para las pruebas es el siguiente:

a) Se realizó la instalación de los cilindros infiltrómetros

Se colocó el cilindro exterior en el lugar seleccionado, golpeando con almádana sobre una tapa metálica que se ubica sobre el cilindro, este se introdujo 10 cm aproximadamente en el suelo, de la misma manera se procedió con el cilindro interior verticalmente los dos.



Fig. 2: Instalación de los cilindros infiltrómetros.

b) Llenado de cilindros

El agua se depositó primero al cilindro exterior y luego al cilindro interior, se consideró llenar simultáneamente los dos para ejecutar una lectura correcta a partir de que los dos anillos empiecen a filtrar el agua en el suelo.



Fig. 3: Llenado de cilindros.

c) Lectura del nivel de agua

Se procedió a efectuar las lecturas del nivel de agua, en el anillo interior a intervalos de uno a dos minutos. Al inicio y luego cada 1, 3, 5 y 10, minutos hasta cumplir la prueba.

Se tomó por factor de partida, que para la lectura el flotador se mantuviera al tope de su puente o soporte de tal forma que cuando el suelo absorbió el agua el flotador descendió y arrojó datos con los intervalos de tiempo. Cuando en los cilindros se filtró una lámina de alrededor de 2.5 a 3 cm se repitió el proceso de llenado nuevamente al mismo nivel inicial.

Se consideró que cuando la infiltración se mantuvo inalterable y la toma de datos fueron similares en tres ocasiones seguidas se dio por terminada la prueba, ya que el suelo alcanzó su saturación básica de tal forma que está siempre fue constante.



Fig. 4: Toma de lecturas.

Anexo 12: Hoja de cálculo para determinar la Infiltración básica (Fc), miembro s2 de la formación San Salvador.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS
DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE
CALCULO DE VELOCIDAD DE INFILTRACION (D) Y LAMINA ACUMULADA (D)

POR: Ing Agr. Msc. José Mauricio Tejada

LUGAR: **s2**
 FECHA: **23 Sep. 2015**

PROYECTO RESPONSABLE: **Tesis de ZR**
Dario, Abel, Edgar

HORA	TIEMPO (min)		LECTURAS (cm)		LAMINA (cm)		INFILTRACION (cm/h)	
	Parcial	Acumulado	antes	despues	Periodo	Acumulada	Periodo	Acumulada
11:50	0	0		3.50		0.00		-
					1.10		33.00	
11:52	2	2	4.60			1.10		33.00
					1.20		36.00	
11:54	2	4	5.80			2.30		34.50
					1.10		16.50	
11:58	4	8	6.90			3.40		25.50
					3.10		46.50	
12:02	4	12	3.80			6.50		32.50
					2.20		16.50	
12:10	8	20	6.00			8.70		26.10
					2.10		15.75	
12:18	8	28	3.90			10.80		23.14
					1.90		11.40	
12:28	10	38	5.80			12.70		20.05
					0.90		5.40	
12:38	10	48	4.90			13.60		17.00
					3.00		9.00	
12:58	20	68	7.90			16.60		14.65
					3.10		9.30	
13:18	20	88	11.00			19.70		13.43

Analisis de infiltracion básica (I b)
y Coeficientes de la ecuacion (D)

RETORNAR

COEFICIENTES
USDA

GRAFICO
LAMINA VRS
USDA

Coeficientes de la prueba

C=	0.79
m=	0.75
K=	47.14
n=	-0.25

$D = C T^m + 7$

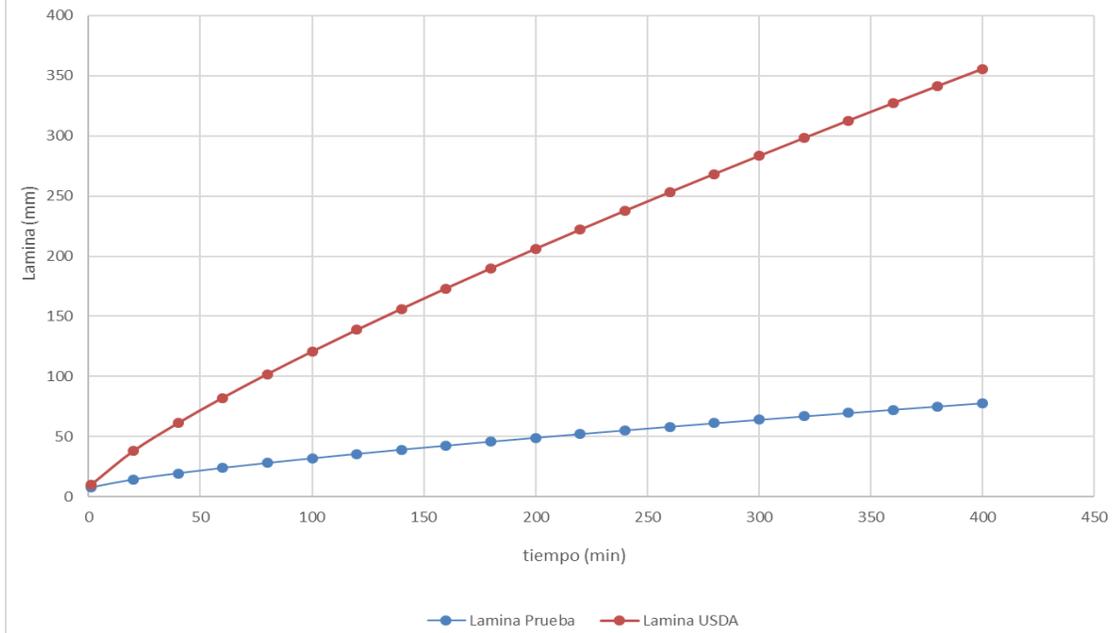
$I = K T^n$

Coeficientes de USI

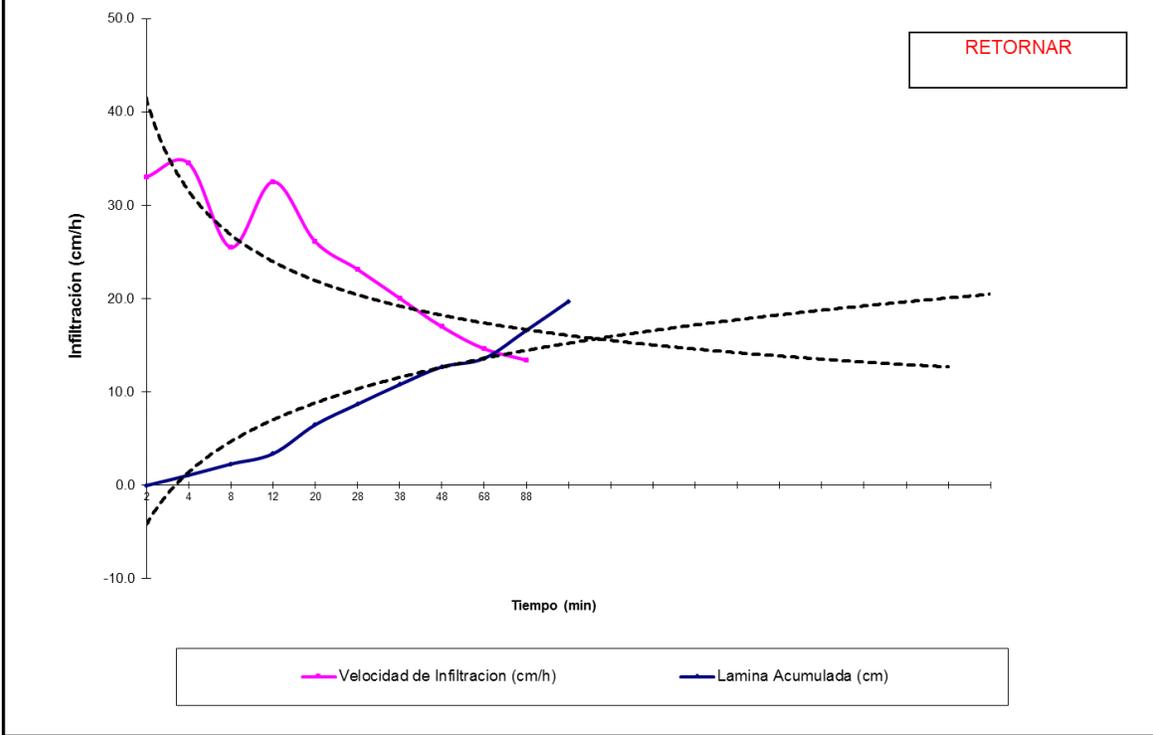
C=	2.753
m=	0.808
Familia (mm ² /h)	50.8

Tiempo acumulado minutos	Velocidad Infiltracion mm ² /h	% Variación en infiltración (Inf n) e (Inf n-1)	Lamina acumulada (mm)	
			Prueba	USDA
1	471.38	---	7.79	9.75
20	223.77	52.53	14.46	37.98
40	188.34	15.83	19.56	61.23
60	170.27	9.59	24.03	82.26
80	158.52	6.90	28.14	101.95
100	149.96	5.40	31.99	120.71
120	143.31	4.43	35.66	138.76
140	137.92	3.76	39.18	156.24
160	133.42	3.27	42.58	173.24
180	129.56	2.89	45.87	189.84
200	126.21	2.59	49.07	206.08
220	123.26	2.34	52.19	222.02
240	120.62	2.14	55.25	237.68
260	118.24	1.97	58.24	253.10
280	116.08	1.83	61.17	268.28
300	114.11	1.70	64.05	283.26
320	112.29	1.59	66.89	298.05
340	110.61	1.50	69.68	312.66
360	109.05	1.41	72.43	327.11
380	107.59	1.34	75.14	341.40
400	106.23	1.27	77.82	355.55

Comparacion entre Lamina de Prueba y Lamina de USDA



Curvas de Velocidad de Infiltracion y Lamina Acumulada



Anexo 13: Hoja de cálculo para determinar la Infiltración básica (Fc), miembro s3'a de la formación San Salvador.

**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 Piedra/Lacayo s3a**
FECHA: **24-Sept-15**

PROYECTO
RESPONSABLE

**Tesis de ZR
Dario, Edgar, Abel**

HORA	TIEMPO (min)		LECTURAS (cm)		LAMINA (cm)		INFILTRACION (cm/h)	
	Parcial	Acumulado	antes	despues	Periodo	Acumulada	Periodo	Acumulada
9:20	0	0		3.00		0.00		-
					0.73	0.73	21.99	
9:22	2	2	3.73		0.75	1.49	22.60	21.99
					0.57	2.06	8.55	22.30
9:24	2	4	4.49		0.60	2.66	9.07	
					0.20	2.86	1.52	13.31
9:28	4	8	5.06		0.63	3.50	4.73	8.59
					0.60	4.10	3.63	
9:32	4	12	5.66		0.63	4.73	3.79	7.49
					0.58	5.31	1.74	6.47
9:40	8	20	5.86		8.31	5.90	24.93	4.69
9:48	8	28	6.50					
9:58	10	38	7.10					
10:08	10	48	7.73					
10:28	20	68	8.31					
10:48	20	88	0.00					

**Analisis de infiltracion básica (I b)
y Coeficientes de la ecuacion (D)**

RETORNAR

COEFICIENTES
USDA

GRAFICO
LAMINA VRS
USDA

Coeficientes de la prueba

C=	0.65
m=	0.51
K=	38.73
n=	-0.49

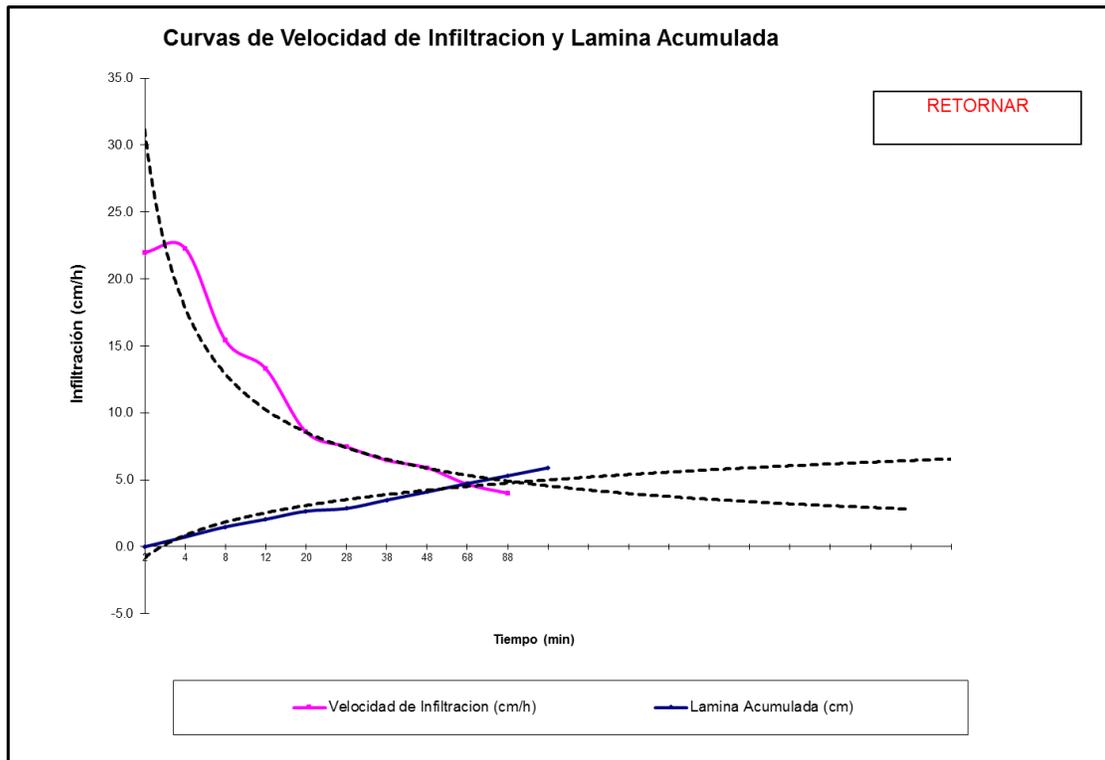
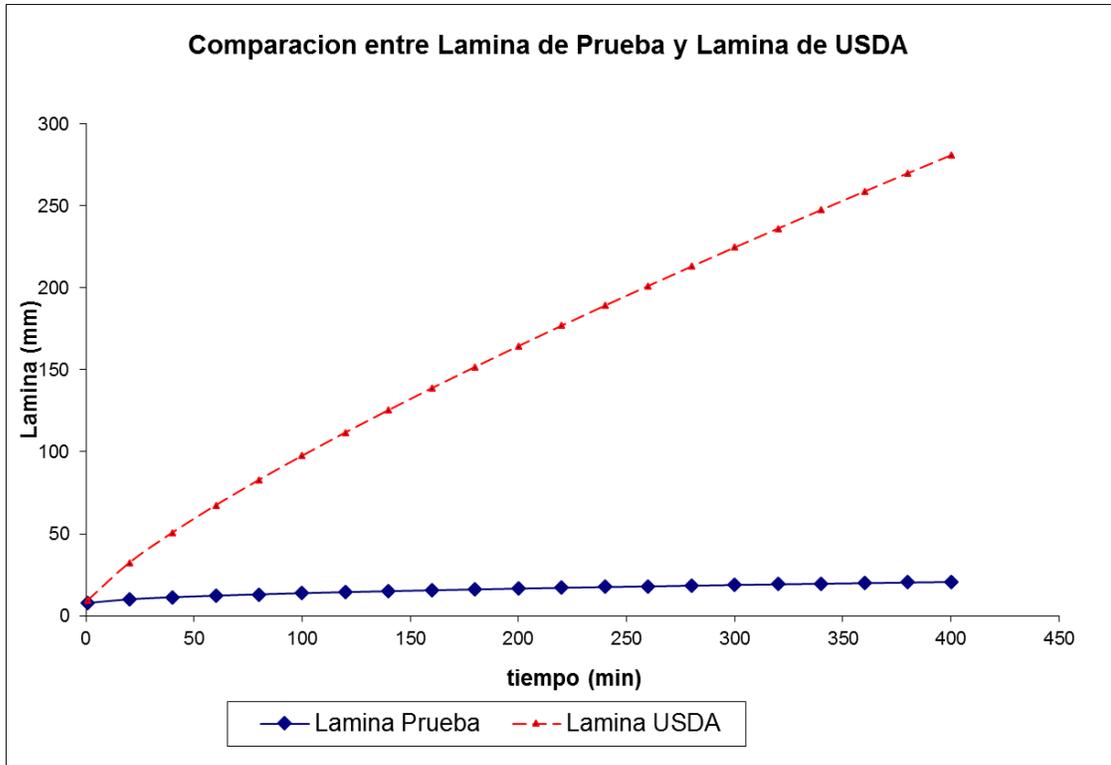
$$D = C T^m + 7$$

$$I = K T^n$$

Coeficientes de USDA

C=	2.284
m=	0.799
Familia (mm/h)	38.1

Tiempo acumulado minutos	Velocidad Infiltracion mm/h	% Variación en infiltración (Inf n) e (Inf n-1)	Lamina acumulada (mm)	
			Prueba	USDA
1	387.26	---	7.65	9.28
20	89.20	76.97	9.97	32.02
40	63.51	28.80	11.23	50.53
60	52.06	18.02	12.21	67.18
80	45.21	13.15	13.03	82.73
100	40.53	10.36	13.76	97.51
120	37.07	8.55	14.41	111.70
140	34.37	7.28	15.02	125.43
160	32.19	6.33	15.58	138.76
180	30.39	5.61	16.12	151.76
200	28.86	5.03	16.62	164.48
220	27.54	4.56	17.10	176.94
240	26.39	4.17	17.56	189.17
260	25.37	3.85	18.00	201.20
280	24.47	3.57	18.42	213.05
300	23.66	3.32	18.83	224.73
320	22.92	3.11	19.22	236.25
340	22.25	2.93	19.61	247.63
360	21.63	2.76	19.98	258.87
380	21.07	2.62	20.34	269.99
400	20.55	2.48	20.70	280.99



Anexo 14: Hoja de cálculo para determinar la Infiltración básica (Fc), miembro s⁵a de la formación San Salvador.

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 Moritzalta s5a**
 FECHA: **25-Sept-15**

PROYECTO
 RESPONSABLE

Tesis de ZR
Darío, Edgar, Abel

HORA	TIEMPO (min)		LECTURAS (cm)		LAMINA (cm)		INFILTRACION (cm/h)	
	Parcial	Acumulado	antes	despues	Periodo	Acumulada	Periodo	Acumulada
9:45	0	0		0.60		0.00		-
					0.40		12.00	
9:47	2	2	1.00			0.40		12.00
					0.30		9.00	
9:49	2	4	1.30			0.70		10.50
					0.50		7.50	
9:53	4	8	1.80			1.20		9.00
					0.40		6.00	
9:57	4	12	2.20			1.60		8.00
					0.20		1.50	
10:05	8	20	2.40			1.80		5.40
					0.40		3.00	
10:13	8	28	2.80			2.20		4.71
					1.00		6.00	
10:23	10	38	3.80			3.20		5.05
					0.90		5.40	
10:33	10	48	4.70			4.10		5.13
					0.80		2.40	
10:53	20	68	5.50			4.90		4.32
					1.10		3.30	
11:13	20	88	6.60			6.00		4.09

**Análisis de infiltración básica (Ib)
 y Coeficientes de la ecuación (D)**

RETORNAR

COEFICIENTES
 USDA

GRAFICO
 LAMINA VRS
 USDA

Coeficientes de la prueba

C=	0.26
m=	0.69
K=	15.53
n=	-0.31

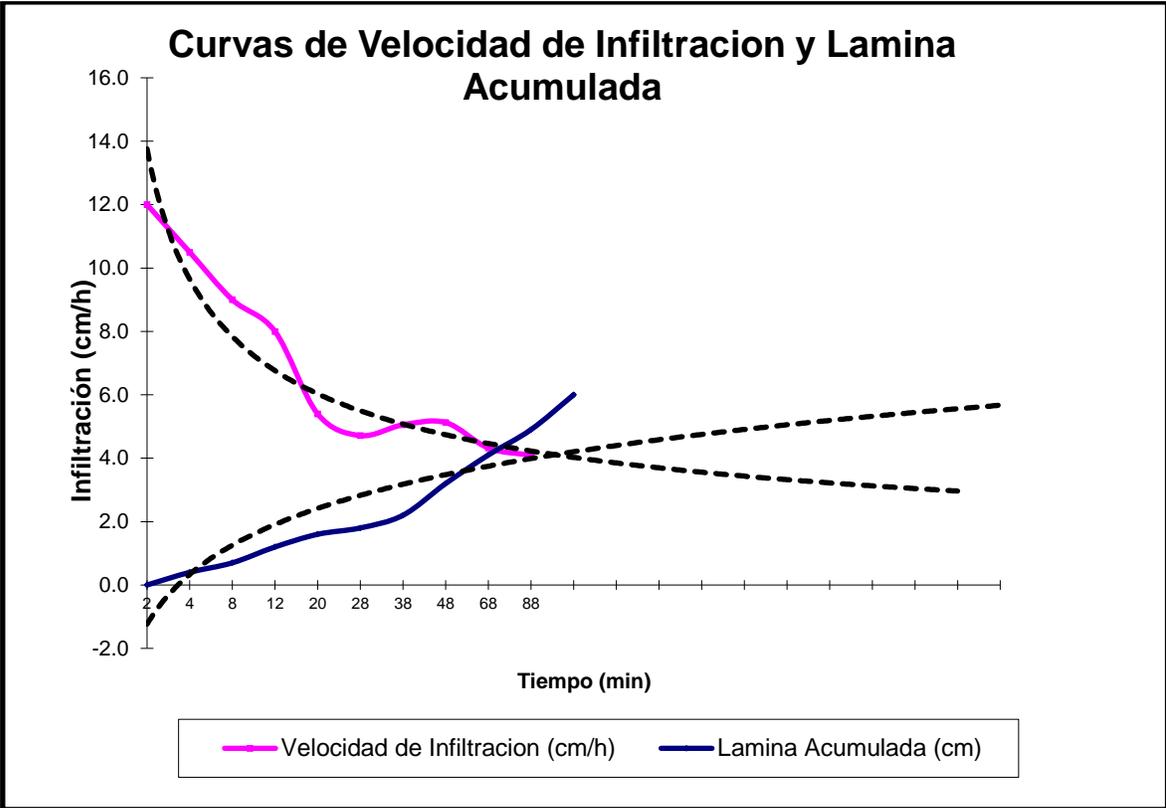
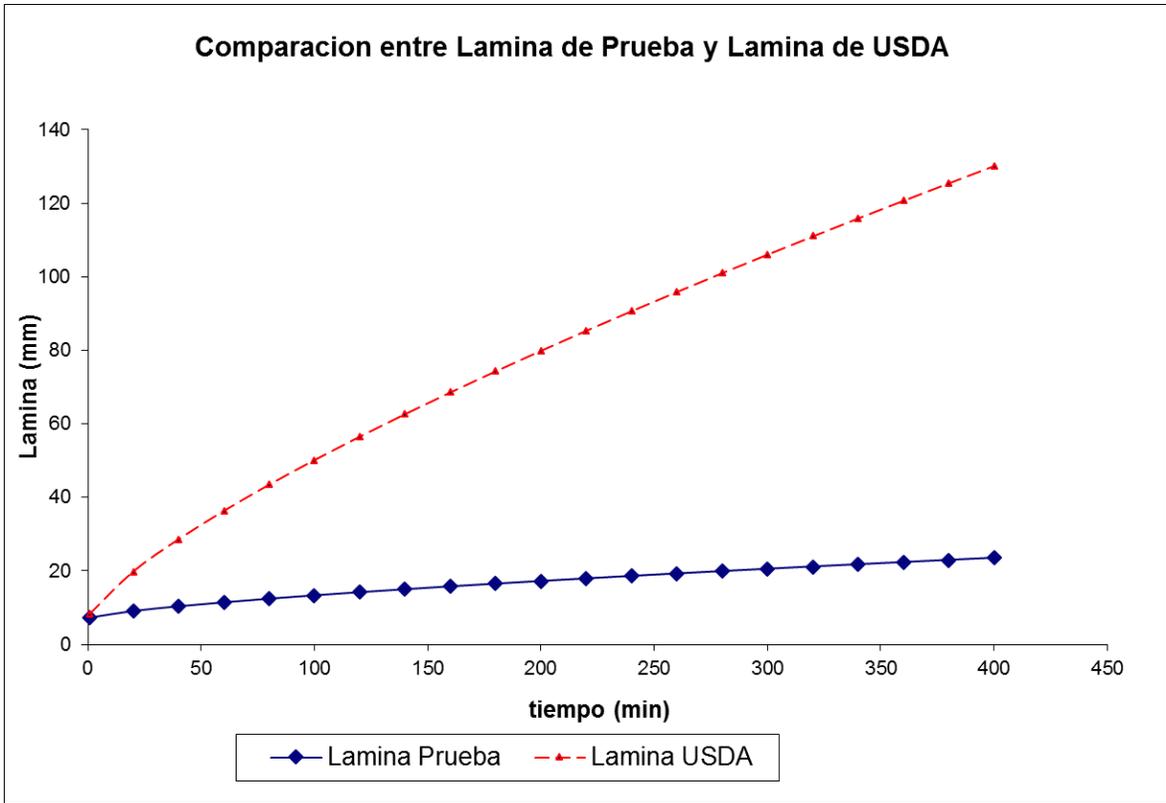
$$D = C T^{m+7}$$

$$I = K T^n$$

Coeficientes de USDA

C=	1.321
m=	0.757
Familia (mm ² /h)	22.86

Tiempo acumulado minutos	Velocidad Infiltración mm/h	% Variación en infiltración (Inf n) e (Inf n-1)	Lamina acumulada (mm)	
			Prueba	USDA
1	155.31	---	7.26	8.32
20	61.95	60.11	9.07	19.76
40	50.08	19.16	10.34	28.56
60	44.22	11.70	11.42	36.31
80	40.49	8.45	12.40	43.44
100	37.81	6.62	13.30	50.14
120	35.75	5.44	14.15	56.53
140	34.10	4.62	14.96	62.66
160	32.73	4.01	15.73	68.58
180	31.57	3.55	16.47	74.32
200	30.57	3.18	17.19	79.91
220	29.69	2.88	17.88	85.36
240	28.90	2.63	18.56	90.70
260	28.20	2.43	19.22	95.93
280	27.57	2.25	19.87	101.06
300	26.99	2.09	20.50	106.10
320	26.46	1.96	21.11	111.06
340	25.97	1.84	21.72	115.95
360	25.52	1.74	22.31	120.77
380	25.10	1.65	22.90	125.52
400	24.71	1.56	23.47	130.21



Anexo 15: Hoja de cálculo para determinar la Infiltración básica (Fc), miembro s⁵b de la formación San Salvador.

**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 Piedra/Lacayo s5b**
FECHA: **24-Sept-15**

PROYECTO: **Tesis de ZR**
RESPONSABLE: **Dario, Abel, Edgar**

HORA	TIEMPO (min)		LECTURAS (cm)		LAMINA (cm)		INFILTRACION (cm/h)	
	Parcial	Acumulado	antes	despues	Periodo	Acumulada	Periodo	Acumulada
9:20	0	0		0.00		0.00		-
					0.40		12.00	
9:22	2	2	0.40			0.40		12.00
					0.40		12.00	
9:24	2	4	0.80			0.80		12.00
					0.20		3.00	
9:28	4	8	1.00			1.00		7.50
					0.30		4.50	
9:32	4	12	1.30			1.30		6.50
					0.30		2.25	
9:40	8	20	1.60			1.60		4.80
					0.20		1.50	
9:48	8	28	1.80			1.80		3.86
					0.50		3.00	
9:58	10	38	2.30			2.30		3.63
					1.00		6.00	
10:08	10	48	3.30			3.30		4.13
					0.60		1.80	
10:28	20	68	3.90			3.90		3.44
					0.50		1.50	
10:48	20	88	4.40			4.40		3.00

**Analisis de infiltracion básica (I b)
y Coeficientes de la ecuacion (D)**

RETORNAR

COEFICIENTES
USDA

GRAFICO
LAMINA VRS
USDA

Coeficientes de la prueba

C=	0.29
m=	0.60
K=	17.20
n=	-0.40

$$D = C T^m + 7$$

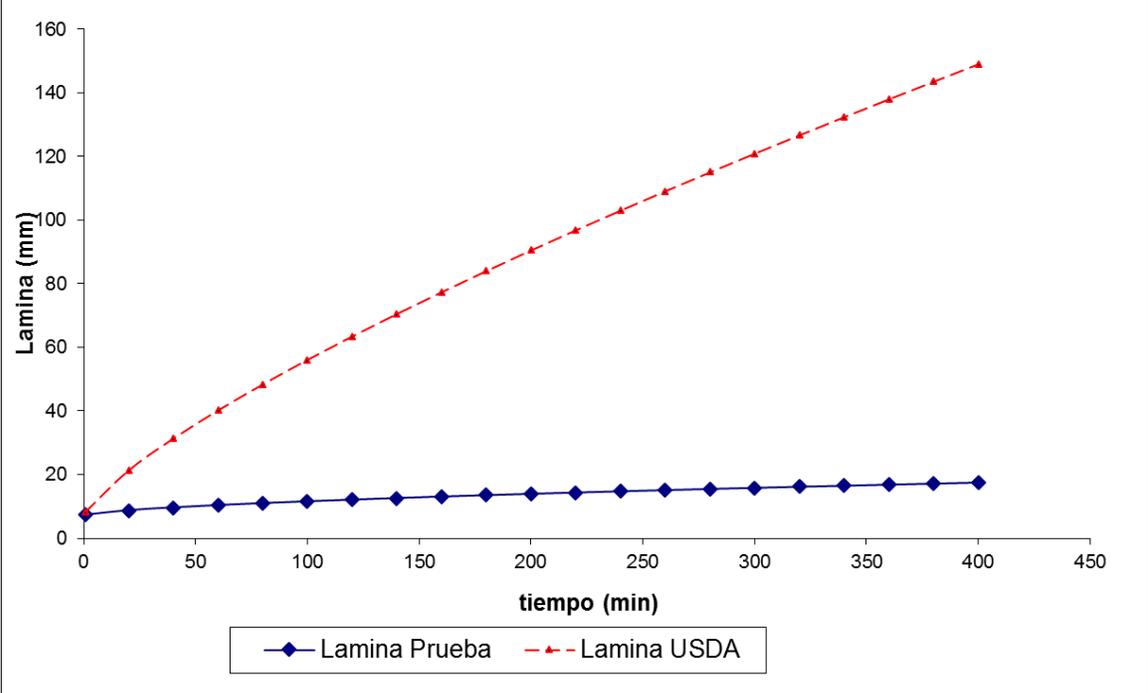
$$I = K T^n$$

Coeficientes de USI

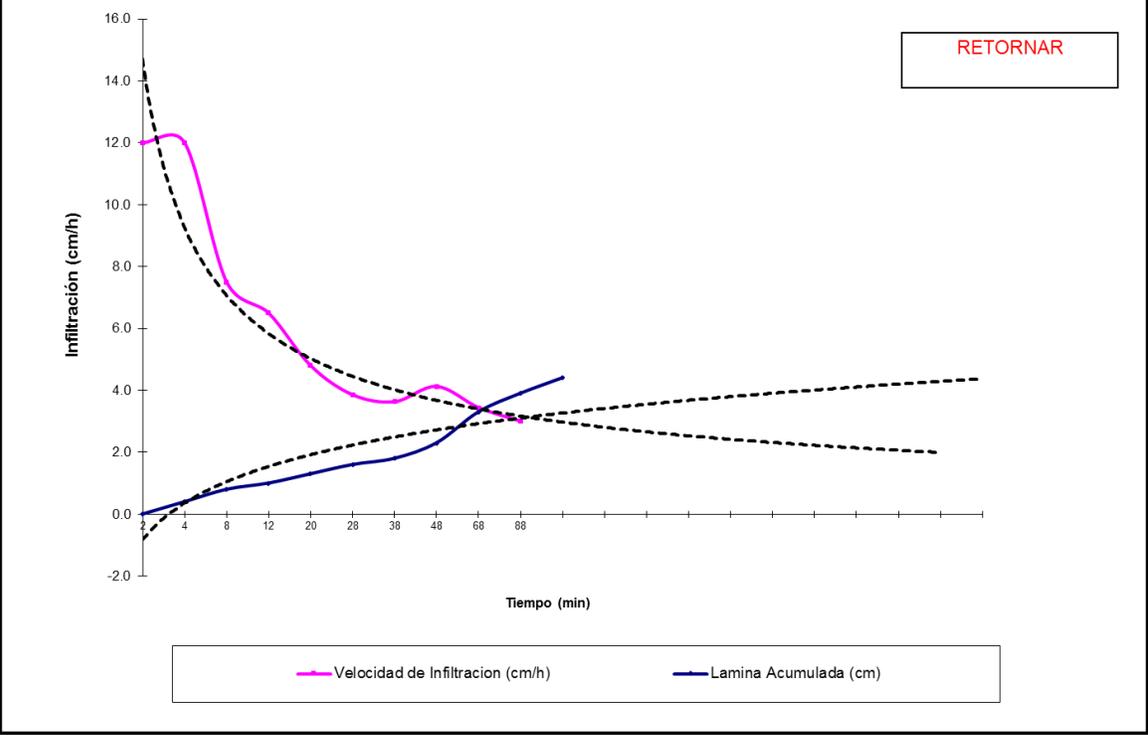
C=	1.443
m=	0.766
Familia (mm/h)	17.78

Tiempo acumulado minutos	Velocidad Infiltracion mm/h	% Variación en infiltración (Inf n) e (Inf n-1)	Lamina acumulada (mm)	
			Prueba	USDA
1	172.03	---	7.29	8.44
20	52.10	69.72	8.74	21.32
40	39.52	24.15	9.63	31.35
60	33.62	14.93	10.36	40.21
80	29.97	10.84	11.00	48.40
100	27.42	8.51	11.57	56.12
120	25.50	7.01	12.10	63.48
140	23.98	5.96	12.60	70.56
160	22.74	5.19	13.06	77.41
180	21.69	4.59	13.51	84.06
200	20.80	4.11	13.93	90.53
220	20.02	3.73	14.34	96.86
240	19.34	3.41	14.74	103.05
260	18.73	3.14	15.12	109.13
280	18.19	2.91	15.49	115.09
300	17.69	2.71	15.85	120.96
320	17.25	2.54	16.20	126.73
340	16.83	2.39	16.54	132.42
360	16.45	2.25	16.87	138.04
380	16.10	2.13	17.20	143.58
400	15.78	2.02	17.52	149.05

Comparacion entre Lamina de Prueba y Lamina de USDA



Curvas de Velocidad de Infiltración y Lamina Acumulada



Anexo 16: Hoja de cálculo para determinar la Infiltración básica (Fc), miembro s5'c de la formación San Salvador.

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: **Fca Cancy s5c**
 FECHA: **24-Sept-15**

PROYECTO **Tesis de ZR**
 RESPONSABLE **Dario, Abel, Edgar**

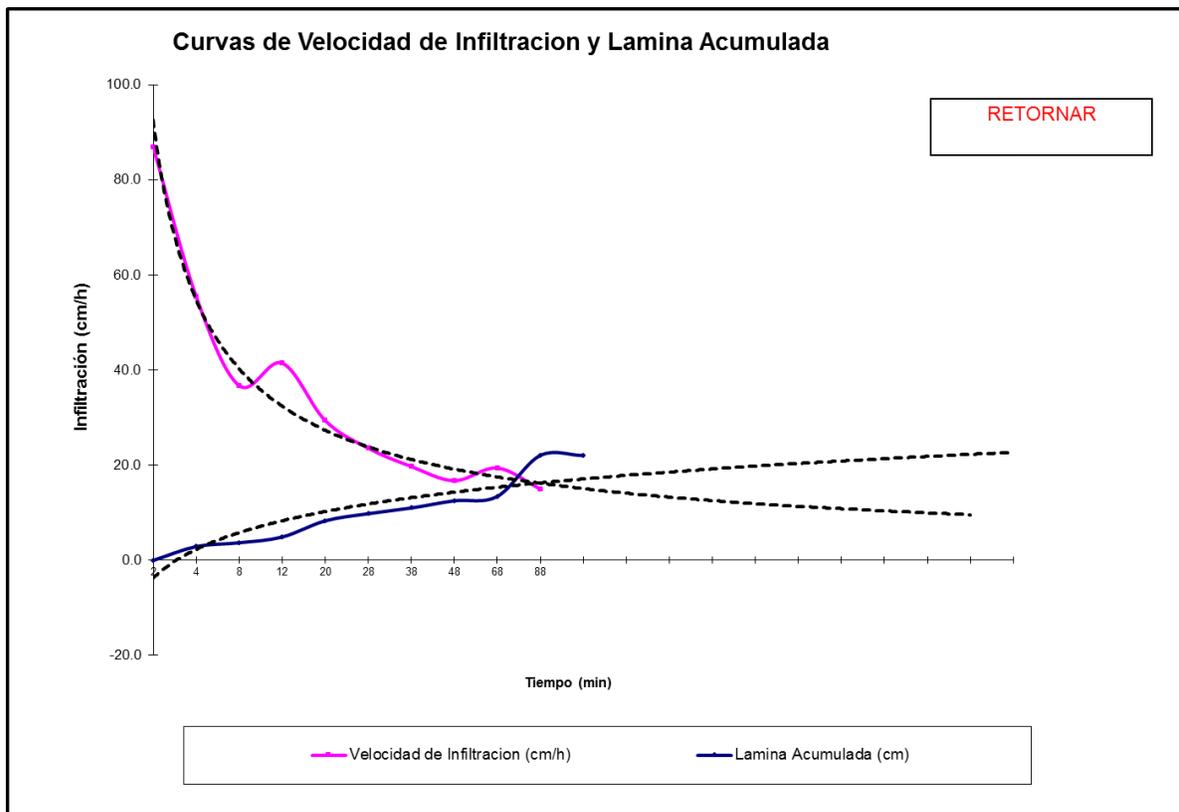
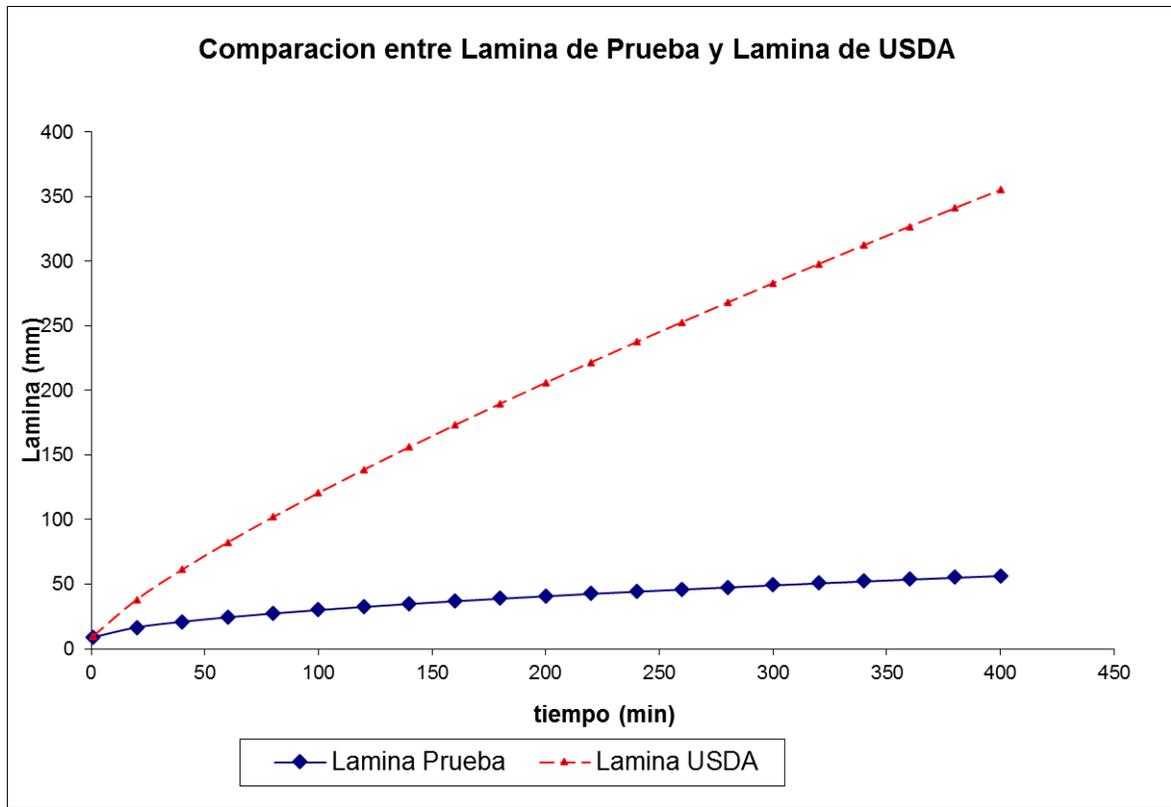
HORA	TIEMPO (min)		LECTURAS (cm)		LAMINA (cm)		INFILTRACION (cm/h)	
	Parcial	Acumulado	antes	despues	Periodo	Acumulada	Periodo	Acumulada
15:10	0	0		2.00		0.00		-
					2.90		87.00	
15:12	2	2	4.90			2.90		87.00
					0.80		24.00	
15:14	2	4	5.70			3.70		55.50
					1.20		18.00	
15:18	4	8	6.90			4.90		36.75
					3.40		51.00	
15:22	4	12	3.50			8.30		41.50
					1.50		11.25	
15:30	8	20	5.00			9.80		29.40
					1.20		9.00	
15:38	8	28	6.20			11.00		23.57
					1.50		9.00	
15:48	10	38	7.70			12.50		19.74
					0.90		5.40	
15:58	10	48	8.60			13.40		16.75
					8.60		25.80	
16:18	20	68	0.00			22.00		19.41
					0.00		0.00	
16:38	20	88	0.00			22.00		15.00

**Analisis de infiltracion básica (I b)
 y Coeficientes de la ecuacion (D)**

RETORNAR	COEFICIENTES USDA	GRAFICO LAMINA VRS USDA
----------	----------------------	-------------------------------

Coeficientes de la prueba	Coeficientes de USI
C= 1.81	C= 2.75
m= 0.55	m= 0.808
K= 108.69	Familia
n= -0.45	(mm/h)
	38.1

Tiempo acumulado minutos	Velocidad Infiltracion mm/h	% Variación en infiltración (Inf n) e (Inf n-1)	Lamina acumulada (mm)	
			Prueba	USDA
1	1086.89	---	8.81	9.75
20	284.43	73.83	16.48	37.94
40	208.57	26.67	20.90	61.17
60	173.96	16.59	24.40	82.18
80	152.95	12.08	27.39	101.85
100	138.41	9.50	30.07	120.59
120	127.57	7.83	32.51	138.62
140	119.07	6.67	34.78	156.07
160	112.16	5.80	36.91	173.06
180	106.40	5.13	38.92	189.64
200	101.50	4.61	40.83	205.87
220	97.26	4.18	42.66	221.79
240	93.55	3.82	44.42	237.43
260	90.26	3.52	46.11	252.83
280	87.31	3.26	47.75	268.00
300	84.66	3.04	49.33	282.96
320	82.25	2.85	50.87	297.73
340	80.05	2.68	52.36	312.33
360	78.03	2.53	53.82	326.76
380	76.16	2.39	55.23	341.04
400	74.43	2.27	56.62	355.17

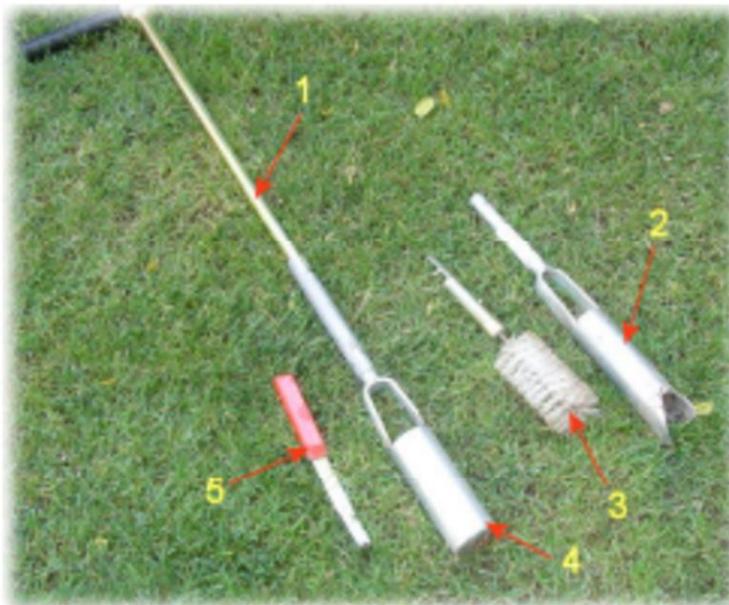


Anexo 17: Guía de conductividad hidráulica

Medición de la conductividad hidráulica con el método del permeámetro de Guelph

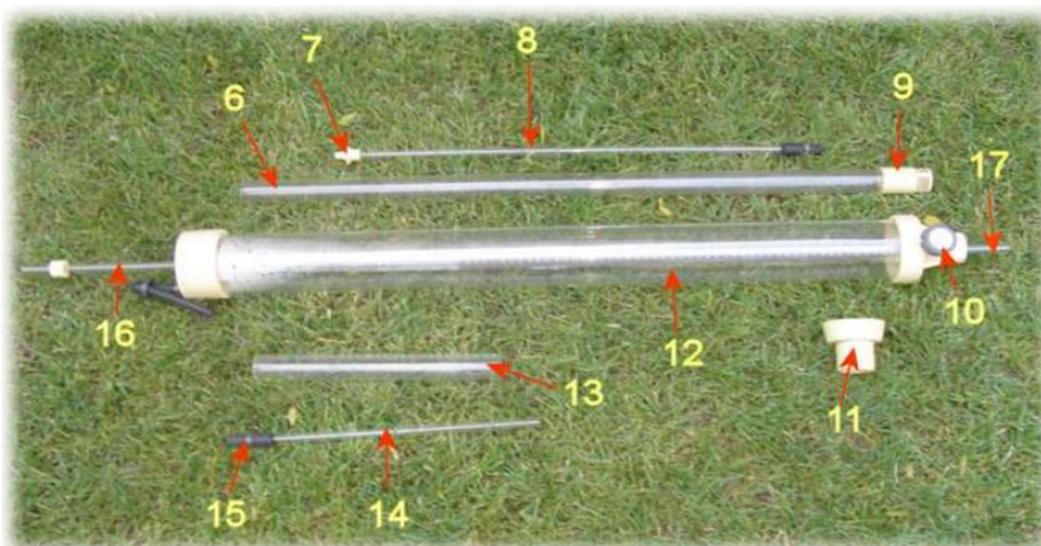
Manual de operación Permeámetro Guelph

➤ Instrumentos para Perforar



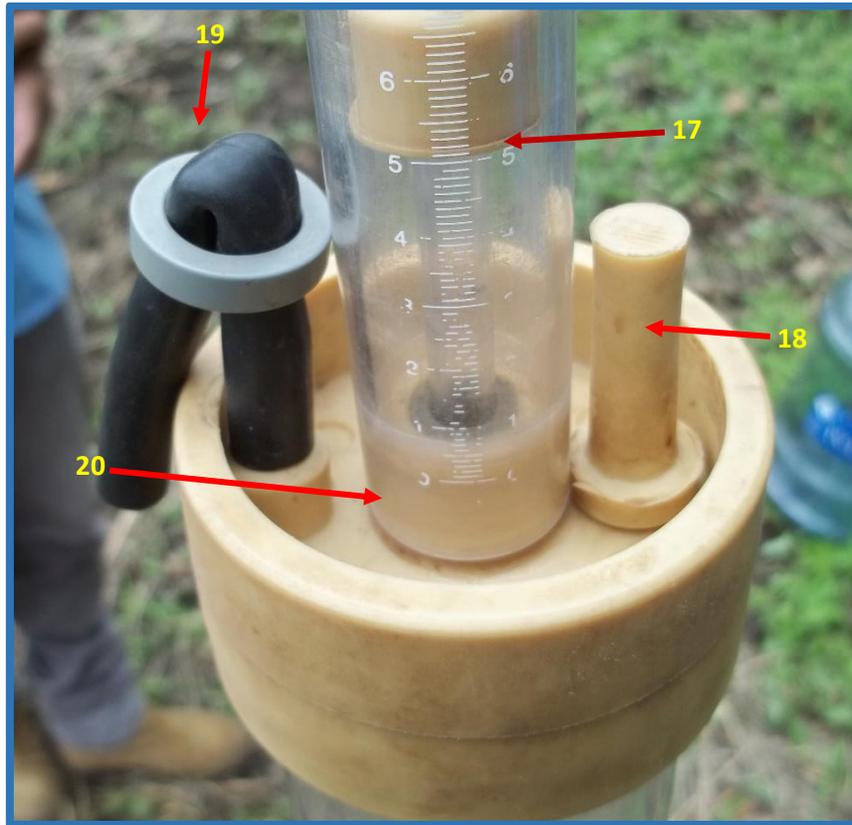
N°	Partes	Descripción
1	Perforador cilíndrico	Al girarlo con fuerza sobre el suelo permite perforar manualmente
2	Cilindro de Acople #1	Funciona como un taladro, removiendo el suelo más firme, se recomienda perforar con este cilindro hasta una profundidad deseada, este realiza la mayor parte de la perforación del agujero
3	Cepillo	Se utiliza para remover la capa compactada que genera el primer cilindro de perforación, de igual forma realiza la función de despejar de la zona raíces y basura que se pueda encontrar en las paredes del agujero
4	Cilindro de acople #2	Es utilizado para crear una geometría uniforme en la perforación y para aplanar el fondo y dejarlo parejo tanto en la base como en el grosor que debe ser de 6 cm de diámetro
5	Espátula	De poco uso, pero no menos importante en la práctica ya que brinda limpieza en los cilindros de perforación al retirar la tierra dentro de ellos

➤ **Cuerpo del Permeámetro**



N°	Partes	Descripción
6	Tubo de Soporte	Sirve de soporte para la estructura del permeámetro y permite conducir el agua desde los reservorios principales hacia el punto de salida
7	Entrada de Aire	Regula el nivel de agua dentro del agujero y permite o impide el flujo de agua desde los recipientes.
8	Tubo de aire inferior	Es el que permite el flujo de aire en el permeámetro
9	Salida de Agua	Contiene una rejilla de goma que permite dispersar la energía de la salida del agua, para evitar la erosión en el agujero; se encuentra en la base del permeámetro
10	Válvula	Si este apunta hacia arriba el flujo de agua sale desde ambos reservorios y si apunta hacia abajo el flujo sólo proviene desde el reservorio interior
11	Soporte deslizante	Permite ajustar la estructura del permeámetro (Tubo de Soporte) al trípode para montar el equipo en terreno.
12	Reservorios (Externo e Interno)	Encargados de almacenar el agua dentro del permeámetro
13	Regleta (Tubo marcador de carga)	Su escala se encuentra en centímetros y permite medir el nivel de agua dentro del agujero
14	Tubo de Mariot	Este se encarga de mantener el aire dentro del permeámetro
15	Unión o Acople de tubos internos	Es el que mantiene unidos todos los tubos internos, su material es de goma
16	Tubo de aire medio	Permite el flujo de aire en el permeámetro juntamente con el tubo de aire inferior

➤ **Parte superior del Permeámetro**



N°	Partes	Descripción
17	Regleta	Contiene una escala en cm. que permite medir el nivel de agua presente en el agujero de infiltración
18	Tapón	Impide el ingreso de aire al permeámetro
19	Tubo de Neopreno	Contiene un anillo de goma que lo mantiene sellado. Permite generar un vacío mediante una bomba para el correcto funciona cuando los reservorios no se encuentran completamente llenos de agua

➤ **Armado del tripode**

Esta es la parte que soporta y mantiene en posición vertical el permeámetro, consta de las siguientes partes:

- Tubos (3 patas)
- Cadena (funciona como un seguro al sujetar las patas en caso de aberturas excesivas del tripode así como un sobrepeso)
- Base de hule (Pieza en la cual se ensamblan los tres tubos o patas)
- Soporte dealizante (Permite ajustar la estructura del permeámetro al trípode para montar el equipo en terreno.



Una vez instalado el tripode se procede a continuación al armado del permeámetro para ubicarlo sobre este y atravesar el tubo principal a través de este.

➤ **Armado del permeámetro**

- Se conectan el tubo de aire inferior con el tubo de aire medio, mediante la conexión de goma diseñada para unir los dos tubos. Se presiona firmemente el tubo de aire (Tubo de Marriotte) inferior contra la conexión hasta quedar lo más firme posible
- La conexión de ambos tubos puede no quedar completamente rígida y tener cierta flexibilidad horizontal, lo importante es que la conexión se mantenga firme cuando el permeámetro se encuentre en la vertical.



Instalación del tubo principal y de Marriotte.



Colocación del permeatro en el tripode.

MEDICION DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA MEDIANTE PERMEAMETRO DE GUELPH

✚ Materiales extras y Equipo

- Permeámetro (Equipo completo como se mencione anteriormente)
- Agua
- Cinta Métrica
- Cronómetro
- Libreta de apuntes

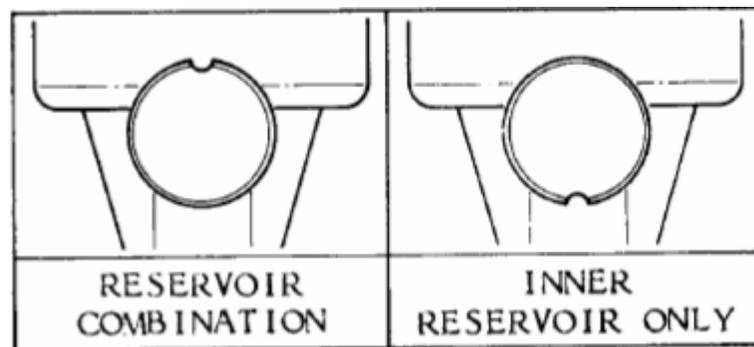
✚ Pasos a Seguir

1. Perforación del suelo en el lugar seleccionado del ensayo. Hacer un agujero utilizando el perforador cilíndrico con dimensiones de 6 cm de diámetro, y una profundidad de 40 – 60 cm de profundo, posteriormente utilizar el cepillo para mejorar la calidad del agujero y el resultado.
2. Armado de trípode; instalación del tubo principal de desagüe dentro del agujero, este pasa en medio del soporte del trípode, cerciorándose de que este llegue el final de la perforación pero que no tenga contacto con las paredes de la misma.

3. Llenado de los reservorios, con anticipación se llena de agua el bidón, este se conecta al vacío por medio de una manguera o sonda que deposita directamente el agua a los tubos del permeámetro.

4. Cerrado de los sellos del vacío, es el mismo donde se conecta la manguera del bidón, cuando el agua se halla depositado se retira la manguera y se tampona. Posteriormente se levanta el tubo de Mariotte con la carga deseada (Sea esta de 10 o 5 cm).

Luego de que el nivel en el agujero se estabilice debería empezar a bajar el nivel de los reservorios lentamente. Si el cambio es imperceptible en 2 minutos se puede desconectar el reservorio exterior del interior. Esto se hace cerrando la válvula inferior



Válvula que regula el flujo proveniente del Permeámetro.

5. Posteriormente, se deben registrar las medidas del nivel de agua dentro del permeámetro (Figura 10) y determinar la tasa de infiltración, tomando en consideración que:

- Se tiene que elegir un intervalo de tiempo adecuado entre cada medida, para poder determinar la tasa de infiltración con exactitud y para no alargar demasiado la experiencia.
- Se deben registrar medidas hasta que la tasa de infiltración calculada coincida en al menos tres mediciones sucesivas, de esta manera, se obtiene una tasa de infiltración en régimen permanente.

PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.

La conductividad Hidráulica es una medida de la habilidad de un medio poroso para Transmitir agua, y es un parámetro esencial para solucionar problemas agrícolas, hidrológicos y ambientales relacionados con el movimiento del agua a través de suelo y estratos; sus superficiales. Es una propiedad muy variable y dependiente de la estructura del suelo, de la textura, y de las características del sistema poroso.

Con el registro de campo se procede a realizar los cálculos en base a la tabla realizada por el Ing. Msc. José Mauricio Tejada, docente de la Facultad de Ciencias Agronómicas en la Universidad de El Salvador.

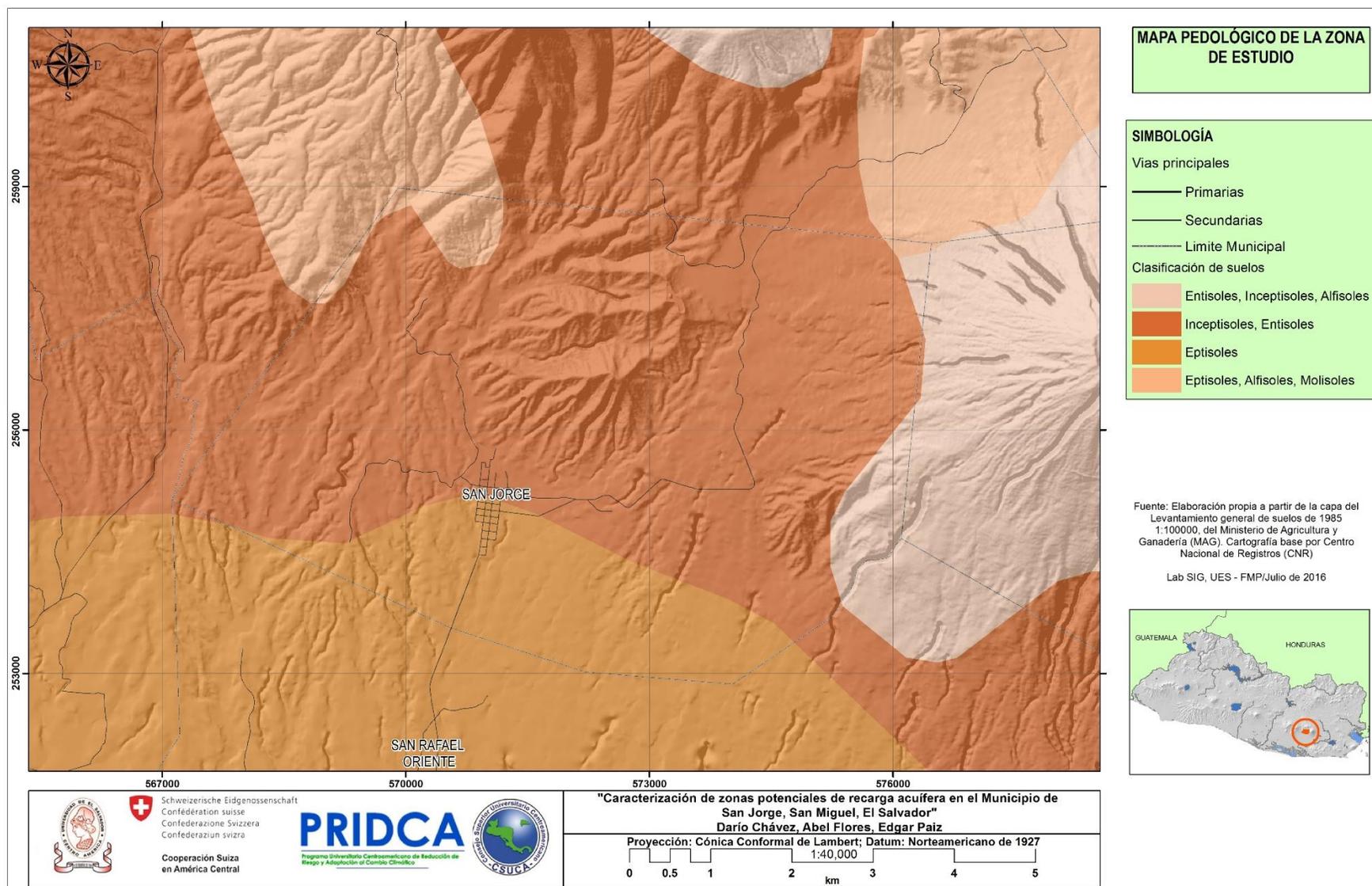
Anexo 18: Hoja de cálculo para determinar conductividad hidráulica (Kfs) del miembro s2 de la formación San Salvador.

REGISTRO DE DATOS DE CAMPO									
PERMEAMETRO DE GUELPH									
Lugar:	Miembro s2 de la F. S. Salvador				Fecha y hora:	23/09/2015 - 11:00 am			
Características del suelo y estado de humedad	Alto contenido de Arena, depositos del cuaternario								
Características del agujero de infiltración:	Suelo arenoso (cultivado con Granos básicos)								
Profundidad:	60 cm			Diámetro:	10				
Reservorios utilizados:	combimados			<input checked="" type="checkbox"/>	Responsables: Gpo. Tesis + 2 asesores ADES				
	Interior			<input type="checkbox"/>	Ing. Irvin & Ing. Alirio				
NIVEL DEL AGUA EN EL AGUJERO h1=					NIVEL DEL AGUA EN EL AGUJERO h2				
5 cm					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		14			0		17		
	2		0.2	0.1		2		0.6	0.3
2		14.2			2		17.6		
	2		0.7	0.35		2		0.3	0.15
4		14.9			4		17.9		
	8		0.1	0.0125		8		0.7	0.0875
12		15			12		18.6		
	8		0.5	0.0625		8		0.8	0.1
20		15.5			20		19.4		
	10		0.5	0.05		10		0.6	0.06
30		16			30		20		
	10		0.8	0.08		10		0.5	0.05
40		16.8			40		20.5		
	20		1.1	0.055		20		1.1	0.055
60		17.9			60		21.6		
	20		0.7	0.035		20		1.2	0.06
80		18.6			80		22.8		
	30		1.2	0.04		30		1.9	0.06333333
110		19.8			110		24.7		
	30		1.2	0.04		30		1.8	0.06
140		21			140		26.5		
Tasa de infiltración regimen permanente R1 (cm/min) =				0.038	Tasa de infiltración regimen permanente R2 (cm/min) =				0.061

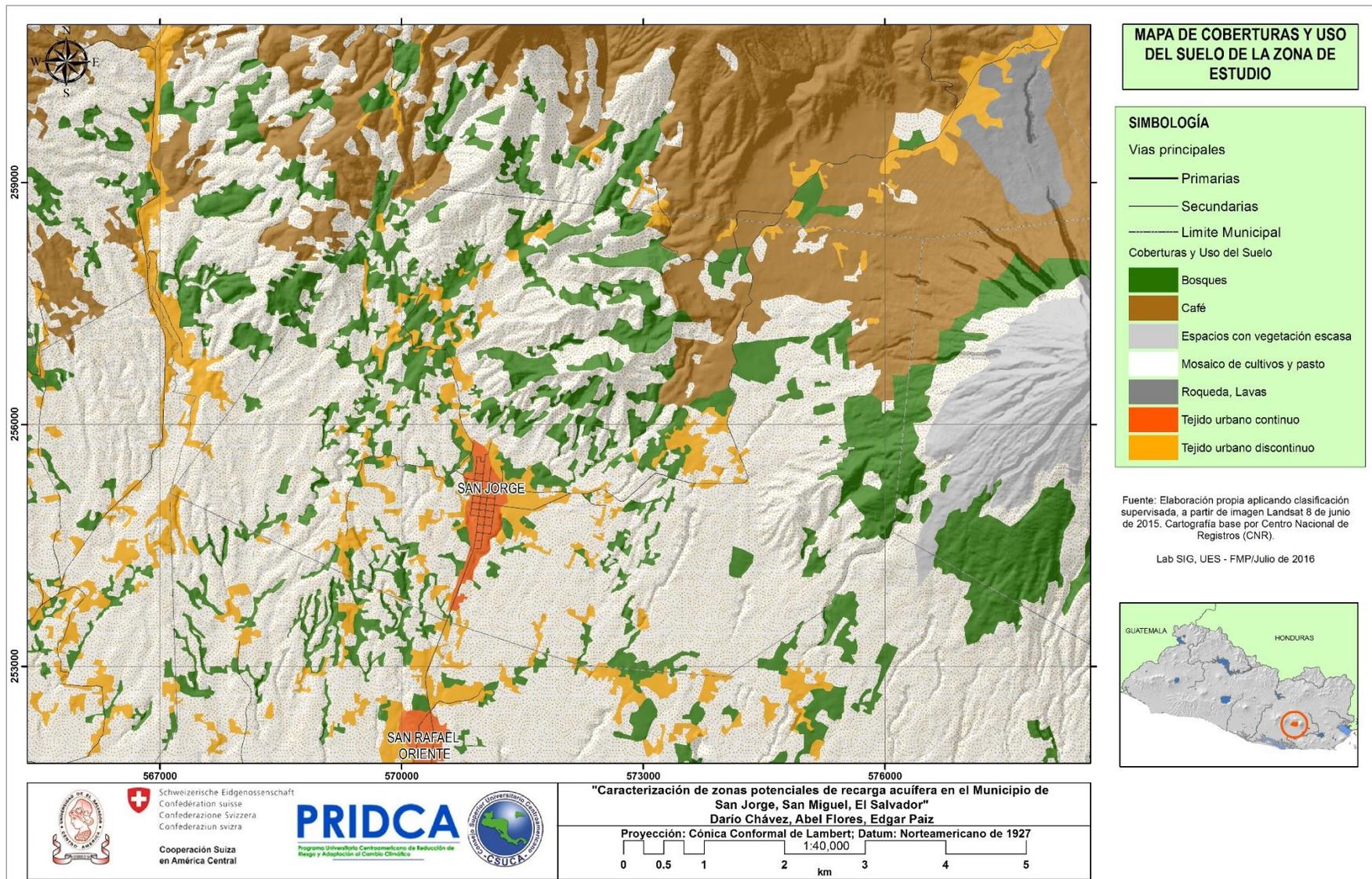
$$R = \Delta h / \Delta t$$

Calculo de la conductividad hidraulica Kfs		
Permeametro de Guelph		
Por Ing Jose Mauricio Tejada		
Lugar	Miembro s2 de la F. S. Salvador	
Fecha	23/09/2015 - 11:00 am	
Datos	H1=5 cm	H2=10 cm
R (cm/min)	0.038	0.061
C =	35.22	
Kfs	0.00	cm/min
Kfs	0.09	cm/h
C= x	2.15	cte para un reservorio
C= y	35.22	cte para reservorios combinados
FORMULA EMPLEADA		
Kfs = 0.0041 * C * R2 - 0.0054 * C * R1		

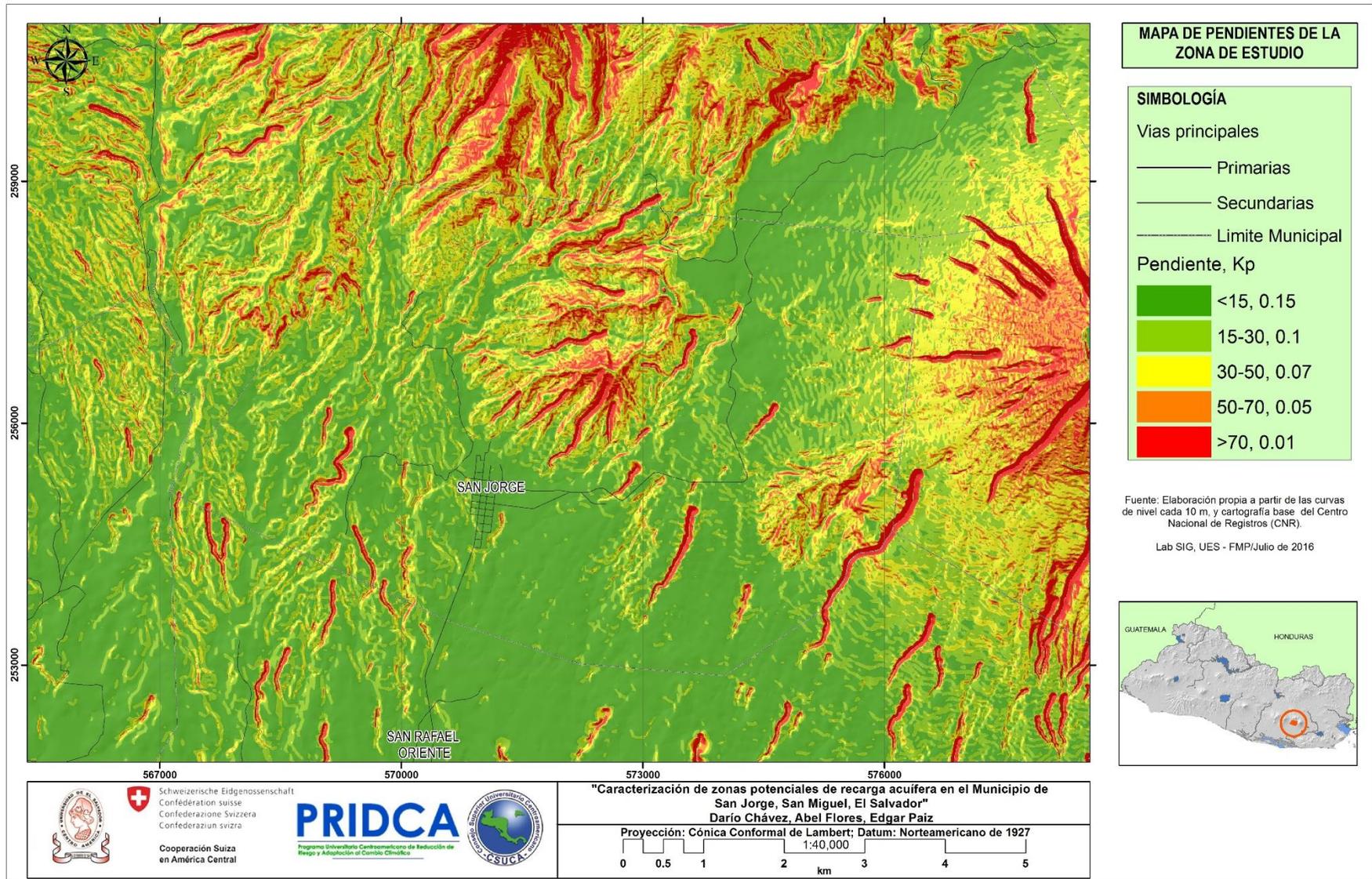
Anexo 23: Mapa de pedología según clasificación USDA



Anexo 24: Mapa de coberturas y uso del suelo de la zona de estudio.



Anexo 25: Mapa de pendientes en porcentaje de la zona de estudio.



Anexo 26: Balance hídrico del miembro s2

BALANCE HIDRICO DE SUELOS Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Formación San Salvador, miembro s2
Fecha: Septiembre de 2015

Textura de Suelo: Franco arenosa

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.

I: Infiltración.

CC: Capacidad de Campo.

PM: Punto de Marchitez.

PR: Profundidad de Raíces.

(CC-PM): Rango de Agua Disponible.

DS: Densidad de Suelo.

C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR

C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR

Kp: Factor por pendiente (ver léame)

Kv: Factor por vegetación (ver léame)

Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.

Pi: Precipitación que infiltra.

ESC: Escorrentía Superficial

ETP: Evapotranspiración Potencial.

ETR: Evapotranspiración Real.

HSi: Humedad de Suelo Inicial.

HD: Humedad Disponible

HSf: Humedad de Suelo Final.

DCC: Déficit de Capacidad de Campo.

Rp: Recarga Potencial

NR: Necesidad de Riego.

Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]

1867.65

Kp [0.01%]

0.10

Kv [0.01%]

0.14

Kfc [0.01%]

1

I [0.01%]

1

DS (g/cm³):

1.50

PR (mm)

1408.00

HSi (mm)

238.66

Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?

11

Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12

0.15

por peso

(%)

(mm)

CC 11.30 238.66

PM 3.40 71.81

(CC-PM) 7.90 166.85

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	0.44	1.05	8.33	25.51	188.17	237.82	187.41	269.11	349.43	294.47	63.49	5.51	1630.75
Ret [mm]	0.44	1.05	5.00	5.00	28.55	36.09	28.44	40.83	53.02	44.68	9.63	5.00	257.74
Pi (mm)	0.00	0.00	3.33	20.51	159.62	201.73	158.97	228.27	296.41	249.79	53.86	0.51	1373.01
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	139.68	142.65	175.69	178.43	169.67	151.87	163.61	159.20	139.27	139.36	130.98	131.75	1822.17
HSi (mm)	134.73	104.10	88.30	81.19	85.72	158.54	222.17	227.89	238.66	238.66	238.66	191.81	
C1	0.38	0.19	0.12	0.18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.72	
C2	0.06	0.03	0.00	0.00	0.02	0.82	0.87	1.00	1.00	1.00	0.54	0.15	
HD (mm)	62.92	32.30	19.82	29.90	173.53	288.47	309.34	384.36	463.25	416.64	220.70	120.51	
ETR (mm)	30.63	15.81	10.43	15.99	86.80	138.10	153.25	159.20	139.27	139.36	100.71	57.59	1047.15
HSf (mm)	104.10	88.30	81.19	85.72	158.54	222.17	227.89	238.66	238.66	238.66	191.81	134.73	
DCC (mm)	134.55	150.36	157.46	152.94	80.12	16.48	10.76	0.00	0.00	0.00	46.85	103.93	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	58.31	157.13	110.43	0.00	0.00	325.86
NR (mm)	243.61	277.20	322.72	315.38	162.99	30.25	21.12	0.00	0.00	0.00	77.12	178.09	1628.48

Anexo 27: Balance hídrico del miembro s3'a

BALANCE HIDRICO DE SUELOS Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Formación San Salvador, miembro s3a
Fecha: Septiembre de 2015
Textura de Suelo: Franco arenoso

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.
 I: Infiltración.
 CC: Capacidad de Campo.
 PM: Punto de Marchitez.
 PR: Profundidad de Raíces.
 (CC-PM): Rango de Agua Disponible.
 DS: Densidad de Suelo.
 C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR
 C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR
 Kp: Factor por pendiente (ver léame)
 Kv: Factor por vegetación (ver léame)
 Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.
 Pi: Precipitación que infiltra.
 ESC: Escorrentía Superficial
 ETP: Evapotranspiración Potencial.
 ETR: Evapotranspiración Real.
 HSi: Humedad de Suelo Inicial.
 HD: Humedad Disponible
 HSf: Humedad de Suelo Final.
 DCC: Déficit de Capacidad de Campo.
 Rp: Recarga Potencial
 NR: Necesidad de Riego.
 Ret: Retención de Lluvia

fc [mm/d]	496.72
Kp [0.01%]	0.11
Kv [0.01%]	0.12
Kfc [0.01%]	0.85805
I [0.01%]	1
DS (g/cm ³):	1.50
PR (mm)	1197.14
HSi (mm)	202.92
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	11
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12	0.13

por peso		
	(%)	(mm)
CC	11.30	202.92
PM	3.40	61.05
(CC-PM)	7.90	141.86

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	0.48	0.43	8.63	22.68	177.23	232.93	172.31	265.25	338.22	295.03	60.46	3.35	1576.98
Ret [mm]	0.48	0.43	5.00	5.00	22.99	30.21	22.35	34.41	43.87	38.27	7.84	3.35	214.19
Pi (mm)	0.00	0.00	3.63	17.68	154.24	202.71	149.96	230.84	294.35	256.76	52.62	0.00	1362.79
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	143.69	146.78	180.35	183.34	174.69	156.05	167.40	162.71	142.84	142.87	134.65	135.73	1871.10
HSi (mm)	110.53	85.47	72.84	66.67	69.30	136.19	193.89	192.06	202.92	202.92	202.92	159.82	
C1	0.35	0.17	0.11	0.16	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.70	
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.86	0.81	1.00	1.00	1.00	0.42	0.03	
HD (mm)	49.47	24.42	15.41	23.30	162.48	277.85	282.79	361.85	436.21	398.62	194.48	98.76	
ETR (mm)	25.06	12.63	9.80	15.05	87.34	145.02	151.78	162.71	142.84	142.87	95.72	49.29	1040.11
HSf (mm)	85.47	72.84	66.67	69.30	136.19	193.89	192.06	202.92	202.92	202.92	159.82	110.53	
DCC (mm)	117.44	130.08	136.25	133.62	66.72	9.03	10.85	0.00	0.00	0.00	43.10	92.39	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	57.28	151.51	113.89	0.00	0.00	322.68
NR (mm)	236.08	264.23	306.79	301.91	154.07	20.06	26.47	0.00	0.00	0.00	82.03	178.83	1570.47

Anexo 28: Balance hídrico del miembro s5'a

BALANCE HIDRICO DE SUELOS Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Formación San Salvador, miembro s5a
Fecha: Septiembre de 2015

Textura de Suelo: Franco arenoso

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.

I: Infiltración.

CC: Capacidad de Campo.

PM: Punto de Marchitez.

PR: Profundidad de Raíces.

(CC-PM): Rango de Agua Disponible.

DS: Densidad de Suelo.

C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR

C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR

Kp: Factor por pendiente (ver léame)

Kv: Factor por vegetación (ver léame)

Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.

Pi: Precipitación que infiltra.

ESC: Escorrentía Superficial

ETP: Evapotranspiración Potencial.

ETR: Evapotranspiración Real.

HSi: Humedad de Suelo Inicial.

HD: Humedad Disponible

HSf: Humedad de Suelo Final.

DCC: Déficit de Capacidad de Campo.

Rp: Recarga Potencial

NR: Necesidad de Riego.

Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]

563.38

Kp [0.01%]

0.12

Kv [0.01%]

0.14

Kfc [0.01%]

0.88141

I [0.01%]

1

DS (g/cm³):

1.50

PR (mm)

929.66

HSi (mm)

157.58

Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?

11

Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12

0.13

por peso

(%)

(mm)

CC 11.30 157.58

PM 3.40 47.41

(CC-PM) 7.90 110.16

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	0.45	0.97	8.37	25.15	186.77	237.19	185.48	268.61	347.99	294.54	63.10	5.24	1623.88
Ret [mm]	0.45	0.97	5.00	5.00	25.19	31.99	25.01	36.22	46.93	39.72	8.51	5.00	229.98
Pi (mm)	0.00	0.00	3.37	20.15	161.59	205.21	160.47	232.39	301.07	254.82	54.59	0.24	1393.90
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	140.19	143.18	176.28	179.06	170.31	152.40	164.09	159.65	139.73	139.81	131.45	132.26	1828.42
HSi (mm)	79.15	58.96	51.45	48.89	51.46	127.89	157.58	156.65	157.58	157.58	157.58	126.57	
C1	0.29	0.10	0.07	0.20	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.72	
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.97	1.00	1.00	1.00	0.30	0.00	
HD (mm)	31.74	11.54	7.41	21.63	165.64	285.69	270.63	341.63	411.23	364.99	164.76	79.40	
ETR (mm)	20.19	7.50	5.93	17.58	85.16	152.40	161.39	159.65	139.73	139.81	85.60	47.66	1022.61
HSf (mm)	58.96	51.45	48.89	51.46	127.89	157.58	156.65	157.58	157.58	157.58	126.57	79.15	
DCC (mm)	98.62	106.12	108.68	106.11	29.68	0.00	0.92	0.00	0.00	0.00	31.00	78.43	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	23.12	0.00	71.81	161.34	115.01	0.00	0.00	371.29
NR (mm)	218.62	241.80	279.04	267.59	114.84	0.00	3.62	0.00	0.00	0.00	76.85	163.03	1365.39

Anexo 29: Balance hídrico del miembro s5'b

BALANCE HIDRICO DE SUELOS Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Formación San Salvador, miembro s5b

Fecha: Septiembre de 2015

Textura de Suelo: Franco arenoso

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.

I: Infiltración.

CC: Capacidad de Campo.

PM: Punto de Marchitez.

PR: Profundidad de Raíces.

(CC-PM): Rango de Agua Disponible.

DS: Densidad de Suelo.

C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR

C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR

Kp: Factor por pendiente (ver léame)

Kv: Factor por vegetación (ver léame)

Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.

Pi: Precipitación que infiltra.

ESC: Escorrentía Superficial

ETP: Evapotranspiración Potencial.

ETR: Evapotranspiración Real.

HSi: Humedad de Suelo Inicial.

HD: Humedad Disponible

HSf: Humedad de Suelo Final.

DCC: Déficit de Capacidad de Campo.

Rp: Recarga Potencial

NR: Necesidad de Riego.

Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]

420.43

Kp [0.01%]

0.05

Kv [0.01%]

0.11

Kfc [0.01%]

0.82528

I [0.01%]

0.98282

DS (g/cm³):

1.50

PR (mm)

719.13

HSi (mm)

121.89

Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?

11

Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12

0.14

por peso

(%)

(mm)

CC 11.30 121.89

PM 3.40 36.68

(CC-PM) 7.90 85.22

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	0.39	2.15	7.81	30.49	207.41	246.43	213.97	275.89	369.13	293.49	68.81	9.33	1725.30
Ret [mm]	0.39	2.15	5.00	5.00	29.53	35.09	30.47	39.28	52.56	41.79	9.80	5.00	256.06
Pi (mm)	0.00	0.00	2.76	25.05	174.82	207.71	180.35	232.54	311.13	247.38	58.00	4.25	1444.00
ESC (mm)	0.00	0.00	0.05	0.44	3.06	3.63	3.15	4.06	5.44	4.32	1.01	0.07	25.24
ETP (mm)	132.62	135.38	167.50	169.79	160.85	144.52	156.94	153.04	133.00	133.20	124.52	124.75	1736.11
HSi (mm)	55.85	40.93	37.55	36.74	36.77	117.89	121.89	121.89	121.89	121.89	121.89	103.97	
C1	0.23	0.05	0.04	0.29	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.84
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.22	0.00	
HD (mm)	19.18	4.25	3.64	25.12	174.92	288.92	265.57	317.76	396.35	332.59	143.22	71.55	
ETR (mm)	14.92	3.38	3.58	25.02	93.70	144.52	156.94	153.04	133.00	133.20	75.92	52.37	989.59
HSf (mm)	40.93	37.55	36.74	36.77	117.89	121.89	121.89	121.89	121.89	121.89	103.97	55.85	
DCC (mm)	80.96	84.34	85.15	85.12	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	17.92	66.04	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	59.19	23.41	79.50	178.13	114.18	0.00	0.00	454.40
NR (mm)	198.66	216.34	249.08	229.89	71.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	66.52	138.42	1170.06

Anexo 30: Balance hídrico del miembro s5'c

BALANCE HIDRICO DE SUELOS Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Formación San Salvador, miembro s5c

Fecha: Septiembre de 2015

Textura de Suelo: Franco arenoso

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.

I: Infiltración.

CC: Capacidad de Campo.

PM: Punto de Marchitez.

PR: Profundidad de Raíces.

(CC-PM): Rango de Agua Disponible.

DS: Densidad de Suelo.

C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR

C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR

Kp: Factor por pendiente (ver léame)

Kv: Factor por vegetación (ver léame)

Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.

Pi: Precipitación que infiltra.

ESC: Escorrentía Superficial

ETP: Evapotranspiración Potencial.

ETR: Evapotranspiración Real.

HSi: Humedad de Suelo Inicial.

HD: Humedad Disponible

HSf: Humedad de Suelo Final.

DCC: Déficit de Capacidad de Campo.

Rp: Recarga Potencial

NR: Necesidad de Riego.

Ret: Retención de Iluvia

fc [mm/d]

1358.91

Kp [0.01%]

0.09

Kv [0.01%]

0.17

Kfc [0.01%]

0.99398

I [0.01%]

1

DS (g/cm³):

1.50

PR (mm)

1764.07

HSi (mm)

299.01

Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?

11

Lluvia retenida [0.01%]: Bosques=0.2, otros=0.12

0.18

por peso

(%)

(mm)

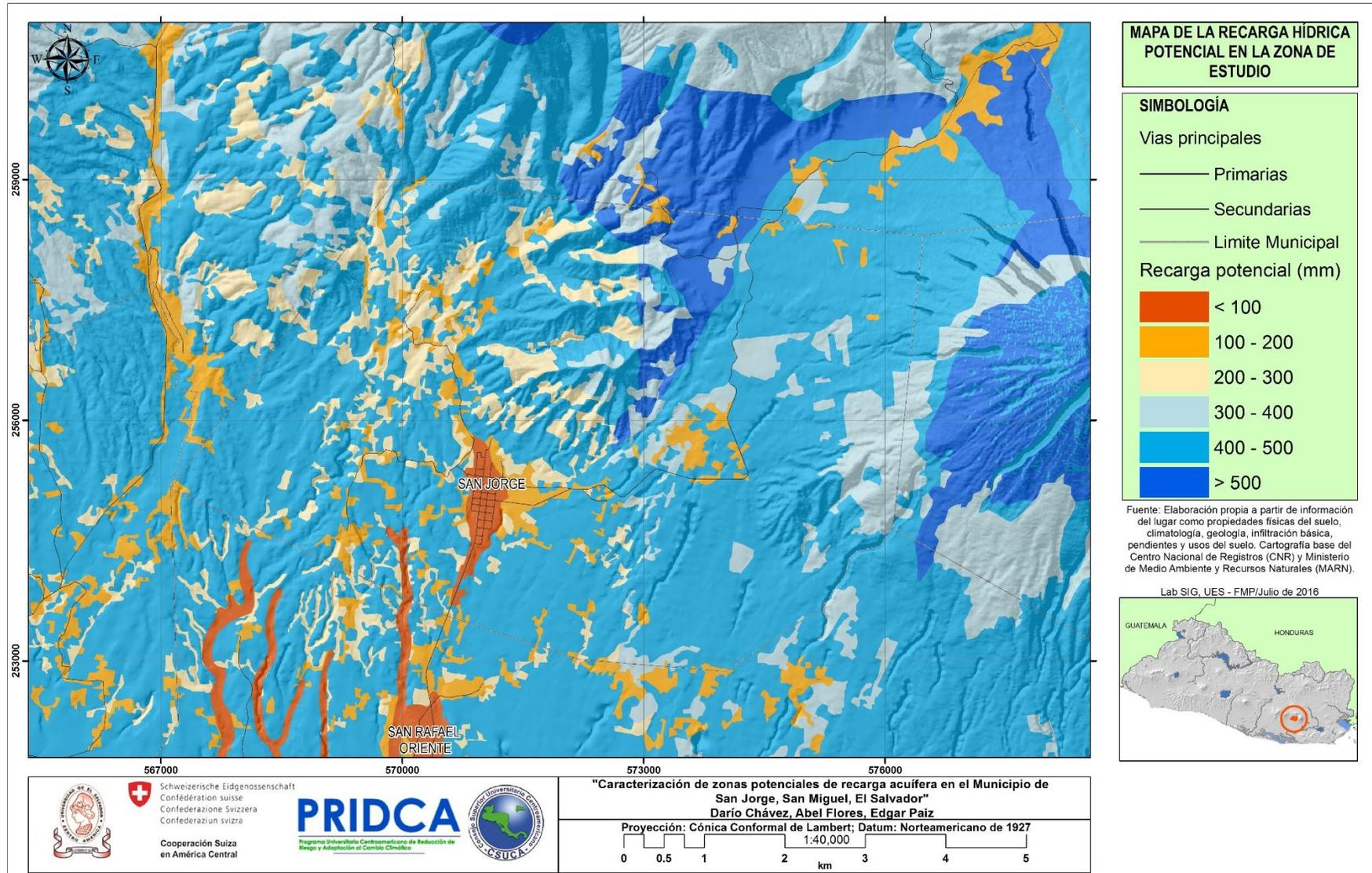
CC 11.30 299.01

PM 3.40 89.97

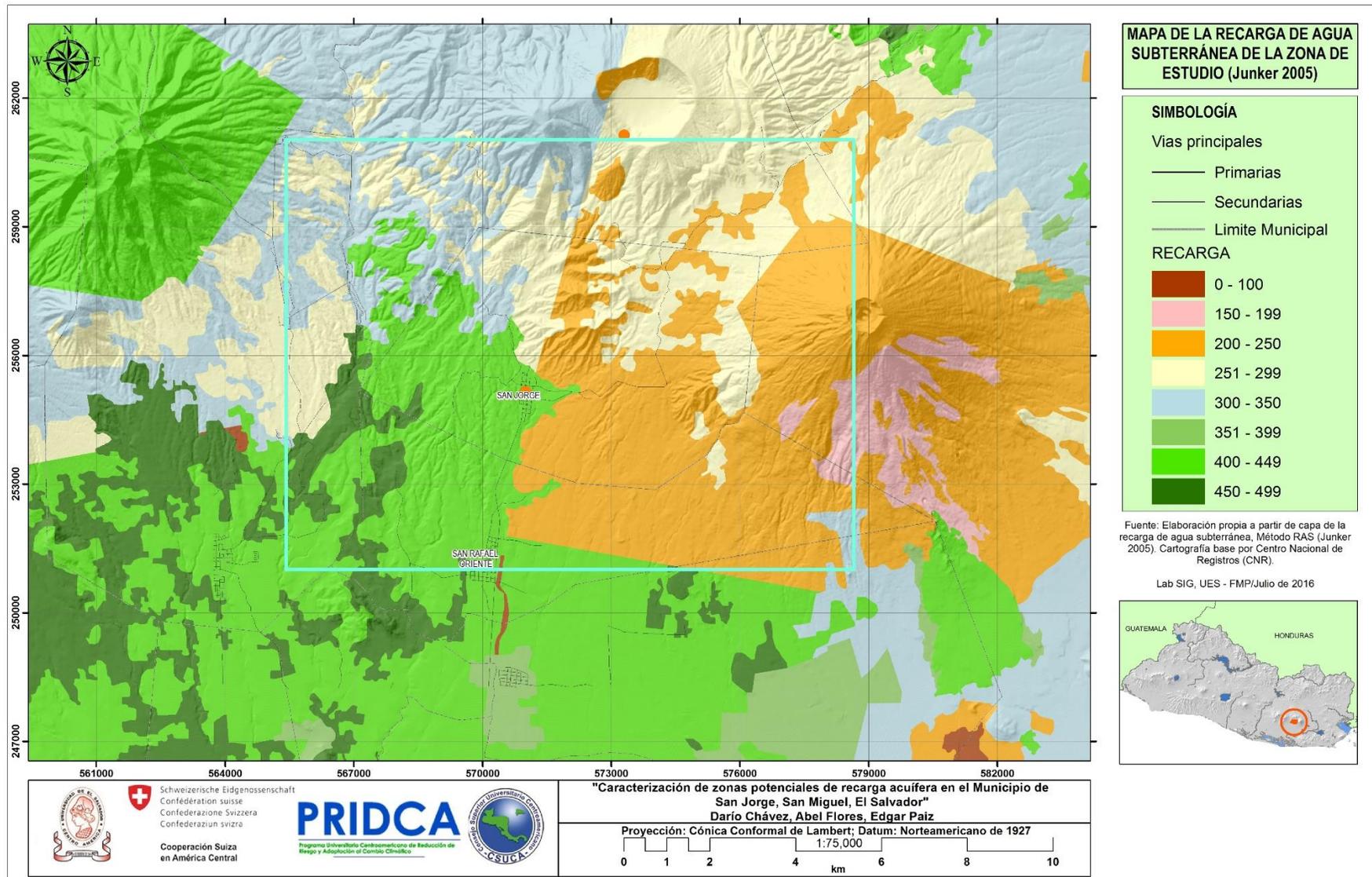
(CC-PM) 7.90 209.04

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	0.36	2.58	7.61	32.45	215.00	249.82	224.44	278.57	376.90	293.11	70.91	10.83	1762.58
Ret [mm]	0.36	2.58	5.00	5.73	37.99	44.14	39.66	49.22	66.60	51.79	12.53	5.00	320.60
Pi (mm)	0.00	0.00	2.61	26.72	177.01	205.68	184.78	229.34	310.31	241.32	58.38	5.83	1441.97
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	129.84	132.52	164.27	166.38	157.37	141.62	154.32	150.61	130.53	130.77	121.98	121.99	1702.19
HSi (mm)	189.61	146.94	122.27	108.22	113.39	196.31	273.45	299.01	299.01	299.01	299.01	253.97	
C1	0.48	0.27	0.17	0.22	0.96	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.81	
C2	0.18	0.10	0.04	0.04	0.24	0.82	1.00	1.00	1.00	1.00	0.70	0.34	
HD (mm)	99.64	56.97	34.91	44.98	200.43	312.02	368.27	438.39	519.35	450.36	267.42	169.83	
ETR (mm)	42.67	24.67	16.65	21.55	94.09	128.53	154.32	150.61	130.53	130.77	103.42	70.19	1068.00
HSf (mm)	146.94	122.27	108.22	113.39	196.31	273.45	299.01	299.01	299.01	299.01	253.97	189.61	
DCC (mm)	152.07	176.74	190.79	185.62	102.70	25.55	0.00	0.00	0.00	0.00	45.04	109.40	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.91	78.74	179.78	110.55	0.00	0.00	373.97
NR (mm)	239.24	284.59	338.40	330.45	165.98	38.65	0.00	0.00	0.00	0.00	63.60	161.20	1622.10

Anexo 31: Mapa de la recarga potencial (Balance hídrico de suelos) de la zona de estudio.



Anexo 32: Mapa de la recarga de agua subterránea (Junker 2005)



Anexo 33: Mapa de categorías de la recarga acuífera potencial de la zona de estudio.

