

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS**



**MÉTODO DE MAPEO DIGITAL PARA UNA APROXIMACION
A LA INTERPRETACION DE LA FERTILIDAD DE SUELOS
Y SU RELACION CON EL RENDIMIENTO DE MAIZ (*Zea
mays*), EN EL MUNICIPIO DE COMACARAN, SAN MIGUEL,
EL SALVADOR.**

**POR
TORRES GAMEZ LUIS DAVID
VÁSQUEZ MÉNDEZ FERNANDO JOSÉ**

CIUDAD UNIVERSITARIA, OCTUBRE DE 2017

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS**



**MÉTODO DE MAPEO DIGITAL PARA UNA APROXIMACION
A LA INTERPRETACION DE LA FERTILIDAD DE SUELOS
Y SU RELACION CON EL RENDIMIENTO DE MAIZ (*Zea
mays*), EN EL MUNICIPIO DE COMACARAN, SAN MIGUEL,
EL SALVADOR.**

**POR
TORRES GAMEZ LUIS DAVID
VÁSQUEZ MÉNDEZ FERNANDO JOSÉ**

CIUDAD UNIVERSITARIA, OCTUBRE DE 2017

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y MEDIO
AMBIENTE**



**MÉTODO DE MAPEO DIGITAL PARA UNA APROXIMACION
A LA INTERPRETACION DE LA FERTILIDAD DE SUELOS
Y SU RELACION CON EL RENDIMIENTO DE MAIZ (*Zea
mays*), EN EL MUNICIPIO DE COMACARAN, SAN MIGUEL,
EL SALVADOR.**

POR:

TORRES GÁMEZ, LUIS DAVID.

VÁSQUEZ MÉNDEZ, FERNANDO JOSÉ

REQUISITO PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO

SAN SALVADOR, OCTUBRE DE 2017

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

LIC. M. Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

LIC. CRISTÓBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ

FACULTAD DE CIENCIAS AGRÓNOMICAS

Ing. Agr. JUAN ROSA QUINTANILLA QUINTANILLA

DECANO

Ing. Agr. FERNANDO LUS CASTANEDA ROMERO

SECRETARIO

JEFE DEL DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE

Ing. Agr. Msc. JOSÉ MAURICIO TEJADA ASCENSIO.

DOCENTES DIRECTORES:

ING. AGR. ABEL ALEXEI, ARGUETA PLATERO.

DR. REYNALDO ADALBERTO LÓPEZ LANDAVERDE.

ING. AGR. QUIRINO ARGUETA PORTILLO

COORDINADOR GENERAL DE LOS PROCESOS DE GRADUACIÓN

ING. AGR. SABAS ALBERTO ARGUETA PALACIOS.

RESUMEN.

La presente investigación se realizó en los Cantones del Platanarillo y Colorado pertenecientes al Municipio de Comacarán del Departamento de San Miguel en los meses comprendidos desde junio de 2016 a mayo de 2017. El objetivo del estudio fue generar mapas de propiedades físicas y químicas que permitan describir el comportamiento de la fertilidad de los suelos y de esta manera poder generar recomendaciones técnicas sobre el manejo de la fertilidad de los suelos, además de generar una herramienta que permita a los técnicos tener un apoyo en la toma de decisiones de campo. Se utilizaron las bases de datos siguientes: mapa de uso actual, mapa de geología, el modelo de elevación digital, mapa de red vial, mapa de departamentos, cantones y municipios de El Salvador, además de herramientas para realizar el muestreo de suelo como lo es barreno, pala, bolsas plásticas, palines, cubetas. Se realizó primeramente la generación del modelo de elevación digital (MDE), con las curvas a nivel, posteriormente se generaron las capas de índice de posición topográfico (TPI), el índice de humedad topográfico (TWI), el mapa de costo y el mapa de red vial, utilizando la metodología del Hipercubo Latino Condicionado, se determinaron los puntos a muestrear, procediendo a coleccionar las muestras de suelo para realizar el análisis en laboratorio, seguidamente estos resultados se analizaron para obtener tablas y mapas de propiedades físicas y químicas. Finalmente, con los datos de rendimiento se procedió a realizar el mapa de rendimiento del cultivo del maíz, además de las recomendaciones del manejo de fertilidad de los suelos que les permita a los productores mejores rendimientos. La aplicación de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite el desarrollo de mapas que caracterizan las propiedades de los suelos, obteniendo así un mapa de fertilidad, el cual se convierte en una herramienta para productores y técnicos, que puedan con más precisión conocer las condiciones de fertilidad y junto con las demandas de nutrientes de los cultivos, hacer recomendaciones de enmiendas o generar recomendaciones de aplicaciones de dosis de fertilizante más eficaz y aumentar así el rendimiento de los cultivos. De acuerdo al mapa de fertilidad obtenido un 29.82 % del área se considera que tiene un nivel bajo y un 39.04% un nivel alto, para los cantones del Colorado y el Platanarillo, del municipio de Comacarán, con estos resultados se desarrolló un programa de fertilidad propio para cada área específica, para equilibrar las deficiencias de los elementos del suelo, como fue el Fósforo, zinc, cobre, Hierro.

Palabras claves: Mapeo de la fertilidad del suelo, Hipercubo Latino Condicional, Análisis de suelo.

AGRADECIMIENTOS

A DIOS NUESTRO PADRE CELESTIAL Y A LA VÍRGEN MARÍA:

Por darnos el entendimiento y la sabiduría para realización de nuestro trabajo e iluminarnos en todos los momentos de nuestra vida.

A LOS QUE LABORAN EN EL DECANATO:

Ing. Msc. Juan Rosa Quintanilla, Dr. Francisco Lara Ascencio.

A LOS QUE LABORAN EN LA ESCUELA DE POSGRADO Y EDUCACIÓN CONTINUA:

Ing. Agr. Mario Antonio Orellana, Ing Agr. Miguel Hernández, A niña Milita.

A NUESTROS DOCENTES DIRECTORES:

Ph. D. Reynaldo Adalberto López Landaverde, Ing. Msc. Quirino Argueta Portillo, Ing. Agr. Abel Alexei Argueta Platero.

AL PERSONAL DE CATHOLIC RELIEF SERVICES (CRS):

Ing. Agr. Francisco Casares, Ing. Norma Minero, Ing. Agr. Douglas Saleh, Lic. Gloria Recinos, Ing. Amb. Jaime Tobar.

A LOS DOSCENTES DE LA FACULTAD:

Ing. Agr. Sermeño, Ing. Agr. Carlos Aguirre, Ing. Agr. Efraín Urrutia, Ing. Agr. Elmer Corea.

A LOS ASESORES DE LA UNIVERSIDAD DE PURDUE:

Msc. Minerva Dorantes, Ph. D. Phillipe Owen, Ph. D. Zamir Libohova

AL GRUPO DE MAPEO DIGITAL DE SUELOS:

Ing. Agr. Sol María Muñoz., Ing. Agr. Rene Arévalo, Lic. Geovany Molina, Ing. Agr. Bernardo

AL PERSONAL DEL CEDAF MORAZAN:

Ing. Agr. Marlon, Ing. Agr. David Turcios, Al señor Oscar.

LUIS TORRES Y FERNANDO VÁSQUEZ.

DEDICATORIA.

A DIOS, que siempre me dio la sabiduría y las fuerzas para salir adelante y porque me permitió llegar hasta donde ahora estoy.

A MIS PADRES Y HERMANA, José Fernando Vásquez, Sara Inéz de Vásquez y Marielos Vásquez porque siempre estuvieron a mi lado, brindándome su comprensión y apoyo total.

A MIS AMIGOS, Fátima, Nelson, Keni, Luis, Alex por su apoyo incondicional durante el proceso de elaboración de la tesis.

A MI NOVIA, Celene Lemus por su apoyo incondicional, comprensión, ayuda y porque siempre me dio los ánimos que necesitaba.

A CATHOLIC RELIEF SERVICES (CRS), por brindarnos la oportunidad de crecer como futuros profesionales y contar con apoyo internacional en nuestro proceso de elaboración de tesis.

A LA UNIVERSIDAD DE PURDUE, especialmente a Minerva Dorantes y Zamir Libohova por enseñarnos y asesorarnos durante todo el proceso de mapeo digital de suelos, por sus consejos y por compartir cada uno de sus conocimientos.

A MI COMPAÑERO DE TESIS, Luis Torres, por ser un buen amigo y compañero en cada una de las etapas del proceso de elaboración de nuestra tesis.

CATHOLIC RELIEF SERVICES (CRS), por su apoyo incondicional y por permitirnos crecer como profesionales.

Fernando Vásquez

DEDICATORIA.

A DIOS Y A MARÍA SANTÍSIMA, que siempre me dio la sabiduría, bendición y las fuerzas para lograr mis sueños.

A MIS MADRE Y HERMANA, María Juana Torres Gámez, Sara Raquel Torres, por su incondicional apoyo en toda la etapa de mi carrera.

A MIS ABUELOS, José Demetrio Torres y Catalina Gámez por darme sus consejos y apoyo en mis estudios

A MIS TÍAS/TÍOS, a mis tías Rita Esmeralda y Judith Ester por su apoyo y comprensión durante mis estudios, a mi tío Ángel, porque siempre me dio ánimo y me mostro su apoyo en las etapas difíciles de mi carrera.

A MIS AMIGOS, Fernando, Valery, Javier, Helen Zamora por su apoyo incondicional durante el proceso de elaboración de la tesis.

A MI NOVIA, Judith Zavaleta por su ayuda incondicional en momentos claves en el desarrollo de esta investigación y por los ánimos que siempre me brindo.

A CATHOLIC RELIEF SERVICES (CRS), por brindarnos la oportunidad de crecer como futuros profesionales y contar con apoyo internacional en nuestro proceso de elaboración de tesis.

A LA UNIVERSIDAD DE PURDUE, especialmente a Minerva Dorantes por enseñarnos y asesorarnos durante todo el proceso de mapeo digital de suelos, por sus consejos y por compartir cada uno de sus conocimientos.

MI COMPAÑERO DE TESIS, Fernando Vásquez, por ser un buen amigo y compañero en cada una de las etapas del proceso de elaboración de nuestra tesis.

Luis Torres

ÍNDICE GENERAL

Contenido.....	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.	3
2.1. Maíz.....	3
2.1.1. Importancia Socio-económica	3
2.1.2. Datos económicos.....	3
2.1.3. Seguridad alimentaria nutricional	4
2.2. El suelo	5
2.2.1. Generalidades.....	5
2.2.2. Factores de formación del suelo.....	6
2.2.2.1. Material parental	6
2.2.2.2. Relieve.....	7
2.2.2.3. Organismos	7
2.2.2.4. Clima	7
2.2.2.5. Tiempo.....	8
2.2.3. Factores de formación en relación con la fertilidad del suelo	8
2.2.4. Fertilidad del suelo.....	9
2.2.5. Determinación de un plan de fertilización para el cultivo de maíz	9
2.2.5.1. Metodologías de muestreo y Análisis de suelos	9
2.2.5.2. Muestreo de suelo según manual de CENTA.....	9
2.2.5.3. Muestreo por Hipercubo Latino Condicional (LHS)	10
2.2.5.4. Procedimientos en el muestreo georreferenciado	11
2.2.6. Diagnóstico de la fertilización.	12
2.2.6.1. Análisis químico de suelos.	12
2.2.6.2. Tipos de análisis de suelo más comunes.....	12
2.2.6.3. Importancia de los análisis químicos	13
2.2.7. Importancia de los elementos en el cultivo de maíz.....	16
2.2.8. Diseño del plan de fertilización.	16
2.2.9. Interpretación de resultados del análisis de suelos.....	16
2.3. El mapeo o cartografía digital del suelo	17
2.3.1. Fundamento de Mapeo digital de suelo.....	18

2.3.2.	Mapeo digital de fertilidad en el suelo	19
2.3.3.	Información documental para el mapeo digital de suelos	21
2.3.4.	Conocimiento experto	21
2.3.5.	Uso de la teoría de lógica difusa.	22
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	23
3.1.	DESCRIPCION DEL ESTUDIO	23
3.2.	Descripción del flujograma de trabajo	24
3.3	Metodología de gabinete.	25
3.3.1.	Recopilación de la información	25
3.3.2.	Clasificación de la información.....	25
3.3.3.	Archivos de información geográfica	26
3.3.4.	Información documental de suelos	26
3.3.5.	Utilización del conocimiento experto.....	26
3.3.6.	Calidad de datos geográficos	26
3.3.7.	Herramientas metodológicas SIG.....	27
3.3.7.1.	ArcGis.....	27
3.3.7.2.	Qgis	27
3.3.7.3.	SoLIM (Soil-land Inference Model).....	27
3.3.8.	Diagnóstico de aspectos biofísicos.	28
3.3.8.1.	División política administrativa.....	28
3.3.8.2.	Red hídrica.....	28
3.3.8.3.	Mapa de uso de suelo.	28
3.3.8.4.	Geología de la zona de estudio.....	28
3.3.8.5.	Zonas Agrológicas.....	28
3.3.9.	Generación de mapas de atributos de terreno.....	29
3.3.9.1.	Configuración de software QGIS y sus plugins o complementos	29
3.3.9.2.	Modelo de elevación digital (DEM)	30
3.3.9.3.	Sombreado analítico	30
3.3.9.4.	Pendiente.....	30
3.3.9.5.	Índice de humedad topográfico (TWI).....	31
3.3.9.6.	Índice de posición topográfica (TPI)	31
3.3.9.7.	Índice de multirresolución de planicie de fondo de valle (MRVBF) ...	32
3.3.10.	Mapa de costo	33

3.3.11.	Elaboración de mapa de puntos de muestreo	33
3.3.12.	Análisis de fertilidad químico del suelo.....	33
3.3.13.	Toma de muestras y georeferenciación de los puntos de muestreo.	33
3.3.14.	Análisis de laboratorio.....	35
3.3.14.1.	Características físicas.....	35
3.3.14.2.	Análisis químico del suelo	36
3.3.14.3.	Elementos y propiedades químicas	36
3.3.15.	Elaboración de mapas de propiedades.	36
3.3.15.1.	Elaboración de mapa de clases genéricas.....	37
3.3.15.2.	Elaboración de mapas de propiedades químicas y físicas	37
3.3.16.	Elaboración de mapa de fertilidad.....	37
3.3.17.	Elaboración de mapa de rendimiento de maíz.....	38
3.3.18.	Recomendación técnica para el manejo de la fertilidad del cultivo de maíz.....	38
3.3.19.	Validación en campo.....	40
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
4.1.	Diagnostico biofísico.	41
4.1.1.	División política y administrativa.....	41
4.1.2.	Red hídrica.....	42
4.2.	Suelos.....	43
4.2.1.	Geología.....	43
4.2.2.	Agrología.....	44
4.2.3.	Uso actual del suelo.	47
4.3.	Mapeo Digital de Suelos.	49
4.3.1.	Mapa de modelo de elevación digital (DEM).	49
4.3.2.	Mapa de pendiente.....	50
4.3.3.	Mapa de Índice de Humedad Topográfica (TWI).	51
4.3.4.	Mapa de Índice de Posición Topográfica (TPI).....	52
4.3.5.	Mapa de Multirresolución de Fondo de Valle (MRVBF).....	54
4.3.6	Muestreo de suelo.	56
4.3.7.	Mapa de clases genéricas.....	57
4.3.8.	Mapa de Profundidad efectiva.....	58
4.3.9.	Densidad Aparente de los suelos de la zona	59

4.3.10. Textura de suelo	60
4.3.11. Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	63
4.3.12. Mapa de Acidez del suelo (pH en H ₂ O).....	64
4.3.13. Materia orgánica (MO).....	66
4.3.14. Mapa de Fósforo (P).	67
4.3.15. Mapa de Potasio (K).....	68
4.3.16. Mapa de Calcio (Ca).....	70
4.3.17. Mapa de Magnesio (Mg).	71
4.3.18. Mapa de Zinc (Zn).	72
4.3.19. Mapa de Cobre (Cu).....	74
4.3.20. Mapa de Hierro (Fe).	75
4.3.21. Mapa de Manganeseo (Mn).....	76
4.3.22. Rendimiento de productores.....	78
4.3.23. Mapa de Fertilidad.	81
4.4. Recomendaciones de manejo de fertilidad.	83
4.4.1. Requerimiento de la variedad de maíz H-59.....	83
4.4.2 Análisis de fertilidad y recomendación por productor.	83
4.4.3. Manejo de la acidez.	84
4.4.3.1. Sitio 1.....	84
4.4.3.2. Sitio 2.....	84
4.4.3.3. Sitio 3.....	85
4.4.3.4. Sitio 4.....	85
4.4.3.5. Sitio 5.....	85
4.4.3.6. Sitio 6.....	86
5. CONCLUSIONES	89
6. RECOMENDACIONES.....	90
7. BIBLIOGRAFÍA	91
8. ANEXOS	96
8.1 Cuadros.	104
8.2 Figuras.	109

ÍNDICE DE CUADROS

Nº de Cuadro.....	Pág.
Cuadro 1. Variedades y rendimientos de cultivo de maíz (CENTA, 2013).....	4
Cuadro 2. Forma de elementos en el suelo (Cepeda, 2010).....	13
Cuadro 3. Macronutrientes y micronutrientes para el cultivo de maíz.	14
Cuadro 4. Distancia en metros de múltiplo buffer.....	33
Cuadro 5. Método de análisis utilizado en el laboratorio de suelos del centro nacional de tecnología agropecuaria y forestal.....	36
Cuadro 6. Requisitos del programa 4R	39
Cuadro 7. Determinación de Fertilización del cultivo.	39
Cuadro 8. Longitud de ríos	42
Cuadro 9. Geología de la zona de estudio y su extensión en km ²	43
Cuadro 10. Clases de suelos predominantes en la zona de estudio.....	44
Cuadro 11. Uso actual del suelo.....	47
Cuadro 12. Áreas de los rangos altitudinales de la zona de estudio	49
Cuadro 13. Áreas de porcentajes de Pendiente.....	50
Cuadro 14. Áreas de Índice de humedad topográfico.....	52
Cuadro 15. Áreas de Índice de posición Topográfica.	53
Cuadro 16. Áreas de Índice de multirresolución de Fondo de Valle.	54
Cuadro 17. Áreas de Mapa de clases	57
Cuadro 18. Áreas de Mapa de profundidad efectiva	59
Cuadro 19. Áreas de Mapa densidad aparente del suelo.....	60
Cuadro 20. Áreas de Mapa de Textura de suelo	61
Cuadro 21. Áreas de Capacidad de intercambio catiónico.....	63
Cuadro 22. Áreas de Acidez del suelo pH en agua.....	65
Cuadro 23. Áreas de contenido de Materia Orgánica.....	66
Cuadro 24. Áreas de Contenido de Fósforo.....	68
Cuadro 25. Áreas de contenido de Potasio.....	69
Cuadro 26. Áreas de contenido de Calcio.....	70
Cuadro 27. Áreas de contenido de Magnesio.	72
Cuadro 28. Áreas de Contenido de Zinc	73
Cuadro 29. Áreas de contenido de Cobre.	74
Cuadro 30. Áreas de contenido de Hierro.....	76

Cuadro 31. Áreas de contenido de Manganeseo.....	77
Cuadro 32. Áreas de rendimiento de cultivo de Maíz.....	79
Cuadro 33. Áreas de contenido de fertilidad.	81
Cuadro 34. Requerimiento nutricional del cultivo de maíz.	83
Cuadro 35. Resumen de Manejo de Fertilización.	87
Cuadro 36. Tabla de encalado para el control de acidez en el suelo.	88

ÍNDICE DE FIGURAS

N° de Figura.....	Pág.
Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.	23
Figura 2. Flujograma de trabajo.	24
Figura 3. Estructura de almacenamiento de base de datos.....	25
Figura 4. Toma de muestras en campo.	34
Figura 5. Herramientas de muestreo en campo.....	34
Figura 6. Toma de muestras densidad aparente.	35
Figura 7. Identificación de muestras.	35
Figura 8. División política y administrativa de los cantones El Platanarillo y El Colorado.....	41
Figura 9. Red Hídrica de la zona de estudio.	42
Figura 10. Geología de la zona de estudio.....	43
Figura 11. Clases de suelo de los cantones El Platanarillo y El Colorado.	47
Figura 12. Uso del suelo de la zona de estudio.	48
Figura 13. Mapa de modelo de elevación digital.....	50
Figura 14. Pendiente de los cantones El Platanarillo y El Colorado	51
Figura 15. Índice de humedad topográfico.	52
Figura 16. Mapa de índice de posición topográfica.....	53
Figura 17. Mapa de multirresolución de fondo de Valle.....	55
Figura 18. Puntos de muestreo obtenidos por la metodología del LHS	57
Figura 19. Mapa de clases genérico	58
Figura 20. Mapa de profundidad efectiva.....	59
Figura 21. Mapa de densidad aparente	60
Figura 22. Mapa de textura de suelo.....	61
Figura 23. Capacidad de intercambio catiónico.	64

Figura 24. Acidez del Suelo (pH).....	65
Figura 25. Contenido de Materia Orgánica.....	67
Figura 26. Contenido de Fósforo en la zona de estudio.	68
Figura 27. Contenido de Potasio.	69
Figura 28. Contenido de Calcio.....	71
Figura 29. Contenido de magnesio.....	72
Figura 30. Contenido de zinc.	73
Figura 31. Contenido de Cobre.....	75
Figura 32. Contenido de Hierro.....	76
Figura 33. Contenido de manganeso.....	77
Figura 34. Rendimiento de los cantones El Platanarillo y El Colorado.....	79
Figura 35. Contenido de fertilidad de los suelos de la zona de estudio.	82

ÍNDICE DE ANEXOS

N° de Anexo.....	Pág.
A- 1. Calculo para determinar dosis de fertilización caso 1.	96
A- 2. Calculo para determinar dosis de fertilización caso 2.	97
A- 3. Calculo para determinar dosis de fertilización caso 3.	98
A- 4. Calculo para determinar dosis de fertilización caso 4.	99
A- 5. Calculo para determinar dosis de fertilización caso 5.	101
A- 6 Calculo para determinar dosis de fertilización caso 6.	102

CUADROS

N° de Cuadro.....	Pág.
Cuadro A- 1. Importaciones de maíz en los periodos de 2010 a 2015 (MAG, 2016).	104
Cuadro A- 2. Exportaciones de maíz en los periodos de 2010 a 2015 (MAG, 2016).	104
Cuadro A- 3. Precio de maíz por quintal mensual durante el periodo de 2015.	104
Cuadro A- 4. Superficie de Producción (mz), producción total por año (qq) y productividad en (qq/mz) del maíz en el país (CENTA, 2013).	104
Cuadro A- 5. Información general de los sitios de muestreo y resultados de laboratorio (textura, pH, Macronutrientes).....	105

Cuadro A- 6. Resultados de laboratorio de laboratorio (Micronutrientes, Suma de bases, MO)	105
Cuadro A- 7. Resultado de laboratorio (Micronutrientes, DA)	106
Cuadro A- 8. Estadística zonal para la zona de estudio.....	106
Cuadro A- 9. Niveles críticos para la investigación de análisis de suelo	107
Cuadro A- 10. Tipo de métodos de aplicación.....	107
Cuadro A- 11. Categorías del pH del suelo (Acidez-Alcalinidad) en agua relación 1:2.5	108

FIGURAS.

Nº de Figura.....	Pág.
Figura A- 1. Mapa de pobreza de El Salvador (CNR, sf).....	109
Figura A- 2. Zonas productoras de maíz en El Salvador (MAG-2015).	109
Figura A- 3. Generación de sombreado analítico.	110
Figura A- 4. Elaboración de Mapa de pendiente.....	110
Figura A- 5. Elaboración de Índice de humedad Topográfica.....	111
Figura A- 6. Elaboración de Índice de Posición Topográfica.....	111
Figura A- 7. Elaboración de Multirresolucion de Fondo de Valle.	112
Figura A- 8. Elaboración de Mapa de Costo.....	112
Figura A- 9. Elaboración de mapas de puntos de muestreo.....	113
Figura A- 10. Elaboración de mapa de clases genéricas.	113
Figura A- 11. Elaboración de mapa de membresía.....	114
Figura A- 12. Elaboración de mapas de propiedades químicas y físicas.	114
Figura A- 13. Mapa de división política y administrativa.	115
Figura A- 14. Mapa de Red Hídrica.	116
Figura A- 15. Mapa de Geología.....	117
Figura A- 16. Mapa de Agrología.	118
Figura A- 17. Mapa uso actual del suelo.	119
Figura A- 18. Mapa de Modelo de elevación digital.....	120
Figura A- 19. Mapa de Pendiente.....	121
Figura A- 20. Mapa de índice de humedad topográfico.....	122
Figura A- 21. Mapa de Índice de Posición Topográfica.....	123
Figura A- 22. Mapa de Índice de Multirresolución de Fondo de Valle.....	124

Figura A- 23. Mapa de Puntos de Muestreo.	125
Figura A- 24. Mapa de Clases Genéricas.	126
Figura A- 25, Mapa de Profundidad Efectiva	127
Figura A- 26. Mapa Densidad Aparente	128
Figura A- 27. Mapa de Texturas del Suelo.	129
Figura A- 28. Mapa de Capacidad de Intercambio Catiónico	130
Figura A- 29. Mapa de Acides del Suelo (pH)	131
Figura A- 30. Mapa de Materia Orgánica del suelo	132
Figura A- 31. Mapa de Fósforo	133
Figura A- 32. Mapa de Potasio	134
Figura A- 33. Mapa de Calcio	135
Figura A- 34. Mapa de Magnesio	136
Figura A- 35. Mapa de Zinc	137
Figura A- 36. Mapa de Cobre	138
Figura A- 37. Mapa de Hierro	139
Figura A- 38. Mapa de Manganeso	140
Figura A- 39 Mapa de Rendimiento	141
Figura A- 40. Mapa de Fertilidad	142

1. INTRODUCCIÓN

La fertilidad de los suelos durante los últimos años ha disminuido considerablemente debido a los procesos de erosión y a la indiscriminada utilización de productos químicos, estos procesos modifican sus propiedades físicas, químicas y biológicas que conllevan a su deterioro, además los suelos se han visto afectados debido a las prácticas tradicionales del productor de quema y siembra de cultivos limpios en terrenos con laderas pronunciadas que inducen a la erosión superficial de las tierras. (Andrades y Martínez, 2010). El rendimiento de los cultivos está estrechamente relacionado con los niveles de fertilidad de los suelos agrícolas, que es donde las plantas obtienen los elementos minerales que requieren para su nutrición.

En nuestro país el recurso suelo no se le da la relevancia que se merece, a pesar de ser un recurso natural no renovable, la erosión se ha convertido en los últimos años en el principal problema en El Salvador, por ello la fertilidad ha disminuido considerablemente y los suelos se vuelven ácidos. Este recurso es uno de los principales medios que tienen los agricultores para subsistir, generalmente los productores que se dedican a la siembra de granos básicos no cuentan con análisis de fertilidad de sus suelos, los cuales desarrollan procesos de fertilización empíricos, aplicando muchas veces dosis y productos que no se requieren, ocasionando contaminación en el suelo o inclusive en los recursos hídricos (MARN, 2016).

La cartografía digital de suelos por medio de los sistemas de información geográfica es de vital importancia en la agricultura, permitiendo generar visiones complejas del terreno de trabajo, para tomar decisiones como la aplicación de fertilizantes o determinar las causas de la variabilidad, por medio de estos sistemas cada variable medida estará localizada y de esta forma se tiene la posibilidad de estudiarlo y observar los resultados (Rosas, sf).

Algunos estudios demuestran que se puede realizar un mapeo de suelos y estimar los valores de nutrientes presentes en el suelo, desarrollando a través de modelos estadísticos, mapas que demuestran los valores para las distintas zonas geográficas de un territorio (Prisma, 2015), los cuales se utilizan posteriormente para que técnicos y productores puedan estimar en base a las demandas del cultivo, las dosis más precisas de fertilizante o enmiendas que se requieren para obtener óptimos rendimientos.

En El Salvador la agricultura de precisión está siendo aplicada en alguna medida para cultivos extensivos como la caña de azúcar, sin embargo, para los pequeños productores, que cultivan en suelos de laderas y de baja fertilidad, es difícil que las instituciones, técnicos

o los mismos productores cuenten con herramientas que les permita hacer un uso adecuado de los recursos de producción. Generar investigación sobre el mapeo de fertilidad de suelos, permitirá realizar recomendaciones para el manejo de la fertilidad de los suelos, que los técnicos y los productores pueden utilizar, con esto se disminuirán los costos debido al uso excesivo de fertilizantes que son aplicados sin análisis técnico entre la fertilidad y los requerimientos de los cultivos, una buena fertilización contribuye a obtener mejores rendimientos en el cultivo de maíz, el cual es parte importante de la dieta de los salvadoreños y su demanda se encuentra en aumento año con año. (Argueta Portillo, 2015)

La finalidad del estudio fue generar mapas de propiedades físicas y químicas que permitan describir el comportamiento de la fertilidad de los suelos, dichos análisis se han desarrollado a partir de la selección de puntos de muestreo seleccionados en base a un programa Hipercubo Latino condicional, el cual considera la geología y la topografía local, así como la proximidad y accesibilidad al territorio, además se ha utilizado los softwares Arc Map 10.4, QGIS 2.12 Lyon y soLIM versión 2.1.0. Después de identificar los puntos de muestreo y obtener las muestras, estas se llevaron al laboratorio de suelos del Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA). A partir de los resultados físicos y químicos reportados, se generaron recomendaciones técnicas para el manejo de la fertilidad, basados en las demandas de los cultivos según la guía técnica del maíz de CENTA, con el apoyo las herramientas SIG se llegó a obtener un mapa que representa la fertilidad actual del suelo. Dicho mapa contiene la información de las propiedades físicas, químicas y fisiográficas, mediante estas herramientas los técnicos un apoyo en la toma de decisiones en campo, para mejorar el manejo de los cultivos.

El mapa digital de suelos y fertilidad obtenido, permite tener una representación gráfica de los sitios con mayor o menor fertilidad, así de la zona estudiada tiene un área de 677 Ha de menor fertilidad ocupando un 29.82 % del total del área de estudio, mientras que 886 Ha tienen un alto contenido de fertilidad para el cultivo de maíz lo cual representa un 39.04% de la zona de estudio ubicada en los cantones del Colorado y el Platanarillo, del municipio de Comacarán, de acuerdo a los resultados de fertilidad obtenido se observó que los principales elementos deficientes son: Fósforo (P), Cobre (Cu), Zinc (Zn), Hierro (Fe), con ellos se elaboró un programa de fertilidad que en su mayoría corresponde a dosis en donde se utilice 18-46-0 para nutrir la falta de P, Sulfato de Zinc, Sulfato de Hierro, Sulfato de Cobre, además el uso de enmiendas para disminuir el pH de los suelos, utilizando la metodología utilizada por el CENTA en el año 2002

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

2.1. Maíz

El maíz es el alimento principal de los salvadoreños; es consumido casi en todas las comidas en forma de tortillas o pupusas. Su cultivo inicia con la selección de la semilla para asegurarse que sea de buena calidad; y posteriormente la preparación del terreno deshierbándolo para la siembra de los granos que se realiza a finales de mayo o principios de junio cuando comienzan a caer las primeras lluvias del invierno (MAG, 2013).

2.1.1. Importancia Socio-económica

Según datos del CENTA, 2015, el sector agrícola generó en el ciclo 2012/2013 un total de 333,974 empleos directos. Casi el 44% (145.834) fue en la producción de granos básicos, siendo el cultivo de maíz el que más empleos aportó, con 84.467. El maíz es el rubro de mayor importancia dentro de la canasta alimenticia básica de la población salvadoreña. Según FAO, el consumo per cápita por año en El Salvador es alrededor de 80.51 kilogramos en el área urbana y 127 kilogramos en el área rural, siendo de los mayores consumos del área centroamericana, pues el 95% de la producción lo utiliza para consumo humano (CENTA, s.f).

2.1.2. Datos económicos.

En **el cuadro A-1** se presentan las cantidades de maíz en kilogramos que se han importado durante los últimos años, el cual durante los periodos de 2014 al 2015 reflejan un alza esto debido a los problemas de sequía y plagas por el cual se ha visto afectado el cultivo, lo que provoca que las producciones se vean afectadas lo que conlleva a no satisfacer la demanda del mercado, por lo que el país se ve en la necesidad de realizar importaciones de este producto importante en la dieta diaria de la población.

En **el cuadro A-2** se presentan las cantidades de maíz que se han exportado durante los últimos años, la cual ha sido mínima o nula debido a los problemas para satisfacer la demanda en el mercado nacional, lo que provoca que las producciones se queden en el mercado interno para satisfacer las necesidades alimentarias diarias de la población.

En **el cuadro A-3** se pueden observar los ^{precios} por quintal durante los meses de enero a febrero del año 2015, los cuales han sido constantes, teniendo un valor desde los \$19.3 a \$23.4 por quintal.

2.1.3. Seguridad alimentaria nutricional

En El Salvador, se observan grandes desequilibrios y desafíos para asegurar la disponibilidad adecuada, oportuna y suficiente de los alimentos que conforman la dieta básica, especialmente en aquellos sectores en condiciones de pobreza (figura A-1), y dentro de éstos, los grupos biológicamente más vulnerables (niños menores de cinco años, mujeres embarazadas y en lactancia materna), así como los grupos de riesgo por características propias, como son los escolares, mujeres, adolescentes y ancianos (FAO, 1998).

La inseguridad alimentaria es analizada en términos de disponibilidad, acceso y utilización biológica de los alimentos, así como de su incidencia en el estado nutricional de la población, particularmente aquella que se encuentra en situación de pobreza extrema o relativa (MAG, 2016).

El maíz constituye la dieta básica de la población y la fuente principal de proteínas y calorías, aportando más del 50% de la ingesta calórica diaria per cápita, especialmente en el área rural (MARN, 2015).

La producción de maíz es realizada principalmente por pequeños productores, en el marco de una economía de subsistencia, cuya prioridad es cubrir las necesidades alimenticias del grupo familiar, y con los excedentes, generar ingresos para cubrir otros requerimientos familiares. En general, los pequeños productores cultivan en tierras marginales, con dificultad de acceso a la tecnología y con unos rendimientos y rentabilidad baja; en gran medida producen el maíz y el resto de granos básicos que requiere la población urbana del país (Merino, 1998).

En **el cuadro 1** se presenta la producción media del cultivo de maíz para pequeños productores la cual es de 1,943.63 kg/Ha (30 qq/mz) utilizando variedades de maíz criollo, las variedades que son más recomendables por sus niveles de producción según CENTA (2013), son los siguientes:

Cuadro 1. Variedades y rendimientos de cultivo de maíz (CENTA, 2013)

Variedad	Rendimiento (qq/mz)	Rendimiento (Kg/Ha)
H-59	95-100	6,168.8 – 6,478.8
Oro blanco	95-100	6,168.8 – 6,478.8

Platino	95-102	6,168.8 – 6,740.8
CENTA Pasaquina	65	4,211.2
CENTA Protemas	75	4,859.0
CENTA DORADO	60-80	3,887.2-5,183.0

En el cuadro A-5 se presenta la superficie de producción del cultivo de maíz el cual se expresa en quintales que corresponde a 42.5 Kg (100 libras) y luego la superficie que corresponde a 0.698896 ha en El Salvador durante los periodos de 2000- 2011.

El cultivo de maíz durante los periodos de 2010-2014 tuvo un rendimiento de 4,178.81 kg/Ha (64.7 qq/mz), pero durante el año 2015 presento una reducción a 3,673.46 kg/Ha (56.7 qq/mz), debido a la sequía del 2015, se perdieron 164.17 millones de Kg (3.62 millones de qq) de maíz. Las pérdidas en maíz, representan casi el 20% de la producción anual esperado, generaron mucha preocupación para la seguridad alimentaria nacional. El cultivo de maíz acostumbra expresar con mayor claridad las diferencias de potencial productivo entre áreas, siendo más rústico y con capacidad de compensar limitaciones ambientales, tendiendo a exhibir menor amplitud en las mediciones de productividad (MAG, 2014). Las áreas cultivadas de maíz en el país se representan en la figura 2, como se puede observar en las diferentes zonas geográficas existe un sistema de productivo que comprende el cultivo de maíz.

2.2. El suelo

2.2.1. Generalidades

El suelo es un sistema muy complejo que sirve como soporte de las plantas, además de servir de reservas de agua y de otros elementos necesarios para el desarrollo de los vegetales. Es conocido como un ente vivo en el que habitan gran cantidad de seres vivos como pequeños animales, insectos, microorganismos (hongos y bacterias) que influyen en la vida y desarrollo de las plantas de una forma u otra. El suelo es un sistema abierto, dinámico, constituido por tres fases. La fase sólida está formada por los componentes inorgánicos y los orgánicos, que dejan espacios (poros, cámaras, galerías, grietas y otros) en el que se hallan las fases líquida y gaseosa (principalmente oxígeno y dióxido de carbono) (Forsythe, 2000).

El suelo es el medio en el cual las plantas crecen para alimentar y vestir al mundo. El entender la fertilidad del suelo es entender una necesidad básica de la producción de

cultivos (propiedades físicas, químicas y biológicas). La fertilidad es vital para que un suelo sea productivo, al mismo tiempo, un suelo fértil no es necesariamente un suelo productivo. Factores como: mal drenaje, insectos, sequias, y otros, pueden limitar la producción, aun cuando la fertilidad del suelo sea adecuada (PPI, 1997).

Los suelos explotados con cultivos anuales presentan atributos químicos (pH, disponibilidad de nutrientes) y físicos (textura y compactación) que varían horizontal y verticalmente además de las variaciones pedogenéticas por causa de la influencia de los materiales de origen y de los factores de formación del suelo (Ortega Batres y Flores Mejía, 2005).

Los suelos de la zona de estudio son característicos por ser suelos muy superficiales, con presencia de rocas en la superficie, limitado para los cultivos en sitios que son arcillosos, suelos poco desarrollados, erosionados, con poca profundidad efectiva, se encuentra talpetate a poca profundidad, son suelos pobres en fósforo y potasio, poseen bajos niveles de materia orgánica y vegetación arbustiva, con fuertes pendientes, el rendimiento promedio de maíz es de 2,232.36 Kg/Ha (36 qq/mz), con un costo de producción de \$917.00 (Argueta Portillo, 2015).

2.2.2. Factores de formación del suelo

Al considerar el suelo, es fundamental recordar que el suelo es uno de los componentes de un sistema de producción agrícola. No el único, ni más importante. Los otros son la planta y el clima. Lo que determina la producción es la interacción que se logre entre los tres a través del manejo y no las características de uno u otro (Argueta Portillo, 2015).

Por otro lado, los suelos son el producto de la interacción de 5 factores, de ahí que las posibilidades de diversidad sean tan altas. De estos factores 2 son considerados pasivos: el material parental y el relieve, sobre los que actúan dos elementos el clima y los organismos, todo ello a lo largo del tiempo (Bertsch, 1998).

2.2.2.1. Material parental

El material parental puede tratarse de una roca consolidada, un depósito no consolidado e incluso un suelo pre-existente. Se constituye en un elemento pasivo sobre el que actúan el resto de factores formadores. Un mismo tipo de roca, bajo diferentes condiciones del medio (en especial el régimen de humedad y de temperatura), puede dar lugar a suelos con distintas características. Por otro lado, rocas diferentes bajo un clima suficientemente energético, y actuando durante un tiempo suficientemente prolongado, puede dar suelos

similares. Pero lo habitual es que la influencia del material originario se deje sentir en propiedades edáficas como la textura, la reacción, la pedregosidad, el color (Badía et al. 2013).

2.2.2.2. Relieve

La formación del suelo se ve condicionada por la posición que ocupa en el relieve al afectar a la redistribución de masa y energía. En superficies más estables, como son las plataformas estructurales y las laderas, se prolonga la acción del resto de factores formadores y el perfil edáfico alcanza un mayor grado de organización y, por lo tanto, el desarrollo de horizontes (horizonación). En cambio, sobre superficies más inestables, como escarpes, fondos de valle o llanuras de inundación, el suelo es rejuvenecido continuamente (por erosión o cumulización) lo que limita la horizonación. Según las características de la forma del relieve (inclinación, longitud, orientación de la ladera) y por la posición del suelo en la misma, los efectos pueden ser distintos. Así, la inclinación y longitud de la ladera afectan a la velocidad de escorrentía y erosión. La posición que ocupa el suelo en el relieve condiciona su espesor, drenaje, presencia de sales (Badía et al. 2011).

2.2.2.3. Organismos

La participación de una amplia variedad de formas biológicas (animales, bacterias, hongos, algas) resulta trascendental en el funcionamiento de los ciclos del carbono, del nitrógeno, etc. La vegetación ejerce una serie de acciones tanto directas como indirectas en la formación y conservación del suelo. Entre las primeras destacan el aportar materia orgánica, acelerar la meteorización e incrementar la porosidad y el movimiento del agua y el aire. Entre las indirectas destaca el efecto pantalla que el dosel o cubierta vegetal impone sobre el clima edáfico, al sombrear, al interceptar las gotas de lluvia, frenar la escorrentía superficial (o sea aumentar la infiltración) y, por tanto, reducir la erosión hídrica, además de la eólica. Además, el sistema radicular respira, segrega sustancias y absorbe agua por lo que tiene efectos sobre la translocación y lavado de sustancias en el suelo, por ejemplo, de carbonatos. Interviene en los ciclos biogeoquímicos al absorber nutrientes en solución que fija en sus tejidos temporalmente. En casos particulares, la vegetación ejerce efectos alelopáticos (Badía et al. 2010).

2.2.2.4. Clima

El clima influye directamente en la humedad y la temperatura del suelo e indirectamente a través de la vegetación. La temperatura y la precipitación influyen en los procesos de

alteración y transformación mineral, modificando la velocidad de muchas reacciones químicas que se dan en el suelo. La temperatura condiciona el tipo de meteorización, predominantemente física con bajas temperaturas, y altas temperaturas (Badía et al. 2010).

2.2.2.5. Tiempo

Cada uno de los factores anteriormente comentados ejerce su influencia en la formación del suelo a lo largo del tiempo dando lugar a características morfológicas distintas. Los suelos jóvenes e inmaduros son aquellos que han desarrollado pocas propiedades y que sus horizontes están poco desarrollados. A medida que van evolucionando, sus características se desarrollan más rápidamente originando suelos más profundos y también más diferenciados los unos de los otros (Badía et al. 2011).

2.2.3. Factores de formación en relación con la fertilidad del suelo

La relación entre el suelo y sus factores formadores puede expresarse de la siguiente forma, el carácter del suelo viene determinado por la acción de ciertos procesos que dependen del clima modificados por la geomorfología. Estos procesos actúan directamente a través de la vegetación o indirectamente a través de los factores bióticos sobre un material originario (Hernández, 2013).

La composición mineralógica de las rocas permite establecer que minerales puede heredar el suelo de ellas y cuales minerales secundarios son susceptibles de formarse en él; este aspecto está muy relacionado con la fertilidad natural del mismo, ya que los minerales primarios componen la reserva de nutrientes que posee el suelo (Jaramillo, 2002).

Los minerales que pueden pasar al suelo desde la roca están controlados, en parte, por sus condiciones de formación, las cuales determinan su resistencia a la alteración, al quedar expuestos a las condiciones ambientales superficiales; mientras más contrastantes sean las condiciones de formación y las de la superficie, más inestable es el mineral (Jaramillo, 2002).

La composición química del material parental que origina el suelo define, en buena medida, los nutrientes y otros elementos que pueden pasar a él. La cantidad y tipo de minerales presentes en el material parental controlan buena parte de la calidad nutricional del suelo (Jaramillo, 2002).

2.2.4. Fertilidad del suelo

El suelo es el fundamento de los ecosistemas terrestres, sustento no solamente de las coberturas vegetales que hacen posible la vida sobre el planeta, sino base fundamental de la producción de alimentos en el mundo (Chirino et al. 2005).

El manejo eficiente de la nutrición en el cultivo de maíz es uno de los pilares fundamentales para alcanzar rendimientos elevados sostenidos en el tiempo y con resultados económicos positivos. Uno de los problemas más serios que afecta la agricultura en El Salvador es el deterioro de los recursos naturales, especialmente en las zonas de ladera, en dichas áreas hay graves problemas de degradación de tierras y caída de la fertilidad del suelo como consecuencia de esta situación son la pobreza rural y la inseguridad alimentaria, de esta manera y tomando en cuenta la necesidad de producir alimentos se han desarrollado estudios como el proyecto CENTA-FAO y el Programa de Agricultura Sostenible en Laderas de América Central (PASOLAC) los cuales promueven el uso y manejo de la fertilidad del recurso suelo (FAO, 1998).

Algunos estudios realizados como la sistematización y validaciones de documentos básicos en el manejo y conservaciones de suelos y aguas en zonas de laderas han permitido fortalecer los conocimientos de los productores y potenciar el desarrollo de una agricultura sostenible (Pineda y Vallecampo, 2009).

2.2.5. Determinación de un plan de fertilización para el cultivo de maíz

Según Melgar y Torres, s.f. El proceso de planificación de la fertilización se divide en 3 etapas.

2.2.5.1. Metodologías de muestreo y Análisis de suelos

El análisis de suelos es una práctica básica para determinar la fertilidad actual y potencial de cada lote. El objetivo de efectuar un análisis de suelos es determinar la oferta de nutrientes del lote, para que, junto con la extracción de nutrientes (demanda) se pueda efectuar un balance y establecer las cantidades a agregar como fertilizantes. Se describen tres metodologías utilizadas en el muestreo del suelo:

2.2.5.2. Muestreo de suelo según manual de CENTA

Según Orellana (2005), la metodología del Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA) para realizar un muestreo representativo del suelo para conocer la fertilidad, requiere de varios pasos a seguir:

1. Hacer reconocimiento general de la propiedad previo al muestreo y según su extensión de manera que se facilite la delimitación de las áreas homogéneas con base en criterios fisiográficos, edáficos y del cultivo.
2. Seleccionar las herramientas necesarias y los materiales, asegurándose que estén limpias tanto las herramientas y que los materiales sean nuevos de modo que se evite la contaminación de la muestra.
3. Delimitar la propiedad en áreas o lotes que sean homogéneos o uniformes en cuanto color, textura, pendiente, drenaje, profundidad de suelo, pedregosidad y sistema de cultivo.
4. Iniciar el muestreo de suelo haciendo la primera perforación o toma de submuestra de conformidad con la herramienta seleccionada o disponible, se toma aproximadamente una libra de la porción central y depositela en un recipiente (balde), a fin de mezclar las submuestras de cada área homogénea y obtener la muestra representativa del terreno.
5. El primer punto perforado o muestreado y los siguientes tendrán que seleccionarse al azar, teniendo cuidado de ubicarlos a una distancia de 15 a 20 m de los linderos (cercos), calles, bordas, quebradas, canales, casas y otras construcciones. Al tomar la primera submuestras, iniciar el recorrido y continuar las perforaciones en el interior de la parcela, caminando en zig – zag.
6. Tomar de la mezcla de tierra aproximadamente dos libras. En el caso de aquellas parcelas o lotes extensos se deben tomar de 5 a 6 submuestras para mezclarlas en un balde y dejar solo un 50% del volumen extraído.
7. Depositarla en una bolsa plástica resistente y nueva, e identificarla.

2.2.5.3. Muestreo por Hipercono Latino Condicional (LHS)

Una metodología nueva para el muestreo de los suelos es el método del Hipercono Latino Condicional (LHS) el cual consiste en la selección de los parámetros y variables a muestrear, la asignación de distribuciones de probabilidad a cada una (que pueden estar basados en estudios teóricos o mediciones experimentales), la división de cada distribución en un número fijado apriori de intervalos equiprobables, la generación de una muestra aleatoria dentro de cada intervalo y para cada variable, y el apareamiento aleatorio

de muestras entre variables, de modo de obtener vectores de valores de entrada, uno por cada intervalo (Núñez y Barón, 1999).

Este surge debido a la necesidad de conocer el método de muestreo óptima con el fin de representar adecuadamente la variabilidad del suelo dentro de un área, especialmente en los países en desarrollo, en los cuales el número de muestras para un estudio del suelo está limitado no sólo por las dificultades de acceso, sino también por el tiempo y las restricciones de dinero, lo que dificulta la representatividad de muestreo de la zona e influir en el mapa final del suelo (Duarte et al. 2013).

En el año 2006 Minasny y McBratney utilizaron el LHS, en la ciencia del suelo y estudios ambientales, siendo una metodología para la evaluación de la incertidumbre en un modelo de predicción. Por medio de la metodología del LHS, se pueden obtener puntos de muestreo, los cuales reflejan diferentes propiedades del suelo, (profundidad, índice de humedad topográfico, color, pedregosidad, índice de paisaje topográfico), generando una buena idea de la distribución de las propiedades del suelo, este esquema de muestreo reduce el tiempo y las inversiones necesarias para el trabajo de campo.

2.2.5.4. Procedimientos en el muestreo georreferenciado

Un conjunto de acciones debe ejecutarse en forma planificada, para obtener un buen muestreo del suelo para fines de agricultura de precisión. Se pueden utilizar varios métodos para identificar, caracterizar y entender la variabilidad de los atributos de los suelos, pero el proceso que ha sido mayormente utilizado para el muestreo sistematizado y el mapeo intensivo del suelo, consiste en el establecimiento de un muestreo en cuadrículas regularmente distribuidas en el campo, lo cual permite el procesamiento geoestadístico e interpolar posteriormente los datos de análisis de suelo para generar los mapas de diagnósticos de fertilidad (García y Flego s.f).

Los procedimientos que van desde el muestreo georreferenciado del suelo hasta las aplicaciones de nutrientes a dosis variables han sido utilizados para realizar un mapeo digital de fertilidad de suelo (García y Flego s.f).

La profundidad de la recolección debe ser definida de acuerdo a las mismas premisas consideradas en el muestreo tradicional, siendo más común caracterizar la capa de 0 a 20 cm de profundidad, en el caso del número de muestras simples es de 20 a 30, con el objetivo de garantizar una buena representatividad, pero en la agricultura de precisión debido a la

demanda de mano de obra de mayor intensidad en la recolección en el área a ser mapeada es de 5 a 10 muestras simples por cuadrícula de 8 Ha⁻¹ (Villareal Núñez et al. 2010).

2.2.6. Diagnóstico de la fertilización.

El proceso de diagnóstico se efectúa analizando en forma integral los resultados provenientes del análisis de suelo en conjunto con las características de calidad de cada lote (rotación, cobertura de rastrojos, antecesores, historia agrícola, aspectos físicos, etc.) y el clima local. Para esto es necesario realizar análisis de las propiedades químicas del suelo (Bertsch, 1998).

2.2.6.1. Análisis químico de suelos.

El análisis químico de suelos consiste en la estimación de la disponibilidad de nutrientes a la planta durante su ciclo de desarrollo por medio de métodos químicos. Se extraen los elementos con determinadas soluciones y se asume que esas concentraciones (o proporciones semejantes a estas) son las que están a disposición de las plantas (Bertsch, 1998).

Es el procedimiento seguido metodológicamente por los profesionales y técnicos de un laboratorio de suelos sobre una muestra representativa de una parcela de terreno, para elaborar recomendaciones de fertilizantes y enmiendas en función al estado de fertilidad del suelo (Orellana, 2005).

Los análisis químicos, efectuados bajo condiciones controladas, pueden determinar exactamente las características de una muestra de suelo. Pero, si la muestra no es representativa de lo que hay en el campo, los resultados carecerán de significado (Garman, 1982).

2.2.6.2. Tipos de análisis de suelo más comunes

El análisis debe contener resultados como: contenido de materia orgánica, el pH, la conductividad eléctrica, el contenido de fósforo, potasio, calcio, magnesio, zinc, manganeso, hierro, cobre, boro, sodio, aluminio, la capacidad de intercambio catiónico y la relación calcio/magnesio, magnesio/potasio, calcio + magnesio/potasio y calcio/potasio (USAID, s.f).

El principal objeto del análisis de suelo, es determinar los elementos químicos de interés para la nutrición de las plantas. El análisis de rutina se realiza en varios laboratorios de

suelo, pero uno de los más completos para la interpretación de la fertilidad del suelo debe de contener lo siguiente: textura, pH en H₂O Y KCl, P, K, Ca, Mg, Al, acidez total, CIC y materia orgánica. En suelos donde se sospecha que pueda existir deficiencia de elementos menores, se agrega a los análisis especiales determinación de Boro y Zinc u otro micronutriente (Torres, 2006).

2.2.6.3. Importancia de los análisis químicos

El análisis químico de suelos es importante porque permite determinar el potencial nutricional del suelo y que es esencial para el desarrollo de los cultivos, constituyéndose en una herramienta de diagnóstico de la fertilidad de los suelos. Desde el punto de vista agronómico los principales motivos para realizar el análisis químico de suelos son: a) generar información para el manejo y mejoramiento de los suelos, b) evaluar el estado de la fertilidad para recomendar las prácticas de fertilización, c) determinar el impacto ecológico de algunas prácticas agronómicas o el efecto de la contaminación ambiental (García, 2005).

El análisis del suelo es una herramienta muy importante para la elaboración de una recomendación de fertilización, ya que permite cuantificar la oferta de nutrientes del suelo. La diferencia entre esta oferta y la demanda del cultivo a partir de la definición de un rendimiento objetivo indica la cantidad de nutrientes que deberá agregarse por fertilización y permite determinar la necesidad de aplicar cal o si el suelo necesita incorporación de materia orgánica (Ferraris, 2006).

2.2.6.4. Formas de absorción por las raíces

En el cuadro 2 se destacan las formas en que los nutrientes se encuentran en el suelo y de esta manera son absorbidas por las raíces. Nótese que son iones tanto positivos o negativos.

Cuadro 2. Forma de elementos en el suelo (Cepeda, 2010).

Nitrógeno	No₃⁻	Hierro	Fe²⁺, Fe³⁺
Fosforo	HPO ₄ ²⁻	Manganeso	Mn ²⁺ , Mn ³⁺
Potasio	K ⁺	Cobre	Cu ²⁺
Calcio	Ca ²⁺	Zinc	Zn ²⁺
Magnesio	Mg ²⁺	Boro	H ₂ BO ₃ ⁻
Azufre	SO ₄ ²⁻	Molibdeno	MoO ₄ ²⁻

2.2.6.5. Macronutrientes y micronutrientes esenciales para el cultivo de maíz.

Para conocer la importancia que puede tener aplicar algún otro nutriente de los considerados esenciales, a continuación, en el cuadro 3, se hace una breve descripción de la función de los distintos nutrientes en el cultivo de maíz.

Cuadro 3. Macronutrientes y micronutrientes para el cultivo de maíz (Caamaño y Melgar, 1998).

Elemento	Función
Nitrógeno (N)	Es el nutriente motor del crecimiento. Cuando la planta lo absorbe, lo acumula como nitrato en las hojas, y es este nitrato el encargado de motorizar la síntesis del complejo hormonal del crecimiento, cuyo exponente principal es el AIA (ácido indol acético). Así mismo, el nitrógeno es el componente principal de la mayoría de los aminoácidos que integran las proteínas.
Fósforo (P)	Es la fuente de energía necesaria para que se produzcan todos los procesos metabólicos en la planta. Su deficiencia le imposibilita a la planta completar normalmente dichos procesos. Los dos momentos críticos en los que su presencia es fundamental son: a la germinación, para favorecer un rápido crecimiento radicular; V6, es decir cuando comienza el crecimiento vegetativo lineal y por ende la mayor demanda y en pre-floración.
Potasio (K)	Su rol más relevante lo cumple en todo proceso de traslado de azúcares fotosintetizados. A medida que la planta va fotosintetizando, va acumulando azúcares en las hojas. Estos azúcares son los que la planta trasloca a los granos en el momento del llenado de los mismos.
Calcio (Ca)	Es uno de los nutrientes más importantes, y tal vez al que menos atención se le presta por considerar a los suelos “supuestamente” bien abastecidos del mismo. Su rol principal está asociado a la síntesis de componentes de estructura de la planta en la forma de pectato de calcio.
Magnesio (Mg)	Cumple tres roles importantes en la planta (entre otros). En primer lugar, es integrante de la clorofila, potenciando de esta manera la síntesis de azúcares. También interviene en el proceso de traslado de azúcares a los granos en forma similar al K, aunque en un segundo plano de importancia. Y finalmente optimiza el aprovechamiento del fósforo dentro de la planta facilitando el desdoblamiento del ATP (fuente de P).

Azufre (S)	Fundamental para el aprovechamiento del N. Una vez que el N se acumuló como nitrato en las hojas, debe ser transformado en proteína. En ese proceso interviene una enzima llamada nitrato reductasa, en la que el S es uno de sus principales componentes. También forma parte de la síntesis de aminoácidos azufrados (cistina, cisteína y metionina), de algunas vitaminas (tiamina, biotina) y de la coenzima A, fundamental para la respiración.
Hierro (Fe)	Directamente ligado a la fotosíntesis. Participa en la síntesis de clorofila junto con el Mg. Es fundamental para el aprovechamiento del N, cumpliendo un rol, similar al S en este sentido, cómo así también para el aprovechamiento interno del P por parte de la planta.
Zinc (Zn)	Otro nutriente fundamental para las gramíneas. Junto con el N son los dos promotores del crecimiento en las plantas al promover también la síntesis de hormonas de crecimiento. Su carencia limita también el desarrollo radicular. También tiene propiedades fungistáticas. Potencia el cuaje de frutos. Promueve la síntesis de proteínas.
Manganeso (Mn)	Este nutriente, junto con el Zn, es fundamental para las gramíneas. Es el primer nutriente que interviene en el proceso de la fotosíntesis, permitiendo el desdoblamiento de la molécula de agua encargada de liberar los electrones para que se desencadene el proceso.
Cobre (Cu)	Fundamental para optimizar el transporte del agua dentro de la planta al potenciar la síntesis de lignina (rigidez de tejidos). En la medida que los tejidos se encuentren lignificados, las pérdidas de agua por transpiración serán menores. Al hacer los tejidos más fuertes por la síntesis de lignina, la planta se vuelve menos susceptible a las enfermedades.
Boro (B)	Este nutriente cumple varios roles dentro de la planta entre los que podemos citar a los siguientes como los más importantes: junto con el Ca interviene en la síntesis de la pared celular, dándole mayor rigidez a los tejidos; Junto con el K y el Mg, completa el trío de “carriers” de azúcares; es fundamental para el cuaje, ya que favorece el crecimiento del tubo polínico, en especial en aquellos granos que se encuentran en el extremo de las espigas.
Molibdeno (Mo)	Finalmente, el molibdeno, cuya función principal es la de potenciar el aprovechamiento del N. Junto con el S y el Fe, es el responsable del pasaje del N de formas inorgánicas aprovechables por las plantas (nitratos), a formas orgánicas no aprovechables (proteínas).

2.2.7. Importancia de los elementos en el cultivo de maíz.

El maíz es una planta con capacidad de crecimiento rápido y alta producción que requiere cantidades considerables de nutrimentos. La demanda de N aumenta conforme la planta se desarrolla; cuando se aproxima el momento de la floración, la absorción de este elemento crece rápidamente, en tal forma que, al parecer las flores femeninas, la planta ha absorbido más de la mitad del total extraído durante todo el ciclo (CENTA, 2015).

La cantidad de P en la planta de maíz es baja en comparación con el N y el K, este es un elemento importante para su nutrición, las mayores concentraciones se encuentran en los tejidos jóvenes, este elemento es muy importante para el desarrollo radicular. La cantidad de P extraída por la planta es aproximadamente 10 kilogramos por tonelada.

El maíz necesita grandes cantidades de K y casi lo toma en los 30 primeros días de la planta, el K le permite a la planta de maíz soportar condiciones de estrés hídrico, enfermedades y plagas (CENTA, 2015).

2.2.8. Diseño del plan de fertilización.

Una vez realizado el diagnóstico (en el cual se debería establecer la necesidad o no de fertilizar y en el caso de hacerlo, las cantidades de nutrientes a aplicar), es necesario armar un plan de fertilización ajustado a cada lote. Este plan consiste en la definición de las cantidades y tipos de fertilizantes a aplicar, así como del momento y tecnología de aplicación para satisfacer las necesidades del cultivo (Bertsch, 1998).

2.2.9. Interpretación de resultados del análisis de suelos.

Según sean las características de detalle y especificidad de los estudios de calibración y correlación de los que surgen de las Tablas de Niveles Críticos (NC), así será la precisión con que se pueda interpretar los análisis de suelos. Los NC varían según la solución extractora, según el tipo de suelo y según el cultivo, por lo tanto, antes de realizar una interpretación hay que tomar en cuenta con que solución se hizo el análisis, y con qué tabla de niveles críticos se cuenta. Por NC de suelo se entiende aquella concentración extraída del suelo por encima del cual, las posibilidades de encontrar respuestas a la fertilización son muy bajas y por debajo de la cual, muy probablemente los rendimientos serán significativos (Bertsch, 1998).

La persona a cargo del diseño de las recomendaciones debe tener buen entrenamiento y experiencia en interpretar los resultados de los análisis. Esta persona necesita tener a su alcance toda la información disponible del lote, de la finca y del manejo del agricultor (PPI, 1997).

2.3. El mapeo o cartografía digital del suelo

La necesidad de conocer la distribución geográfica de los suelos y de aprovechar este recurso en las actividades humanas, agrícolas y ganaderas ha impulsado una gran cantidad de investigaciones y metodologías para desarrollar estudios, análisis y sistemas predictivos de suelos integrados con el mapeo digital (Bertsch, 1998).

El estudio del recurso suelo siempre ha sido de primera necesidad y diversas culturas han desarrollado sus métodos de estudio de acuerdo a sus objetivos específicos, principalmente con fines agrícolas. Varios enfoques han sido utilizados para generar información de suelos, el principal corresponde al método convencional que se basa en generar un modelo mental de la relación suelo-paisaje y correlacionar con los demás factores formadores del suelo (Mantovani Coelho et al. s.f).

Existe una demanda creciente de geo-información de suelos, cada vez a escalas más grandes y con un enfoque más cuantitativo, por tanto, el desarrollo de herramientas y enfoques modernos generan un escenario potencial para brindar información de suelos más rápida, objetiva y que represente con mayor precisión la real variabilidad de este recurso y sus propiedades (Mata Chinchilla, 2010).

La idea general es que cada suelo se encuentra en un lugar por un motivo y si podemos determinar la historia del ambiente en que se encuentra ese suelo, podremos predecir al propio suelo. Esta constituye la idea básica del modelo convencional del estudio de suelos. El uso de cartografía digital para evaluar la fertilidad del suelo no es común en América Latina y el Caribe, se utiliza principalmente en el campo de la agricultura de precisión en países como Brasil, Chile y Argentina. Asimismo, algunos centros de investigación comenzaron a utilizar la cartografía digital de suelos, en el marco de políticas de investigación y desarrollo, en países como Argentina INTA, (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria), Bolivia (Universidad Mayor de San Simón), Brasil (Embrapa-Solos), Chile (compañías privadas), Venezuela (Universidad Central de Venezuela) (ALAC 2014).

El grupo SOLIM (2004) citado por Villareal Nuñez et al. 2010, indica que, para realizar un levantamiento de suelos convencional, el edafólogo o pedólogo primero debe construir un modelo mental subjetivo de la relación suelo-paisaje y analizarlo a través de un trabajo de campo intensivo. Tradicionalmente, la distribución espacial de las unidades suelo-paisaje es identificada y delineada a través de la foto-interpretación.

Este enfoque, como lo menciona Mata Chinchilla 2010, se basa sólo en los datos y desarrolla modelos geoestadísticos que después pueden ser aplicados para predecir las propiedades de los suelos en lugares que no fueron visitados en el muestreo.

La Geoestadística, se define como una ciencia aplicada que estudia las variables distribuidas espacialmente, partiendo de una muestra representativa del fenómeno en estudio. Se basa en el hecho de que los datos se correlacionan espacialmente, es decir, un dato se relaciona con otros cercanos, pero a medida que se alejan del mismo, la dependencia espacial disminuye. La aplicación a la ciencia del suelo en la geoestadística a datos edafológicos se popularizó en la década de los 80, como se ha evidenciado con el incremento de estudios reportados los pedólogos deben estudiar la variabilidad espacial con el fin de representar de una forma más adecuada, real y precisa el suelo y sus propiedades (Mantovani Coelho et al. s.f).

En estudios realizados en Bolivia se utilizó la cartografía digital para generar datos e información cuantitativa sobre el estado actual de los suelos en el municipio de San Buenaventura, con el fin de evaluar su potencial para el cultivo de caña de azúcar bajo diferentes escenarios de gestión (Ortega Blu, 2012).

En Brasil se han realizado investigaciones para la definición del tamaño de las cuadrículas para realizar un muestreo en cuadrículas, dando como resultado la necesidad de un gran número de puntos para el muestreo para poder identificar mejor la variabilidad del suelo en los cultivos, la recomendación del tamaño de la cuadrícula para el muestreo será en función de la resolución deseada “precisión del mapeo” asociada a los costos (Schlatter et al. 2008).

2.3.1. Fundamento de Mapeo digital de suelo

El mapeo digital de suelo es la generación de mapas de tipos o propiedades de suelos mediante relaciones cuantitativas (modelos de predicción) entre datos de suelos (observaciones de campo y datos de laboratorio) y variables ambientales (Angelini, 2012)

Según Angelini, 2012 (Mapeo digital de suelos aplicado a la agricultura de precisión) el fundamento del mapeo digital de suelos se basa en las propiedades de formación del suelo las cuales son: clima, organismos, topografía, material de origen y tiempo. Las cuales toman diferentes variables de cada una de estas propiedades que permiten el origen de los suelos como se define a continuación: $S_{c,p} = f(\text{s.c.o.r.p.a.n})$

S: Suelos, otras propiedades del suelo.

C: clima, propiedades climáticas (temperatura, precipitación y viento)

O: organismos, vegetación biomasa, fauna, actividad humana.

R: relieve, atributos del terreno.

P: material parental, litología.

A: edad, el factor tiempo.

N: espacio, posición espacial.

Según Minasny et al, 2006 El modelo s.c.o.r.p.a.n. es un modelo cuantitativo digital el cual permite la estimación de clases o propiedades, a partir de información de suelos, clima, material parental y tiempo tomando en consideración su localización espacial, el modelo permite hacer descripciones empíricas de las relaciones entre el suelo y los factores de formación a, esto permite predecir el suelo a partir de sus propiedades.

2.3.2. Mapeo digital de fertilidad en el suelo

En el manejo de la fertilidad del suelo a través de la agricultura de precisión, generalmente el terreno se subdivide de acuerdo a un muestreo en cuadrículas regulares (regular grids) con determinado tamaño homogéneo, de modo de efectuar un muestreo sistemático en puntos georreferenciados (Mata Chinchilla 2010).

Los valores de fertilidad con las coordenadas geográficas posibilitan interpolar espacialmente los resultados de los análisis de suelo del conjunto de muestras extraídas y generar mapas que representen la variabilidad de los atributos de interés, cuando los resultados son obtenidos producto de las interpolaciones por ejemplo mapas de disponibilidad de K, para recomendar las dosis de fertilizantes y correctivos necesarios en diferentes partes del área analizada (Henríquez et al. 2013).

Los datos obtenidos por medio de los muestreos georreferenciados para el mapeo de la fertilidad del suelo deben ser procesados y validados según los principios geoestadísticos,

y los mapas deben ser manipulados y acabados a través del SIG (Sistema de Información Geográfica), para esto se requiere la recolección de cierto número de muestras para que los datos puedan ser analizados por la geoestadística, para la obtención de mapas confiables (Calderón Puig et al. 2012).

En la agricultura de precisión para determinar la fertilidad del suelo, se deben de asociar procedimientos adicionales de caracterización de áreas para orientar mejor la etapa de muestreo, sobre todo cuando se trata de un área extensa, otros tipos de información georreferenciada pueden ser importantes para orientar su subdivisión en partes más homogéneas, que deberán ser muestreadas y mapeadas aisladas, en caso de que sea conveniente (Mantovani Coelho y Vargas Resende s.f).

Aspectos normalmente observados para el muestreo tradicional también son válidos para el muestreo georreferenciado entre estas se mencionan: las diferencias de color del suelo, cobertura vegetal, el histórico de su uso anterior (incluido el histórico de eventual erosión/degradación), textura, relieve y drenaje, los cuales tienen implicaciones sobre la fertilidad del suelo y el potencial productivo a lo largo de las áreas de cultivo (Villareal Núñez et al. 2010).

El registro de datos de productividad de años anteriores y la secuencia de datos de productividad obtenida luego de tres o más cosechas en diferentes cultivos, puede ser relativizada e integrada en un único mapa, revelando sub-ambientes estables a lo largo del tiempo que presenten potencial productivo distinto. Esto es útil para orientar el muestreo del suelo y la aplicación a dosis variable, ese tipo de información abre la perspectiva de que se apliquen otros enfoques de agricultura de precisión, tales como: fertilización basada en la exportación de nutrientes en la cosecha y siembra a dosis variable (Villareal Núñez et al 2010).

El conocimiento histórico del uso y de eventuales variaciones en el manejo del suelo y de los insumos en diferentes partes del campo es un aspecto imprescindible en la estratificación del muestreo individualizado. El uso de cal y fertilizantes por períodos de tiempo diferentes crea impresiones digitales en el suelo que no pueden ser “ocultadas” por el manejo más reciente, induciendo a la formación de zonas con fertilidad diferencial. Para identificar ese tipo de situación, es fundamental la interacción con el productor o con personas que están directamente vinculadas al día a día de la conducción de las áreas cultivadas. Incluso a partir de observaciones empíricas, ellos pueden auxiliar mucho en la

interpretación de los mapas de rendimiento y en la toma de decisiones para el manejo localizado en diferentes partes del campo (Calderón Puig et al. 2012).

2.3.3. Información documental para el mapeo digital de suelos

Para la elaboración y ejecución de los diferentes análisis efectuados es necesario hacer una revisión de la base documental existente hasta la fecha, tanto como para la caracterización de suelos, así como también para el establecimiento de flujos de trabajo en SIG, en este sentido se convierte en una de las bases indispensables para la obtención del producto final. (Angelini, 2012). En el mapeo digital del suelo la fertilidad se emplea en el sentido de las características físicas y químicas del suelo, agrupándolas en distintas de clases de fertilidad, logrando interpretaciones más precisas para la elaboración de recomendaciones del manejo de la fertilidad de los suelos, el cual es factor limitante en la producción y manejo de los cultivos (Ayaviri, 1996).

La utilización del mapeo digital de suelos consiste en generar mapas de propiedades del suelo en la que se toman en cuenta antecedentes del área, análisis del paisaje, trabajo de campo y análisis de laboratorio (Angelini, 2012).

En estudios realizados sobre mapeo digital de suelos, se han utilizado metodologías como el Modelo de Monte Carlo el cual se basa en una técnica cuantitativa que hace uso de la estadística y los ordenadores para imitar, mediante modelos matemáticos, el comportamiento aleatorio de sistemas reales no dinámicos esto hace que tenga una menor precisión en comparación con otras metodologías como la metodología utilizada en la investigación que es el Hipercubo Latino Condicionado la cual hace un muestreo aleatorio estratificado para datos multidireccionales (Gomes, 2008).

2.3.4. Conocimiento experto

El conocimiento experto es un insumo indispensable en el proceso de mapeo digital de suelos, la metodología utilizada, usa información proveniente de análisis geo-espacial para la obtención de características homogéneas de acuerdo a las condiciones topográficas y otras condiciones de la zona de estudio, luego mediante un proceso de revisión, los especialistas en estudio de suelos tienen la tarea de hacer observaciones a modo de obtener un producto de acuerdo a la experiencia adquirida en campo y de esta manera integrarlo en el modelo predictivo con el fin mejorar los resultados esperados (Zhu, 1997).

2.3.5. Uso de la teoría de lógica difusa.

La lógica difusa se puede aplicar en procesos demasiados complejos, cuando no existe un modelo de solución simple o un modelo matemático preciso. Es útil también cuando se necesite usar el conocimiento de un experto que utiliza conceptos ambiguos o imprecisos. De las mismas maneras se puede aplicar cuando ciertas partes de un sistema a controlar son desconocidas y no pueden medirse de forma confiable y cuando el ajuste de una variable puede producir el desajuste de otras (Morcillo, 2009).

Con la utilización de la lógica difusa es posible dar un paso adelante en la descripción de la realidad de la superficie terrestre. Esta teoría provee un método para reducir, así como explicar la complejidad de un sistema, se refiere a un cálculo de compatibilidad a diferencia de la probabilidad, la cual está basada en distribución de frecuencias en una población escogida al azar, la lógica difusa describe las propiedades que tiene una variación continua, asociando partes de esos valores a una etiqueta semántica. Las clases difusas son funciones que mapean un valor que puede ser miembro de un conjunto, la cual indica un valor representativo de dicho conjunto (Gutiérrez et al. 2005).

En países como Venezuela se ha realizado estudios sobre el uso de la teoría de la lógica difusa para la clasificación de imágenes satelitales con coberturas mixtas, con la utilización de esta metodología fue posible describir la superficie terrestre en el cual se observó si existen usos de coberturas mezcladas o zonas de transición (Gutiérrez et al. 2005).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. DESCRIPCION DEL ESTUDIO

La investigación se realizó durante los meses de junio de 2016 a mayo de 2017 (con una duración de un año), en la zona de estudio que abarca los cantones de El Platanerillo y El Colorado pertenecientes al municipio de Comacarán del departamento de San Miguel, con un área de 22.74 km², una altura que oscila entre los 200 msnm y 400 msnm (figura 1) (MARN, 2015).

La zona piloto está limitada al oeste y este por la cuenca del rio grande de San Miguel, las condiciones climáticas de la zona son las siguientes: Temperatura promedio anual es de 32.5 °C, humedad relativa 65 % y precipitación promedio anual de 1300 mm (MARN, 2015)

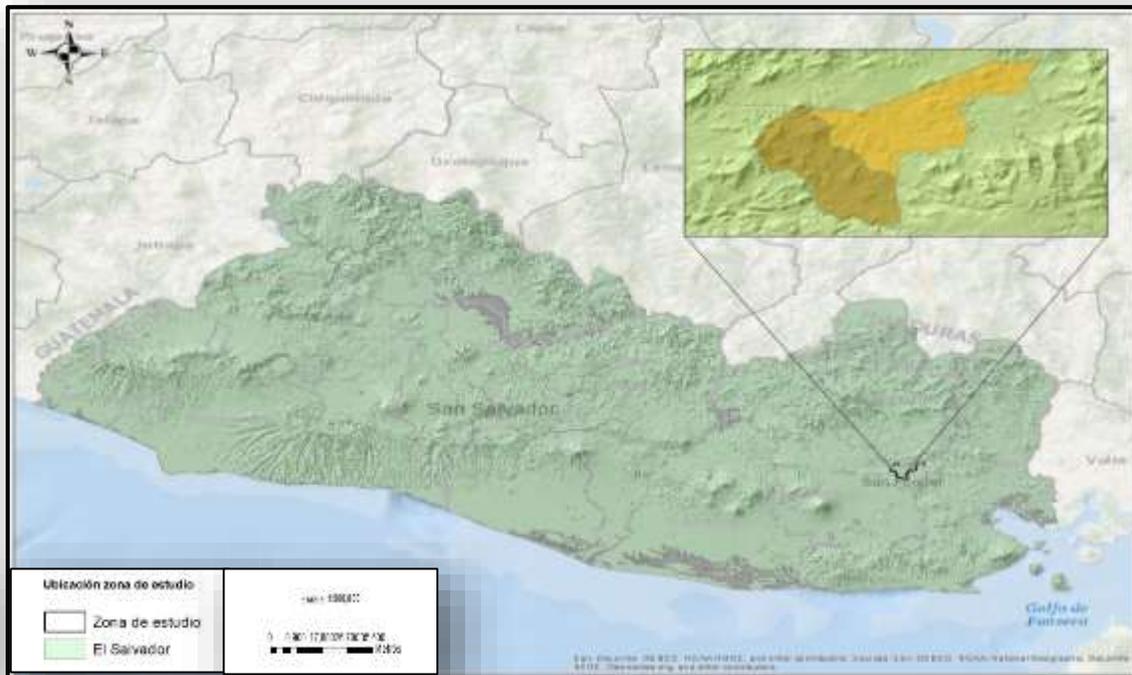


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.

El estudio es de carácter descriptivo el cual se desarrolló en 3 partes: la primera parte consistió en el análisis de las características y condiciones del área de estudio por medio de herramientas informáticas, la segunda se basó en el muestreo del suelo en el campo y la tercera en la generación de mapas de propiedades físicas, químicas, fertilidad

del suelo, rendimiento del cultivo de maíz y recomendaciones técnicas de acuerdo los mapas mencionados.

3.3. Descripción del flujograma de trabajo

El flujograma describe cada uno de los pasos que se llevaron a cabo para elaborar las diferentes actividades realizadas durante la investigación, los cuales fueron los siguientes. (figura 2)

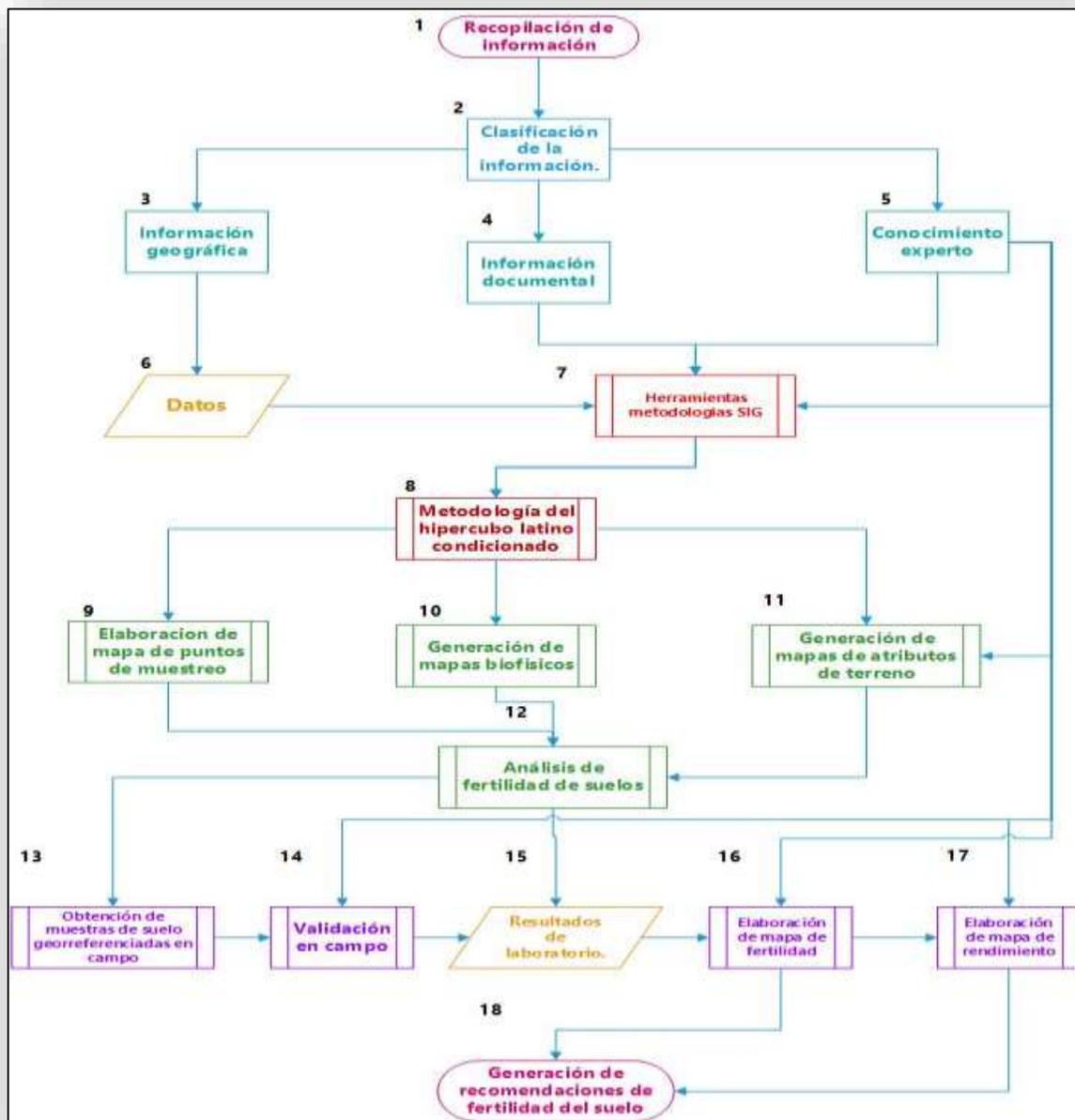


Figura 2. Flujograma de trabajo.

3.3 Metodología de gabinete.

3.3.1. Recopilación de la información

Se recopiló información geográfica de temáticas como municipios, red vial, geología, agrología, uso actual de los suelos, modelo de elevación digital, provenientes de las principales instituciones que generan datos espaciales, entre ellos Ministerio de Recurso Naturales y Medio Ambiente (MARN), Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), Universidad de El Salvador (UES), Catholic Relief Services (CRS) y Ministerio de Obras Públicas (MOP).

3.3.2. Clasificación de la información

La estructura que este proyecto separa la información base en archivos de entrada y de progreso los cuales se subdividen en archivos administrativos, fisiográficos, suelo y topo, los archivos generados se clasifican en vectores, ráster o tablas que se realizaron a partir de procesos implementados con herramientas especializadas para datos SIG, los datos resultantes se encuentran dentro de la carpeta salida. La estructuración fue la siguiente (figura 3)

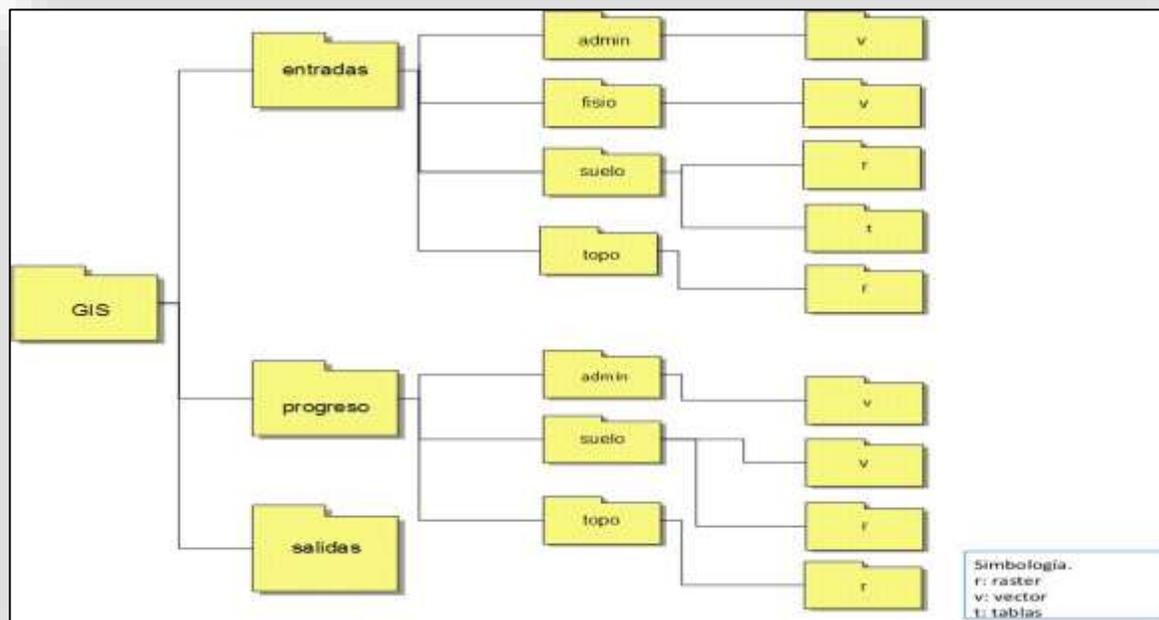


Figura 3. Estructura de almacenamiento de base de datos.

3.3.3. Archivos de información geográfica

Dentro de esta clasificación se incluyeron archivos de información vectorial en formato shape de tipo punto, polígono y línea de diferentes temáticas como, por ejemplo; Mapas de geología, red hídrica, uso actual del suelo, cuerpos de agua, cuencas, límites administrativos.

3.3.4. Información documental de suelos

Para la elaboración de los mapas digitales de suelo se realizaron visitas de campo, en las que se llevaron a cabo actividades como el muestreo y la caracterización biofísica, las que sirvieron para conocer información sobre el material parental, clases de suelo y características topográficas que existen para la zona de estudio. Con esta información se realizaron los mapas de propiedades físicas y químicas del suelo, posteriormente se realizaron visitas de campo para la validación de los mapas digitales para realizar correcciones en el modelo.

3.3.5. Utilización del conocimiento experto

Dentro del proceso de mapeo digital de suelo se realizaron consultas con expertos en el área de SIG, en entidades como la Universidad de El Salvador, Ministerio de Agricultura y Ganadería, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales y el Centro de Tecnología Agropecuaria y Forestal, además de realizar consultas de información en cuanto a mapas de suelos, geológicos, agrologicos y uso actual del suelo del país y de los procesos de formación, descripción de aspectos biofísicos, comportamiento de las variables físico-químicas de los suelos en estudio, la cual se aplicó para el desarrollo de los diferentes mapas de propiedades físicas, químicos, fertilidad y rendimiento elaborados.

3.3.6. Calidad de datos geográficos

Como primer paso en el estudio de la información disponible se conoció la calidad de la información geográfica esto en cuanto a la escala 1:30,000 que posee cada uno de los mapas bases que sirvieron para el desarrollo de los mapas secundarios como los mapas de atributos de terreno, mapas de propiedades químicas y físicas.

De acuerdo a lo anterior, el dato principal en la metodología de mapeo digital de suelos es el modelo de elevación digital (MED) con resolución a 10 m, siendo la base para el desarrollo de los mapas de atributos de terreno.

3.3.7. Herramientas metodológicas SIG.

Para la elaboración de los mapas temáticos se utilizaron softwares especializados en el manejo de Información Geográfica como:

3.3.7.1. ArcGis

El software que se utilizó para el análisis de la información es ArcMap versión 10.4 y versión 10.1 en versión de prueba, el cual permitió unir capas de información digital, sobreponer mapas, seleccionar ocupaciones de suelo por departamento, municipio y editar mapas facilitando así el análisis de la información.

3.3.7.2. Qgis

QGIS versión 1.12 Lyon es un SIG de código libre para plataformas GNU/Linux, Unix, Mac OS, Microsoft Windows y Android. El cual permitió desarrollar los mapas de atributos de terreno usando complementos de SAGA.

3.3.7.3. SoLIM (Soil-land Inference Model)

Para la tarea final del levantamiento de mapas de propiedades de suelos se implementaron los procesos del software SoLIM versión 2015, este contiene un conjunto de herramientas metodológicas para la cartografía digital de suelos predictiva como la lógica difusa y el proceso de inferencia.

El proceso de inferencia fue realizado de forma automatizada a través de la herramienta (Inference) en la cual las relaciones del suelo y el medio ambiente se almacenan en un base de datos conocida como base del conocimiento, luego por medio de un conjunto de técnicas de inferencia que es construido por la lógica difusa la cual se utilizó para vincular la base de conocimiento con la base de datos SIG se logra la similitud de las clases del suelo.

En el proceso de determinación de clases suelos se utilizó la lógica difusa que consistió en asignar al suelo un valor de píxel, al cual se le puede asignar una o más clases de

membresía con diferentes grados de clases asignados. Estos grados de asignación de clases se denominan lógica difusa. Esta representación permite que un suelo en cada píxel tenga una pertenencia parcial en cada uno de las clases de suelo, cada clase o afiliación difusa se considera como una medida de similitud entre el suelo local y el valor de la clase dada. Todas las asociaciones difusas se conservan en esta representación de similitud:

$$S_{ij} (S_{ij 1}, S_{ij 2}, \dots, S_{ij k}, \dots, S_{ij n})$$

Donde:

N: Es el número de clases de suelos

S_{ij} k: Representa el valor de similitud entre el píxel del suelo y la clase de suelo.

3.3.8. Diagnóstico de aspectos biofísicos.

Para describir los aspectos biofísicos se utilizaron mapas digitales de la zona, los cuales por medio del software ArcGis y utilizando diferentes herramientas, se realizaron cortes correspondientes al área de estudio, los mapas obtenidos tendrán una escala de 1: 30,000.

3.3.8.1. División política administrativa.

El mapa de división política administrativa contiene una descripción de los nombres de los cantones del municipio y el área en Km²

3.3.8.2. Red hídrica.

En este mapa se identifican los principales ríos que tienen influencia en la zona de estudio

3.3.8.3. Mapa de uso de suelo.

Este mapa muestra el uso y la cobertura en la zona de estudio tales como granos básicos, pastos cultivados, pastos naturales, entre otros.

3.3.8.4. Geología de la zona de estudio.

Expresa el material parental que ha dado origen a los suelos de la zona de estudio y el área de cada descripción geológica en Km².

3.3.8.5. Zonas Agrológicas.

Contiene las clases de suelo existentes en el área de estudio, su descripción, la ocupación más adecuada y el área en Km².

3.3.9. Generación de mapas de atributos de terreno.

Los mapas de atributos de terreno permiten conocer características y propiedades relacionadas al suelo-paisaje considerando cotas de elevación del terreno. Los mapas generados por medio del software QGIS fueron los siguientes: mapa del modelo de elevación digital, mapa de sombreado analítico, mapa de pendiente, mapa de índice de humedad topográfica (TWI), mapa de índice de posición topográfica (TPI) y mapa de Índice de multiresolución de fondo de valle (MRVBF).

3.3.9.1. Configuración de software QGIS y sus plugins o complementos

La configuración del software involucro procesos generales sobre la configuración de ficheros o carpetas de trabajo que contienen la información de partida del análisis, así como también la estructura de los datos de salida producto del geoprocesamiento de la información primaria.

Las herramientas seleccionadas para realizar los procesos relacionados a la obtención del mapa de atributos fueron:

1. QGIS:
2. SAGA-GIS:

La plataforma principal para la lectura de datos fue QGIS, esta plataforma posee una interfaz gráfica parecida a la mayoría de software GIS presentes en el mercado como por ejemplo ArcGIS.

La configuración efectuada para trabajar con QGIS, fue la relacionada a opciones generales como se muestra a continuación:

- Sistema de Coordenadas y Proyecciones. (North American Lambert Conformal Conic, EPSG 100002)
- Herramientas integradas de SAGA-GIS (DEM, Hillshade, pendiente, TPI, TWI, MRVBF).
- Activación de herramientas GDAL, SAGA, GRASS 7.

La carpeta de trabajo utilizada es la llamada GIS la cual posee una estructura como se puede observar en la figura 3.

3.3.9.2. Modelo de elevación digital (DEM)

El modelo de elevación digital DEM por sus siglas en inglés, representa una superficie continua dentro de un archivo tipo ráster en formato TIF, este archivo se basa en una estructura básica llamada pixel que posee la información de elevación sobre el nivel del mar, este fue cortado del DEM de país con resolución a 10 metros elaborado por el MARN. Los siguientes parámetros a calcular se basan en la distribución de las elevaciones a lo largo del sitio de estudio, obteniendo los respectivos derivados

3.3.9.3. Sombreado analítico

El sombreado analítico o Hillshade se elaboró tomando en cuenta herramientas incluidas dentro del software QGIS mediante algoritmos implementados por complementos o plugin de SAGA, los cuales se encuentran integrados en la plataforma de QGIS.

La elaboración de este mapa se basa en la simulación del software que ubica la fuente de luz solar sobre la superficie del terreno representado por el modelo de elevación digital que de acuerdo a los valores de elevaciones genera una superficie que muestra la incidencia de los rayos solares sobre ella generando un arreglo de sombras.

Para generar el mapa de sombreado analítico o Hillshade se utilizó la herramienta de SAGA, Terrain Analysis, la cual contiene una rutina para elaborar el sombreado analítico, teniendo como base el MDE generado.

Los parámetros utilizados para su generación fueron un ángulo azimuth de 315°, una posición de elevación del solo de 45° y una exageración de 4 con un método de sombreado estándar (figura A-3)

3.3.9.4. Pendiente.

El mapa de pendiente, se generó a partir del modelo de elevación digital utilizando herramientas de geoprocésamiento del software QGIS mediante plugins o complementos de SAGA.

El geoalgoritmo se basa en el cálculo de la variación máxima de elevación sobre la distancia para cada unidad mínima del DEM llamada también pixel, el proceso involucra la evaluación incluso de los pixeles aledaños formando una matriz de 3 x 3 sobre el pixel central, el resultado puede ser de dos tipos, un ráster de pendientes expresadas en grados decimales

o uno expresado en valores de porcentaje, para el presente estudio la unidad de seleccionada para el análisis fue en valores de porcentaje (Gutiérrez, 2012).

Para generar los mapas de Pendiente, se utilizó la herramienta de SAGA, Terrain Analysis - Morphometry, ingresando la capa del MDE generada en el primer paso (figura A-4)

3.3.9.5. Índice de humedad topográfico (TWI)

El índice de humedad topográfico es utilizado frecuentemente para la estimación del control de la topografía sobre los procesos hidrológicos, el valor de cada celda representa el valor de acumulación de flujo del terreno entre más altos son los valores TWI mejor se representan las zonas de valle y drenaje, entre más bajos sean estos se representan mejor las zonas de crestas o parteaguas (Gutiérrez, 2012).

Para obtener este mapa fue necesario implementar el algoritmo de SAGA dentro de las herramientas análisis del terreno, el cual utiliza la formula siguiente:

$$WI_s = \ln [SCA_m / \tan \beta]$$

Dónde:

SCA_m: Es el área de acumulación de flujo en la celda i.

β: es la pendiente local en la celda i.

Para generar el mapa de TWI es necesario ingresar en las herramientas SAGA, Terrain Analysis-Hidrology, la cual contiene la herramienta de TWI para generar el mapa es necesario utilizar el MDE (figura A-5).

3.3.9.6. Índice de posición topográfica (TPI)

El índice de posición topográfica compara la elevación de cada pixel con el promedio de elevaciones de los pixeles vecinos, valores positivos de TPI representan ubicaciones más altas con respecto al promedio de los valores circundantes (crestas). Valores negativos de TPI representa ubicaciones más bajas con respecto a los valores circundantes (valles) (Gutiérrez, 2012).

Según Genchi 2011, para obtener este mapa fue necesario implementar el algoritmo de SAGA, de las herramientas de análisis de terreno, el cual utiliza la fórmula siguiente:

Dónde:

$$TPI_{fe} = E_a - E_{cc}$$

TPI: Es el índice de posición topográfico para un determinado factor de escala.

E_a: Es la elevación media del área.

E_{cc}: Es la elevación de la celda central.

Para generar el mapa de TPI es necesario ingresar en las herramientas SAGA, Terrain Analysis-Morphometry, la cual contiene la herramienta de TPI para generar el mapa es necesario utilizar el MDE (figura A-6)

3.3.9.7. Índice de multirresolución de planicie de fondo de valle (MRVBF)

Este índice es calculado como una medida de la planicie y profundidad para identificar áreas de deposición y el fondo de los valles. El índice de MRVBF clasifica el grado de llanura del fondo de valles asociado con la profundidad de los depósitos y permite delinear las unidades hidrológicas y geomorfológicas. Según Abarca, 2010 El MVRBF usa el algoritmo de la pendiente y la elevación para clasificar el fondo de los valles como planos o áreas bajas el cual se describe por medio de la siguiente fórmula:

$$\text{MVRBF} = W_2(1 + \text{VF2}) + (1 - W_2) \text{VF1}$$

Dónde:

W₂: Valor continuo.

VF1: valores entre 0.5 y 1.

VF2: valores entre 1.5 y 2.

Para generar MRVBF se utilizó la herramienta de SAGA, Terrain Analysis - Morphometry, la cual contiene el MRVBF, ingresando la capa del MDE generada anteriormente (figura A-7)

3.3.10. Metodología del Hiper cubo Latino Condicionado.

Para la determinación de los puntos de muestreo se procedió a:

- Recopilación de datos existentes: Área de estudio, geología de los suelos, vías de acceso del lugar.
- Preparación de una cobertura de costos.
- Uso de la metodología del LHS, determinando los puntos de muestreo con base a en seis variables: Índice de Humedad Topográfico (TWI), Índice de posición topográfica (TPI), Índice de multirresolución de planicie de fondo de valle (MRVBF), pendiente, mapa de geología y Mapa de Costo.

Para la georeferenciación de los puntos de muestreo se utilizó equipo de GPS, tomando datos de latitud y longitud

3.3.10. Mapa de costo

Los LHS permitió distribuir las muestras a lo largo del área de estudio, pero en algunos lugares son de imposible o difícil acceso para realizar el muestreo, para esto se realizó un mapa de costo que representa el costo de llegar a los lugares de la zona de estudio tomando en cuenta los atributos del terreno y la cobertura, este mapa de costo es creado de acuerdo al mapa de vías y usando el algoritmo de múltiple ring buffer (figura A-8) que permite agregar diferentes distancias a partir de un punto las cuales se pueden observar en el cuadro 4:

Cuadro 4. Distancia en metros de múltiplo buffer.

Distancia (m)	10	25	50	75	150	250	500	750	1,000	1,100
------------------	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-------	-------

3.3.11. Elaboración de mapa de puntos de muestreo

El mapa de puntos de muestreo se elaboró utilizando la metodología del LHS, en el cual se utilizaron los mapas anteriormente descritos con la extensión TEUI, que consiste en agregar los archivos ráster en la opción de Add Data layer, y una capa de vías de acceso de la zona, luego se definió el número de puntos de muestreo y se guardó en la ubicación de la base datos (figura A-9)

Metodología de campo

3.3.12. Análisis de fertilidad químico del suelo.

El estudio de fertilidad de los suelos se realizó por medio de un muestreo utilizando la metodología del LHS para de esta manera ir a campo a la recolección de las muestras de suelo, con dicho análisis se pretendió conocer el comportamiento de los macroelementos y microelementos en la zona de estudio.

3.3.13. Toma de muestras y georeferenciación de los puntos de muestreo

La obtención de las muestras en campo se realizó para estimar el contenido actual de nutrientes del suelo, para realizar los puntos de muestreo se ubicaron a una distancia de

15 a 20 m de los linderos (cercos), calles, bordas, quebradas, casas y otras construcciones (Orellana, 2005) (figura 4).

De cada punto de muestreo se tomaron 5 submuestras obtenidas a una profundidad de 30 cm, sacando (1 lb) de suelo por submuestra, el muestreo se realizó en forma de cruz partiendo del punto central a una distancia de 5 m, las submuestras se homogenizaron en un bolsas plásticas con una pala, obteniendo la muestra compuesta con un palin (2 lb de suelo) (figura 5); a la vez del punto central se tomaron muestras para determinar densidad aparente utilizando el método de los cilindros de un volumen de 98.2 cm^3 (figura 6); tomando muestras a los 30 cm de profundidad; posteriormente se colocaron las etiquetas que contiene la información del productor, nombre del productor, localización de la parcela (Georreferenciada) utilizando GPS, fecha, cultivo, entre otros. Las muestras se trasladaron al laboratorio de CENTA para su análisis respectivo (figura 7).



Figura 4. Toma de muestras en campo.



Figura 5. Herramientas de muestreo en campo



Figura 6. Toma de muestras densidad aparente.



Figura 7. Identificación de muestras.

3.3.14. Análisis de laboratorio.

En este estudio se tomó de base en la metodología implementada para el análisis completo de elementos implementada por CENTA. (Cuadros A-5, A-6 y A-7)

3.3.14.1. Características físicas.

- **Densidad aparente**, se realizó por el método del cilindro de volumen conocido, la cual es la relación entre la masa de las partículas del suelo seco y el volumen total (Forsythe, 2000).
- **Textura**, se realizó por el método del bouyoucos para determinar la proporción relativa de arena, arcilla y limo de un suelo (Forsythe, 2000).
- **Estructura**, se utilizó el método del tamizado, donde la muestra se tamiza en húmedo y seco la cual consiste en medir los tamaños de las partículas por medio de diferentes tamices N°4 tamiz de 5 (mm), la masa retenida en cada uno de los tamices se pesa obteniendo así el porcentaje de peso de material de cada intervalo de tamaño (Forsythe, 2000).

3.3.14.2. Análisis químico del suelo

Para conocer la condición de fertilidad de la zona de estudio se realizó un análisis completo de laboratorio:

3.3.14.3. Elementos y propiedades químicas

Cuadro 5. Método de análisis utilizado en el laboratorio de suelos del centro nacional de tecnología agropecuaria y forestal (CENTA).

Análisis	Extracción
pH	Relación Suelo: Agua 1:2.5
Fosforo	Carolina del norte mehlich 1
Potasio	Carolina del norte mehlich 1
Zinc	Carolina del norte mehlich 1
Manganeso	Carolina del norte mehlich 1
Hierro	Carolina del norte mehlich 1
Cobre	Carolina del norte mehlich 1
Calcio Intercambiable	Solución de cloruro de potasio
Magnesio Intercambiable	Solución de cloruro de potasio
Sodio Intercambiable	Solución de cloruro de potasio
Acidez Intercambiable	Solución de cloruro de potasio
CICE	Suma de bases + acidez intercambiable
Materia Orgánica	Oxido reducción

Fuente: CENTA, s.f.

3.3.15. Elaboración de mapas de propiedades.

Para la elaboración del mapa de propiedades se hizo uso de herramientas informáticas como QGIS y los complementos de SAGA y la herramienta especializada en el modelado de suelos conocida como **SoLIM** (Soil Land Inference Model), para lograr el objetivo se

tomaron en cuenta diferentes variables de la topografía local (TPI, TWI, MRVBF, Pendiente).

3.3.15.1. Elaboración de mapa de clases genéricas

Los atributos de terreno y la geología generados anteriormente son los que mejor representaron los patrones en la topografía local de la zona de estudio, se agruparon por medio del análisis de grupo por cuadrícula, la cual agrupa todas las áreas homogéneas de los mapas de atributo en una misma agrupación, utilizando la sombra como guía visual se determinó que la topografía local se expresa mejor en 6 agrupaciones (figura A-10).

El método Hill-Climbing (Ascenso de colinas), fue el primero utilizado como herramienta para la reconstrucción mediante procesos de optimización, se trata de un algoritmo de descenso. Es decir, que la elección de la dirección de búsqueda se hace forma exhaustiva y se elige aquella que consigue un mayor descenso, si el nuevo punto es mejor, se transforma en el punto actual, si no, otro punto es seleccionado y evaluado, el método termina cuando no hay mejorías, o cuando se alcanza un número predefinido de interacciones (Hernández, 2013).

Al determinar las 6 agrupaciones se realizó una estadística zonal (cuadro A-8), determinando los valores de la suma, la desviación estándar, la sumatoria y la diferencia de cada uno de los parámetros seleccionados, estos valores se procesaron en el software SoLIM a través del proceso de inferencia y basados en la lógica difusa, para obtener el mapa de membresía, siendo la base para originar el mapa de clase genérica y los mapas de propiedades físicas y químicas (figura A-11).

3.3.15.2. Elaboración de mapas de propiedades químicas y físicas

Al obtener el mapa de membresía y por medio de un archivo con extensión (.lkt) se procedió a agregar por cada elemento químico y físico el valor obtenido por medio del análisis de laboratorio para cada una de las clases resultantes del paso anterior, logrando así elaborar los mapas de propiedades físicas y químicas para la zona de estudio (figura A-12).

3.3.16. Elaboración de mapa de fertilidad.

Para la elaboración del mapa de fertilidad del cultivo de maíz, se utilizó la herramienta de QGIS análisis de agrupamiento por cuadrícula, anteriormente descrita, la cual agrupa las características homogéneas de los parámetros analizados, se procesaron las propiedades

químicas más importantes en la nutrición del maíz, determinadas con ayuda del conocimiento experto del especialista en fertilidad de suelos, la cuales son: Ca, P, pH, CICE, Zn y Mg, juntamente con esta se procesó la geomorfología del suelo, para lograr un mapa de fertilidad con mayor precisión que servirá en la toma de decisiones.

3.3.17. Elaboración de mapa de rendimiento de maíz.

El rendimiento a diferencia de otras variables analizadas en el estudio se conoció de manera puntual para cada uno de los puntos de muestreo, la forma de realizar este proceso fue utilizando datos provenientes del Centro para el Desarrollo Agropecuario y Forestal (CEDAF) el cual contiene el rendimiento promedio de las parcelas de maíz en kg/ha, los cuales fueron comparados con valores bajo condiciones actuales de fertilidad, de esta forma se pudo establecer un patrón de comportamiento productivo que permitió conocer la certeza del mapa de fertilidad.

3.3.18. Recomendación técnica para el manejo de la fertilidad del cultivo de maíz.

La recomendación de fertilización se realizó con base al programa 4R de la nutrición de plantas realizado por IPNI (Institute Plant Nutrition International), el cual consiste en el manejo responsable de los nutrientes a través de 4 acciones las cuales son:

- Selección de fuente
- Dosis adecuada
- Momento correcto
- Lugar de adecuado

En el cuadro 6 se pueden observar los requisitos y criterios fundamentales para el manejo de la fertilización del cultivo basados en el programa 4R.

Cuadro 6. Requisitos del programa 4R (IPNI, 2012)

Los cuatro requisitos (4R)				
Crterios	Fuente	Dosis	Momento	Lugar
Principios Científicos	<ul style="list-style-type: none"> - Asegurar una oferta balanceada de nutrientes. - Adaptarse a las propiedades del suelo 	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluar la oferta de nutrientes de todas las fuentes. - Evaluar la demanda del cultivo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluar las dinámicas de demanda por el cultivo y de abastecimiento por el suelo. - Determinar momentos de riesgo de pérdidas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Reconocer los patrones de distribución de las raíces. - Manejar la variabilidad espacial.
Opciones de	<ul style="list-style-type: none"> -Fertilizante Comercial -Abono Animal -Compost -Residuos de cultivos 	<ul style="list-style-type: none"> -Analizar los nutrientes del suelo. - Realizar los cálculos económicos. - Balancear la remoción del cultivo. 	<ul style="list-style-type: none"> -Previo a la siembra -A la siembra -En floración -En fructificación 	<ul style="list-style-type: none"> -Al voleo -En bandas superficiales, bandas incorporadas, inyectado - Aplicación en dosis variable.

En el cuadro 7 se puede observar los diferentes criterios que se tomaron en cuenta para determinar el plan fertilización del cultivo de maíz de la zona de estudio

Cuadro 7. Determinación de Fertilización del cultivo (IPNI, 2012).

Determinación de plan de fertilización.			
Fuente	Dosis	Momento	Lugar
-Análisis de suelo	-Igualar la oferta de nutrientes con la	-Acorde a la demanda estacional del cultivo de maíz y	-Ubicación de nutrientes donde puedan ser

<p>-Abastecer los nutrientes en forma disponible</p> <p>-Ajustar las dosis a las propiedades físico-químicas del suelo.</p>	<p>demanda de las plantas.</p> <p>-Conocer la capacidad del suelo de proveer nutrientes al cultivo.</p> <p>- Considerar el impacto al recurso suelo.</p>	<p>en base a la fecha de siembra, características de crecimiento y desarrollo de las plantas (fenología).</p> <p>-Mineralización de la materia orgánica.</p> <p>-Dinámica de pérdidas de nutrientes por factores climáticos.</p> <p>-Número de aplicaciones de fertilizante.</p>	<p>tomados por las raíces en crecimiento.</p> <p>-La concentración de nutrientes que son retenidos en el suelo como el P mediante su aplicación en bandas o en volúmenes de suelo reducidos, mejoran su disponibilidad</p> <p>-Cobertura del suelo para conservar los nutrientes.</p>
---	--	--	---

3.3.19. Validación en campo.

Se realizaron dos visitas de campo para comprobar los resultados obtenidos a través de los mapas digitales de propiedades físicas y químicas, en las que se utilizó un iPad con la aplicación ISEE (Integrating Spatial Educational Experiences), posteriormente cargando los mapas generados se procedió a verificar los datos en campo como lo fue la profundidad efectiva utilizando barrenos para medir el total de la profundidad en campo y comparándola con el valor del mapa generado.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Diagnostico biofísico.

4.1.1. División política y administrativa.

La zona de estudio pertenece al municipio de Comacarán, el cual se divide en 5 cantones: El Hormiguero, Candelaria, El Jicaral, El Colorado y Platanarillo, estos dos últimos representan el área de estudio y se encuentra limitados al norte por los cantones Loma Tendida y Santa Anita, del municipio de El Divisadero, y los cantones de San Juan y Las Lagunetas del Municipio de Jocoro del departamento de Morazán, al este por el cantón la Trinidad del Municipio de San Miguel, al sur por el cantón Los Pilonos, del Municipio de Uluazapa, El Hormiguero y Candelaria del municipio Comacarán pertenecientes al departamento de San Miguel y al este por Valle Nuevo del municipio de Yucuaiquín, perteneciente al departamento de La Unión. El área de los cantones dentro de la zona de estudio es de: Colorado 12.20 km² y Platanarillo 10.50 km². Totalizando un área total de 22.70 km² (figura 8, figura A-13).

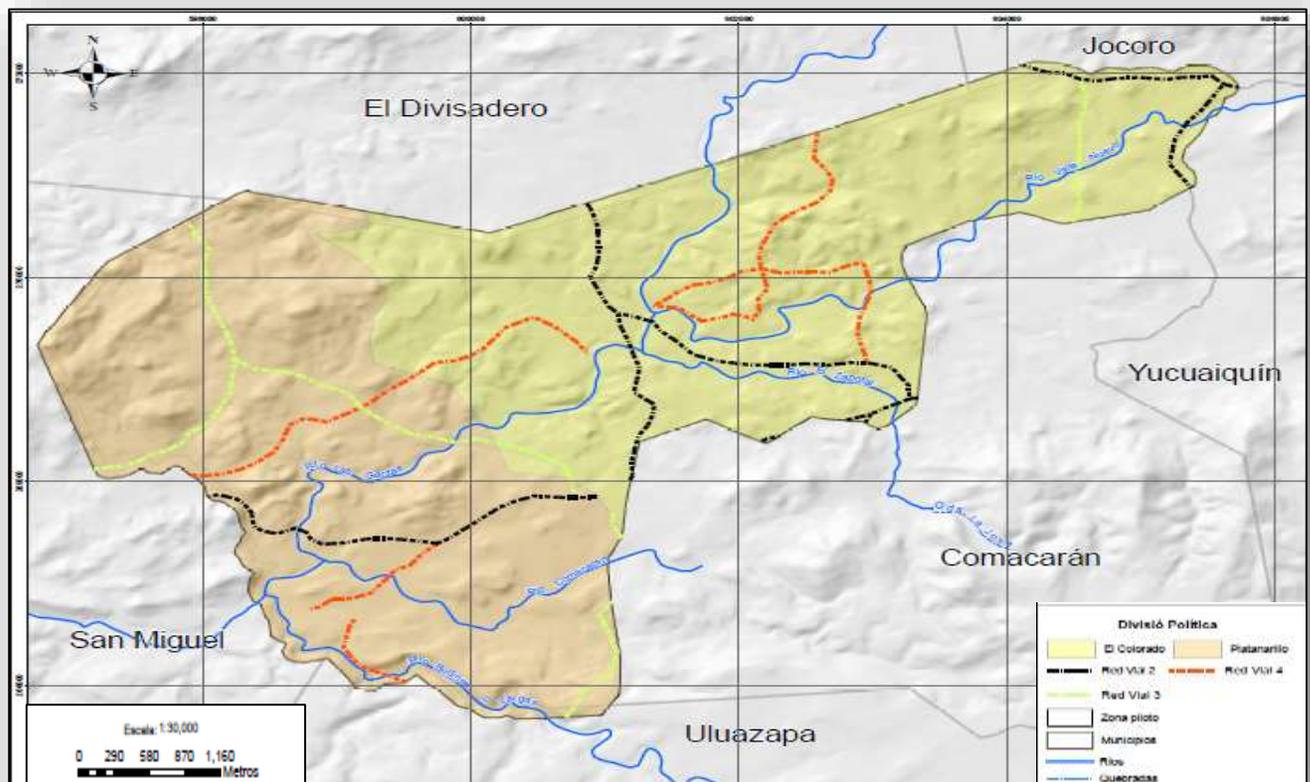


Figura 8. División política y administrativa de los cantones El Platanarillo y El Colorado.

4.1.2. Red hídrica.

En los cantones el Colorado y Platanarillo, existen entradas y salidas de agua; una de las entradas es debido a la precipitación que llega al suelo la cual se infiltra y sale al cauce como flujo superficial. En el cuadro 8, figura 9, se exponen los ríos de existentes en los cantones El Colorado y Platanarillo del Municipio de Comacarán, en donde el rio de mayor longitud es el Río las Garzas en 9.62 km, atravesando ambos cantones y desembocando en el rio grande de San Miguel (figura A-14).

Cuadro 8. Longitud de ríos

Nombre del rio	Longitud en Km
Rio Budines O Vargas	2.11
Rio Comacarán	2.71
Rio El Zapotal	2.19
Rio Las Garzas	9.62
Rio San Juan	1.71
Rio Taisihuat	0.62

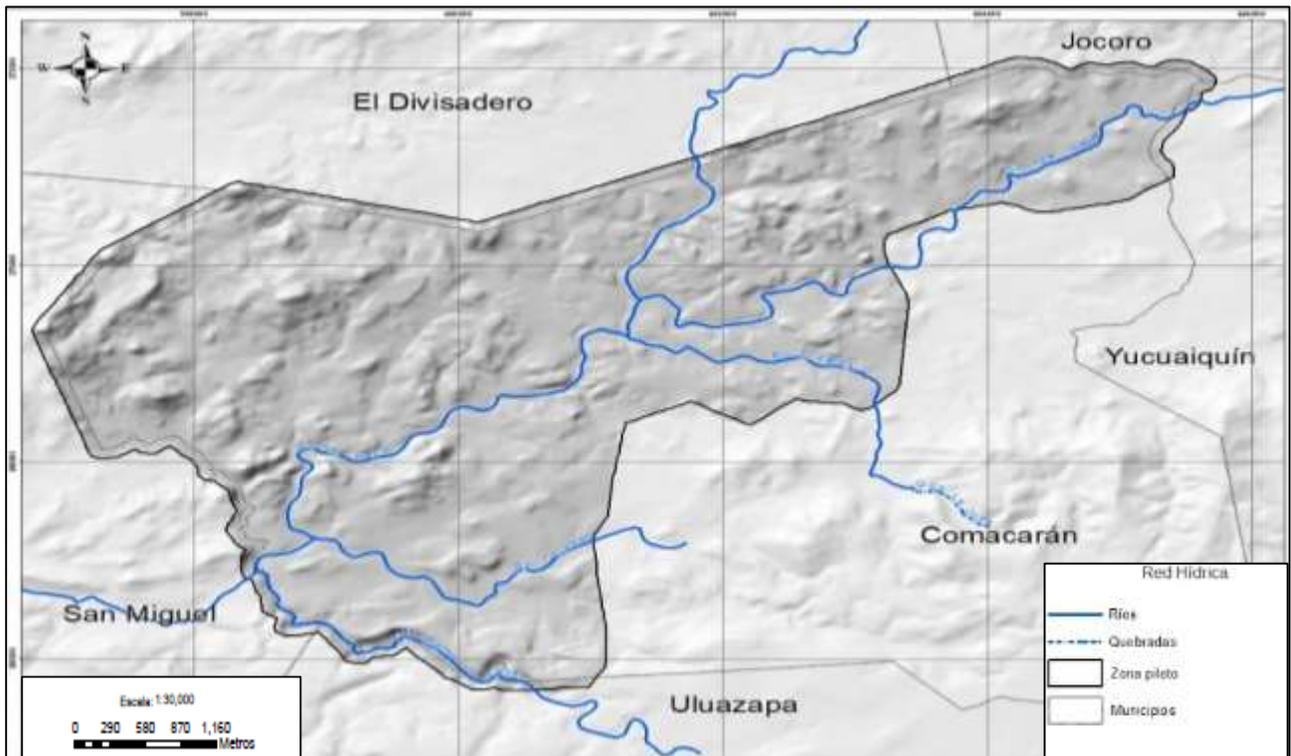


Figura 9. Red Hídrica de la zona de estudio.

4.2 Suelos.

4.2.1. Geología.

La zona de estudio tiene litológicamente cuatro tipos de material parental, las cuales han dado el origen a los suelos de la zona de estudio, en el cuadro 9 figura 10 se expone el área que abarca cada uno de los materiales geológicos predominando las efusivas intermedias hasta intermedias ácidas en 20.36 km² (figura A-15).

Cuadro 9. Geología de la zona de estudio y su extensión en km²

Tipos de Geología	Área en Km ²
Ríos	0.21
Efusivas básicas-intermedias	1.19
Efusivas ácidas e intermedias ácidas	0.34
Efusivas intermedias hasta intermedias ácidas	20.36
Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas	0.60
Total	22.70

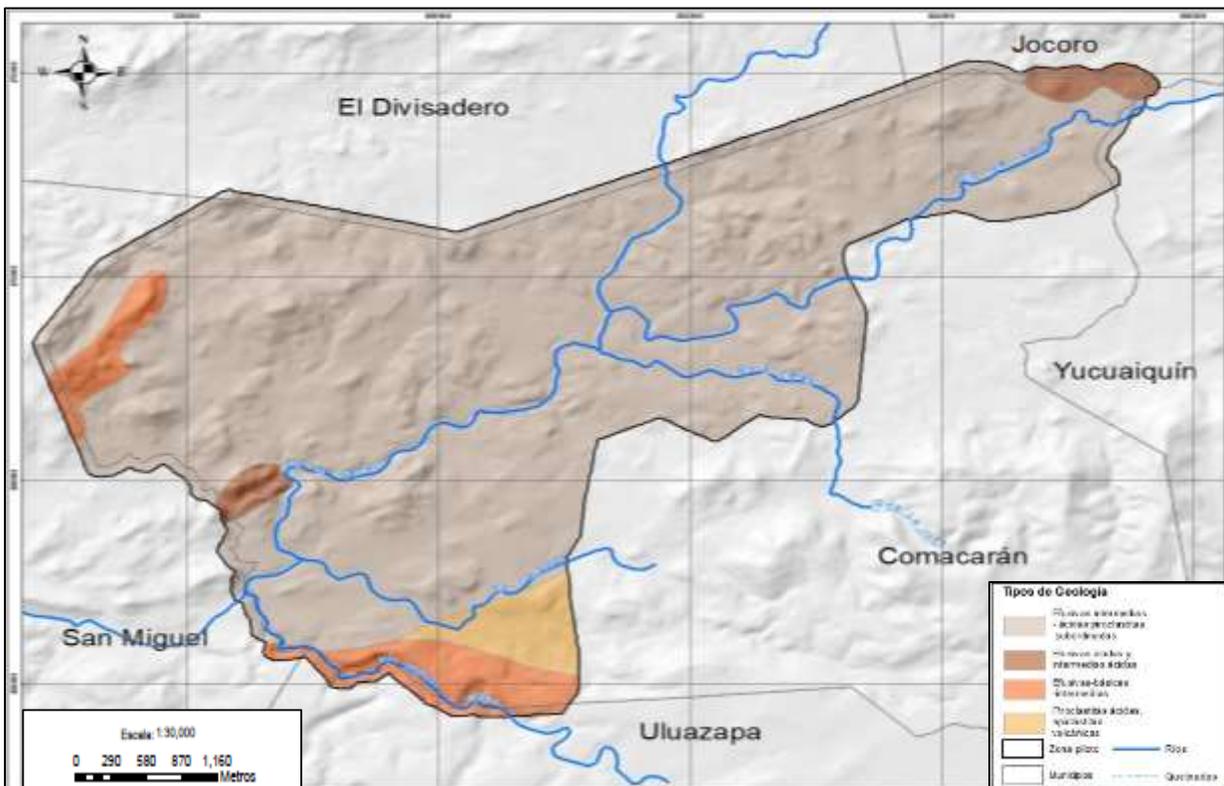


Figura 10. Geología de la zona de estudio.

4.2.2. Agrología.

Según la pendiente, profundidad, tipo de suelo, drenaje, facilidad para erosionarse las tierras se clasifican agrologicamente en categorías I a la VIII, siguiendo la clasificación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, en los cantones de la zona de estudio se encuentran diferentes clases de suelos (cuadro 10, figura 11, figura A-16).

Cuadro 10. Clases de suelos predominantes en la zona de estudio

Capacidad del Uso del Suelo	Características de la Clase	Aptitud principal para su utilización	Área en Km ²
Clase IV	Son tierras que se ubican en distintas posiciones fisiográficas y de relieve, su inclinación varía de 12 hasta 25% de pendiente y pueden o no representar moderadas limitaciones por pedregosidad o rocosidad superficial. Los suelos que las caracterizan son pocos profundos, de texturas finas y eventualmente muy gruesas; el drenaje interno es lento o rápido, cuando la textura es gruesa; presenta moderada fertilidad y en las zonas del área montañosa, es adecuada.	La variabilidad de condiciones le imprime amplia aptitud de uso. En las zonas planas son aptas para el cultivo semi intensivo y mecanizado de cultivos anuales y semipermanente, donde las texturas son moderadas o gruesas, así como para pastos intensivamente manejados y algunos cultivos permanentes (frutas y forestales), propios de cada zona.	7.90
	Son tierras que ocupan áreas casi planas a	Las diferentes características físicas de esta Clase de suelo la	

<p>Clase V</p>	<p>ligeramente depresionadas en el valle. Son suelos de topografía bastante homogénea, sin mayores declives y por tanto no erosionables. Las mayores limitaciones de uso en esta Clase de suelo radican en el factor drenaje (imperfectamente a pobremente drenados) y en el factor edáfico (arcillosos).</p>	<p>hacen más apropiada para la vegetación permanente y para el desarrollo de actividades pecuarias.</p>	<p>1.65</p>
<p>Clase VII</p>	<p>Estas tierras presentan muchas limitaciones para la producción agropecuaria, por regla general son de topografía irregular con pendientes del 30% predominando pendientes de 50 a 70%. Pueden tener inclinación menor a 30% pero con fuerte limitación por pedregosidad dentro del suelo que las caracteriza, son pocos profundos o superficiales, de texturas franco arenosas, franco arcillo arenosas o arcillo gravilosa y bajo nivel de fertilidad, pero como denominador común se presentan combinadas sus</p>	<p>Debido a sus limitaciones, la aptitud se limita a cultivos forestales y eventualmente frutales como Marañón, Guayaba u otros no muy exigentes en suelos, así como para el cultivo de pastos naturales o mejorados dedicados a la ganadería extensiva.</p>	<p>11.90</p>

	características desfavorables.		
Clase VIII	<p>En esta categoría se incluyen todas aquellas tierras que por sus limitantes extremas no presentan posibilidad para el aprovechamiento agropecuario o forestal. En general, son tierras muy accidentadas, con pendientes mayores del 70%, de menor inclinación, pero extremadamente pedregosas o rocosas. Sus suelos, cuando los contienen, son muy superficiales, pero generalmente el estrato útil es la roca madre en estado de descomposición físico-química. Se caracteriza por tener excesiva pendiente y ausencia de suelo.</p>	<p>Debido a sus extremas limitaciones, su aptitud de uso es de tipo conservacionista y protectorio de las especies de flora y fauna presentes.</p>	1.25
TOTAL			22.70

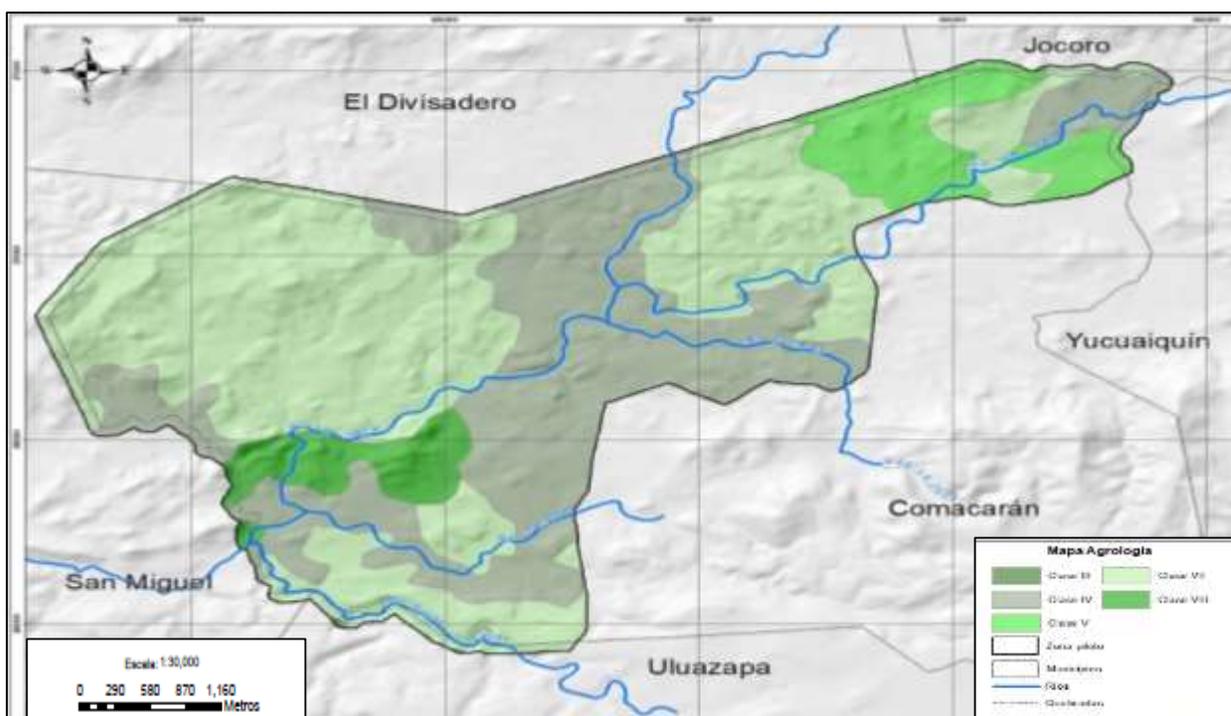


Figura 11. Clases de suelo de los cantones El Platanarillo y El Colorado.

4.2.3. Uso actual del suelo.

El uso del suelo de la zona de estudio, se obtuvo a partir mapa de uso de suelo a nivel nacional del año 2012 de corine land cover.

En el cuadro 11, figura 12, En el uso actual del suelo se visualiza 1.20 Km² de granos básicos como maíz y sorgo; en terrenos con diferentes tipos de pendientes existiendo poco esfuerzo para el manejo de los recursos naturales, estos son suelos donde en la época lluviosa sirven como potreros para el ganado, Además de 11.66 Km² en los cuales se cultiva pasto para el ganado (figura A-17).

Cuadro 11. Uso actual del suelo.

USO DEL SUELO	Área en Km ²
Bosque caducifolios	0.07
Bosque de galerías (a orillas de ríos y quebradas)	0.49
Granos básicos	1.20
Pastos Naturales	11.66

Mosaico de Cultivos y Pastos	4.73
Tejido Urbano Discontinuo	0.12
Terrenos principalmente Agrícola, pero con importantes espacios de vegetación natural	1.89
Vegetación arbustiva Baja	8.26
Total	22.70

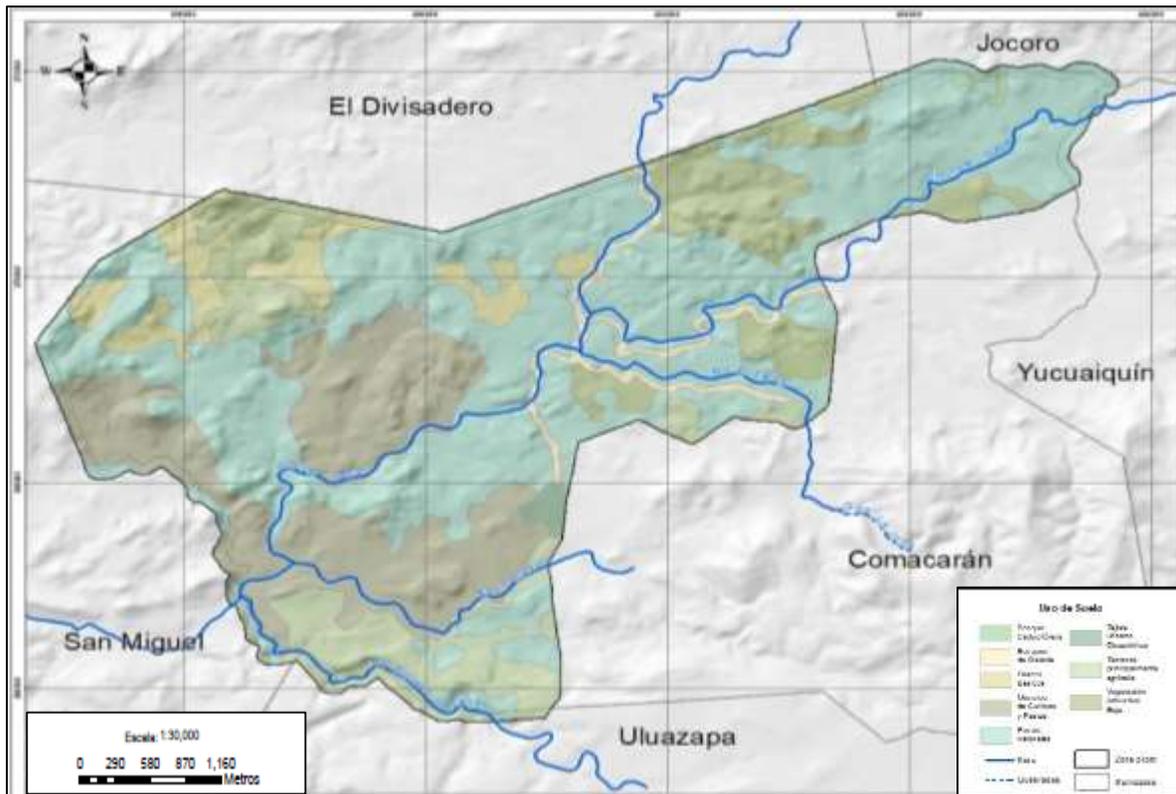


Figura 12. Uso del suelo de la zona de estudio.

La mayoría de los suelos del área de estudio se encuentran en la clase agrológica VII, siendo áreas restringidas para la producción agrícola, debido a sus características: las cuales poseen suelos con pedregosidad, pocos profundos o superficiales y un bajo nivel de fertilidad, además según el mapa de usos del suelo del MARN del año 2012, la ocupación del suelo es principalmente agrícola y de granos básicos, la cual tiene un mayor área de cobertura de la zona de estudio, por eso es importante un estudio sobre el manejo de la fertilidad, debido a las diferentes condiciones edáficas que los productores enfrentan día a día, de esta manera se logró recomendar un plan de manejo de fertilidad de forma eficiente y que mejore los rendimientos del cultivo de maíz.

4.3. Mapeo Digital de Suelos.

4.3.1. Mapa de modelo de elevación digital (DEM).

En el cuadro 12, figura 13, se pueden observar los rangos altitudinales de los cantones El Platanerillo y El Colorado, las zonas con una altitud entre los 150-200 m.s.n.m. tienen un área total de 14.42 km² con un 63.5% que representa la mayor área de cobertura de la zona de estudio, mientras que las elevaciones mayores a 300 m.s.n.m. cubren un área total de 0.05 km² representando un 0.22% de la zona de estudio (figura A-18).

El DEM, es fundamental para conocer las altitudes de la zona de estudio y poder obtener mapas secundarios para la evaluación del relieve tal como lo expresa Rossiter y Rodríguez (2000) el DEM es fundamental para la evaluación de tierras en áreas montañosas, ya que muestran la elevación de cada celda sobre el nivel de mar, la cual afecta directamente la aptitud de los suelos para varios usos. Igualmente indican que de este se derivan una variedad de mapas secundarios, útiles también en la evaluación de tierras. El DEM es el insumo principal para realizar el mapeo de suelos.

Cuadro 12. Áreas de los rangos altitudinales de la zona de estudio

Rango de Altitud (m.s.n.m.)	Área en km ²	Área en Ha	Porcentaje %
Menores de 150	1.26	126.0	5.55
150-200	14.42	1442.0	63.50
200-250	6.34	634.0	28.00
250-300	0.60	60.0	2.64
Mayores de 300	0.05	5.0	0.22
Total	22.7	2,270.0	100 %

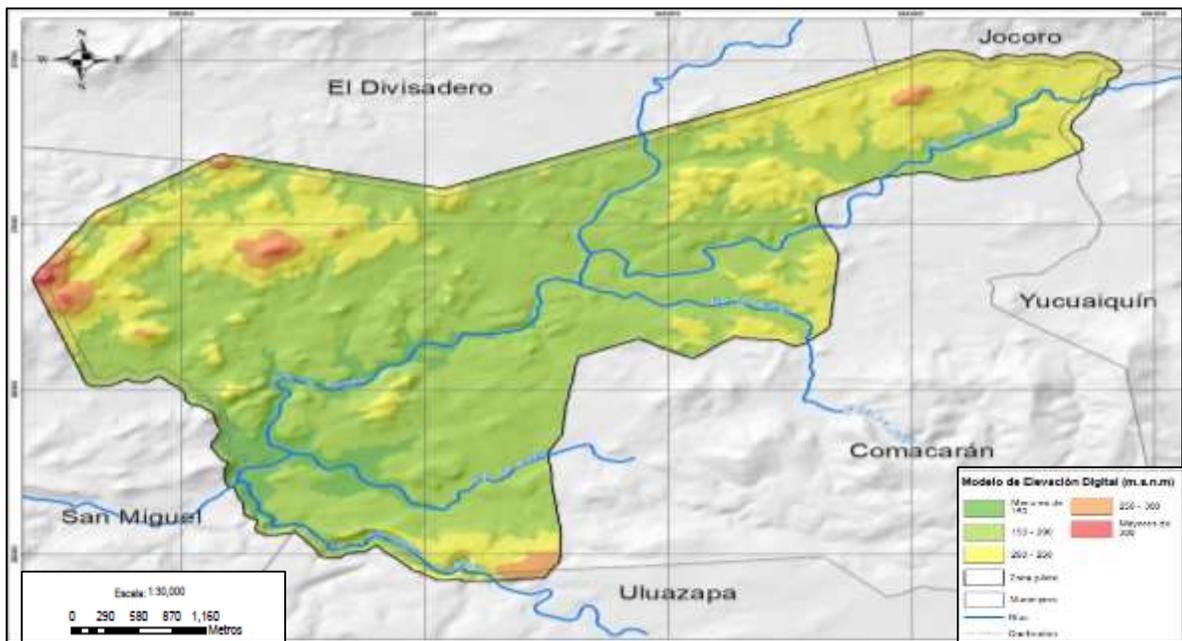


Figura 13. Mapa de modelo de elevación digital.

4.3.2. Mapa de pendiente.

La pendiente es la tasa de cambio de la elevación con relación a una superficie permitiendo identificar el porcentaje de la pendiente y determinar el grado de erosión en los suelos (Kang-tsung, 2004), según el cuadro 13, figura 14, en la zona de estudio se pueden observar las pendientes que se encuentran en el área de estudio; las pendientes que más predominan son las menores del 15% de pendiente con un área total de 14.7 km² al 63.5% la mayor parte de estos suelos están conformados por valles aluviales, terrenos casi planos con relieves moderados, además existen áreas con menor porcentaje de pendiente, las cuales tienen un rango mayor al 60% que cubren 0.10 km² representando un 0.36% de la zona de estudio (figura A-19).

Cuadro 13. Áreas de porcentajes de Pendiente.

Pendientes (%)	Área en km ²	Área en Ha	Porcentaje
Menores de 15	14.7	1,470	63.5
15-30	7.00	700	28.8
30-45	1.80	180	6.9
45-60	0.10	10	0.44
Mayores de 60	0.10	10	0.36
Total	22.7	2,270.0	100 %

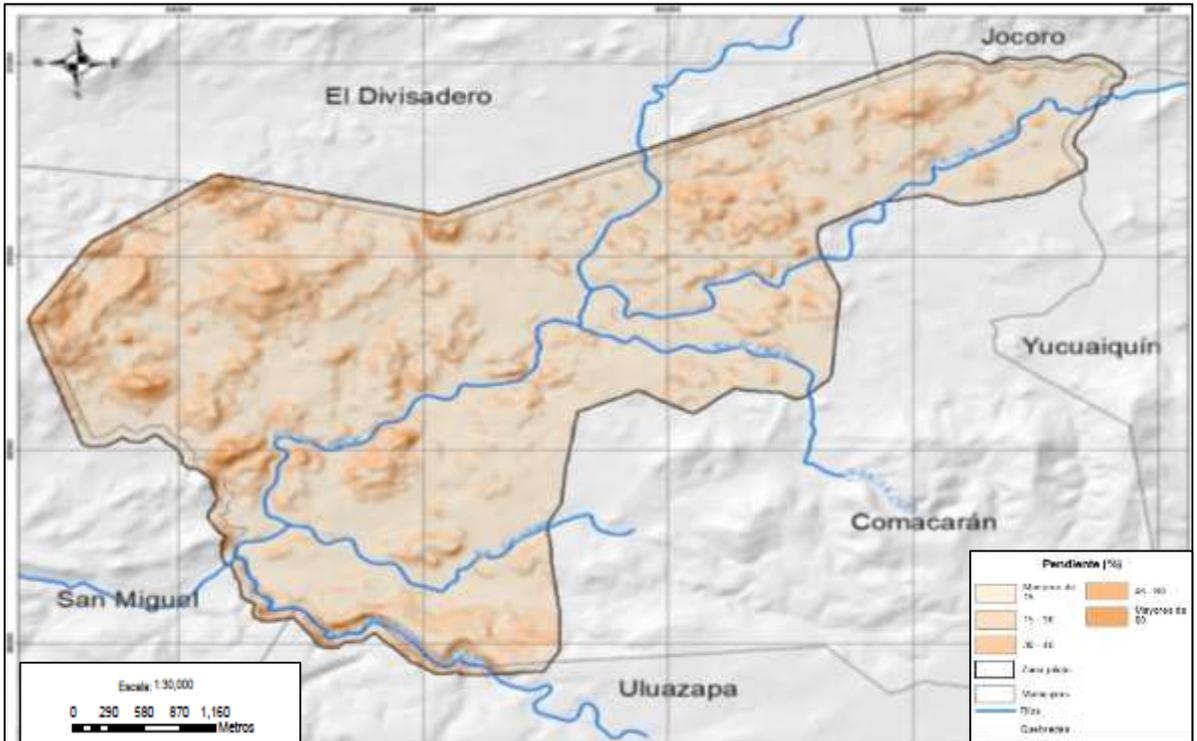


Figura 14. Pendiente de los cantones El Platanarillo y El Colorado

4.3.3. Mapa de Índice de Humedad Topográfica (TWI).

En el cuadro 14, figura 15, Se pueden observar las zonas de acumulación de agua en la zona de estudio, este índice resulta útil para cuantificar el control de la topografía en los procesos hidrológicos e indicar la espacialidad de la humedad del suelo, en zonas planas correspondientes a 2.80 km² que representan el 16.7% y con valores de 9 a mayores de 12, estas áreas poseen un alto potencial de retención de agua, mientras que valores menores a 9 indican menor potencial de retención de humedad esto se debe a la topografía del terreno (figura A-20). Esto se relaciona con lo expresado por Romano y Chirico en el 2004 en donde el TWI es catalogado como un atributo secundario, calculado a partir del DEM, este es un índice generalmente utilizado en análisis de la relación suelo relieve, particularmente en la descripción de la variabilidad espacial de la humedad del suelo.

Cuadro 14. Áreas de Índice de humedad topográfico.

Índice de humedad topográfica	Área en km ²	Área en Ha	Porcentaje (%)
Menores de 3	0.0002	0.2	0
3-6	3.90	390.0	17.2
6-9	15.00	1,500.0	66.1
9-12	1.30	130.0	5.3
Mayores de 12	2.5	250.0	11.4
Total	22.7	2,270.0	100 %

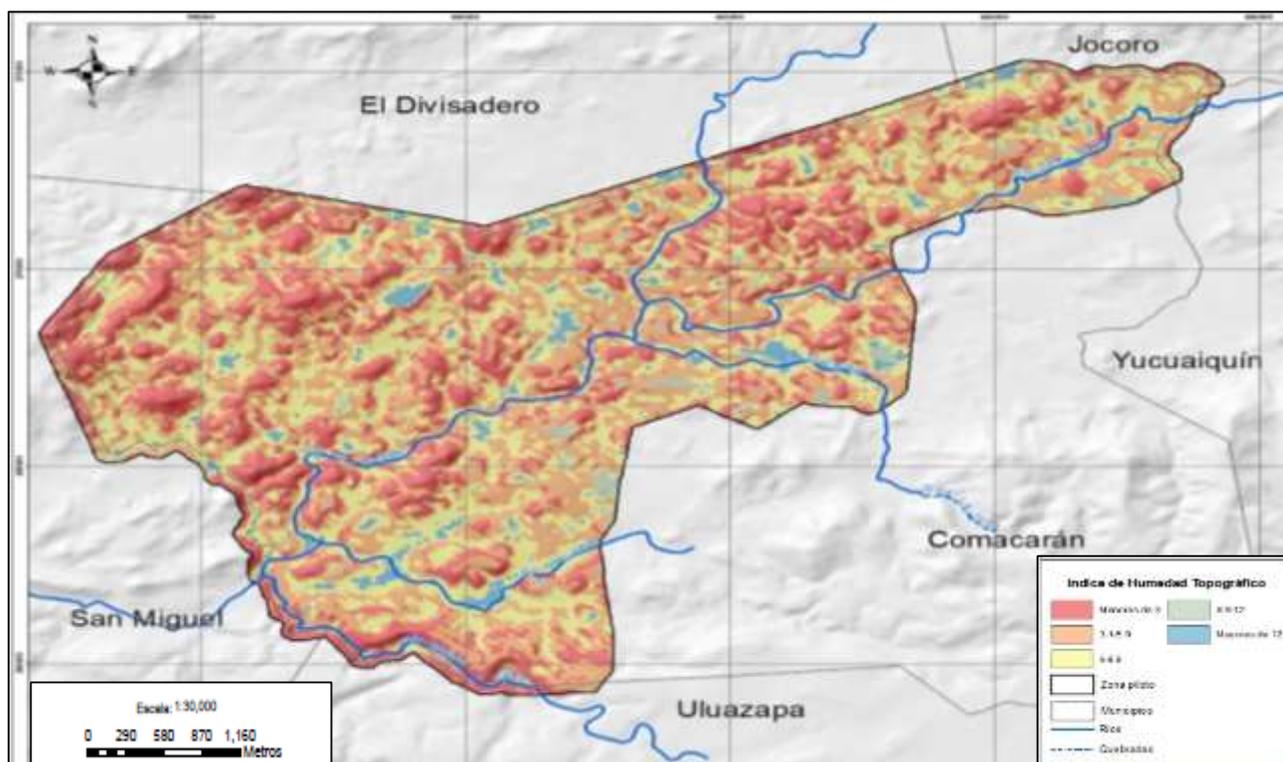


Figura 15. Índice de humedad topográfico.

4.3.4. Mapa de Índice de Posición Topográfica (TPI).

Los valores TPI pueden ser clasificados por medio de la pendiente, basándose por el porcentaje de la pendiente en cada punto (Jenness, 2006).

En el cuadro 15, figura 16, se pueden observar las formas generales del terreno, los valores de TPI negativos o cercanos a 0 representan áreas más bajas o valles, donde el valor de la pendiente es también cercano a 0, dichas áreas están constituidas por 19.1 km² que representan un 84.1%, mientras que los valores positivos indican áreas o regiones que son más altas que sus inmediaciones como lomas, cerros estas áreas están constituidas por 5.9 km² que representan un 25.9% de la zona de estudio (figura A-21).

Cuadro 15. Áreas de Índice de posición Topográfica.

Índice de posición topográfica	Área en km ²	Área en Ha	Porcentaje (%)
Menores de -2	0.20	200.0	0.9
-2 – 0.6	16.60	1,660.0	73.1
0.6 – 0.73	2.30	230.0	10.1
0.73 - 1.39	2.10	210.0	9.3
Mayores de 1.39	1.50	150.0	6.6
Total	22.7	2,270.0	100 %

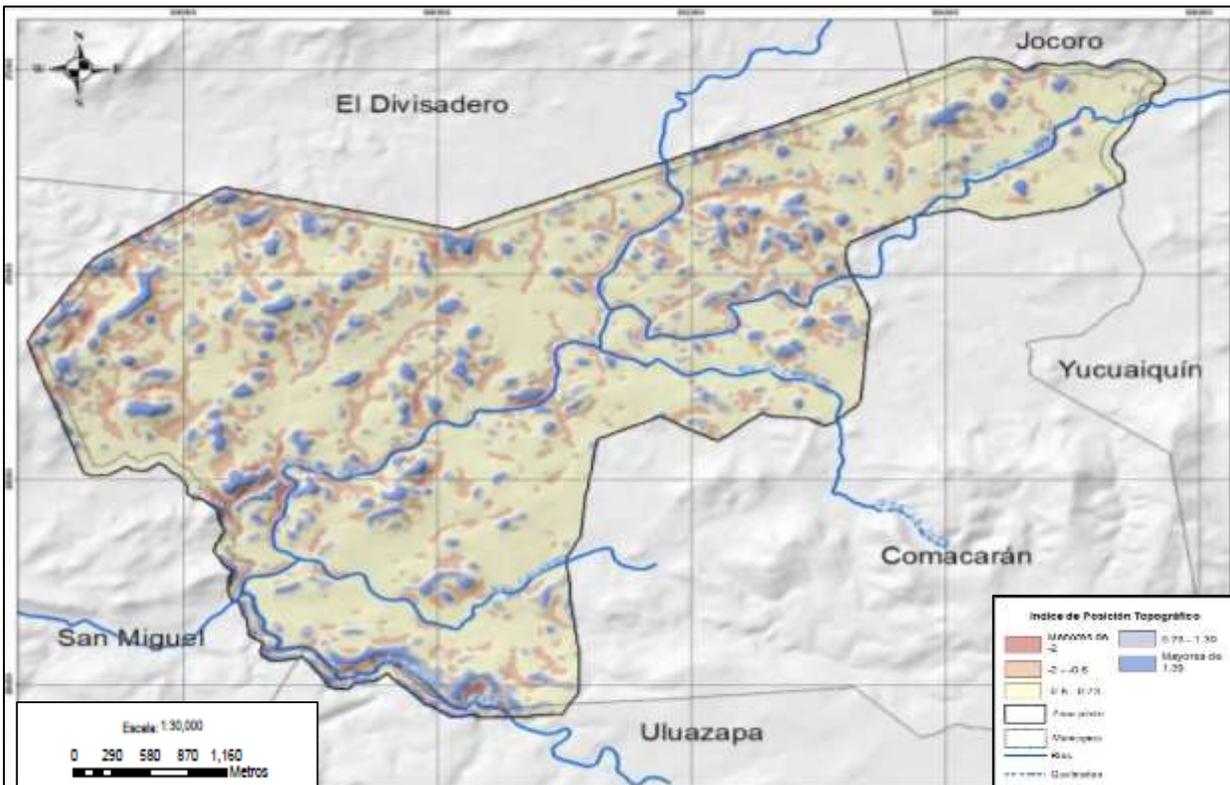


Figura 16. Mapa de índice de posición topográfica

4.3.5. Mapa de Multirresolución de Fondo de Valle (MRVBF).

Es un índice calculado como una medida de la planicidad y profundidad para identificar áreas de deposición y el fondo de los valles. Este índice clasifica el grado de llanura del fondo de los valles, asociado con la profundidad de los depósitos, y permite delinear las unidades hidrológicas y geomorfológicas. El índice usa la pendiente y la elevación para clasificar el fondo de los valles como planos o áreas bajas, a partir de una serie de operaciones de vecindad con resoluciones crecientes para identificar los valles pequeños y grandes (Gallant y Dowling, 2003).

En la zona de estudio en el cuadro 16, figura 17, se pueden observar las diferentes áreas deposicionales, el índice usa la pendiente y la elevación para clasificar el fondo de los valles como planos o áreas bajas, las áreas con valores entre 2-4 permiten identificar zonas de valle que representan el 8%, mientras que valores menores de 2 están constituidas por 20.9 km² la cual representan el 92.3 % de la zona de estudio indican zonas altas (figura A-22).

Cuadro 16. Áreas de Índice de multirresolución de Fondo de Valle.

MRVBF	Área en km ²	Área en Ha	Porcentaje (%)
Menores de 1	17.0	1700	74.8
1-2	3.9	390	17.2
2-3	1.3	130	5.7
3-4	0.4	40	1.8
Mayores de 4	0.1	10	0.5
Total	22.7	2,227.0	100 %

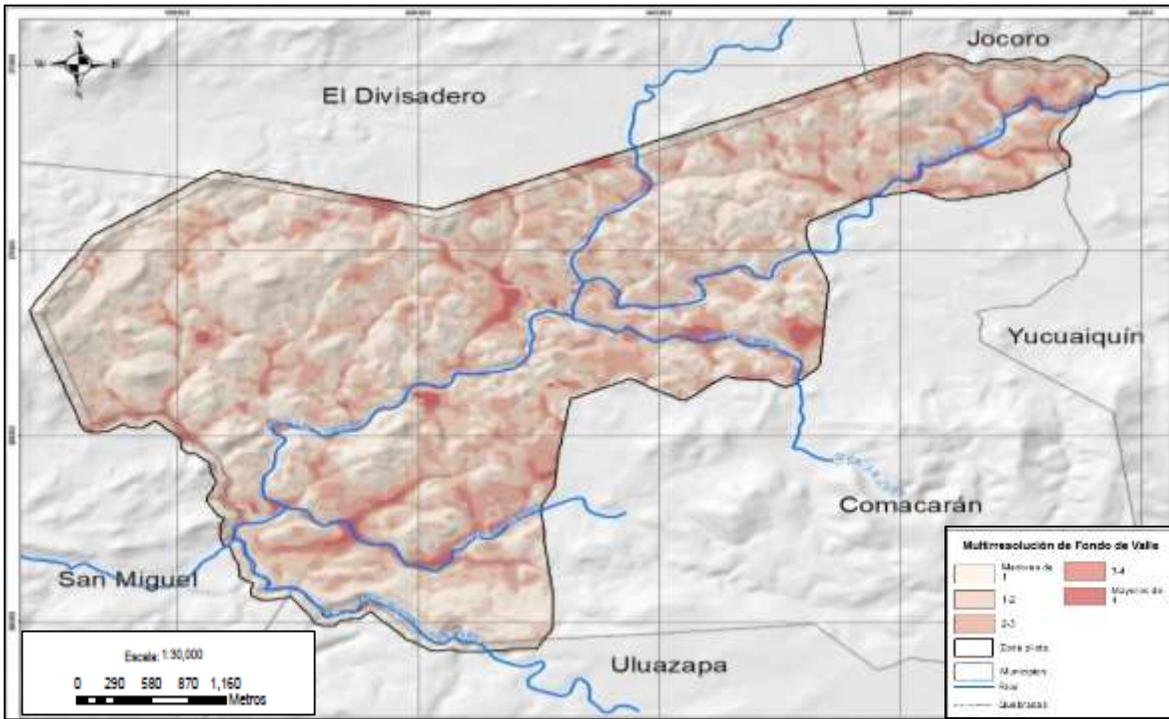


Figura 17. Mapa de multirresolución de fondo de Valle

Entre el suelo y la topografía existe también una relación mutua, algunos suelos se erosionan fácilmente y rápidamente, permitiendo la formación de valles amplios, otros resisten la erosión, dando lugar a cerros y vertientes, la pendiente de las laderas influye en la velocidad con que el suelo se erosiona (Thompson, 2002).

Según Thompson 2002 y FAO 2009, la topografía local modifica el microclima e influye en la vegetación, produciendo, por lo tanto, un impacto notable sobre la cantidad de materia orgánica. La topografía tiene, además un efecto importante sobre el movimiento del agua en el suelo, los suelos con pendientes fuertes sufren una mayor escorrentía y presentan menos agua disponible para las plantas, el contenido de materia orgánica es menor, no solo por el reducido crecimiento de la vegetación sino debido a que se pierde por erosión en las pendientes fuertes sobre todo en su parte superior. El resultado es un suelo relativamente poco profundo, con un reducido porcentaje de materia orgánica como se presentan en la zona de estudio teniendo rangos medios.

La forma del relieve es también importante en la determinación de muchos de los factores antes mencionados. La parte superior suele unirse a zonas divisorias de agua mediante un segmento convexo, la parte de la superficie convexa recibe menos material y agua procedente de la superficie plana, el mismo resultado ocurre cuando la convexidad se presenta a media ladera, como en la cúspide de una montaña. En tales condiciones el agua

y el suelo moviéndose a lo largo de la pendiente tienden a dispersarse. Cuando la superficie es cóncava ocurre el efecto contrario (Thompson, 2002).

Los problemas de erosión y escorrentía generan baja fertilidad en los suelos ya que provocan una baja disponibilidad de nutrientes para las plantas lo cual genera que los rendimientos de los cultivos sean bajos (FAO, 2009).

Todo lo anterior se relaciona en la descripción de las propiedades físicas y químicas del suelo, lo cual es el tema de investigación en los cantones del platanarillo y el colorado, en donde con los mapas de atributos elaborados y la información existente se elabora un mapa de clases de suelo genérico y se aplicara la metodología del LHS, para determinar puntos de muestreo, para conocer el comportamiento de las propiedades físicas y químicas de la zona de estudio.

4.3.6 Muestreo de suelo.

El muestreo de suelos se realizó en los cantones de El Platanarillo y El Colorado, pertenecientes al municipio de Comacarán en el Departamento de San Miguel.

Según Junior et al. 2013 en su investigación sobre el mapeo digital de suelos en Brasil, los puntos generados a partir del muestreo por LHS presentan una mejor distribución geográfica y un menor número de muestras que los obtenidos con el muestreo aleatorio, ya que la LHS permite una mayor eficiencia para la toma de muestras en campo basándose en la utilización de datos auxiliares que captan la variación de valores de las diferentes covariables a muestrear, además permite una mayor eficiencia económica al muestrear solo lugares donde se es necesario.

En la Figura 18 se presentan los puntos de muestreo determinados por medio del LHS obteniendo 6 puntos de muestreo los cuales se determinaron con base al mapa de costos y la topografía local. El mapa representa el costo de la toma de muestra, colores más oscuros indican una mayor dificultad de la toma de muestras a partir de las vías principales de la zona de estudio (figura A-23)

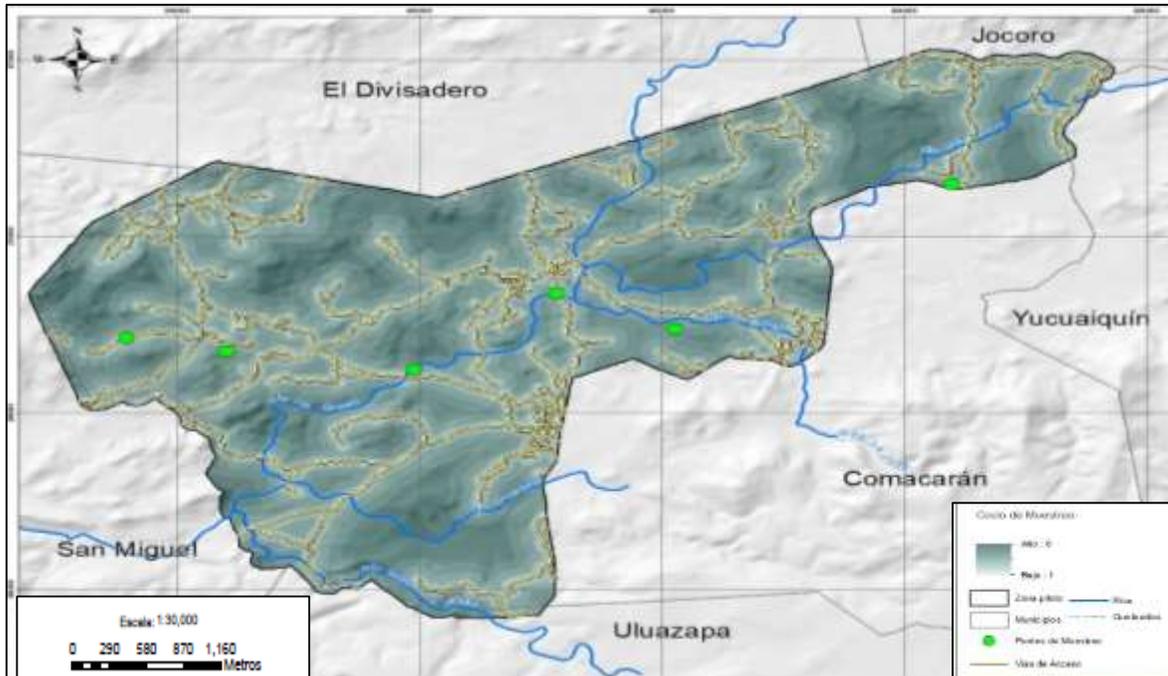


Figura 18. Puntos de muestreo obtenidos por la metodología del LHS

Para las seis muestras de suelos se conoció el comportamiento de las propiedades físicas y químicas mediante un análisis completo de laboratorio realizado por el CENTA (Ver cuadros A-9, A-10 y A-11)

4.3.7. Mapa de clases genéricas

En el cuadro 17, figura 19, podemos observar que al unir las 6 agrupaciones del mapa de membresía (una unidad con un único valor) con sus valores obtenidos a partir de la estadística zonal, se obtiene el mapa de clases, en la cual cada clase representa una característica diferente de la topografía local, la clase 1, 2 y 3 poseen zonas de fondos de valle o planas con pendientes mínimas las cuales tienen un área total de 11.7 km² representando un 51.6% de la zona, mientras que las clases 4, 5 y 6 son zonas de mayor elevación, con mayor porcentaje de pendiente ubicados en cerros o lomas que poseen un área total de 11 km² representando un 48.4% de la zona de estudio (figura A-24)

Cuadro 17. Áreas de Mapa de clases

Clases	Área en km ²	Área en Ha	Porcentaje (%)
1	3.42	342	15.0
2	5.93	593	26.1

3	2.35	235	10.4
4	5.25	525	23.1
5	1.95	195	8.6
6	3.80	380	16.8
Total	22.7	2,227.0	100 %

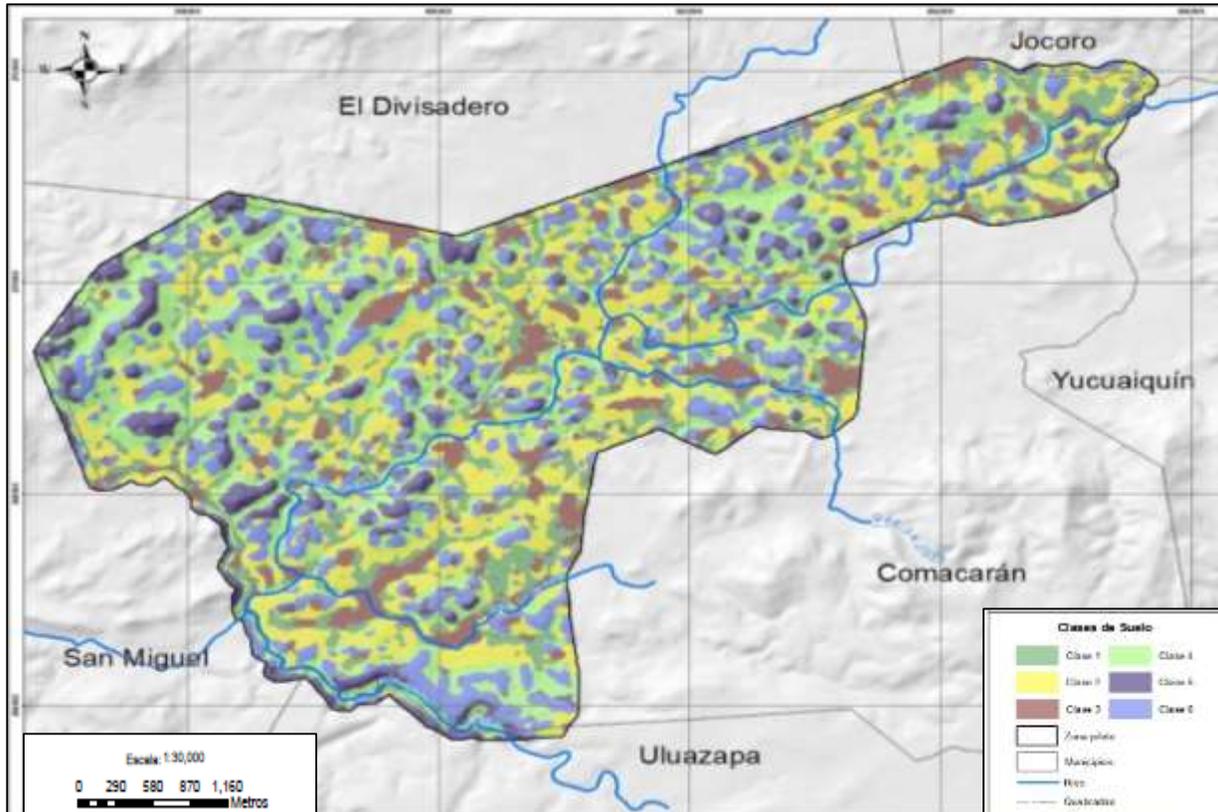


Figura 19. Mapa de clases genérico

4.3.8. Mapa de Profundidad efectiva

La profundidad efectiva del suelo, es la profundidad a la cual la planta no tiene impedimentos físicos para el correcto crecimiento de las raíces en el suelo. (Rosas y Arribillaga, sf), tal es el caso expresado en el cuadro 18, figura 20, en donde se pueden observar la profundidad efectiva del suelo para la zona de estudio, las que poseen una mayor área son las profundidades entre los 85-100 cm teniendo 8 km² lo que representa un 35.2%, mientras que las profundidades menores a los 85 cm tienen un área de 0.10 km² que representan un 0.4% de la zona de estudio (figura A-25).

Cuadro 18. Áreas de Mapa de profundidad efectiva

Profundidad efectiva (cm)	Área en km ²	Área en Ha	Porcentaje (%)
Menores de 85	0.10	10.0	0.4
85-100	8.0	800.0	35.2
100-115	6.7	670.0	29.5
115-130	2.9	290.0	12.8
Mayores de 130	5.0	500.0	22.0
Total	22.7	2,270.0	100 %

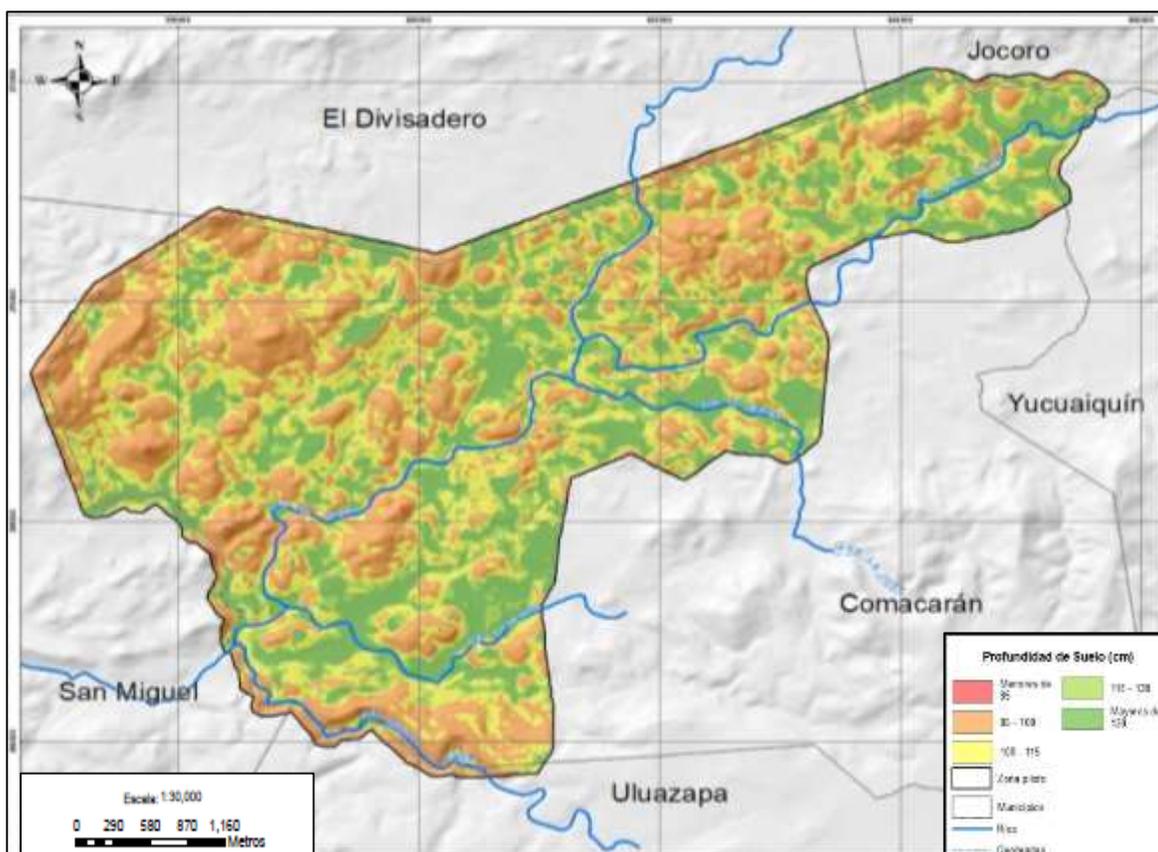


Figura 20. Mapa de profundidad efectiva.

4.3.9. Densidad Aparente de los suelos de la zona

En el cuadro 19, figura 21, se pueden observar los niveles de densidad aparente en la zona piloto, en la cual se encuentran valores en un área total de 22.7 km² menores a 3 gr/ml⁻¹ que representan el 100% de la zona de estudio (figura A-26). Los suelos de la zona de estudio tienen una muy buena porosidad según el expresado por la FAO en el 2009, en

donde La densidad aparente del suelo se define como la masa de una unidad de volumen de suelo seco. Este volumen incluye tanto sólidos como los poros, por los que densidad aparente refleja la porosidad del suelo. Valores de densidad aparente bajos (generalmente por debajo de 1.3 gr/ml¹) indican una condición porosa del suelo, los valores de densidad aparente altos indican un ambiente pobre para el crecimiento de raíces, aireación, reducida y cambios indeseables en la función hidrológica como la reducción de la infiltración.

Cuadro 19. Áreas de Mapa densidad aparente del suelo.

Densidad aparente (gr ml ⁻¹)	Área en km ²	Área en Ha	Porcentaje (%)
Menores de 1.3	22.7	2,270	100%
Mayores de 1.3	0	0	0
Total	22.7	2,270.0	0

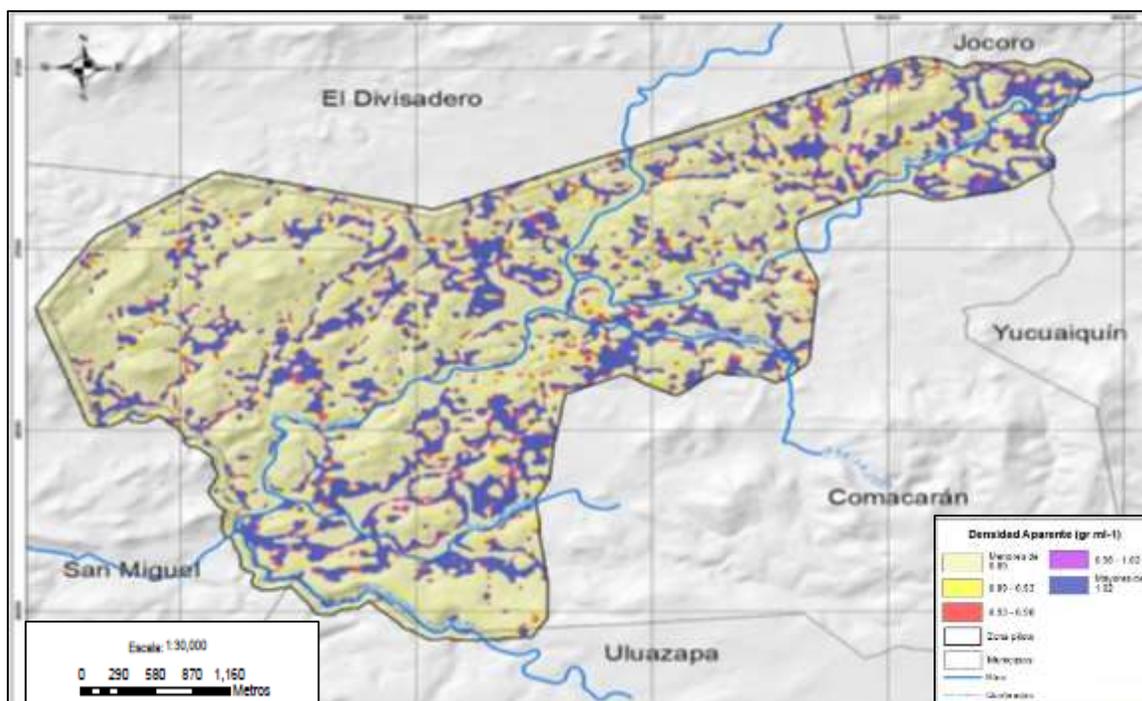


Figura 21. Mapa de densidad aparente

4.3.10. Textura de suelo

En el cuadro 20, figura 22, se puede observar la textura del suelo de la zona piloto la cual se realizó en base a los mapas de limo (figura A-16), arena (figura A-17) y arcilla (figura A-18), utilizando la herramienta de SAGA Soil Texture en QGIS, se determinó que los suelos

en el área de 22.7 km² posee tres tipos de textura, para textura Franco arcillo arenoso se tiene un área de 8.81 km² que representa un 38.8% de la zona, mientras que para textura Arenoso franco posee un área de 10.99 km² que representa 48.4 % la cual posee la mayor área de la zona total, y franco arenoso con área de 2.90 km² representa la menor área con un 12.8% de la zona de estudio (figura A-27).

Cuadro 20. Áreas de Mapa de Textura de suelo

Textura de suelo	Área en km ²	Área en Ha	Porcentaje (%)
Franco arcillo arenoso	8.81	881	38.8
Arenoso franco	10.99	1,099	48.4
Franco arenoso	2.90	290	12.8
Total	22.7	2,270.0	100 %

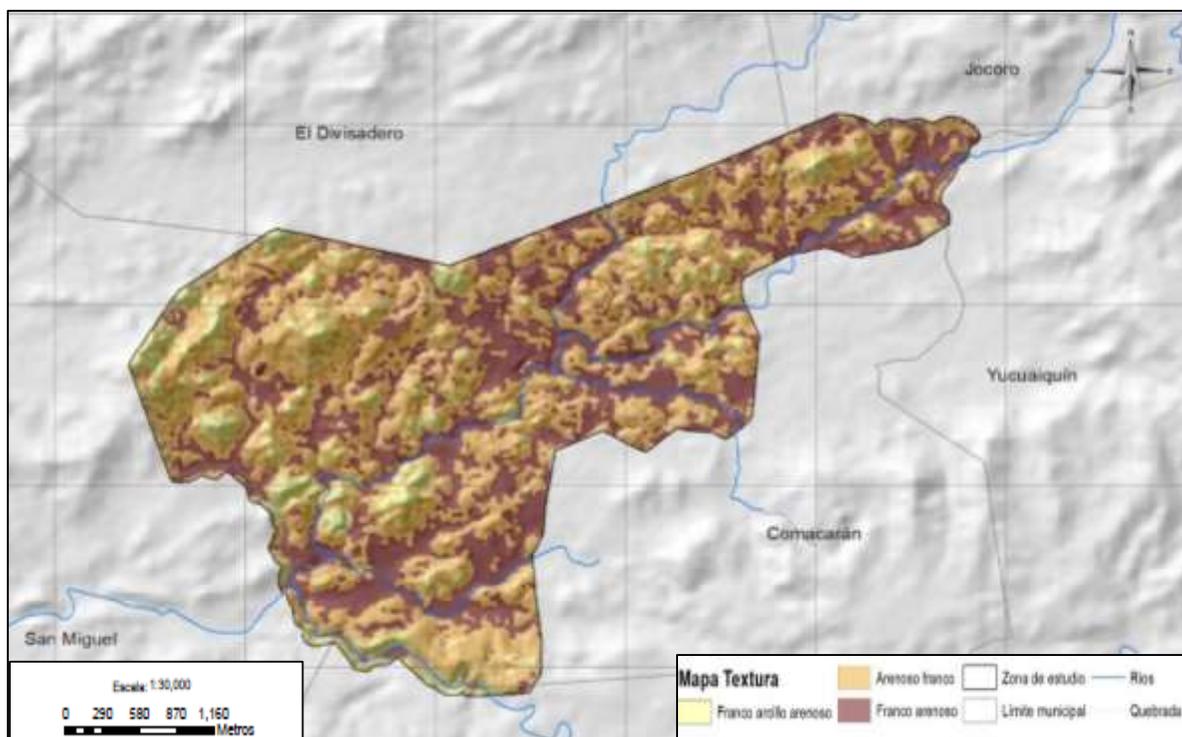


Figura 22. Mapa de textura de suelo.

Las propiedades físicas de los suelos determinan en gran medida la capacidad de muchos de los usos a los que el hombre lo somete. La condición física de un suelo determina su capacidad de sostenimiento, la facilidad para la penetración de las raíces, la circulación del aire, la capacidad de almacenamiento de agua y de drenaje y la retención de nutrientes (Thompson, 2002).

Las propiedades físicas poseen una significancia directa porque el espesor de la zona ocupada por las raíces y las relaciones de aire y agua en la misma, se hallan en gran parte determinadas por la constitución física de los horizontes del suelo (Thompson, 2002).

Suelos profundos, en comparación con superficiales, ofrecen una más amplia zona para la ocupación de las raíces, así como una mayor capacidad para almacenar agua y nutrientes. Los suelos profundos son más productivos que otros, similares, pero menos espesos. Las diferencias son más agudas cuando algún tipo de limitación afecta a las plantas (Jiménez, s.f).

En suelos profundos las plantas resisten mejor la sequía, ya que a más profundidad mayor capacidad de retención de humedad. De igual manera, la planta puede usar los nutrimentos almacenados en los horizontes profundos del subsuelo, si estos están al alcance de las raíces. (Thompson, 2002)

En la mayor parte de la zona de estudio se presentan suelos con profundidad efectiva entre los 85 a 100 cm, para el cultivo del maíz variedad H-59 se requieren suelos profundos para obtener los rendimientos óptimos. La densidad aparente es una propiedad del suelo ampliamente utilizada en la agricultura, relacionada principalmente con las prácticas de manejo de los suelos y de las aguas. La Da es la característica que en mayor grado influye sobre la productividad de los cultivos, debido a su estrecha relación con otras propiedades del suelo incluso con el uso de fertilizantes el cual puede ser más notable cuando no se aplican estos últimos (Jiménez, s.f).

Cuando la Da del suelo aumenta, se incrementa la compactación y se afectan las condiciones de retención de humedad, limitando a su vez el crecimiento de las raíces, en la zona de estudio se presentan valores menores $1.3 \text{ (gr ml}^{-1}\text{)}$ por lo cual no hay problemas de compactación (Jiménez, s.f).

La importancia de la textura de suelo radica en cada tipo de partícula presente que realiza una contribución a la naturaleza del suelo, la arcilla y la materia orgánica son importantes por su capacidad de almacenar agua y nutrientes. Las partículas más finas pueden, además, ayudar a unir entre si otras mayores, formando agregados, las partículas más grandes (arena) constituyen el esqueleto del suelo, a ellas se debe la mayor parte de su peso y ayudan conseguir una buena aireación y permeabilidad. Los suelos ricos en arena gruesa suelen ser capaces de soportar grandes pesos con escasa compactación (Thompson, 2002).

Los suelos arenosos son generalmente muy permeables al aire, al agua y a las raíces, pero presentan dos importantes limitaciones como la retención de agua y su baja capacidad de nutrientes, las arcillas tienen la capacidad de retener nutrientes en su superficie de forma utilizable por las plantas, la pérdida de nutrientes por lavado en el caso de arcillas es muy pequeña comparada con las pérdidas ocurrirían si la misma cantidad de nutrientes estuviera en un suelo arenoso, un problema importante que presentan los suelos arcillosos es su pegajosidad (Thompson, 2002).

Los suelos francos y francos limosos son muy deseables para la mayor parte de los usos. Tienen la arcilla suficiente para retener cantidades adecuadas de agua y nutrientes que aseguran un óptimo crecimiento vegetal, pero no tanta como para presentar dificultades de aireación o causar problemas en las operaciones del cultivo (Thompson, 2002).

4.3.11. Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

En el cuadro 21, figura 23, se puede observar la capacidad de intercambio catiónico que poseen los suelos de la zona de estudio, la zona que posee una mayor área 10.98 km² son las que tienen un entre los 12-20 Meq /1000 g de suelo representando un 48.3%, estos valores representan un grado de disponibilidad de nutrientes moderadamente alto, mientras que valores menores a 8 poseen un área de 0 km² que es un 0% de la zona piloto, según el manual de métodos de análisis del CENTA de 1993 (figura A-28).

En la zona de estudio la capacidad de intercambio de cationes se encuentra en rangos adecuados para la absorción de nutrientes de la planta según lo expresado por Castellanos s.f La capacidad de intercambio catiónico se refiere a la cantidad total de cargas negativas que están disponibles sobre la superficie de las partículas del suelo, lo que indica el número total de cationes intercambiables que un suelo en particular puede o es capaz de retener, conocer la CIC es fundamental ya que permite saber el potencial de un suelo para retener o intercambiar nutrientes.

Cuadro 21. Áreas de Capacidad de intercambio catiónico.

Grado de intercambio	CICE (Meq /100g de suelo)	Área (km ²)	Área (Ha)	Porcentaje
Muy Bajo	< 4	0.00	0.00	0
Moderadamente Bajo	4 – 8	0.00	0.00	0
Bajo	8.1 – 12	6.20	620	27.3

Moderadamente Alto	12 – 20	10.98	1,098	48.3
Alto	>20	5.52	552	24.4
Total		22.7	2,270	100%

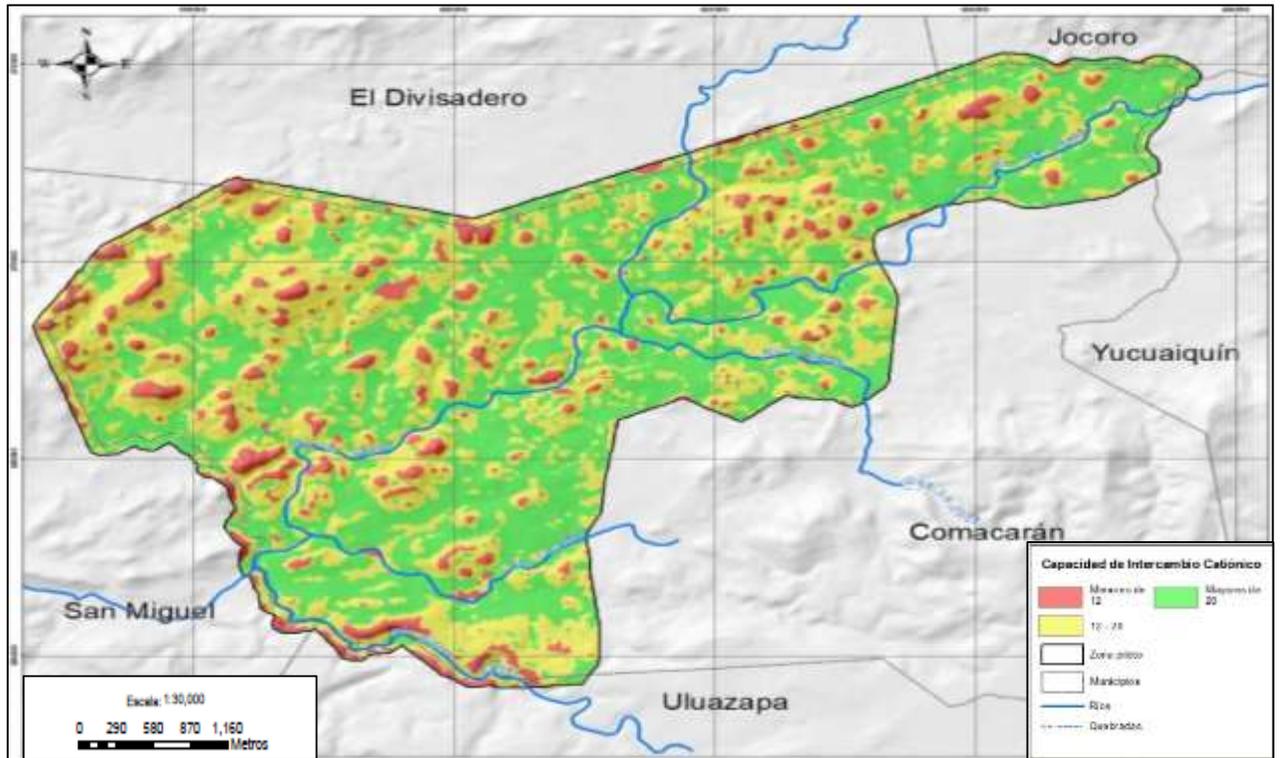


Figura 23. Capacidad de intercambio catiónico.

4.3.12. Mapa de Acidez del suelo (pH en H₂O).

La acidez presente en el suelo corresponde a la concentración de iones hidronio en disolución, extraída de la mezcla de suelo y agua, los problemas de acidez pueden reducir el crecimiento de la planta además de ocasionar una disminución de la disponibilidad de algunos nutrimentos como Ca, Mg, K y P, favorece la solubilización de elementos tóxicos para las plantas como el Al y Mn (Vega, s.f).

En el cuadro 22, figura 24, se puede observar el grado de acidez de los suelos, la zona que posee una mayor área 10.99 km² son las que se encuentran entre los valores de 5.1-5.5 representando un 48.4%, estos valores indican que los suelos de dicha área son fuertemente ácidos por lo que se deben de tomar medidas de corrección de pH por medio de aplicaciones de cal, mientras que suelos moderadamente ácidos tienen un área de 8.81

km² representando un 38.8% de la zona de estudio, según el manual de métodos de análisis del CENTA (1993). En la investigación realizada en San Juan Opico por Castillo 2012, reporta en la fase inicial de su estudio niveles de acidez clasificados como muy fuertemente ácido teniendo valores de 4.6; durante el avance de su investigación reporto cambios de pH entre 5.18 y 5.5 clasificándolos como suelos con un pH fuertemente ácido, mostrando rangos similares con los suelos de la zona de estudio (figura A-29).

Cuadro 22. Áreas de Acidez del suelo pH en agua.

Definición		Valores de Ph en H ₂ O	Área (km ²)	Área (Ha)	Porcentaje
Muy fuertemente ácido	MFA	4.5 – 5.0	2.90	290	12.8
Fuertemente ácido	FA	5.1 – 5.5	10.99	1,099	48.4
Moderadamente ácido	MA	5.6 – 6.0	8.81	881	38.8
Total			22.7	2,270	100%

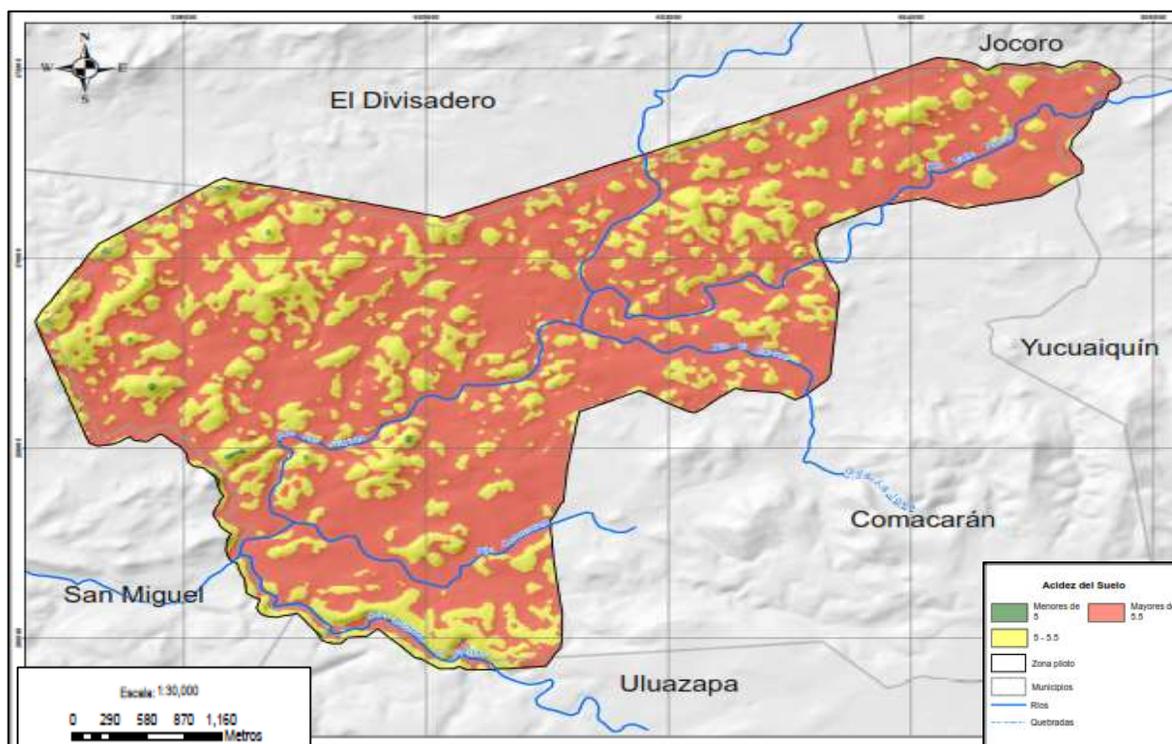


Figura 24. Acidez del Suelo (pH).

4.3.13. Materia orgánica (MO).

La materia orgánica a medida que sufre un proceso de descomposición, pone a disposición los nutrientes en exceso los cuales son liberados dentro del suelo en formas que pueden ser usadas por las plantas, los materiales orgánicos en la parte superficial del suelo pueden proporcionar protección contra el impacto de las gotas de lluvia y la insolación directa (Melgar R. y Torres M., sf).

En el cuadro 23, figura 25, se presentan los contenidos de MO para la zona de estudio, la cual para valores entre los 2-4% con un área de 16.5 km² indican un valor medio contenido de MO representando un 72.7%, mientras que valores mayores al 4% tienen un área de 6.20 km² lo que representa un 27.3% de la zona de estudio, según el manual de métodos de análisis del CENTA de 1993 (figura A-30).

En el mismo estudio realizado por Castillo 2012, reporta contenidos de MO mayores a 4% los cuales son considerados con niveles muy altos, además durante el periodo de investigación reportó valores con porcentajes entre el 2.31% (Medio) y mínimos de 1.22% (bajo) por lo que se establece que son niveles medios y bajos de materia orgánica en el suelo, obteniendo rangos similares en la investigación de materia orgánica en la zona de estudio.

Cuadro 23. Áreas de contenido de Materia Orgánica.

Grado de disponibilidad	Materia Orgánica (%)	Área (km ²)	Área (Ha)	Porcentaje
Bajo	<2	0.00	0.00	0
Medio	2 - 4	16.50	1,650	72.7
Alto	> 4	6.20	620	27.3
Total		22.70	2,270	100%

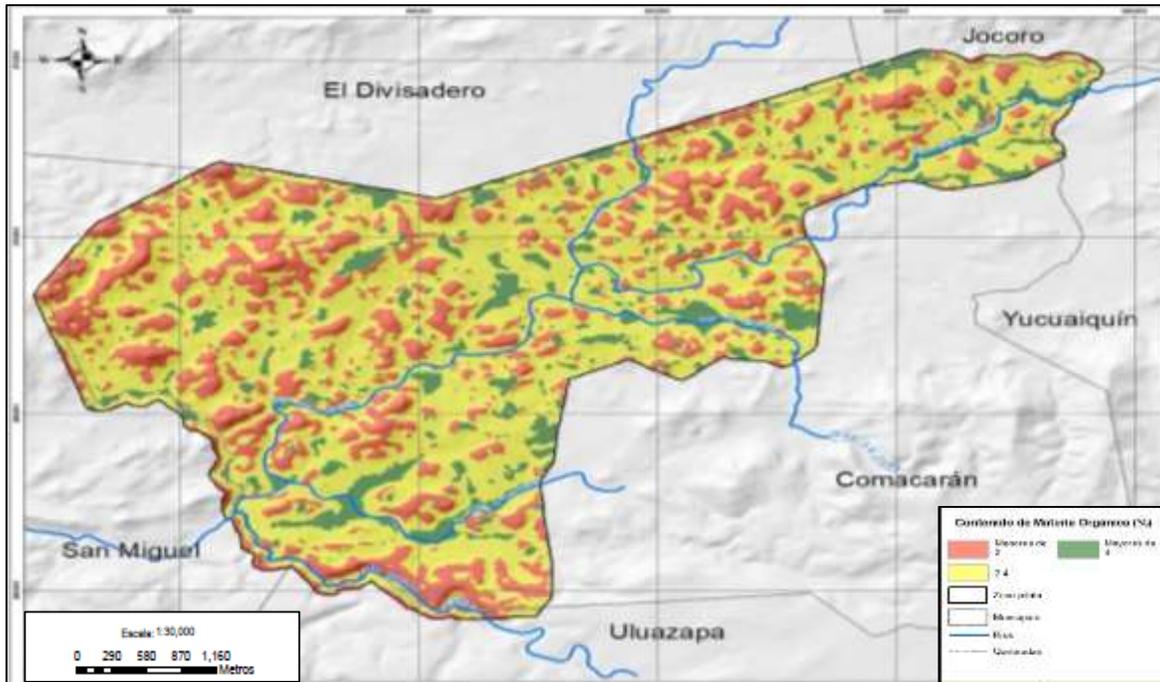


Figura 25. Contenido de Materia Orgánica

4.3.14. Mapa de Fósforo (P).

El fósforo juega un papel importante en la transferencia de energía. Por eso es esencial para los procesos de fotosíntesis y para otros procesos químicos-fisiológicos. Es indispensable para la diferenciación de las células y para el desarrollo de los tejidos, que forman los puntos de crecimiento de la planta (FAO, 2009).

En el cuadro 24, figura 26, se presentan los contenidos de P, valores menores de 12 ppm con un área de 9.1 km² indican niveles de P bajos a muy bajos lo que representa un 78.9 % de la zona de estudio, los valores bajos se deben a la aplicación de sulfatos de amonio y a los residuos de plantas en el suelo, mientras que con un área de 21.1 km² se encuentran valores entre los 13-30 ppm que indican valores altos de P estos representan el 21.1 % de la zona de estudio, según el manual de métodos de análisis del CENTA de 1993 (figura A-31).

En investigaciones realizada por el CATIE en el 2010, en el Departamento de Sonsonate, reportan valores de P de 4 ppm, estos valores son considerado como bajo por lo cual es un nutrimento que debe ser aplicado al suelo para lograr subir al nivel óptimo, lo mismo que se debe de realizar en la zona de estudio.

Cuadro 24. Áreas de Contenido de Fósforo

Grado de disponibilidad	P (ppm)	Área (km ²)	Área (Ha)	Porcentaje
Muy Bajo	0 – 8	8.81	881	38.9
Bajo	9 – 12	9.10	910	40.0
Alto	13 – 30	4.79	479	21.1
Muy Alto	> 30	0.00	0.00	0
Total		22.7	2,270	100%

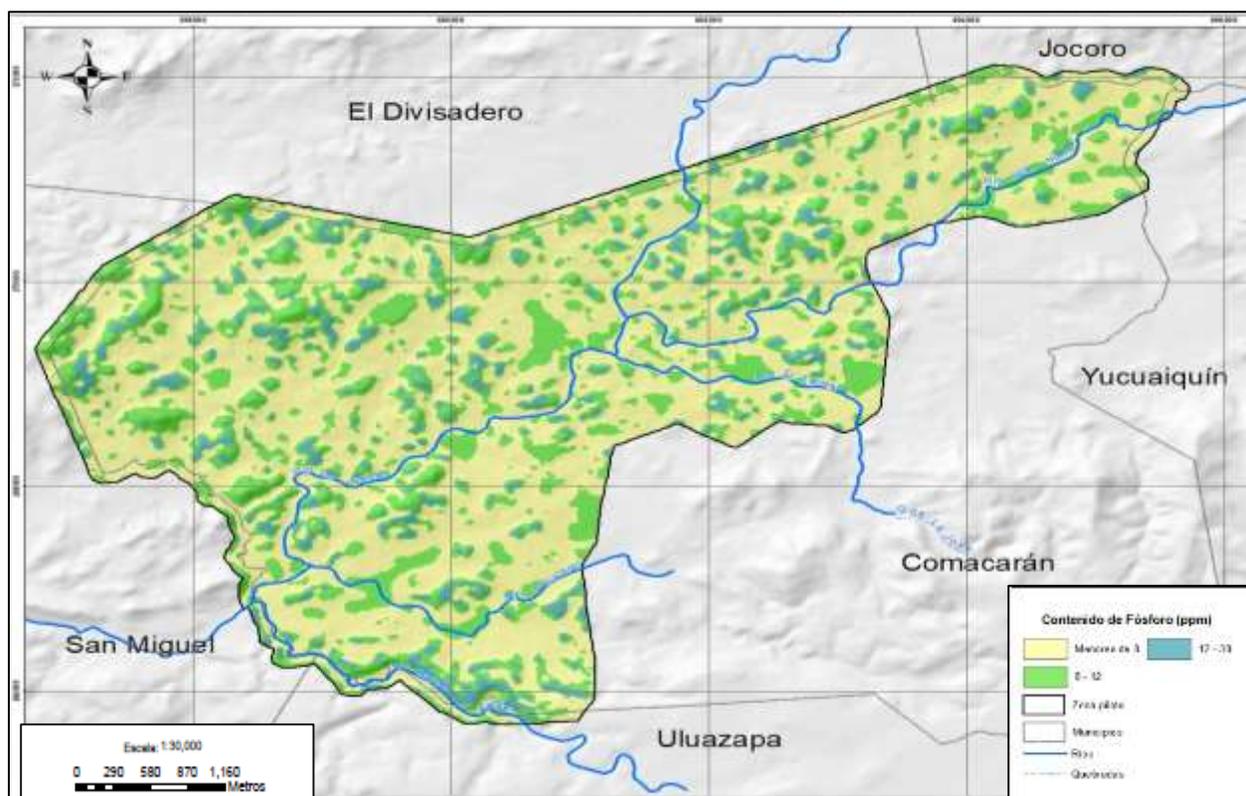


Figura 26. Contenido de Fósforo en la zona de estudio.

4.3.15. Mapa de Potasio (K).

El potasio en las plantas es el encargado de activar diferentes enzimas que se encargan del metabolismo energético, degradación de azúcares, síntesis de almidón, además se encarga de regular la apertura y cerrado de las estomas, el potasio prolonga el periodo de llenado de grano o fruta. (CATIE, 2010)

En el cuadro 25, figura 27, se pueden observar los niveles de K, valores menores de 8 ppm con un área de 8.81 km² indican niveles de K bajos lo que representa un 6.0%, mientras que con un área de 21.34 km² se encuentran valores entre los 60 y mayores de 200 ppm que indica un grado de disponibilidad de alto a muy alto de K lo que representa un 94% de la zona de estudio, según el manual de métodos de análisis del CENTA de 1993 (figura A-32).

En el mismo estudio realizado por Castillo, 2012 reporta contenidos de K de 89 ppm lo que indica que estos niveles son contenidos altos de K en el suelo (60-200ppm) en rangos similares al grado de disponibilidad que se encuentra en la mayor parte de la zona de estudio.

Cuadro 25. Áreas de contenido de Potasio.

Grado de disponibilidad	K (ppm)	Área (km ²)	Área (Ha)	Porcentaje (%)
Bajo	0 - 60	1.32	132	6.0
Alto	60 - 200	17.18	1,718	75.7
Muy Alto	> 200	4.16	416	18.3
Total		22.70	2,270	100%

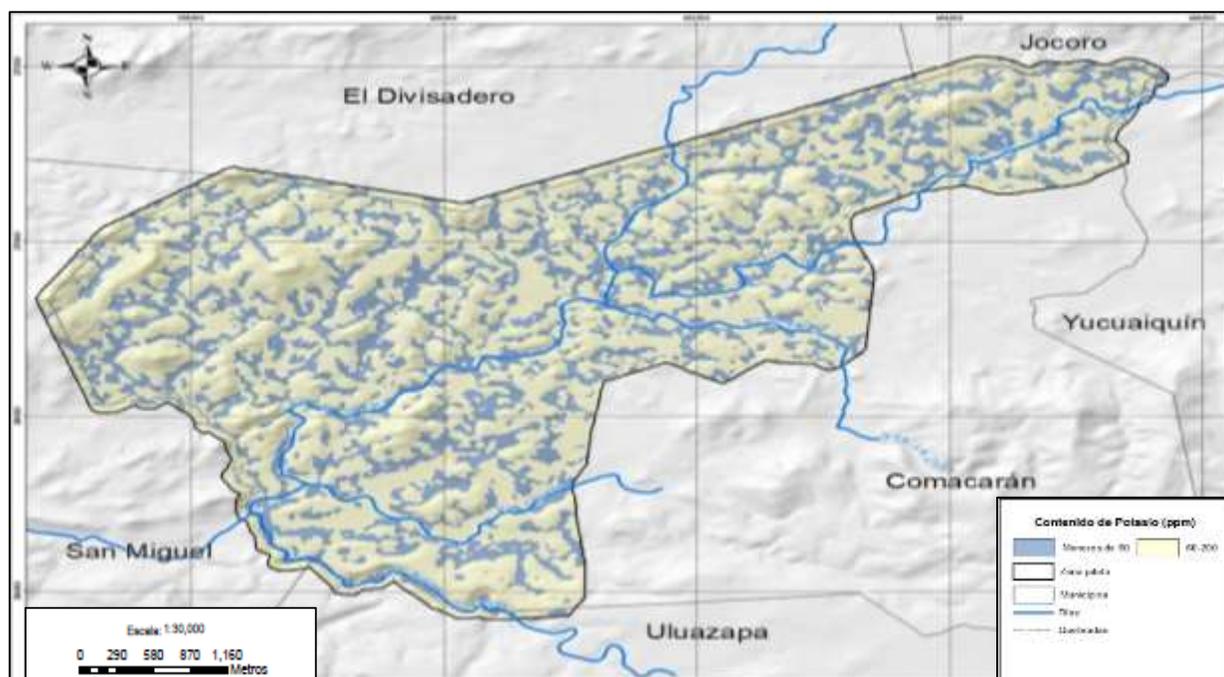


Figura 27. Contenido de Potasio.

4.3.16. Mapa de Calcio (Ca).

El calcio es esencial para el crecimiento de las raíces y como un constituyente del tejido celular de las membranas, además el calcio se utiliza como enmienda en el suelo para mantener un balance químico en la tierra, reduce la salinidad del suelo y mejora la penetración del agua (FAO, 2009).

En el cuadro 26, figura 28, se pueden observar el grado de disponibilidad del Ca, el cual se encuentra entre niveles de 4.1 meq Ca/100 gramos a mayores de 36 meq Ca/100 gramos con un área de 22.7 km² indicando valores altos a muy altos de disponibilidad de Ca

representando así un 100% de la zona de estudio, según el manual de métodos de análisis del CENTA de 1993 (figura A-33).

En el mismo estudio realizado por Castillo 2012, en la fase inicial del proyecto de investigación encontró contenidos de Ca entre los 3.63-4.00 meq Ca/100 gramos lo que indica que es un contenido bajo de Ca, mostrando rangos similares a la mayor parte del área de estudio, el cual tiene influencia en el comportamiento del pH.

Cuadro 26. Áreas de contenido de Calcio.

Grado de disponibilidad	Ca (Meq Ca/ 100 g)	Área (km ²)	Área (Ha)	Porcentaje (%)
Muy Bajo	0 – 2.2	0	0	0
Bajo	2.3 – 4.0	17.18	1718	75.7
Alto	4.1 – 36	5.52	552	24.3
Muy Alto	> 36	0	0	0
Total		22.7	2,270	100%

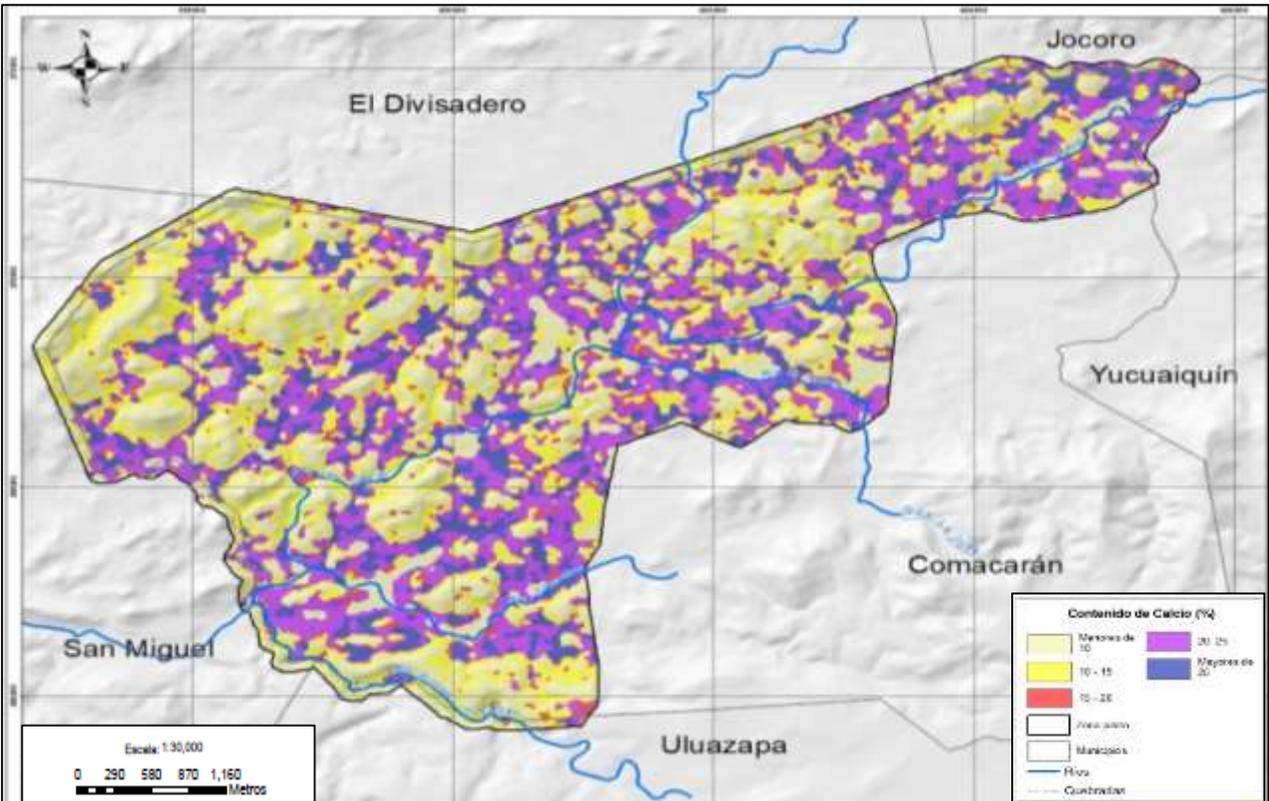


Figura 28. Contenido de Calcio.

4.3.17. Mapa de Magnesio (Mg).

El magnesio es el constituyente central de la clorofila, el pigmento verde de las hojas que funciona como un aceptador de la energía provista por el sol, suministros ideales de Mg a las plantas intensifica claramente la actividad fotosintética. (FAO, 2009)

En el cuadro 27, figura 29, se puede observar el grado de disponibilidad del Mg el cual se encuentra con niveles altos entre los 2.1-18 meq Mg/ 100 g de suelo, para el área total de 22.7 km² representando así un 100% de la zona de estudio, según el manual de métodos de análisis del CENTA de 1993, los niveles altos se deben al alto contenido de este mineral en las rocas. En la misma investigación realizada por Castillo 2012, encontró niveles de Mg entre los 4.10-3.63 meq Mg/100gr de suelo, lo cual indica niveles altos (2.1-18 meq Mg/100gr de suelo), teniendo así rangos similares para la zona de estudio en contenido de Mg (figura A-34)

Cuadro 27. Áreas de contenido de Magnesio.

Grado de disponibilidad	Mg (Meq Mg/ 100 g)	Área (km ²)	Área (Ha)	Porcentaje (%)
Muy Bajo	0 – 0.8	0.00	0.00	0
Bajo	0.9 – 2.0	0.00	0.00	0
Alto	2.1 – 18	22.70	2,270	100
Muy Alto	> 18	0.00	0.00	0
Total		22.70	2,270	100%

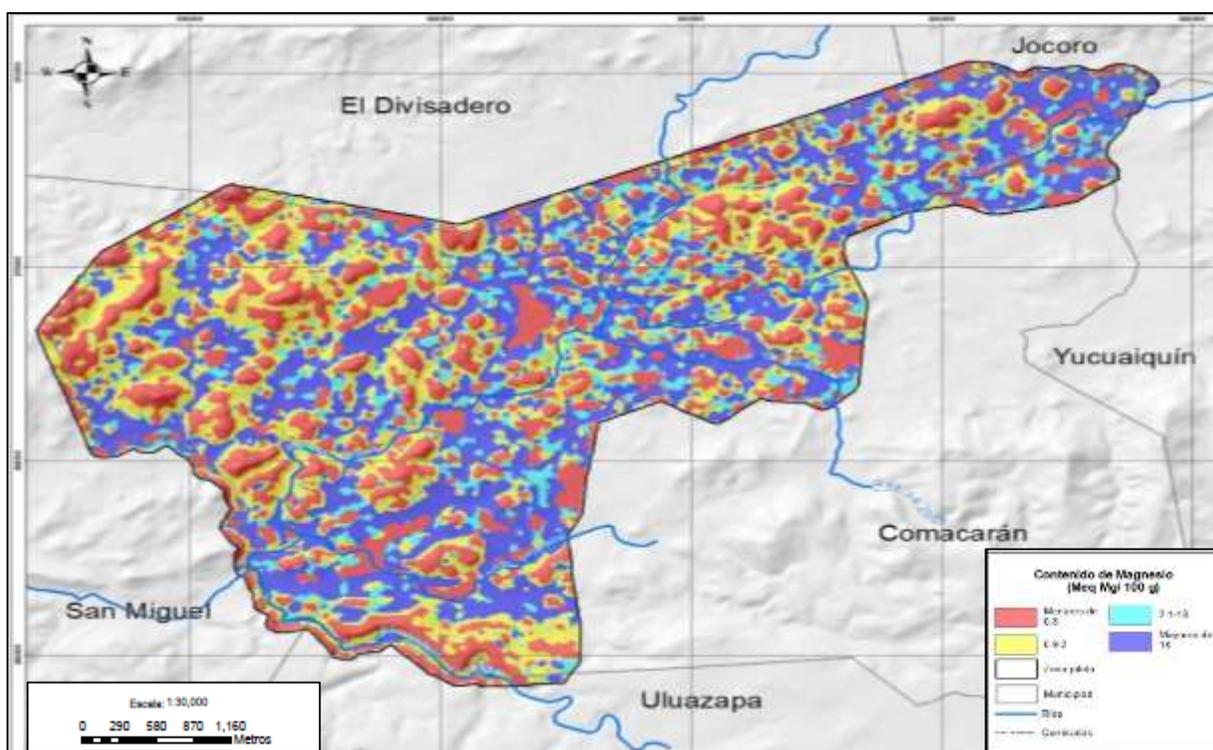


Figura 29. Contenido de magnesio

4.3.18. Mapa de Zinc (Zn).

El Zn activa las enzimas responsables de la síntesis de ciertas proteínas, es utilizado en la formación de clorofila y algunos carbohidratos y en la conversión de almidones en azúcares; su presencia en el tejido foliar ayudar a las plantas a resistir las bajas temperaturas (IPNI, s.f).

En el cuadro 28, figura 30, se pueden observar los niveles de Zn, el grado de disponibilidad tiene niveles muy bajos entre 0-0.4 ppm con un área de 6.20 km² lo que representa un 27.3% de la zona, mientras que valores entre los 0.5- 3.0 ppm con un área de 16.5 km² indican niveles bajo de disponibilidad de Zn representando un 72.7% de la zona de estudio, según el manual de métodos de análisis del CENTA de 1993, los suelos con bajos niveles de zinc presentan esta limitante debido a que los suelos son fuertemente lixiviados desde la parte superior hacia la inferior del terreno (figura A-35).

En el mismo estudio desarrollado por el CATIE en el 2010, expresan valores del Zn de 2.7 a 3.2 ppm considerados en el rango de baja presencia del Zn en el suelo, siendo resultados similares en cuanto a los valores obtenidos en esta investigación.

Cuadro 28. Áreas de Contenido de Zinc

Grado de disponibilidad	Zn (ppm)	Área (km ²)	Área (Ha)	Porcentaje (%)
Muy Bajo	0 – 0.4	6.20	620	27.3
Bajo	0.5 – 3.0	16.50	1,650	72.7
Alto	3.1 – 6	0.00	0.00	0
Muy Alto	6.1 - 36	0.00	0.00	0
Total		22.70	2,270	100%

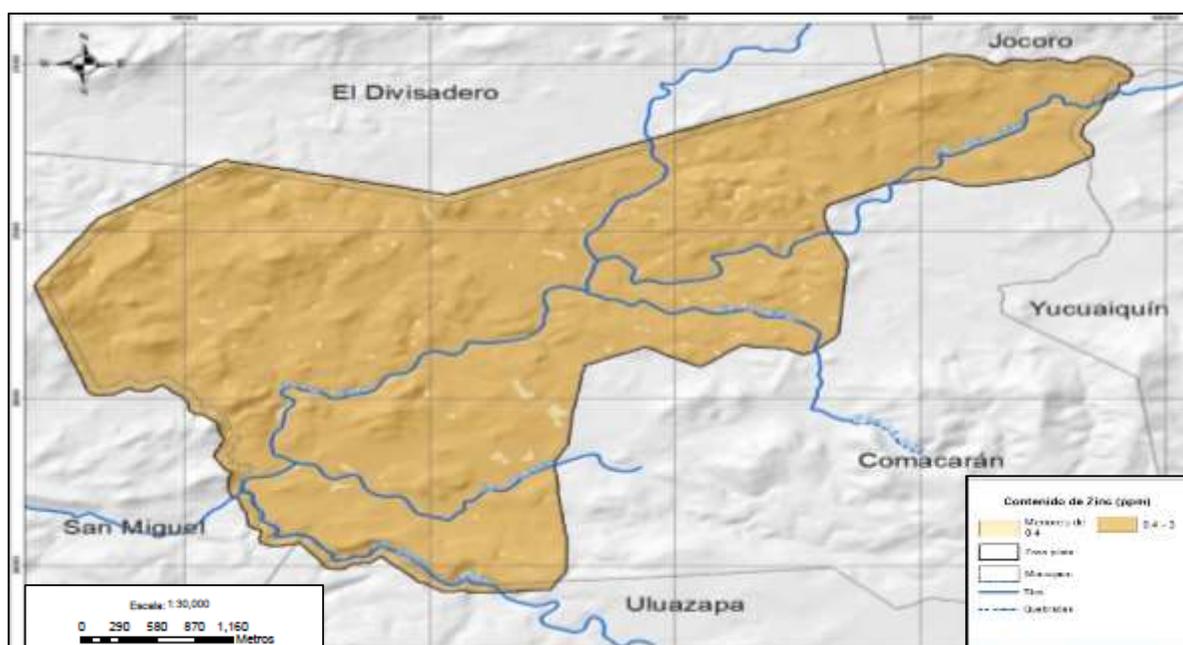


Figura 30. Contenido de zinc.

4.3.19. Mapa de Cobre (Cu).

El cobre en las plantas activa ciertas enzimas implicadas en la síntesis de lignina y es esencial para diversos sistemas enzimáticos. También es necesario en el proceso de la fotosíntesis, esencial para la respiración de las plantas (IPNI, sf).

En el cuadro 29, figura 31, Podemos observar el grado de disponibilidad del Cu se tienen niveles bajos entre los 0.2-1.0 ppm con un área de 18.05 km² que representan un 79.5% de la zona, los niveles bajos se deben al origen de las rocas que son pobres en contenido de Cu, mientras que se presentan niveles altos entre los 1.1-3.0 ppm con un área de 4.65 km² que representan un total del área de estudio del 20.5%, según el manual de métodos de análisis del CENTA de 1993 (figura A-36).

Según el estudio de CATIE, en el 2010. Reflejan valores sobre el Cu de 0.5 a 0.8 ppm considerando esos suelos con baja disponibilidad de este nutriente, presentando resultados similares obtenidos en los análisis químicos, reportados por el laboratorio de suelo del CENTA para esta investigación

Cuadro 29. Áreas de contenido de Cobre.

Grado de disponibilidad	Cu (ppm)	Área (km ²)	Área (Ha)	Porcentaje (%)
Muy Bajo	0 – 0.1	0.00	0.00	0
Bajo	0.2 – 1.0	18.05	1,805	79.5
Alto	1.1 – 3	4.65	465	20.5
Muy Alto	3.1 - 20	0.00	0.00	0
Total		22.70	2,270	100%

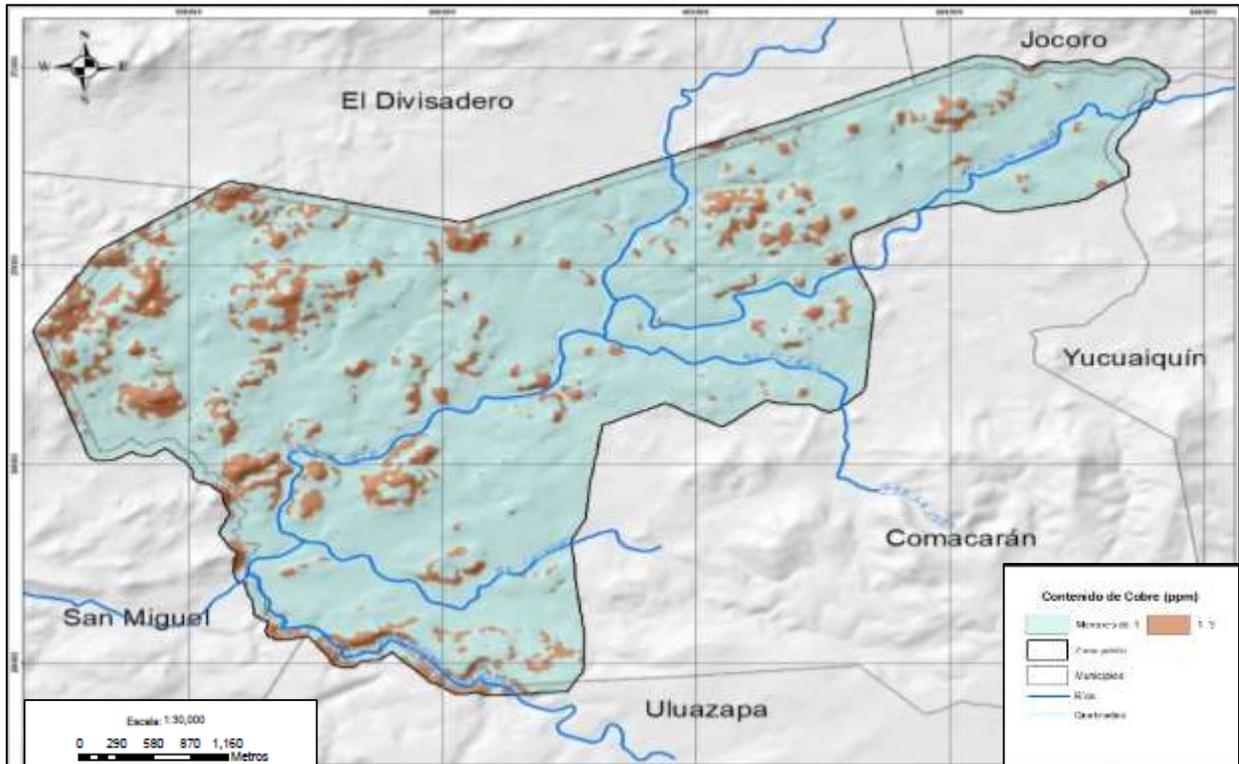


Figura 31. Contenido de Cobre.

4.3.20. Mapa de Hierro (Fe).

El hierro es un elemento que cataliza la formación de clorofila y actúa como un transportador de oxígeno. También ayuda a formar ciertos sistemas enzimáticos que actúan en los procesos de respiración (IPNI, s.f).

En el cuadro 30, figura 32, se observa el grado de disponibilidad del Fe, en la cual se presentan niveles bajos entre 2-10 ppm con un área de 17-91 km² que representan un 78.9% de la zona, los niveles bajos de Fe se deben a que los suelos no han alcanzado un desarrollo adecuado, mientras que niveles altos entre los 11-20 ppm tienen un área de 4.79 km² lo cual representa un 21.1% de la zona de estudio, según el manual de métodos de análisis del CENTA de 1993 (figura A-37).

Según el análisis de suelo realizado por el CATIE en el 2010, reportan valores de Fe entre 15.5 a 17.7 ppm, considerando estos suelos con alta disponibilidad de este elemento para las plantas.

Cuadro 30. Áreas de contenido de Hierro.

Grado de disponibilidad	Fe (ppm)	Área (km ²)	Área (Ha)	Porcentaje (%)
Muy Bajo	0 – 1	0.00	0.00	0
Bajo	2 – 10	17.91	1,791	78.9
Alto	11 – 20	4.79	479	21.1
Muy Alto	21 - 80	0.00	0.00	0
Total		22.70	2,270	100%

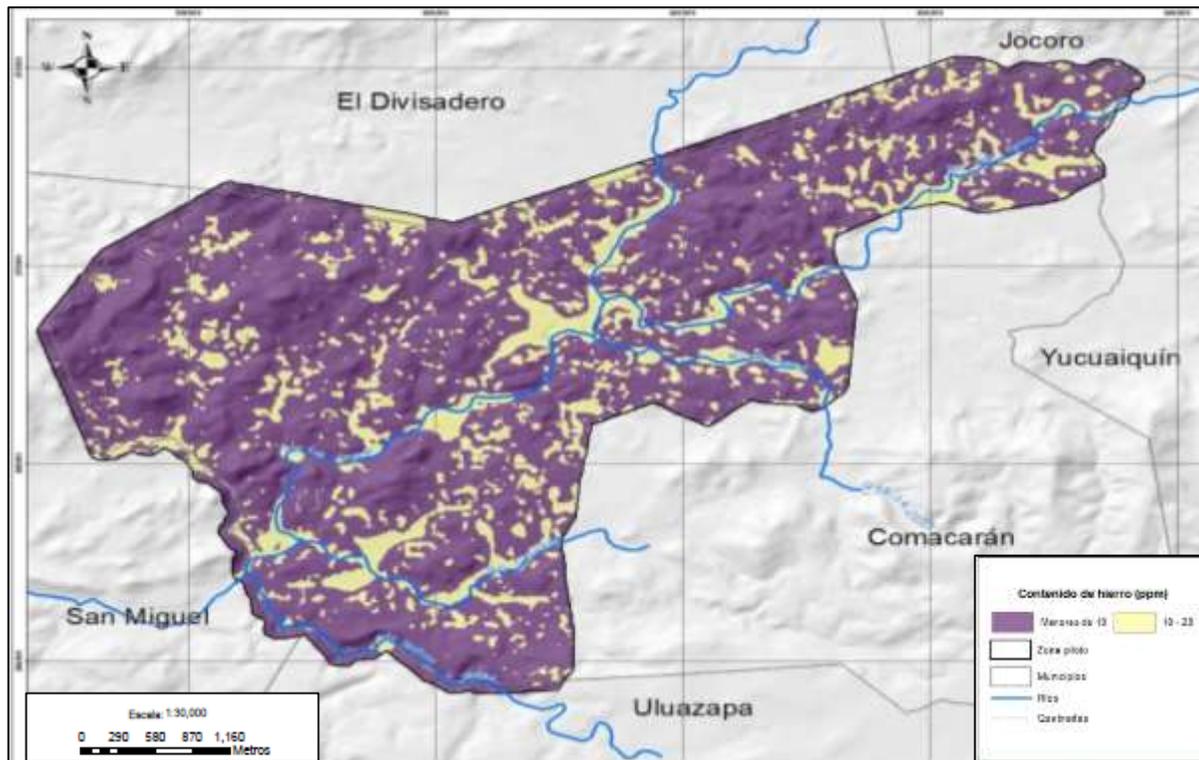


Figura 32. Contenido de Hierro.

4.3.21. Mapa de Manganeso (Mn).

El manganeso es uno de los elementos que más contribuyen al funcionamiento de varios procesos biológicos incluyendo la fotosíntesis, la respiración y la asimilación de nitrógeno.

También interviene en la germinación del polen, el crecimiento del tubo polínico, el alargamiento celular en la raíz y la resistencia a patógenos de la misma (IPNI, s.f).

En el cuadro 31, figura 33, se observa el grado de disponibilidad del Mn, en el cual se presenta niveles muy altos entre los 11-100 ppm con un área de 22.7 km² representando un 100% de la zona de estudio, esto se debe al origen de la roca madre que es abundante en Mn, según el manual de métodos de análisis del CENTA de 1993 (figura A-38).

Según el análisis de suelo realizado por el CATIE en el 2010, reportan valores de Mg entre 80 a 96.9 ppm considerando una alta presencia de este elemento en el suelo.

Cuadro 31. Áreas de contenido de Manganeseo.

Grado de disponibilidad	Mn (ppm)	Área (km ²)	Área (Ha)	Porcentaje (%)
Muy Bajo	0 – 0.7	0.00	0.00	0
Bajo	0.8 – 5.0	0.00	0.00	0
Alto	5.1 – 10	0.00	0.00	0
Muy Alto	11 - 100	22.70	2,270	100%
Total		22.70	2,270	100%

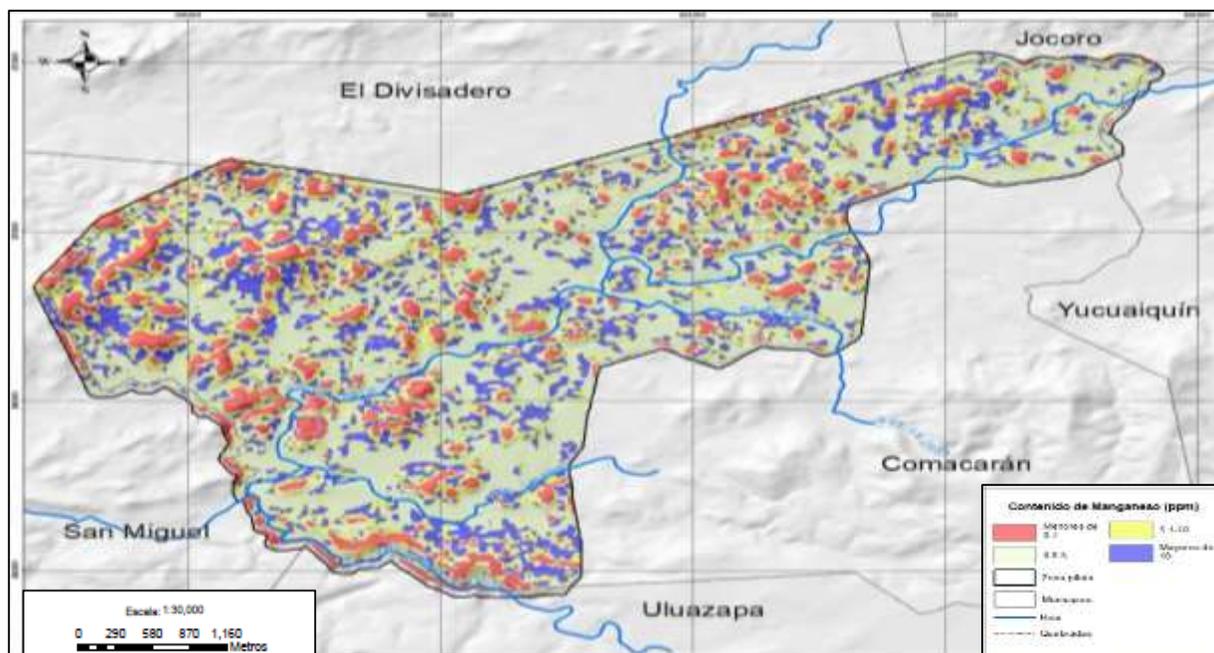


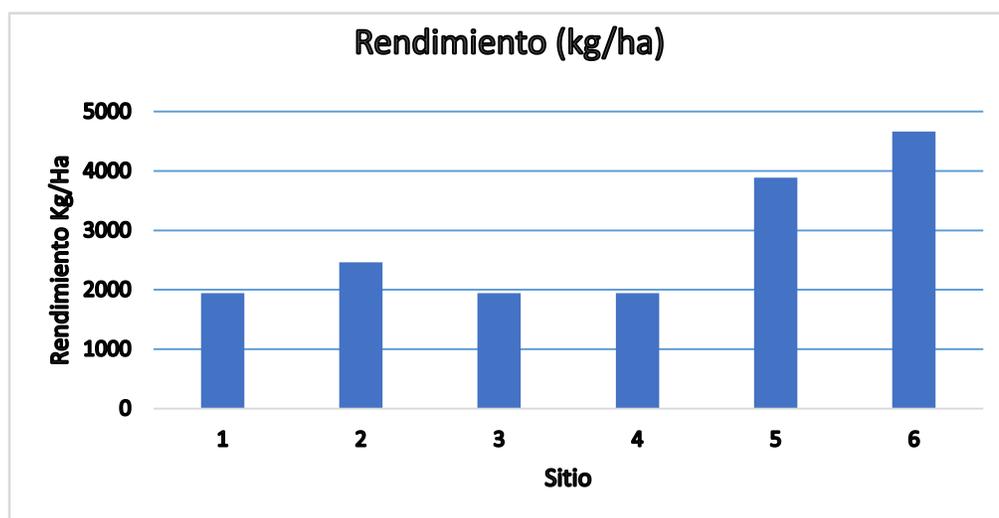
Figura 33. Contenido de manganeso.

El análisis químico elemental de los suelos es un instrumento necesario para su caracterización y para determinar el comportamiento en el largo plazo, además esta información es necesaria para estimar las condiciones de fertilidad de los mismos, se acostumbra a dividir los componentes inorgánicos de los suelos en dos grupos, el primero lo componen las sustancias denominadas minerales primarios y el otro grupo es el de los minerales secundarios, los cuales resultan de la descomposición de los minerales primarios o de la recombinación de los productos consecuencia de ella.

Por medio del mapeo digital del suelo se permite conocer el comportamiento de las propiedades químicas del suelo en relación a las diferentes unidades de suelo-paisaje, expresados en formato ráster como mapas continuos, sirviendo como base en la toma de decisiones de los expertos en las diferentes ramas de las ciencias agronómicas.

4.3.22. Rendimiento de productores.

En la figura 33, se observa el rendimiento en Kg/Ha de los productores de la zona de estudio, en el cual el caso 6 presenta una mayor producción con 4,664.72 Kg/ha mientras que los productores con menores rendimientos registran una cantidad de 1,943.63kg/ha.



En el cuadro 32, figura 34, se observa los rendimientos de maíz por kg/ha de la zona de estudio, los valores mayores se presentan en rangos de 1360-2013 kg/Ha con un área de 14.3 km² representando un 63.0% de la zona, mientras que valores menores de 1360 kg/Ha representan 0.0008 km² que representan el 0.003 % de la zona de estudio (figura A-39).

Cuadro 32. Áreas de rendimiento de cultivo de Maíz

Rendimiento (Kg/Ha)	Área (km ²)	Área (Ha)	Porcentaje (%)
Menores de 1,943	0.0008	0.08	0.003
1,943 - 2,213	14.3	1,330	63.0
2,213 - 2,666	2.0	200	8.80
2,666 - 3,265	6.4	640	28.20
Mayores de 4,000	0.026	2.6	0.11
Total	22.70	2,270	100%

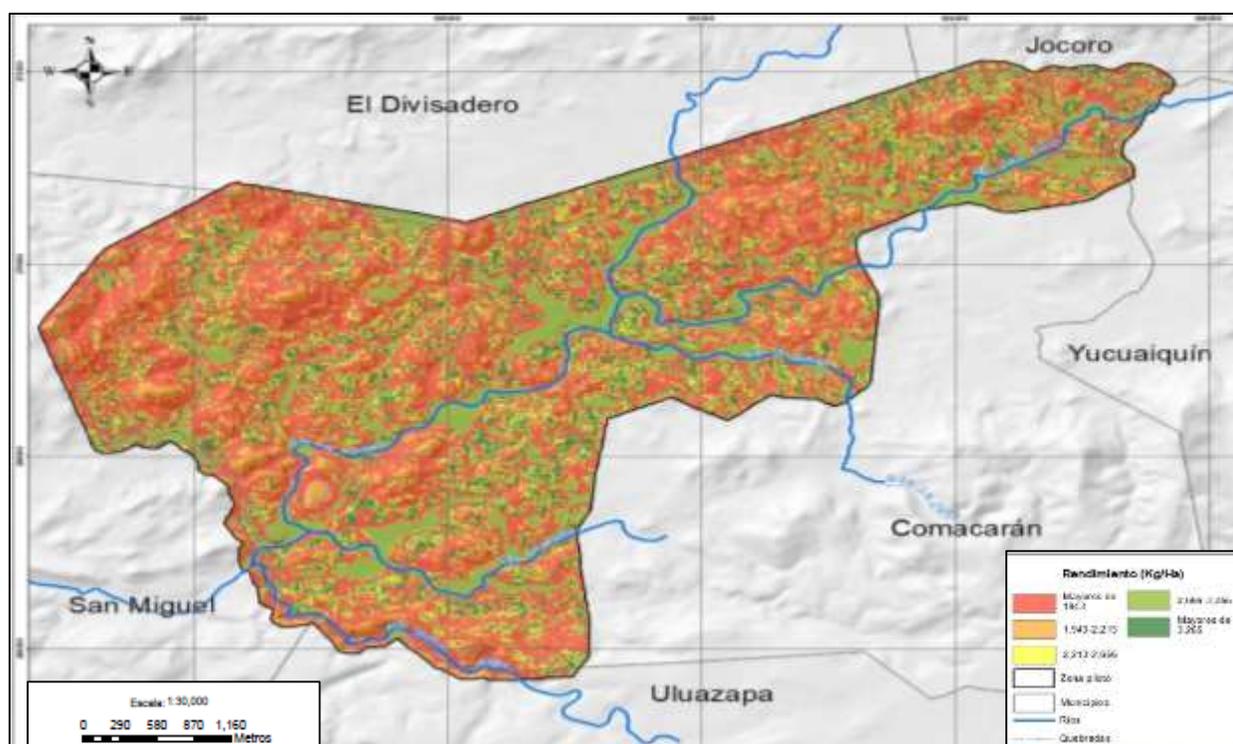


Figura 34. Rendimiento de los cantones El Platanarillo y El Colorado.

En la zona de estudio la variedad de maíz que cultivan los productores es el Híbrido H-59, otorgada por el gobierno por medio de los paquetes agrícolas, dicha variedad de Maíz según el CENTA, s.f, tiene un rendimiento promedio de 6,154.84 – 6,478.78 Kg/Ha (95 – 100 qq/mz) bajo condiciones edafoclimáticas favorables: buena fertilidad, textura franca, suelos bien drenado, profundos y con capacidad de retención de agua.

El rendimiento promedio en la finca de los productores en el área de estudio es de 1,943.43 – 4,664.72 Kg/ Ha (30 a 72 qq/mz) para el año 2015, en donde se produjo la sequía severa

afectando al desarrollo y rendimiento del cultivo de maíz en el departamento de San Miguel, Según datos estadísticos reportado por el MAG en el 2016. El rendimiento promedio del cultivo de maíz para el año 2,015 en el departamento de San Miguel es de 2,591.51 Kg/Ha (40 qq/mz).

Los principales factores asociados con los bajos rendimientos parecen ser a condiciones adversas tales como variaciones en la lluvia, tierra deficiente en nutrimentos, presencia de plagas y enfermedades, y la falta de conocimiento sobre la disponibilidad y el uso de tecnología moderna para reducir el impacto de estas condiciones. Por lo tanto, el pequeño productor de maíz tiende a pensar en el rendimiento como determinado por fuerzas mayores y a buscar el aumento en la producción a través del aumento del área en vez del de la producción por unidad de área (CIAT, 1975).

En la investigación realizada por Álvarez y Grigera en el 2004, determinaron que las variables de mayor impacto sobre el rendimiento del cultivo de Maíz son la precipitación seguida por la dosis adecuada de fertilización y el manejo agronómico.

Para el desarrollo de los cultivos no solo importa la fertilidad de los suelos si no también la humedad presente, la falta de agua es el factor más limitante en la producción de maíz en las zonas tropicales. Cuando hay estrés hídrico o sequía durante las primeras etapas de establecido el cultivo puede ocasionar pérdidas de plantas jóvenes, reduciendo así la densidad poblacional o estancar su crecimiento (CENTA, s.f).

Según el MARN, 2016 y Mendoza, 2015, para el año 2015 se reportaron 4 periodos de sequía bien definidos en la zona oriental, ocasionado pérdidas en los cultivos agrícolas: el primer periodo seco de la época lluviosa tuvo lugar del 14 de junio al 7 de julio del año 2015, alcanzando una sequía meteorológica de intensidad fuerte con 24 días secos consecutivos en el sur de la zona oriental.

Un segundo período seco ocurrió del 10 al 17 de julio, con ocho días seguidos sin llover, representó una sequía meteorológica débil, localizada en el extremo oriental del país y al sur de los departamentos de San Miguel, Usulután, San Vicente y La Paz (MARN, 2016).

El tercer período seco, del 20 de julio al 8 de agosto, se convirtió en sequía fuerte o severa, con 20 días consecutivos sin llover como máximo en la zona oriental y franja costera de la zona paracentral (MARN, 2016).

Un cuarto período seco alcanzó la categoría de sequía fuerte o severa. Inició el 11 de agosto y finalizó el día 29, es decir 19 días secos consecutivos como máximo en la zona oriental y parte costera de la zona paracentral (MARN, 2016).

Dicha sequía según datos oficiales de la cámara salvadoreña de pequeños y medianos productores agropecuarios, estimo una pérdida de 7.7 millones de quintales de maíz (García. 2015).

La falta de humedad en el suelo y las dosis inadecuadas de fertilización se ven reflejado de manera significativa en el rendimiento de maíz, por medio de este tipo de estudio se prevé mejorar las condiciones de fertilidad del suelo incorporando un manejo adecuado de los nutrientes requeridos en el suelo así mismo la adopción de prácticas para el manejo sostenible de los suelos, mejorando de manera significativa el rendimiento del maíz.

4.2.23. Mapa de Fertilidad.

Según Henríquez et al. En el 2013, el uso del mapa de fertilidad generado a partir de las variables químicas reportadas en el análisis de suelos ha sido catalogado muy útil en el diagnóstico y recomendación de fertilización y aplicaciones de enmiendas en Costa Rica. Ejemplo de ello es lo reportado por Bertsch et al. (2002), quienes lograron establecer un programa de manejo de la fertilización de acuerdo con las necesidades de cada sitio en fincas sembradas con café y caña de azúcar.

En el cuadro 33, figura 35, se puede observar el grado de fertilidad de los suelos de la zona de estudio para el cultivo de maíz, la zona que posee un área de 8.86 km² son tierras que poseen una alta fertilidad representando un 39.04%, con mayor disponibilidad de los nutrientes importantes para el desarrollo del cultivo de maíz, mientras que las zonas con baja fertilidad poseen un área de 6.77 km² que representa un 29.82% de zona de estudio (figura A-40).

Cuadro 33. Áreas de contenido de fertilidad.

Grado de fertilidad	Rango	Área (Km ²)	Área (Ha)	Porcentaje (%)
Baja	1	6.77	677	29.82
Media	2	7.07	707	31.14
Alto	3	8.86	886	39.04
Total		22.70	2,270	100 %

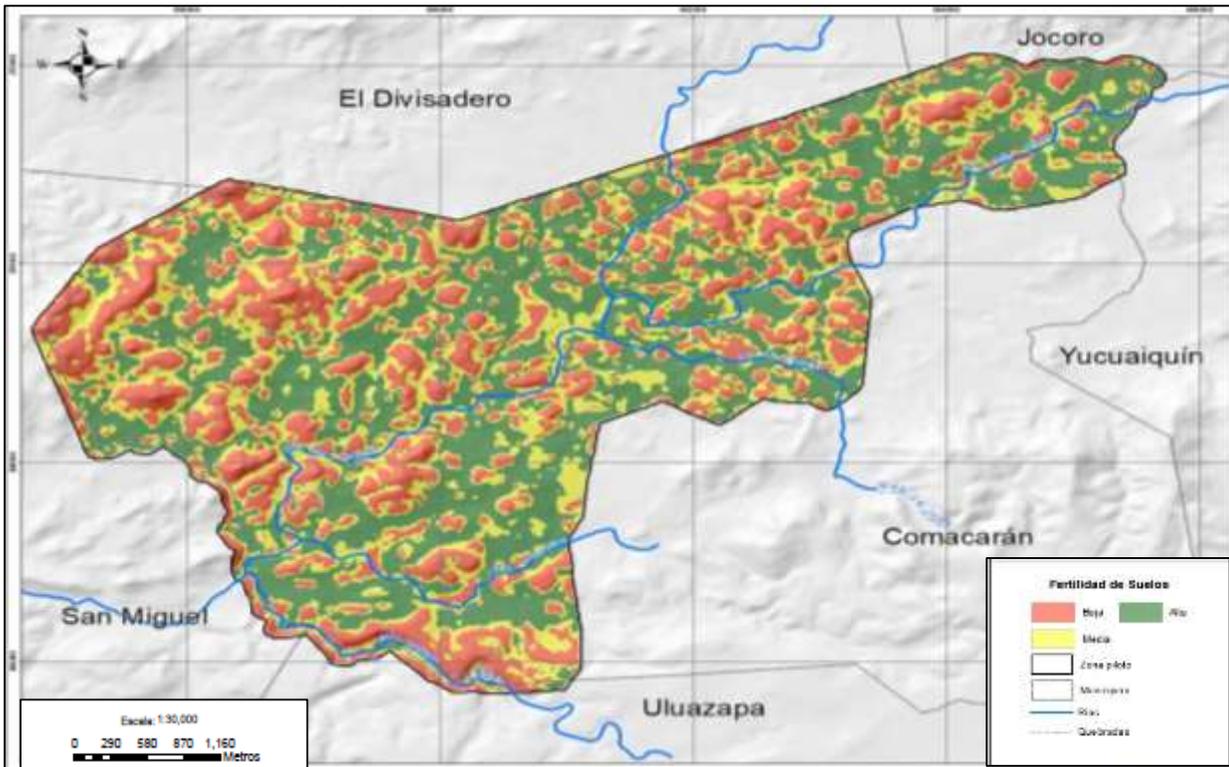


Figura 35. Contenido de fertilidad de los suelos de la zona de estudio.

En la zona de estudio se determinaron 3 clases de fertilidad, denominada como baja, media y alta fertilidad, con base en las propiedades químicas; P, Ca, Zn, Mg, pH, y los atributos de terreno resultantes del modelo de elevación digital.

La fertilidad de un suelo se define como su estado en relación a la capacidad que posee de suministrar elementos esenciales para el crecimiento de las plantas, sin presentar concentraciones tóxicas de ningún elemento, tanto las necesidades de elementos esenciales como la tolerancia a elementos tóxicos varían con el tipo de planta, por lo que el nivel de fertilidad no puede expresarse solamente en relación al suelo, sino que debe referirse también al cultivo, es decir, suelos aparentemente infértiles para un determinados cultivo pueden resultar muy productivos cuando se cultiva otro tipo de planta (Miner, 1995).

La productividad del suelo incluye además de la fertilidad, otros factores ambientales y de manejo. Todos los suelos productivos son fértiles para algunas plantas que se cultivan, pero muchos suelos fértiles son improductivos por falta de agua, aire, luz o porque presentan limitaciones en sus propiedades físicas, tales como compactación (Ifa, s.f).

La fertilidad del área de estudio denominada como alta, son los lugares con pendientes menores en donde se acumula los nutrientes de las zonas alta y medias, por escurrimiento superficial, el pH oscila entre 5.5 a 6 siendo ideal para el aprovechamiento de los nutrientes por parte de las plantas. En los lugares con baja fertilidad tienen pendiente muy pronunciadas, aunque la disponibilidad de macronutrientes sea alta tiene un pH muy fuertemente ácido imposibilitando la absorción de nutrimentos por parte de las plantas y la disponibilidad de los micronutrientes es muy baja.

Según Monterrosa en el 2016, el mapeo de la fertilidad del suelo es una herramienta de agricultura de precisión que permite comprender el comportamiento de las condiciones del suelo, sean estas químicas, físicas, biológicas o sintética, sirviendo como herramienta para diagnosticar la fertilidad y servir como guía en la implementación de recomendaciones de manejo y fertilización.

Al sobreponer el mapa de rendimiento de maíz sobre el de fertilidad de suelos, se determinó que los rendimientos mayores coinciden con una alta fertilidad y los rendimientos menores con una fertilidad baja, mediante el análisis visual que se realiza y aplicando el conocimiento experto, se puede recomendar un plan de manejo de fertilización adecuado según sea el caso de cada finca del productor.

4.4. Recomendaciones de manejo de fertilidad.

En base a los resultados de análisis de suelo y el requerimiento de la variedad de maíz H-59, se realizaron los siguientes cálculos para determinar las recomendaciones técnicas para el manejo de fertilización para cada finca.

4.4.1. Requerimiento de la variedad de maíz H-59.

Cuadro 34. Requerimiento nutricional del cultivo de maíz.

Fuente: CENTA, 2015.

Elemento	N	P	K
Kg/Ha	113	52	113

4.4.2 Análisis de fertilidad y recomendación por productor.

Para la selección de la fuente de fertilizante adecuada se determinó por medio del análisis de suelo realizado en campo y tomando en consideración los niveles críticos de los

elementos, siguiendo la metodología del CENTA, para la realizar las recomendaciones de fertilidad (cuadro A-5).

El lugar correcto significa ubicar los aportes de nutrientes estratégicamente, de manera que sean accesibles a la planta (cuadro A-6).

4.4.3. Manejo de la acidez.

Frente a los problemas de fertilidad que la acidez ocasiona en los suelos y en base a los resultados del análisis de laboratorio y los niveles críticos del pH (cuadro A-7) se generaron las recomendaciones para realizar correcciones en la acidez del suelo.

4.4.3.1. Sitio 1

Los suelos del productor presentan bajos niveles en fósforo, cobre, hierro y zinc, en base a los resultados se realizaron las siguientes recomendaciones de fertilización.

Recomendación de fertilización.

- Primera aplicación: a la siembra 213 Kilogramo de fertilizante granulado 18-46-0/Ha+ 12 Kilogramo de sulfato de Cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) /Ha + 100 Kilogramo de sulfato de Hierro ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) /Ha + 32 Kilogramo de sulfato de zinc ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) /Ha.
- Segunda aplicación: 30 días después de la siembra, 162 Kilogramo de Urea/ Ha

4.4.3.2. Sitio 2.

Estos suelos presentaron deficiencia de fósforo, potasio, hierro y Zinc, en base a los resultados se realizaron las siguientes recomendaciones de fertilización.

Recomendación de Fertilización.

- Primera aplicación: a la siembra 263 Kilogramos de fertilizante granulado 18-46-0/ Ha + 224 Kilogramo de fertilizante granulado 0-0-60/ Ha + 63 kilogramo de sulfato de Hierro ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) /Ha + 34 Kilogramo de sulfato de zinc ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) /Ha
- Segunda aplicación: 30 días después de la siembra, 143 Kilogramo de Urea/Ha + 223 Kilogramo del fertilizante granulado 0-0-60/ Ha.

4.4.3.3. Sitio 3

Estos suelos presentaron deficiencia de fósforo, hierro y Zinc, en base a los resultados se realizaron las siguientes recomendaciones de fertilización.

Recomendación de Fertilización.

- Primera aplicación: a la siembra 213 Kilogramo de fertilizante granulado 18-46-0/Ha + 58 Kilogramo de sulfato de Hierro ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) /Ha + 17 kilogramos de sulfato de zinc ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) /Ha
- Segunda aplicación: 30 días después de la siembra, 162 Kilogramo de Urea/Ha

4.4.3.4. Sitio 4

Estos suelos presentaron bajos niveles de fósforo, cobre, hierro y zinc además el nivel de pH es Fuertemente acido, en base a los resultados se realizaron las siguientes recomendaciones de fertilización.

Recomendación de Fertilización.

- Primera aplicación: a la siembra 150 Kilogramo de fertilizante granulado 18-46-0/Ha + 13 Kilogramo de sulfato de Cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) /Ha + 108 Kilogramo de sulfato de Hierro ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) /Ha + 36 Kilogramo de sulfato de zinc ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) /Ha
- Segunda aplicación: 30 días después de la siembra, 187 Kilogramo de Urea/Ha.

4.4.3.5. Sitio 5

Estos suelos presentaron deficiencia de fósforo, cobre y zinc, además de poseer un pH fuertemente acido, en base a los resultados se recomienda realizar el siguiente plan de fertilización.

Recomendación de Fertilización.

- Primera aplicación: a la siembra 150 Kilogramo del fertilizante granulado 18-46-0/Ha + 11 Kilogramo de sulfato de Cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) /Ha + 32 Kilogramo de sulfato de zinc ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) /Ha.
- Segunda aplicación: 30 días después de la siembra, 187 Kilogramo de Urea/Ha

4.4.3.6. Sitio 6.

Estos suelos no presentaron deficiencia de fósforo y potasio, pero se debe de realizar un aporte de nutrientes para reponer lo que el cultivo absorbe para su desarrollo, se presentaron deficiencias de elementos menores como cobre y zinc, además de tener un pH fuertemente ácido, en base a los resultados se realizaron las siguientes recomendaciones de fertilización.

Recomendación de Fertilización.

- Primera aplicación: a la siembra 137 Kilogramo del fertilizante granulado 18-46-0/Ha + 96 Kilogramo del fertilizante granulado 0-0-60/Ha + 13 Kilogramo de sulfato de Cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) /Ha + 33 Kilogramo de sulfato de zinc ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) /Ha
- Segunda aplicación: 30 días después de la siembra, 192 Kilogramo de Urea/Ha + 96 Kilogramo del fertilizante granulado 0-0-60/Ha.

Cuadro 35. Resumen de Manejo de Fertilización.

Plan de Fertilización						
Productor	D	Primera	Días	Segunda	Días	Encalado
Sitio 1	S	213 Kg/ha 18-46-0/Ha+ 12 Kilogramo de sulfato de Cobre (CuSO ₄ .5H ₂ O) /Ha + 100 kg/ha de sulfato de Hierro (FeSO ₄ .7H ₂ O) /Ha + 32 kg/ha de sulfato de zinc (ZnSO ₄ .7H ₂ O)	30 D/S	162 kg/ha de Urea	----	7 de qq CaMg(CO ₃) ₂ /mz
Sitio 2	S	263 kg/ha de 18-46-0+ 224 Kg/ha de fertilizante granulado 0-0-6 + 63 kg/ha de sulfato de Hierro (FeSO ₄ .7H ₂ O)+ 34 Kg/ha de sulfato de zinc (ZnSO ₄ .7H ₂ O)	30 D/S	143 kg/ha de Urea + 223 kg/ha de 0-0-60	----	7 de qq CaMg(CO ₃) ₂ /mz
Sitio 3	S	213 Kg/ha 18-46-0/Mz + 58 kg/ha de sulfato de Hierro (FeSO ₄ .7H ₂ O) + 17 kg/ha de sulfato de zinc (ZnSO ₄ .7H ₂ O)	30 D/S	162 kg/ha de Urea	----	8 de qq CaMg(CO ₃) ₂ /mz
Sitio 4	S	150 Kg/ha de 18-46-0 + 13 kg/ha de sulfato de Cobre (CuSO ₄ .5H ₂ O) + 108 kg/ha de sulfato de Hierro (FeSO ₄ .7H ₂ O) + 36 kg/ha de sulfato de zinc (ZnSO ₄ .7H ₂ O)	30 D/S	187 kg/ha de Urea	-----	11 de qq CaMg(CO ₃) ₂ /mz
Sitio 5	S	137 Kg/ha de 18-46-0 + 96 Kg/ha 0-0-60 + 13 Kg/ha de sulfato de cobre (CuSO ₄ .5H ₂ O) + 33 kg/ha de sulfato de zinc (ZnSO ₄ .7H ₂ O) /Ha	30 D/S	192 kg/ha de Urea + 96 kg/ha de 0-0-60	Un mes antes de fertilizar	16 qq /mz de CaMg(CO ₃) ₂
Sitio 6	S	150 Kg/ha de 18-46-0/Ha + 11 Kg/ha de sulfato de Cobre (CuSO ₄ .5H ₂ O) + 32 kg/ha (ZnSO ₄ .7H ₂ O).	30 D/S	187 kg/ha de Urea	Un mes antes de fertilizar	15 qq /mz de CaMg(CO ₃) ₂

4.5.3. Correcciones de acidez

Para el cálculo de encalado se tomaron en cuenta los valores de pH menores de 5.5 debido a que el maíz responde a la acidez del suelo con valores arriba de 5.5 absorbiendo un 95% del fertilizante aplicado (Argueta Portillo, 2015). Los cálculos de la dosis de encalado que se deben de aplicar para los sitios de estudio, se realizaron en base a la tabla de encalado de suelos de CENTA (cuadro 36).

Cuadro 36. Tabla de encalado para el control de acidez en el suelo.

Fuente: Argueta Portillo, 2015.

Unidades/pH	5	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9
Kg de CaCO₃/1000m²	255	238	221	205	188	171	154	137	120	60
lb de CaMg(CO₃)₂/mz	1,571	1,466	1,361	1,260	1,158	1,053	949	844	739	370
qq de CaMg(CO₃)₂/mz	16	15	14	13	12	11	9	8	7	4

En los resultados del análisis de suelo se encontraron valores de PH entre los 5 a 5.86 % para la zona de estudio. Datos procedentes del laboratorio de suelos, CENTA.

Nota: La textura considerada en estos cálculos es franco arenoso. Además, los cálculos fueron realizados tomando en cuenta varios parámetros entre ellos: el porcentaje de Ca contenido en CaCO₃ y CaMg(CO₃)₂ los cuales son 40 y 20% respectivamente. Así como las conversiones de las distintas unidades Kg a libras y de 1000m² a 7000m² (Una manzana).

EJEMPLO: Suelo con pH=5.0, PH ideal 6. Para pH 5.0 corresponde 255 kg de CaCO₃ /1000m², por lo tanto:

$$255 \text{ kg de CaCO}_3/1000\text{m}^2 \times 7 = \mathbf{1,785 \text{ kg de CaCO}_3/\text{mz}}$$

$$1,785 \text{ kg de CaCO}_3/\text{mz} \times 2.2 = \mathbf{3,927 \text{ lb}/\text{mz}}$$

$$3,927 \text{ lb}/\text{mz} \times 0.4 (\% \text{ Ca en CaCO}_3) = \mathbf{1,570.80 \text{ lb de Ca}/\text{mz}}$$

$$1,570.80 \text{ lb de Ca}/\text{mz} \div 0.20 (\% \text{ Ca en CaMg(CO}_3)_2) = \mathbf{7,854 \text{ lb de CaMg(CO}_3)_2}$$

$$7,854 \text{ lb de CaMg(CO}_3)_2 \div 5 (\text{Factor de aplicación por planta}) = \mathbf{1,570.8 \text{ lb}/\text{mz} = 16 \text{ qq}/\text{mz}}$$

5. CONCLUSIONES

- Con el estudio de mapeo digital de suelos y las herramientas SIG utilizadas se logró clasificar los suelos en base a la topografía local y al paisaje las cuales demostraron ser eficaces de acuerdo a diferentes criterios y enfoques de la metodología utilizada, con esto se logró generar un mapa de clases genéricas el cual permitió elaborar mapas de propiedades físicas y químicas y que fue validado por los especialistas en materia de suelos y SIG.
- Los productores de granos básicos de El Platanarillo y El Colorado según los análisis de suelo mostraron baja fertilidad natural en las partes altas presentando deficiencias en fósforo, zinc, cobre y Hierro, además en las partes bajas presentaron una mejor fertilidad, esto debido a los efectos de la topografía y desarrollo del suelo (suelos jóvenes), poca lluvia y el material parental el cual es pobre en minerales y eso se refleja en los rendimientos.
- La cartografía base permitió describir las condiciones de la zona de estudio en las que en las partes altas se tenían un 45% de pendiente, una menor acumulación de humedad debido a que eran zonas de valle o cerro lo que permite el lavado de nutrientes y genera una mayor erosión; en las partes bajas se encontraban pendientes menores al 15% además de zonas de mayor acumulación de humedad debido a que son zonas planas que se encuentran en los fondos de valle por lo que se tenía una mejor fertilidad y por eso se presentaban mejores rendimientos para los productores.
- La planificación del muestreo de suelo basado en la metodología del Hipercubo Latino Condicional tiene ventaja sobre otros métodos de muestreo ya que permite establecer un menor número de muestras en campo esto debido a la agrupación que realiza de las variables en estudio.
- En base al mapa de rendimiento generado para la investigación se realizó la validación del mapa de fertilidad, como un resultado viable de la interacción entre los procesos físico-químicos en el suelo, el cual permite diferenciar las zonas de mayor fertilidad que corresponde a un 39.04% y las zonas de menor fertilidad en un 29.82%, del área total de estudio.
- Mediante el uso de datos producto de los análisis de suelos realizado en la zona de estudio, se formuló un plan de manejo de fertilidad basado en los niveles críticos de los nutrientes, requerimientos nutricionales del cultivo de maíz, dicho plan está sustentado en formula 18-46-0, sulfato de zinc, sulfato de Hierro y Sulfato de Cobre.

6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda implementar medidas alternativas a las tradicionales para lograr mejores rendimientos del cultivo de maíz, como la utilización de rastrojos para el aporte de nutrientes al suelo, abonos foliares, obras de conservación y aplicación de fertilizantes en base al análisis de suelo.
- Es necesario implementar herramientas que ayuden a mejorar las técnicas de conservación de suelos tradicionales como por ejemplo los mapas de propiedades de suelo, metodologías para la determinación de puntos de muestreo en campo.
- Es indispensable contar con información actualizada sobre la topografía del terreno, además de datos secundarios como análisis químicos y físicos del suelo para la generación de información de cartografía temática y así obtener productos de buena calidad en el mapeo digital de suelos.
- Es recomendable trabajar la información SIG dentro de una estructura de archivos organizada, de fácil acceso y que garantice el trabajo colectivo con facilidad al mismo tiempo que se permita la integración de datos de campo.
- Es necesario implementar programas de capacitación para la adopción de nuevas metodologías por parte de los productores sobre el manejo de la fertilidad de los suelos mediante herramientas innovadoras.
- El uso de mapas digitales de suelos es necesario para el desarrollo de recomendaciones del uso del suelo y manejo de la fertilidad en la zona de estudio, además es necesario que este tipo de estudios se extiendan a zonas donde se presentan condiciones similares.
- Es necesario aplicar otro tipo de recomendaciones del manejo de la fertilidad del suelo cuando los productores sean arrendatarios de tierra y que le evite tener costos más altos usando alternativas como la aplicación de foliares cuando los micronutrientes presentan deficiencias, manejo de cobertura del suelo para guardar humedad y obras de conservación para evitar la pérdida de suelo y nutrientes por erosión.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. **ALAC (Atlas de suelos de América Latina y el Caribe, CO). 2014.** La Cartografía digital de los suelos. Bogotá, CO. 115 p.
2. **Andrades R; Martínez A. 2010.** Manejo de la Fertilidad de los suelos. Colombia. CL. 3 p.
3. **Álvarez, R; Grigera, S. 2004.** Factores de Fertilidad y Manejo Determinantes de los Rendimientos de Trigo y Maíz en la Pampa Ondulada. Universidad de Buenos Aires, AR. p 5.
4. **Angelini, M. 2012.** Mapeo digital de suelos. ARG. 2p.
5. **Ansonera, M. s.f.** Fertilidad del suelo y complejo de cambio. Departamento de Agricultura y Espacios Naturales. Gipuzkoa. España. Es 1-6 p
6. **Argueta Portillo, Q. 2015.** Microcuenca EL Tamarindo (entrevista). San Salvador, SV. Catholic Relief Services.
7. **Ayaviri, A. 1996.** Clasificación de suelos por el sistema por fertilidad y capacidad, en los módulos agroforestales implementados en el trópico de Cochabamba. Cochabamba, BL. 3 p.
8. **Badía, D; Palacio, J; Andrés, R; Martí, C; Cuchí, J, A. 2010.** Cronosecuencia edáfica en terrazas del río Alcanadre. Universidad de Granada, ES. p. 773-783.
9. **Badía, D; Martí, C; Poch, R.M. 2011.** A soil toposequence characterization in the irrigable land-protected area contact zone of El Basal, Madrid, ES. 18 p.
10. **Badía, D; Martí, C; Aznar, J.M; León, F, J. 2013.** Influence of slope and parent rock on soil genesis and classification in semiarid mountainous environments. Geoderma ES. p 13-21.
11. **Bayon, C; Ditschar, B. 2012.** El magnesio, un macroelemento a redescubrir para su aplicación en cereales. 1-3 p.
12. **Bertsch, F. 1998.** La fertilidad de los suelos y su manejo: Asociación Costarricense de la Ciencia del suelo. San José, CR. p. 43- 58.
13. **Bornemiza, E. 1998.** Química del suelo con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de cooperación Para la Agricultura. San José. Costa Rica. CR. 187-197
14. **Calderón Puig, A; Lara Franquiz, D; Cabrera Rodríguez, A. 2012.** Confección de mapas temáticos para evaluar la fertilidad del suelo en las áreas agrícolas del instituto nacional de ciencias agrícolas. La Habana, CU. Volumen 33, número 1. 7p.

15. **CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 2010.**
Fertilidad de los suelos agrícolas. San Salvador, El Salvador, SV. 23 p.
16. **Castellanos, Z. J. sf.** La capacidad de intercambio catiónico del suelo. MX. 3 p.
17. **Castillo, P. 2012.** Fertilidad de los suelos agrícolas. San Juan Opico, La libertad, El Salvador, SV. p 10-20.
18. **CENTA (Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal, SV). 1993.**
Manual de métodos de análisis de CENTA. San Salvador, El Salvador, SV. 12 p.
19. **CENTA (Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal, SV). 2013.**
Guía Técnica el cultivo del maíz. San Salvador, El Salvador, SV. 8 p.
20. **CENTA (Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal, SV). s.f.** Guía técnica: el cultivo de Maíz. San Salvador, El Salvador, SV. 15 p.
21. **CIAT (Centro Interamericano de Administraciones Tributarias). 1975.**
Descripción de factores asociados con bajos rendimientos de maíz en finca pequeñas de tres departamentos de Colombia. Cali, CO. p 4
22. **Chirino, AV; Brito, J; Rojas, I. 2005.** Características de fertilidad de algunos suelos venezolanos a través de los resúmenes de análisis rutinarios. Caracas, VE. 25 p.
23. **Duarte, M; Henrique Silva, SG; Owens, P; Curill, N. 2013.** Digital soil mapping approach based on fuzzy logic and field expert knowledge. Ciênc. agrotec., Lavras, v. 37.BR. 12 p.
24. **FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) 1998.** Manejo de la fertilidad del suelo en zona de laderas. San Salvador. El Salvador. SV. p 65-78.
25. **FAO, (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) 2009.** Manual de prácticas integradas de manejo y conservación del suelo. Instituto Internacional de Agricultura Tropical (IITA). NG. p 40-50.
26. **Ferraris G, N. 2006.** Muestreo y Análisis de Suelo: Punto de Partida hacia un Diagnóstico de Fertilidad. Lima, PE. Consultado 14 mar. 2016. Disponible en: <http://www.elsitioagricola.com/articulos/ferraris/Muestreo>.
27. **Forsythe W. 2000.** Física de suelos. Instituto Interamericano de Cooperación para la agricultura. San José. Costa Rica. CR. p 77-79.
28. **Gallant, J.C; Dowling, T.I. 2003.** A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. Water Resources Research p. 39
29. **García A, M. 2005.** Análisis Químicos de suelo (en línea). Consultado 14 mar. 2016. Disponible en: <http://www.ciad.mx/boletin/mayjun02/suelos.pdf>

30. **García, P. 2015.** El Salvador pierde un 25% de la cosecha de Maíz por sequía la Prensa Gráfica. San salvador, El Salvador. 16 Jul.: 1
31. **García, E; Flego, F. s.f.** Tecnología agropecuaria: Agricultura de precisión. Universidad de Palermo, IT. p 10-14.
32. **Garman, W. 1982.** Manual de fertilizantes. Balderas. Distrito Federal, MX. p 103-106.
33. **Gomes, J. 2008.** El modelo de Montecarlo. Madrid, ES. 3p.
34. **Gutierrez, J; Jegat, H. 2005.** Uso de la teoría de lógica difusa en la clasificación de imágenes satelitales. Merida, VEN. p 3.
35. **Henríquez, C; Méndez J, C; Masis, R. 2013.** Interpolación de variables de fertilidad de suelo mediante el análisis kriging y su validación. San José, CR. p 8
36. **Hernández, D. 2,013.** Desarrollo, implementación y prueba de un algoritmo de reconstrucción de objetos a partir de una representación axonometría, utilizando técnicas de optimización. Universidad Politécnica de Valencia. ES 37 p.
37. **Ifa (asociación internacional de la industria de los Fertilizantes). s.f.** Los fertilizantes y su uso. Mx. p 12.
38. **IPNI (International Plant Nutrition Institute), 2012.** Manejo de los nutrientes del suelo. USA p. 24-36.
39. **IPNI (International Plant Nutrition Institute), sf.** Micronutrientes de los suelos agrícolas. Estados Unidos de America, USA p. 24-36.
40. **Jaramillo, D. 2002.** Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Cl. 19 p.
41. **Jeness, J. 2006.** Topographic Position Index. Houston EU. 9 p.
42. **Jiménez, C; Lizana, O. s.f.** Propiedades físicas del suelo que condicionan el desarrollo de cultivos en la región de O'Higgins. 2-12 p.
43. **Junior, C; Chagas, W; Alexandre, M; Pinheiro, K. 2013.** Método Do Hipercubo Latino Condicionado a Amostragen de Solos na Presencia de Covariaveis Ambientais Visando o Mapeamento Digital de Solos. Embrapa Solos. Rio de Janeiro, Brasil. Br. 1-12 p.
44. **Kang-tsung, C. 2004.** Introduction to Geographic Information Systems, New York, EU. p 60
45. **Kirkby, E; Volker, R. s.f.** Micronutrientes en la fisiología de las plantas, funciones, absorción y movilidad. Universidad de Leeds. Reino Unido. RU. 11-12 p

46. **MAG (Ministerios de Agricultura y Ganadería, SV). 2013.** Censos agropecuarios 2013. San Salvador, SV. 15 p.
47. **MAG (Ministerios de Agricultura y Ganadería, SV). 2016.** Informe anual sobre costos de producción de cultivos agrícolas 2015. San Salvador, SV. 5 p.
48. **Mantovani Coelho, A; Vargas Resende, A. s.f.** Manual de agricultura de precisión: Muestreo para el mapeo y manejo de la fertilidad del suelo. Santa Lucia, AR. 12 p.
49. **MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2015.** Boletín Climatológico Mensual Anual 2015. 16 p.
50. **MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2016.** Cuatro años continuos de sequía en El Salvador: 2012 -2015. Santa Tecla, SV, p 10.
51. **Mata Chinchilla. 2012.** Mapeo digital de suelos. Brasil. Br. 43 p.
52. **Melgar, R; Torres, M. s.f.** Manejo de la fertilización en Maiz. Proyecto fertilizar EEA INTA Pergamino. 12 p.
53. **Mendoza, B. 2015.** MARN confirma sequia severa en zona oriental. La Prensa Gráfica. San salvador, El Salvador. 7 jul.:1
54. **Merino, G. 1998.** Seguridad alimentaria del Salvador. Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, SV. p 25-30.
55. **Minasny, B; McBratney, A. 2006.** A conditioned latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. Faculty of agricultura, the University of Sidney, AUS. p 3.
56. **Miner, JA. 1995.** El suelo en la agricultura y el medio ambiente: fertilidad del suelo, acidez y complejo de cambio. 10 p.
57. **Monterrosa, R. 2016.** Plan de manejo de precisión PMP. Quito,ECU. p 6.
58. **Morcillo, C. 2009.** Introducción practica de lógica difusa. Madrid. ES. p 4.
59. **Núñez, J; Barón, J. 1999.** Técnicas estadísticas avanzadas en el análisis de grandes modelos computacionales. Facultad de ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, AR. p 3.
60. **Ortega Batres, R; Flores Mejía, L. 2005.** Agricultura de precisión: introducción al manejo sitio específico. Chillán, CL. p 8.
61. **Orellana J, A. 2005.** Muestreo y análisis de suelo: Boletín Tecnico17 (en línea). San Andrés, SV. consultado 15 mar. 2016. Disponible en http://www.centa.gob.sv/uploads/documentos/Suelos_Boletin.pdf

- 62. Ortega Blu, R. 2012.** Cartografía digital de suelos en Chile: primer taller latinoamericano globalsoipmap.net. Universidad técnica Federico Santa María. CL. p 44.
- 63. Pineda, E; Vallecampo, M. 2009.** Sistematización y validación de documentos básicos en el manejo y conservación de suelos y agua en zonas de ladera. Universidad de El Salvador. San Salvador. SV. 2 p.
- 64. PPI (Potash y phosphate institute, MX). 1997.** Manual Internacional de Fertilidad de Suelos. Querétaro, MX. 9 p.
- 65. PRISMA (Programa Salvadoreño de Investigación sobre Desarrollo y Medio Ambiente). 2015.** Mapeo digital de suelos. Mancomunidad La Montañona. El Salvador. SV. 4 p.
- 66. Romano, N; Chirico. 2004.** The role of terrain analysis in using and developing pedotransfer functions: Development of pedotransfer Functions in Soil Hydrology. IT. 131 p.
- 67. Rosas, V. C; Arribillaga, D. G. sf.** Potencial productivo en base a la profundidad de los suelos del Valle de Chile Chico. CH. 2 p.
- 68. Rossiter, D. G; Rodríguez, M. F. 2000.** Construction of Digital Elevation Models for Land Evaluation Venesuelos. VN. 37 p.
- 69. Schlatter, J. 2008.** Fertilidad del suelo y el desarrollo de *Pinus radiata*. Facultad de ciencias forestales. Universidad austral de Chile. CL. p 8-10
- 70. Tompson, M; Troeh, R. 2,002.** Los suelos y su fertilidad. Barcelona. ES. 20-25 p
- 71. Torres, G. 2006.** Programa Nacional de Frutas de El Salvador MAGFRUTAL-ES, Santa Tecla, SV. p 5-15.
- 72. USAID (United States Agency for International Development, US). s.f.** Programa de USAID para la Promoción de Oportunidades Económicas: Boletín No. 1 y 2 Generalidades del suelo. San Salvador, SV. 33 p.
- 73. Vega, J. A. sf.** Acidez del suelo. Ministerio de Agricultura de Costa Rica. CR. 4 p.
- 74. Villareal Núñez J, E; Tuñon, B; García Espino R, A. 2010.** Monitoreo de la fertilidad de los suelos por medio de análisis de laboratorio. PA. p 60.
- 75. Wallace, A. 1993.** La ley del mínimo de Leibig. Argentina. ARG. 1-2 p.
- 76. Zhu, X; Hudson, B; Burt, J; Lubich, K. 1997.** Soil Mapping Using GIS, Expert knowledge and fuzzy logic. United States of America, USA. 12 p.

8. ANEXOS

A- 1. Calculo para determinar dosis de fertilización caso 1.

Los suelos del productor presentan bajos niveles en fósforo, cobre, hierro y zinc, en base a los resultados se realizaron las siguientes recomendaciones de fertilización.

Cálculos de P

$$APS = (AL - NC) Dap * Pr * FC$$

$$APS = (5 ppm - 13 ppm) 1.25 \frac{gr}{cc} * 0.20m * 22.90 = -45.80 \text{ Kg } P_2O_5/Ha + 52 \text{ Kg } P_2O_5/Ha$$

$$APS = 97.8 \equiv 98 \text{ Kg } P_2O_5/Ha$$

Se recomienda utilizar el fertilizante granulado 18 – 46- 0.

$$\text{Cantidad de P} = \frac{APS}{\text{Cantidad de P del fertilizante a utilizar}}$$

$$\text{Cantidad de P} = \frac{98 \text{ Kg/Ha}}{0.46} = \mathbf{213 \text{ Kg de P/ Ha}}$$

- **Cálculos de Cobre**

$$ACuS = (RA - AL) 2$$

$$ACuS = (2.05 - 0.59) 2 = 2.9 \equiv 3 \text{ Kg Zn/Ha}$$

$$\text{Cantidad de Cu} = \frac{APCu}{\text{Cantidad de Cu del fertilizante}} = \frac{3 \text{ Kg zn /Ha}}{0.25} = \mathbf{12 \text{ Kg de } CuSO_4 \cdot 5H_2O/ Ha}$$

- **Cálculos de Hierro**

$$AFeS = (RA - AL) 2$$

$$AFeS = (15.5 - 6.17) 2 = 18.66 \equiv 19 \text{ Kg Fe/Ha}$$

$$\text{Cantidad de Fe} = \frac{APFe}{\text{Cantidad de Fe del fertilizante}} = \frac{19 \text{ Kg zn /Ha}}{0.19} = \mathbf{100 \text{ Kg de } FeSO_4 \cdot 7H_2O /Ha}$$

- **Cálculos de zinc**

$$AZnS = (RA - AL) 2$$

$$AZnS = (4.55 - 0.85) 2 = 7.4 \text{ kg Zn/Ha}$$

$$\text{Cantidad de Zn} = \frac{APZn}{\text{Cantidad de Zn del fertilizante}} = \frac{7.4 \text{ Kg zn / Ha}}{0.23} = \mathbf{32 \text{ Kg de ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O / Ha}}$$

- **Calculo de N**

$$\text{Cantidad de N} = \frac{\text{Requerimiento de N del cultivo} - \text{Cantidad de N aplicado en fertilizante granulado}}{\text{Cantidad de N del fertilizante a utilizar}}$$

$$\text{Cantidad de N} = \frac{113 \text{ Kg/Ha} - (213 \frac{\text{Kg}}{\text{Ha}} * 0.18)}{0.46} = \frac{113 \frac{\text{Kg}}{\text{Ha}} - 38.34 \frac{\text{Kg}}{\text{Ha}}}{0.46} = 162.08 \equiv \mathbf{162 \text{ Kg de Urea/Ha}}$$

A- 2. Calculo para determinar dosis de fertilización caso 2.

Estos suelos presentaron deficiencia de fósforo, potasio, hierro y Zinc, en base a los resultados se realizaron las siguientes recomendaciones de fertilización.

Cálculos de P

$$APS = (AL - NC) Dap * Pr * FC$$

$$APS = (1 \text{ ppm} - 13 \text{ ppm}) 1.25 \frac{\text{gr}}{\text{cc}} * 0.20\text{m} * 22.90 = -68.70 \text{ Kg P}_2\text{O}_5/\text{Ha} + 52 \text{ Kg P}_2\text{O}_5/\text{Ha}$$

$$APS = 120.7 \equiv \mathbf{121 \text{ Kg P}_2\text{O}_5/\text{Ha}}$$

Se recomienda utilizar el fertilizante granulado 18 – 46- 0.

$$\text{Cantidad de P} = \frac{APS}{\text{Cantidad de P del fertilizante a utilizar}}$$

$$\text{Cantidad de P} = \frac{121 \text{ Kg/Ha}}{0.46} = \mathbf{263 \text{ Kg de P/ Ha}}$$

- **Cálculos de K**

$$AKS = (AL - NC) Dap * Pr * FC$$

$$AKS = (8.42 \text{ ppm} - 60 \text{ ppm}) 1.25 \frac{\text{gr}}{\text{cc}} * 0.20\text{m} * 12.04 = -155 \text{ Kg K}_2\text{O /Ha} + 113 \text{ Kg K}_2\text{O /Ha}$$

$$AKS = \mathbf{268 \text{ Kg K}_2\text{O /Ha}}$$

Se recomienda utilizar el fertilizante granulado 0– 0- 60

$$\text{Cantidad de K} = \frac{APK}{\text{Cantidad de K del fertilizante a utilizar}}$$

$$\text{Cantidad de K} = \frac{268 \text{ Kg/Ha}}{0.60} = \mathbf{447 \text{ Kg de K/ Ha}}$$

Nota: se dividirá en 2 aplicaciones.

- Cálculos de Hierro

$$AFeS = (RA - AL) \cdot 2$$

$$AFeS = (15.5 - 9.34) \cdot 2 = \mathbf{12 \text{ Kg Fe/Ha}}$$

$$\text{Cantidad de Zn} = \frac{APFe}{\text{Cantidad de Fe del fertilizante}} = \frac{12 \text{ Kg zn /Ha}}{0.19} = \mathbf{63 \text{ Kg de FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O /Ha}}$$

- Cálculos de zinc

$$AZnS = (RA - AL) \cdot 2$$

$$AZnS = (4.55 - 0.65) \cdot 2 = \mathbf{7.8 \text{ Kg Zn/Ha}}$$

$$\text{Cantidad de Zn} = \frac{APZn}{\text{Cantidad de Zn del fertilizante}} = \frac{7.8 \text{ Kg zn /Ha}}{0.23} = 33.91 \approx \mathbf{34 \text{ Kg de ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O/Ha}}$$

- Calculo de N

$$\text{Cantidad de N} = \frac{\text{Requerimiento de N del cultivo} - \text{Cantidad de N aplicado en fertilizante granulado}}{\text{Cantidad de N del fertilizante a utilizar}}$$

$$\text{Cantidad de N} = \frac{113 \text{ Kg/Ha} - (263 \frac{\text{Kg}}{\text{Ha}} \cdot 0.18)}{0.46} = \frac{113 \frac{\text{Kg}}{\text{Ha}} - 47.34 \frac{\text{Kg}}{\text{Ha}}}{0.46} = \mathbf{142.73 \approx 143 \text{ Kg de N/Ha}}$$

A- 3. Calculo para determinar dosis de fertilización caso 3.

Estos suelos presentaron deficiencia de fósforo, hierro y Zinc, en base a los resultados se realizaron las siguientes recomendaciones de fertilización.

Cálculos de P

$$APS = (AL - NC) \cdot Dap \cdot Pr \cdot FC$$

$$APS = (5 \text{ ppm} - 13 \text{ ppm}) \cdot 1.25 \frac{\text{gr}}{\text{cc}} \cdot 0.20\text{m} \cdot 22.90 = -45.80 \text{ Kg P}_2\text{O}_5/\text{Ha} + 52 \text{ Kg P}_2\text{O}_5/\text{Ha}$$

$$APS = 97.8 \approx \mathbf{98 \text{ Kg P}_2\text{O}_5/\text{Ha}}$$

Se recomienda utilizar el fertilizante granulado 18 - 46- 0.

$$\text{Cantidad de P} = \frac{APS}{\text{Cantidad de P del fertilizante a utilizar}}$$

$$\text{Cantidad de P} = \frac{98 \text{ Kg/Ha}}{0.46} = 213 \text{ Kg de P/Ha}$$

- **Cálculos de Hierro**

$$AFeS = (RA - AL) \cdot 2$$

$$AFeS = (15.5 - 10) \cdot 2 = 11 \text{ kg Fe/Ha}$$

$$\text{Cantidad de Fe} = \frac{APFe}{\text{Cantidad de Fe del fertilizante}} = \frac{11 \text{ Kg zn /Ha}}{0.19} = 57.84 \equiv 58 \text{ Kg de FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} / \text{Ha}$$

- **Cálculos de zinc**

$$AZnS = (RA - AL) \cdot 2$$

$$AZnS = (4.55 - 0.63) \cdot 2 = 3.92 \text{ Kg Zn/Ha}$$

$$\text{Cantidad de Zn} = \frac{APZn}{\text{Cantidad de Zn del fertilizante}} = \frac{3.92 \text{ Kg zn /Ha}}{0.23} = 17.04 \equiv 17 \text{ Kg de ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} / \text{Ha}$$

- **Calculo de N**

$$\text{Cantidad de N} = \frac{\text{Requerimiento de N del cultivo} - \text{Cantidad de N aplicado en fertilizante granulado}}{\text{Cantidad de N del fertilizante a utilizar}}$$

$$\text{Cantidad de N} = \frac{113 \text{ Kg/Ha} - (213 \frac{\text{Kg}}{\text{Ha}} \cdot 0.18)}{0.46} = \frac{113 \frac{\text{Kg}}{\text{Ha}} - 38.34 \frac{\text{Kg}}{\text{Ha}}}{0.46} = 162 \text{ Kg de N/Ha}$$

A- 4. Calculo para determinar dosis de fertilización caso 4.

Estos suelos presentaron bajos niveles de fósforo, cobre, hierro y zinc además el nivel de pH es Fuertemente ácido, en base a los resultados se realizaron las siguientes recomendaciones de fertilización.

Cálculos de P

$$APS = (AL - NC) \cdot Dap \cdot Pr \cdot FC$$

$$APS = (10 \text{ ppm} - 13 \text{ ppm}) \cdot 1.25 \frac{\text{gr}}{\text{cc}} \cdot 0.20 \text{ m} \cdot 22.90 = -17.18 \text{ Kg P}_2\text{O}_5/\text{Ha} + 52 \text{ Kg P}_2\text{O}_5/\text{Ha}$$

$$APS = 69.18 \approx 69 \text{ Kg P}_2\text{O}_5/\text{Ha}$$

Se recomienda utilizar el fertilizante granulado 18 – 46- 00,

$$\text{Cantidad de P} = \frac{APS}{\text{Cantidad de P del fertilizante a utilizar}}$$

$$\text{Cantidad de P} = \frac{69 \text{ Kg/Ha}}{0.46} = 150 \text{ Kg de P/ Ha}$$

- **Cálculos de Cobre**

$$ACuS = (RA - AL) \cdot 2$$

$$ACuS = (2.05 - 0.42) \cdot 2 = 3.26 \text{ Kg Zn/Ha}$$

$$\text{Cantidad de Cu} = \frac{APCu}{\text{Cantidad de Cu del fertilizante}} = \frac{3.26 \text{ Kg zn /Ha}}{0.25} = 13 \text{ Kg de CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O/ Ha}$$

- **Cálculos de Hierro**

$$AFeS = (RA - AL) \cdot 2$$

$$AFeS = (15.5 - 5.25) \cdot 2 = 20.5 \text{ Kg Fe/Ha}$$

$$\text{Cantidad de Fe} = \frac{APFe}{\text{Cantidad de Fe del fertilizante}} = \frac{20.5 \text{ Kg zn /Ha}}{0.19} = 107.89 \approx 108 \text{ Kg de FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O /Ha}$$

- **Cálculos de zinc**

$$AZnS = (RA - AL) \cdot 2$$

$$AZnS = (4.55 - 0.39) \cdot 2 = 8.32 \text{ Kg Zn/Ha}$$

$$\text{Cantidad de Zn} = \frac{APZn}{\text{Cantidad de Zn del fertilizante}} = \frac{8.32 \text{ Kg zn /Ha}}{0.23} = 36 \text{ Kg de ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O/ Ha}$$

- **Calculo de N**

$$\text{Cantidad de N} = \frac{\text{Requerimiento de N del cultivo} - \text{Cantidad de N aplicado en fertilizante granulado}}{\text{Cantidad de N del fertilizante a utilizar}}$$

$$\text{Cantidad de N} = \frac{113 \text{ Kg/Ha} - (150 \frac{\text{Kg}}{\text{Ha}} \cdot 0.18)}{0.46} = \frac{113 \frac{\text{Kg}}{\text{Ha}} - 27 \frac{\text{Kg}}{\text{Ha}}}{0.46} = 186.95 \approx 187 \text{ Kg de N/Ha}$$

A- 5. Calculo para determinar dosis de fertilización caso 5.

Estos suelos presentaron deficiencia de fósforo, cobre y zinc, además de poseer un pH fuertemente ácido, en base a los resultados se recomienda realizar el siguiente plan de fertilización.

- **Cálculos de P**

$$APS = (AL - NC) Dap * Pr * FC$$

$$APS = (10 \text{ ppm} - 13 \text{ ppm}) 1.25 \frac{\text{gr}}{\text{cc}} * 0.20\text{m} * 22.90 = -17.18 \text{ Kg P}_2\text{O}_5/\text{Ha} + 52 \text{ Kg P}_2\text{O}_5/\text{Ha}$$

$$APS = 69.17 \approx 69 \text{ Kg P}_2\text{O}_5/\text{Ha}$$

Se recomienda utilizar el fertilizante granulado 18-46-00

$$\text{Cantidad de P} = \frac{APS}{\text{Cantidad de P del fertilizante a utilizar}}$$

$$\text{Cantidad de P} = \frac{69 \text{ Kg/Ha}}{0.46} = 150 \text{ Kg de P/ Ha}$$

- **Cálculos de Cobre**

$$ACuS = (RA - AL) 2$$

$$ACuS = (2.05 - 0.71) 2 = 2.68 \text{ Kg Zn/Ha}$$

$$\text{Cantidad de Cu} = \frac{APCu}{\text{Cantidad de Cu del fertilizante}} = \frac{2.68 \text{ Kg zn /Ha}}{0.25} = 10.72 \approx 11 \text{ Kg de CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O/}$$

Ha

- **Cálculos de zinc**

$$AZnS = (RA - AL) 2$$

$$AZnS = (4.55 - 0.86) 2 = 7.38 \text{ Kg Zn/Ha}$$

$$\text{Cantidad de Zn} = \frac{APZn}{\text{Cantidad de Zn del fertilizante}} = \frac{7.38 \text{ Kg zn /mz}}{0.23} = 32 \text{ Kg de ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O/ Ha}$$

- **Calculo de N**

$$\text{Cantidad de N} = \frac{\text{Requerimiento de N del cultivo} - \text{Cantidad de N aplicado en fertilizante granulado}}{\text{Cantidad de N del fertilizante a utilizar}}$$

$$\text{Cantidad de N} = \frac{113 \text{ Kg/Ha} - (150 * 0.18)}{0.46} = \frac{113 \frac{\text{Kg}}{\text{Ha}} - 27 \frac{\text{Kg}}{\text{Ha}}}{0.46} = 186.95 \equiv 187 \text{ Kg de N/Ha}$$

A- 6 Calculo para determinar dosis de fertilización caso 6.

Estos suelos no presentaron deficiencia de fósforo y potasio, pero se debe de realizar un aporte de nutrientes para reponer lo que el cultivo absorbe para su desarrollo, se presentaron deficiencias de elementos menores como cobre y zinc, además de tener un pH fuertemente ácido, en base a los resultados se realizaron las siguientes recomendaciones de fertilización.

- **Cálculos de P**

$$APS = (AL - NC) Dap * Pr * FC$$

$$APS = (15 \text{ ppm} - 13 \text{ ppm}) 1.25 \frac{\text{gr}}{\text{cc}} * 0.20\text{m} * 22.90 = 11.45 \text{ Kg P}_2\text{O}_5/\text{Ha} + 52 \text{ Kg P}_2\text{O}_5/\text{Ha}$$

$$\text{APS} = 63.45 \equiv 63 \text{ Kg P}_2\text{O}_5/\text{Ha}$$

Se recomienda utilizar el fertilizante granulado 18-46-0.

$$\text{Cantidad de P} = \frac{APS}{\text{Cantidad de P del fertilizante a utilizar}}$$

$$\text{Cantidad de P} = \frac{63 \text{ Kg/Ha}}{0.46} = 136.95 \equiv 137 \text{ Kg de P/ Ha}$$

- **Cálculos de K**

$$AKS = (AL - NC) Dap * Pr * FC$$

$$AKS = (75.74 \text{ ppm} - 60 \text{ ppm}) 1.25 \frac{\text{gr}}{\text{cc}} * 0.20\text{m} * 12.04 = 2.41 \text{ Kg K}_2\text{O/Ha} + 113 \text{ Kg K}_2\text{O/Ha}$$

$$\text{AKS} = 115.41 \equiv 115 \text{ Kg K}_2\text{O/Ha}$$

Se recomienda utilizar el fertilizante granulado 0- 0- 60,

$$\text{Cantidad de K} = \frac{APK}{\text{Cantidad de K del fertilizante a utilizar}}$$

$$\text{Cantidad de K} = \frac{115 \text{ Kg/Ha}}{0.60} = 191.66 \equiv 192 \text{ Kg de Kg/Ha.}$$

Nota: se dividirá en 2 aplicaciones.

- Cálculos de Cobre

$$ACuS = (RA - AL) \cdot 2$$

$$ACuS = (2.05 - 0.38) \cdot 2 = \mathbf{3.34 \text{ Kilogramo Zn/Ha}}$$

$$\text{Cantidad de Cu} = \frac{APCu}{\text{Cantidad de Cu del fertilizante}} = \frac{3.34 \text{ Kg zn /Ha}}{0.25} = 13.36 \equiv 13 \text{ Kg de CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O/}$$

Ha

- Cálculos de zinc

$$AZnS = (RA - AL) \cdot 2$$

$$AZnS = (4.55 - 0.78) \cdot 2 = \mathbf{7.54 \text{ Kg Zn/Ha}}$$

$$\text{Cantidad de Zn} = \frac{APZn}{\text{Cantidad de Zn del fertilizante}} = \frac{7.54 \text{ Kg zn /Ha}}{0.23} = 32.7 \equiv 33 \text{ Kg de ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O/}$$

Ha

- Calculo de N

$$\text{Cantidad de N} = \frac{\text{Requerimiento de N del cultivo} - \text{Cantidad de N aplicado en fertilizante granulado}}{\text{Cantidad de N del fertilizante a utilizar}}$$

$$\text{Cantidad de N} = \frac{113 \text{ Kg/Ha} - (137 \frac{\text{Kg}}{\text{Ha}} \cdot 0.18)}{0.46} = \frac{113 \frac{\text{Kg}}{\text{Ha}} - 24.66 \frac{\text{Kg}}{\text{Ha}}}{0.46} = \mathbf{192.04 \equiv 192 \text{ Kg de N/Ha}}$$

8.1 Cuadros.

Cuadro A- 1. Importaciones de maíz en los periodos de 2010 a 2015 (MAG, 2016).

Producto	2010 (kg)	2011 (kg)	2012 (kg)	2013 (kg)	2014 (kg)	2015 (kg)
Maíz amarillo	345,101,101	372,385,018	329,693,818	266.964	373,917	438,006
Maíz blanco	100,571,638	227,150,680	94,382,867	52,029	54,154	130,272

Cuadro A- 2. Exportaciones de maíz en los periodos de 2010 a 2015 (MAG, 2016).

Producto	2010 (kg)	2011 (kg)	2012 (kg)	2013 (kg)	2014 (kg)	2015 (kg)
Maíz amarillo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Maíz blanco	2,709,434	50,000	0.00	0.00	0.00	87,090

Cuadro A- 3. Precio de maíz blanco por quintal mensual durante el periodo de 2015 (MAG, 2016).

Producto	E (\$)	F (\$)	M (\$)	A (\$)	M (\$)	J (\$)	J (\$)	A (\$)	S (\$)	O (\$)	N (\$)	D (\$)
Maíz												
blanco	20.2	20.2	20.9	21.1	20.8	21	23.4	21.9	20.9	19.9	19.3	18.7

Cuadro A- 4. Superficie de Producción (mz), producción total por año (qq) y productividad en (qq/mz) del maíz en el país (CENTA, 2013).

Año Agrícola	Superficie de Producción (Mz.)	Producción. (Miles de QQ)	Productividad (QQ/Mz.)	Productividad (Kg/Ha.)
2000/01	370,370.00	12,673	34.22	2,217.0
2001/02	420,150.00	12,429	29.58	1,916.4
2002/03	353,487.00	14,014	39.65	2,568.8
2003/04	327,089.00	13,815	42.24	2,736.6
2004/05	314,892.38	14,570	46.27	2,997.7
2005/06	367,224.20	18,060	49.18	3,186.2
2006/07	348,726.00	13,530	38.80	2,513.7
2007/08	343,614.19	15,387	44.78	2,901.1
2008/09	366,314.13	19,101	52.15	3,378.9
2009/10	374,128.00	17,291	46.22	2,994.4
2010/11	362,706.00	16,898	46.59	3,015.2

Quadro A-5. Información general de los sitios de muestreo y resultados de laboratorio (textura, pH, Macronutrientes)

NPMuestra	Sitios	Coordenadas		Cantón	Municipio	Profundidad (cm)	Cultivo a fertilizar	TEXTURABOYUCOS				pH en agua 1:2.5		Fósforo (mg/kg ⁻¹)		Potasio (mg/kg ⁻¹)	
		Latitud (x)	Longitud (y)					% Arena	% Arcilla	% Limo	Textura	Valor	Interpretación	Valor	Interpretación	Valor	Interpretación
21021	Cas01	13° 33' 26.81" N	88° 2' 12.40" O	Palanero	Comacarán	0.3	IVBZ	57.5	26.32	16.18	FCA	5.86	IVA	5	IVB	230.73	IVA
21022	Cas02	13° 32' 38.11" N	88° 3' 39.40" O	Palanero	Comacarán	0.3	IVBZ	52.5	36.5	11	FCA	5.83	IVA	1	IVB	8.42	B
21023	Cas03	13° 32' 18.41" N	88° 4' 6.32" O	Palanero	Comacarán	0.3	IVBZ	59.6	23.04	17.36	FCA	5.70	IVA	5	IVB	128.01	A
21024	Cas04	13° 32' 33.41" N	88° 5' 9.74" O	El Colorado	Comacarán	0.3	IVBZ	76.6	10.86	12.54	AF	5.50	FA	10	B	78.07	A
21025	Cas05	13° 32' 6.41" N	88° 3' 9.36" O	El Colorado	Comacarán	0.3	IVBZ	76.6	12.4	11	AF	5.06	FA	15	A	75.74	A
21026	Cas06	13° 32' 25.01" N	88° 5' 4.48" O	El Colorado	Comacarán	0.3	IVBZ	71.03	15.52	13.45	AF	5.00	IVFA	10	B	102.09	A

Fuente: Elaboración propia, con datos proporcionados por el laboratorio de suelos de CENIA.

Quadro A-6. Resultados de laboratorio de laboratorio (Micronutrientes, Suma de bases, MO)

Ca (mmol kg ⁻¹)		Mg (mmol kg ⁻¹)		Na (mmol kg ⁻¹)		Potasio int. (mmol kg ⁻¹)		Suma de bases (mmol kg ⁻¹)		Acidez int. (H+Al) (mmol kg ⁻¹)		CCE		% Sat. Bases		% Materia Orgánica		CaMg		Mgk	
valor	interpretación	valor	iner.	valor	iner.	valor	iner.	valor	iner.	valor	iner.	valor	iner.	valor	iner.	valor	iner.	valor	iner.	valor	interpretación
326	A	7.53	A	0.23	NS	0.6		40.35	A	0	B	40.35	A	100		3.76	VI	4.33	VI	24.8	A
3021	A	7.29	A	0.49	NS	0.02		37.98	A	0	B	37.98	A	100		3.6	VI	4.15	VI	342.09	A
10.71	A	4.14	A	0.22	NS	0.33		15.06	VI	0	B	15.06	VI	100		3.79	VI	2.59	VI	14.67	VI
5.57	A	2.1	A	0.19	NS	0.2		8.41	VI	0.56	VI	8.96	VI	93.87		5.83	A	2.66	VI	10.99	VI
7.57	A	3.06	A	0.2	NS	0.2		11.35	VI	0.54	VI	11.89	VI	95.48		2.42	VI	2.48	VI	16.81	A
8.32	A	2.88	A	0.19	NS	0.26		11.66	VI	0.28	B	11.93	VI	97.77		3.27	VI	2.89	VI	11.7	VI

Fuente: Elaboración propia, con datos proporcionados por el laboratorio de suelos de CENIA.

Quadro A-7. Resultado de laboratorio (Micronutrientes, DA)

Ca(mgkg ⁻¹)		CaK		Cu(mgkg ⁻¹)		Fe(mgkg ⁻¹)		Mn(mgkg ⁻¹)		Zn(mgkg ⁻¹)		Densidad/Aparente(gm ⁻¹)
Valor	Interpretación	Valor	Interpretación	Valor	Interpretación	Valor	Interpretación	Valor	Interpretación	Valor	Interpretación	Valor
131.55	A	106.75	A	0.59	B	6.17	B	20.21	IVA	0.85	B	0.89
1759.18	A	1417.09	A	1.69	A	9.34	B	19.1	IVA	0.65	B	0.85
5242	A	37.75	A	1.24	A	10	A	37.44	IVA	0.63	B	0.88
39.88	A	28.89	A	0.42	B	5.25	B	25.18	IVA	0.39	IVB	1.07
58.88	A	42.07	A	0.38	B	11.18	A	33.83	IVA	0.78	B	0.87
45.67	A	33.98	A	0.71	B	10.57	A	26	IVA	0.86	B	0.88

Fuente: Elaboración propia, con datos proporcionados por el laboratorio de suelos de CENITA.

Quadro A-8. Estadística zonal para la zona de estudio

GRU	MEAN m.vbf	SIDDEV m.vbf	MEAN+stdev m.vbf	MEAN-stdev m.vbf	MEAN tpi	SIDDEV tpi	MEAN+stdev tpi	MEAN-stdev tpi	MEAN twi	SIDDEV twi	MEAN+stdev twi	MEAN-stdev swi	MEAN pendiente	SIDDEV pendiente	MEAN+stdev pendiente	MEAN-stdev pendiente
1	22264	0.7623	23886	14641	-0.3700	0.4255	0.0555	-0.7355	8.7014	1.7292	10.4306	6.9722	5.0502	3.3512	8.4014	1.6991
2	0.9693	0.6105	1.5798	0.3587	-0.1325	0.5029	0.3704	-0.6354	7.3298	1.1158	8.4456	6.2140	9.9072	4.8278	14.7349	5.0794
3	25564	0.9639	35203	1.5924	0.0025	0.4926	0.4901	-0.4876	10.3457	1.9408	12.2865	8.4049	2.1765	3.1841	5.3606	-1.0076
4	0.1846	0.4598	0.6444	-0.2751	-0.7654	0.8410	0.0756	-1.6063	6.5005	1.1066	7.6071	5.3939	24.6755	11.6880	36.3634	12.9875
5	0.0015	0.0421	0.0436	-0.0406	1.6865	1.5601	3.2466	0.1265	4.9712	0.6728	5.6439	4.2984	44.5719	16.8358	61.4077	27.7351
6	0.2244	0.4410	0.6654	-0.2166	1.0690	0.7442	1.8132	0.3248	6.0676	1.0221	7.0897	5.0454	17.7615	9.6901	27.4516	8.0714

Fuente: Elaboración propia

Cuadro A- 9. Niveles críticos para la investigación de análisis de suelo

Características	Categorías de disponibilidad				
	Muy Bajo	Bajo	Alto	Muy Alto	Medio
P (ppm)	0-8	9-12	13-30	> 30	
K (ppm)	-	0-59	60-200	> 200	
Ca (meq/100g)	0-2.2	2.3-4.0	4.1-36	> 36	
Mg (meq/100g)	0-0.8	0.9-2.0	2.1-18	> 18	
Zn (ppm)	0-0.4	0.5-3.0	3.1-6.0	6.1-36	
Cu (ppm)	0-0.1	0.2-1.0	1.1-3.0	3.1-20	
Fe (ppm)	0-1	2-10	11-20	21-80	
Mn (ppm)	0-0.7	0.8-5	5.1-10	11-100	
B (ppm)	0-0.03	0.04-0.2	0.3-0.5	0.6-8	
S (ppm)	0-2	3-12	13-20	21-80	
M.O (%)		< 2	> 4		2-4
Relación Ca/Mg		< 2	> 5		2.1-5
Relación Mg/K		< 2.5	> 15		2.5-15
Relación Ca/K		< 5	> 25		5-25
Relación (Ca+Mg) /K		< 10	> 40		10-40
CIC (meq/100 g) *	< 4	8.1-12	> 20		

*moderadamente bajo 4 a 8; moderadamente alto de 12 a 20.

Cuadro A- 10. Tipo de métodos de aplicación.

Superficiales		Enterrados	
No localizados	Voleo	No localizados	Incorporado
Localizados	Banda lateral	Localizados	Fondo de surco o lado del surco
	Circulo		Fondo del hoyo
	Media luna		Espeque

Cuadro A- 11. Categorías del pH del suelo (Acidez-Alcalinidad) en agua relación 1:2.5

Categorías de pH	Siglas	Valores de pH
Extremadamente ácido	EA	4.1-4.4
Muy fuertemente ácido	MFA	4.5-5.0
Fuertemente ácido	FA	5.1-5.5
Moderadamente ácido	MA	5.6-6.0
Ligeramente ácido	LA	6.1-6.5
Neutro	N	6.6-7.3
Mediamente alcalino	MAL	7.4-8.0
Fuertemente alcalino	FAL	8.1-9.0
Extremadamente alcalino	EAL	> 9.0

8.2 Figuras.

Figura A- 1. Mapa de pobreza de El Salvador (CNR, sf)

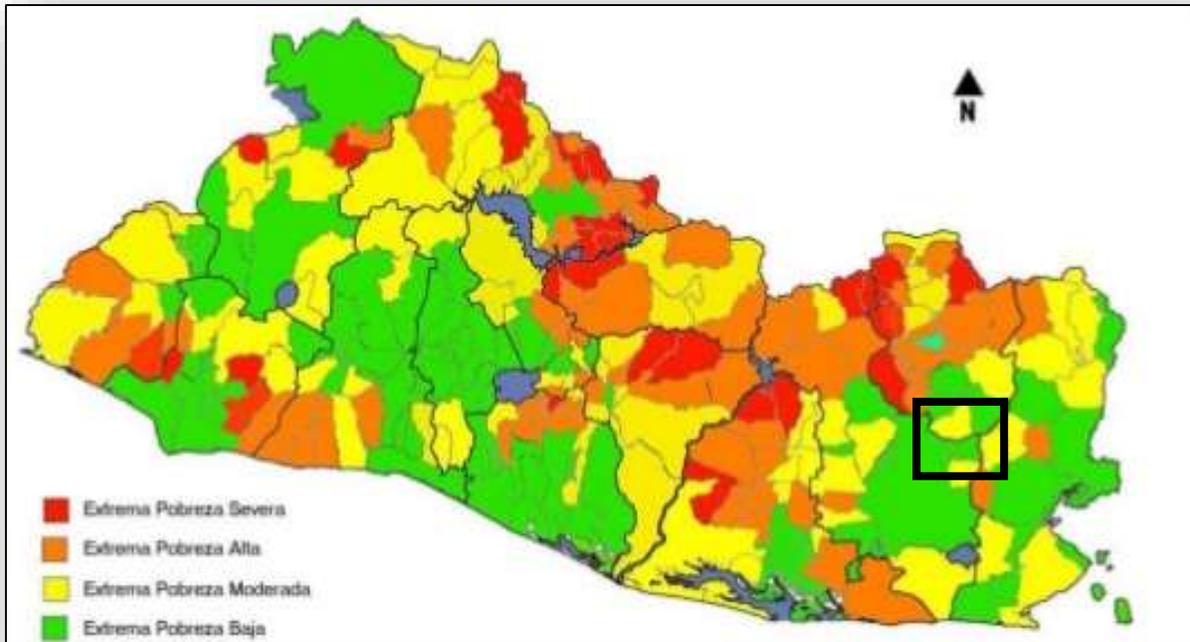


Figura A- 2. Zonas productoras de maíz en El Salvador (MAG-2015).

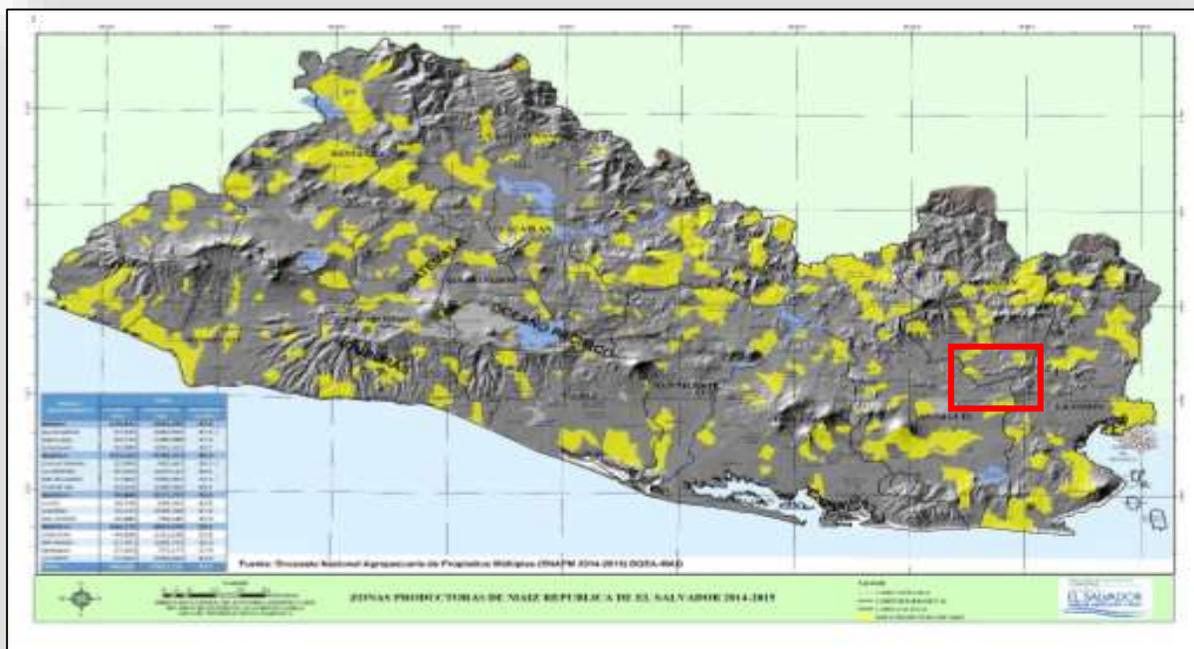


Figura A- 3. Generación de sombreado analítico.

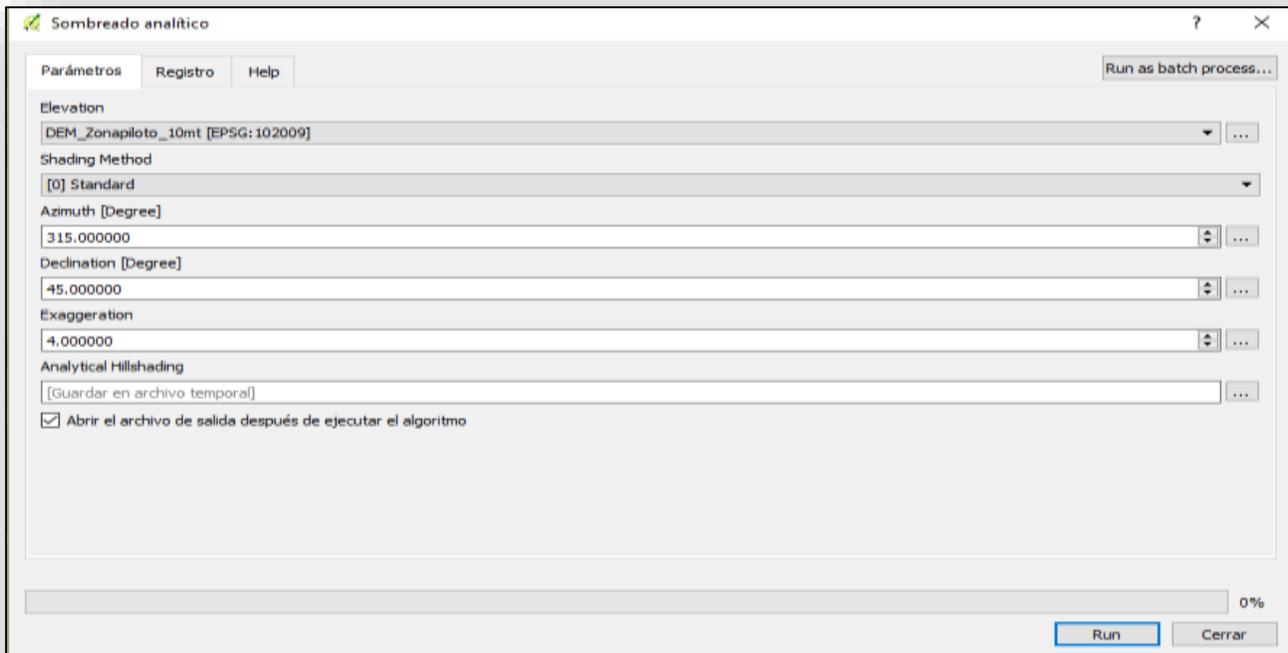


Figura A- 4. Elaboración de Mapa de pendiente.

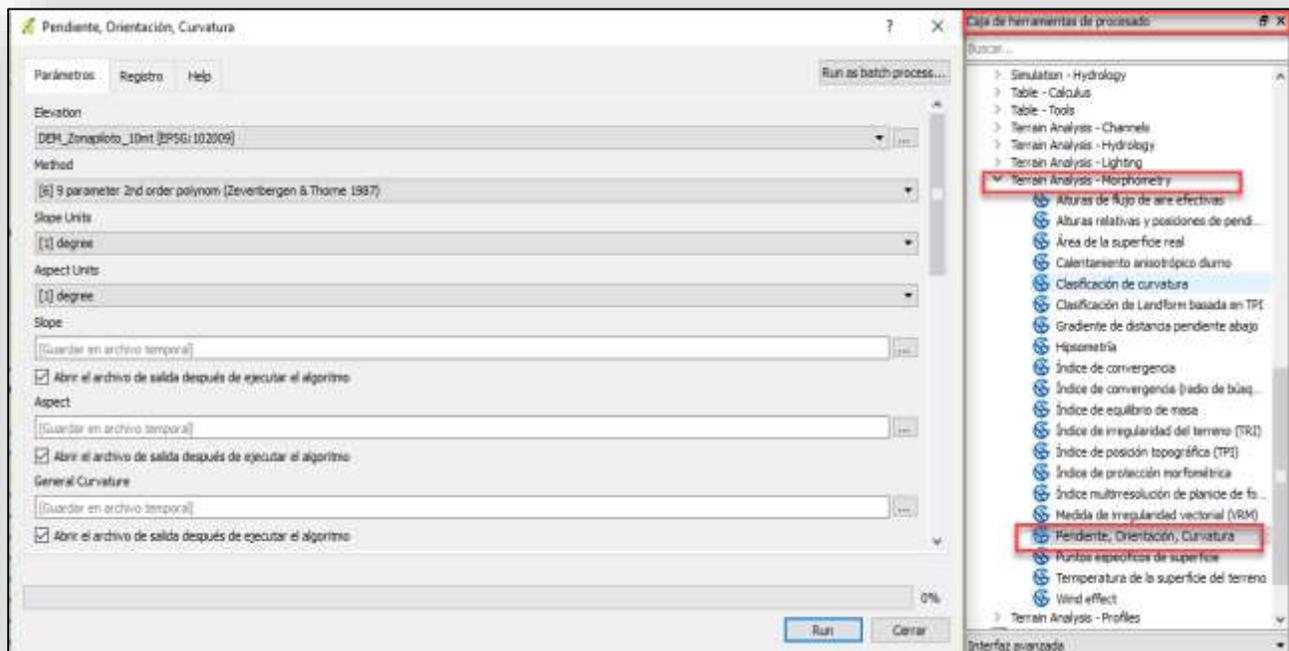


Figura A- 5. Elaboración de Índice de humedad Topográfica.

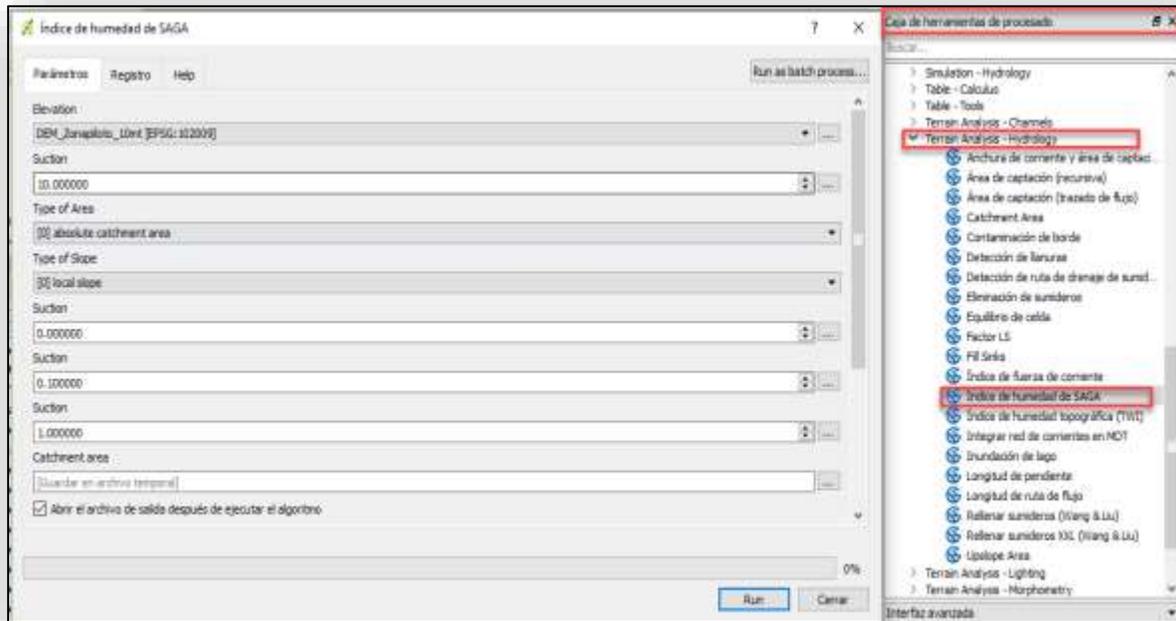


Figura A- 6. Elaboración de Índice de Posición Topográfica.

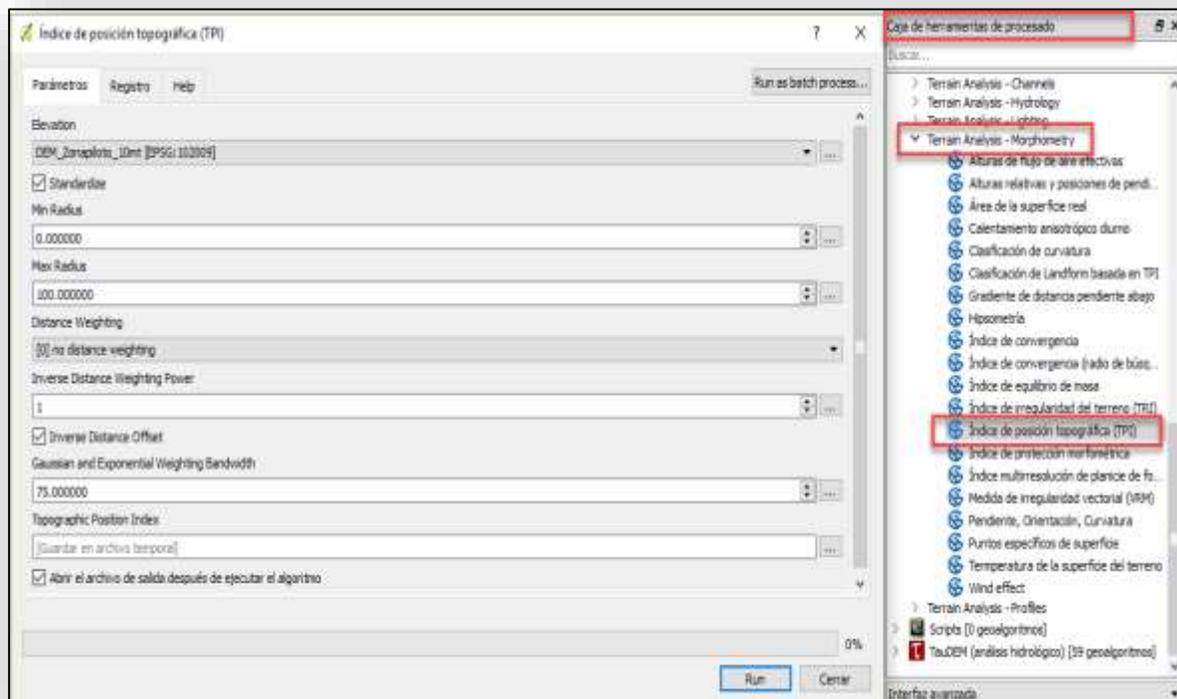


Figura A- 7. Elaboración de Multirresolución de Fondo de Valle.

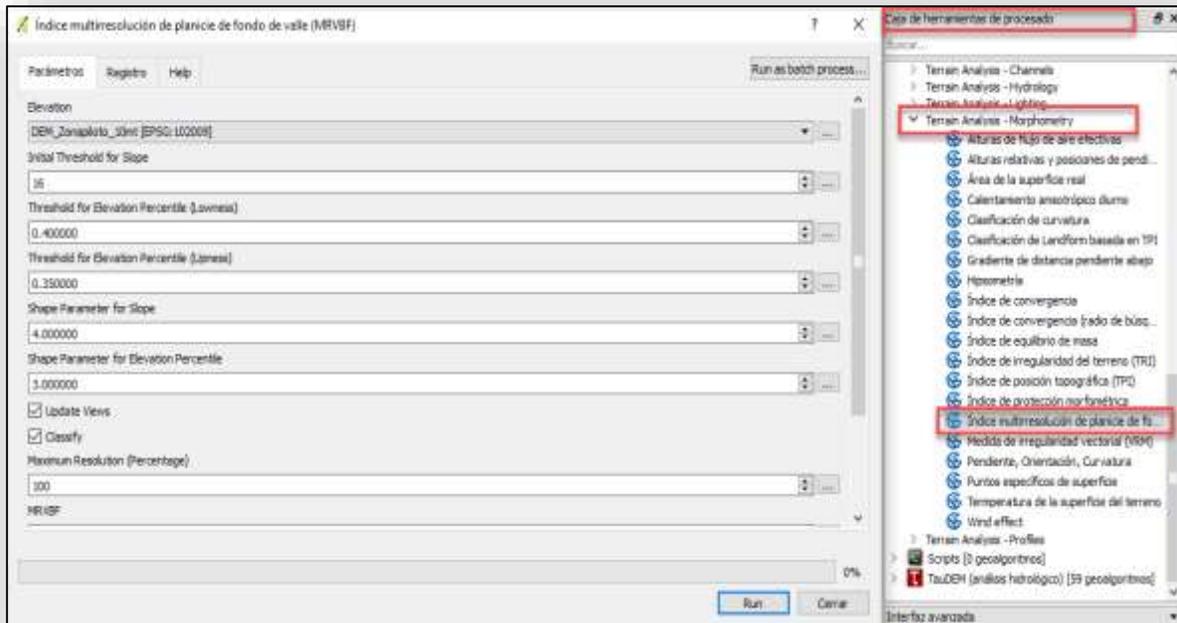


Figura A- 8. Elaboración de Mapa de Costo.

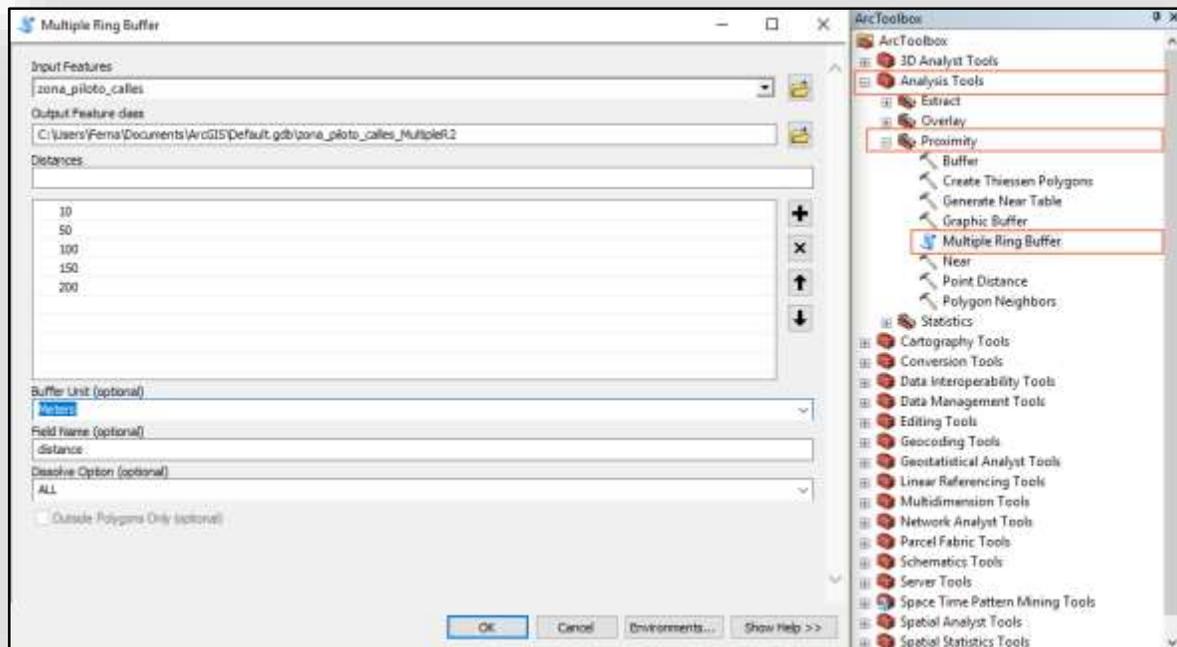


Figura A- 9. Elaboración de mapas de puntos de muestreo.



Figura A- 10. Elaboración de mapa de clases genéricas.

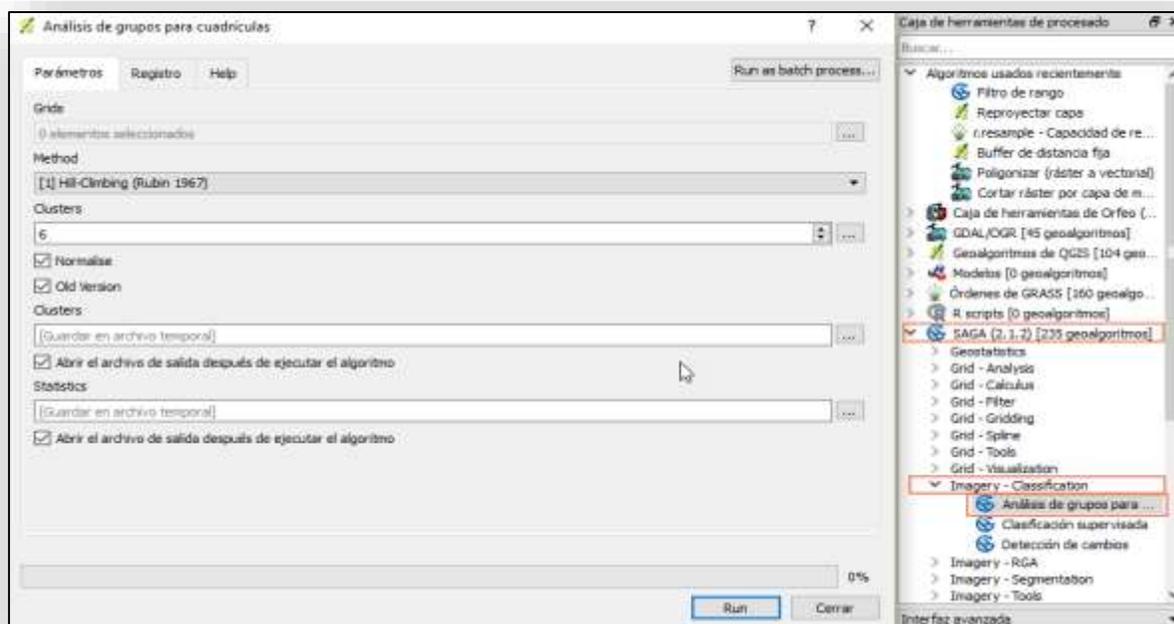


Figura A- 11. Elaboración de mapa de membresía.

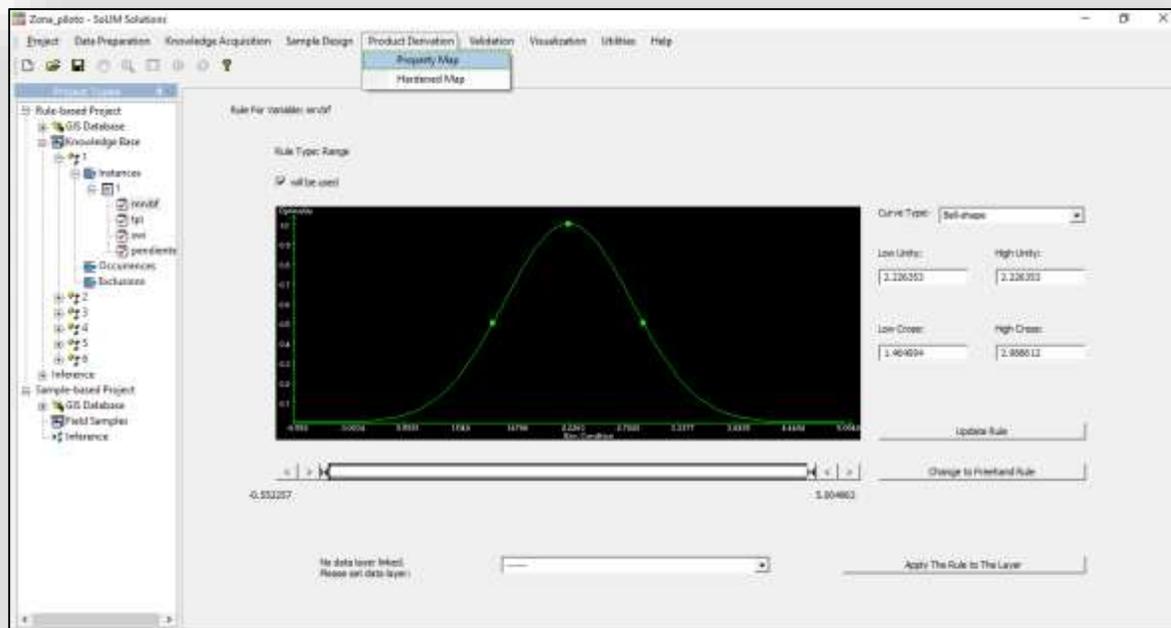


Figura A- 12. Elaboración de mapas de propiedades químicas y físicas.

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
1	16.18			
2	11.00			
3	12.54			
4	17.36			
5	13.45			
6	11.00			

Figura A-13. Mapa de división política y administrativa

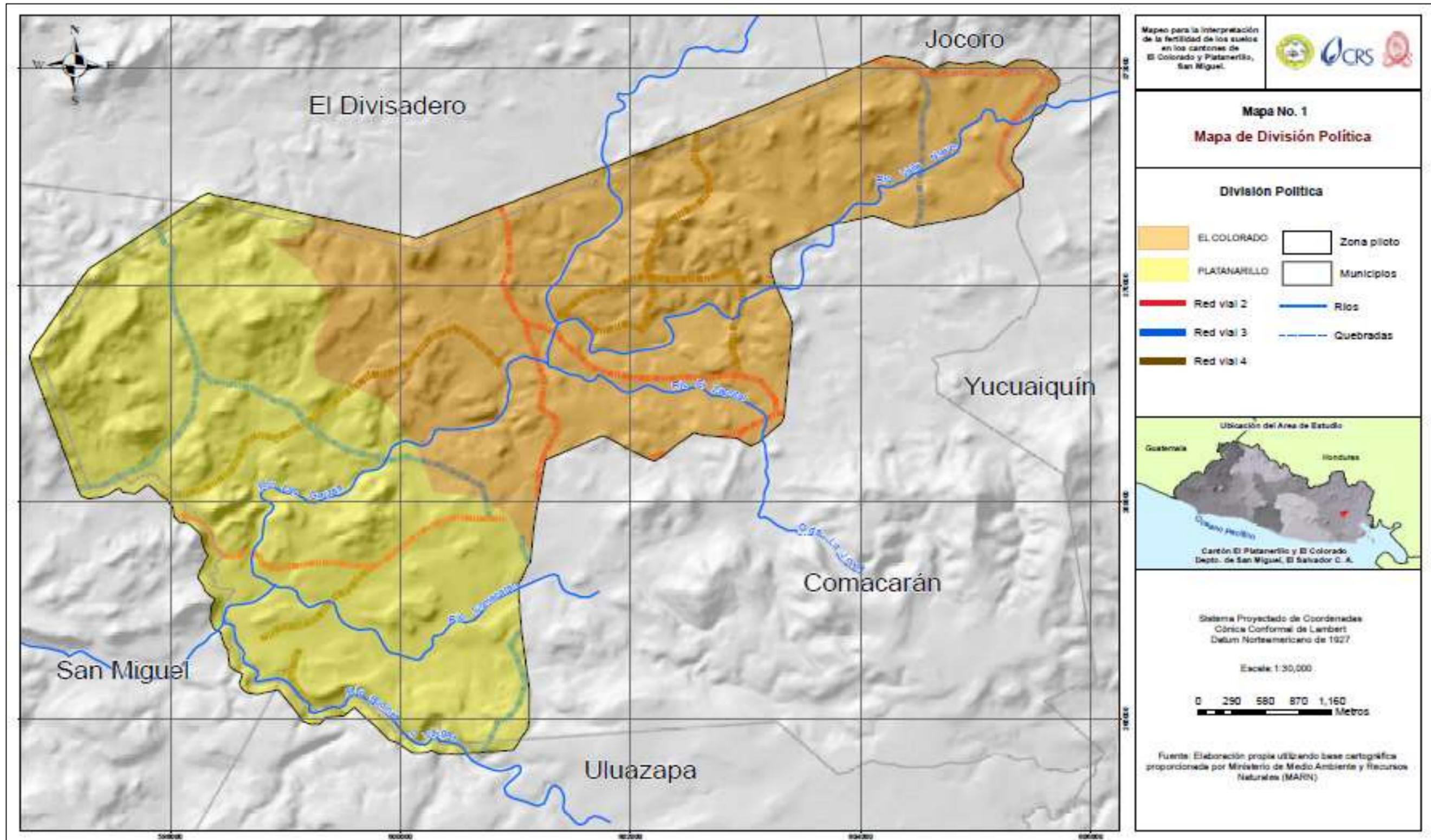


Figura A-14. Mapa de Red Hídrica

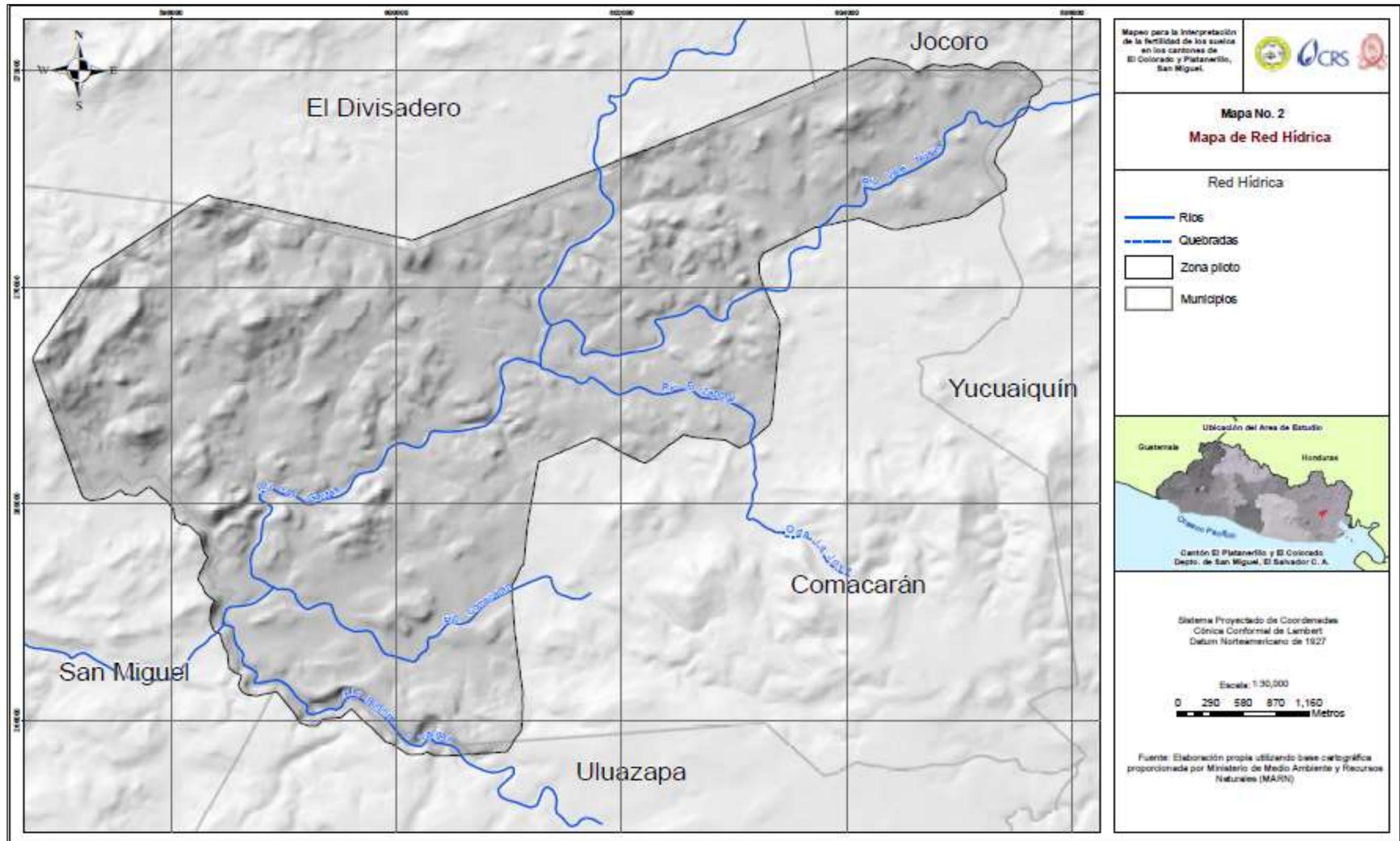


Figura A-15. Mapa de Geología

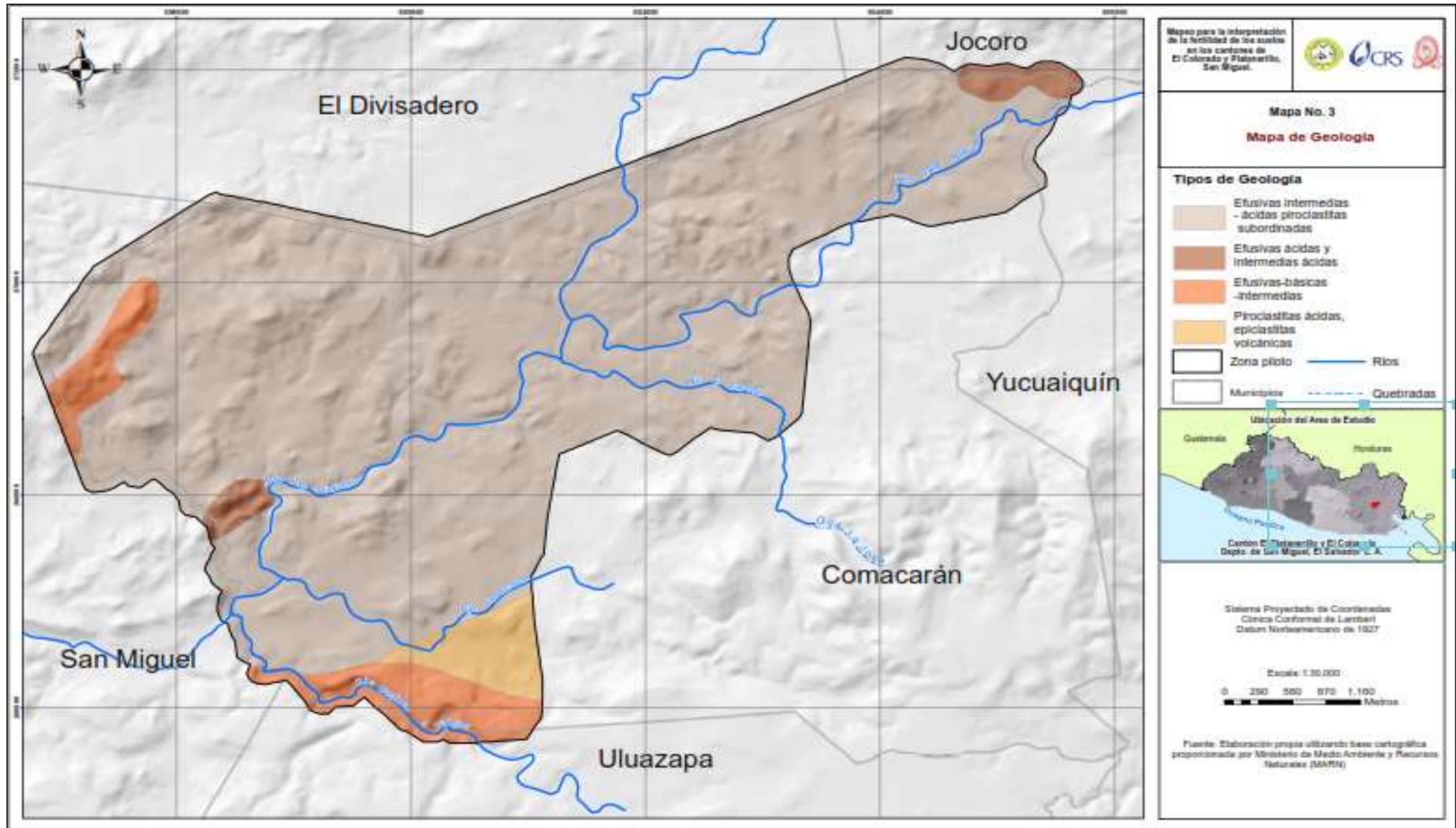


Figura A-16. Mapa de Agrología

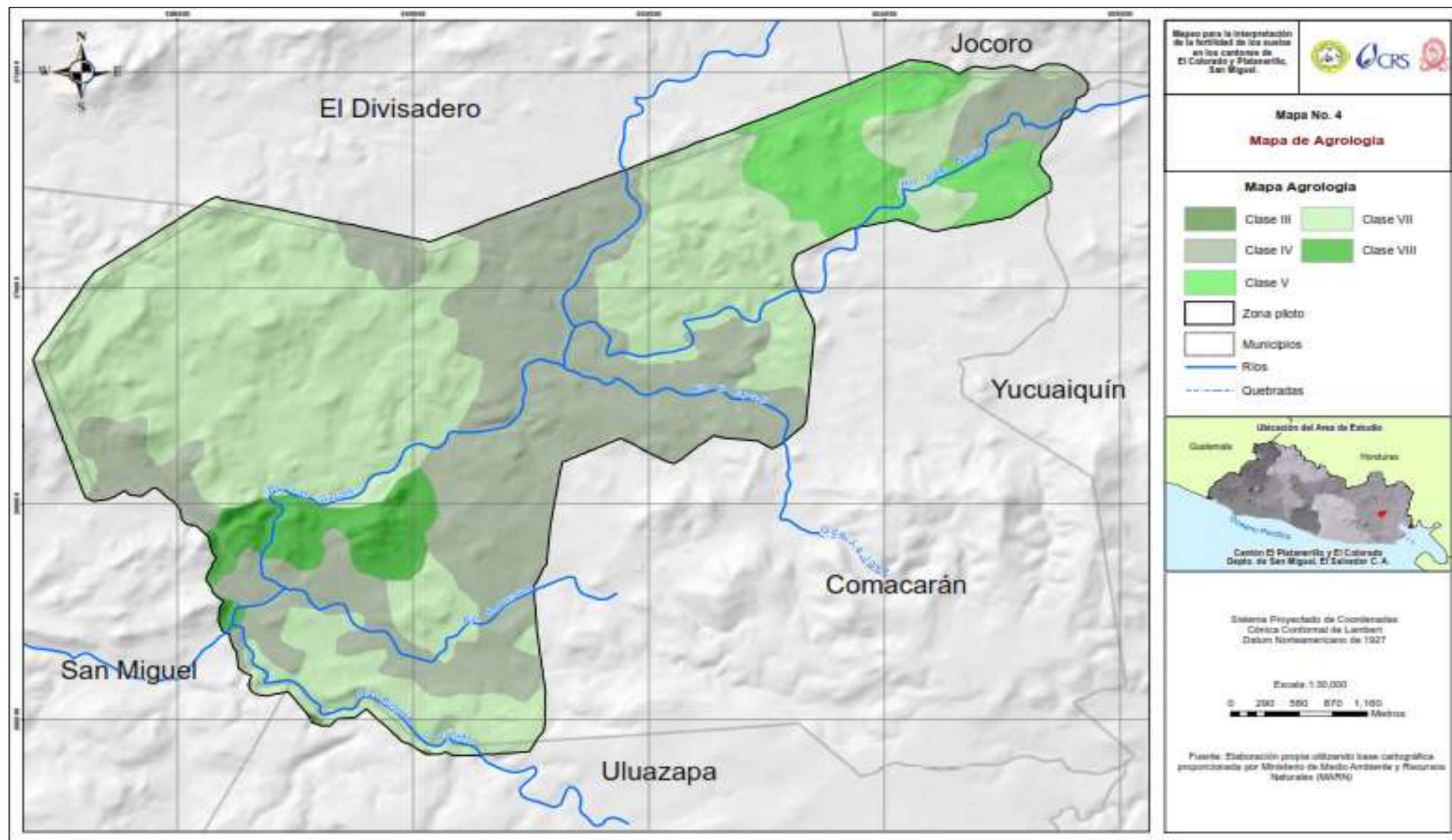


Figura A-17. Mapa uso actual del suelo.

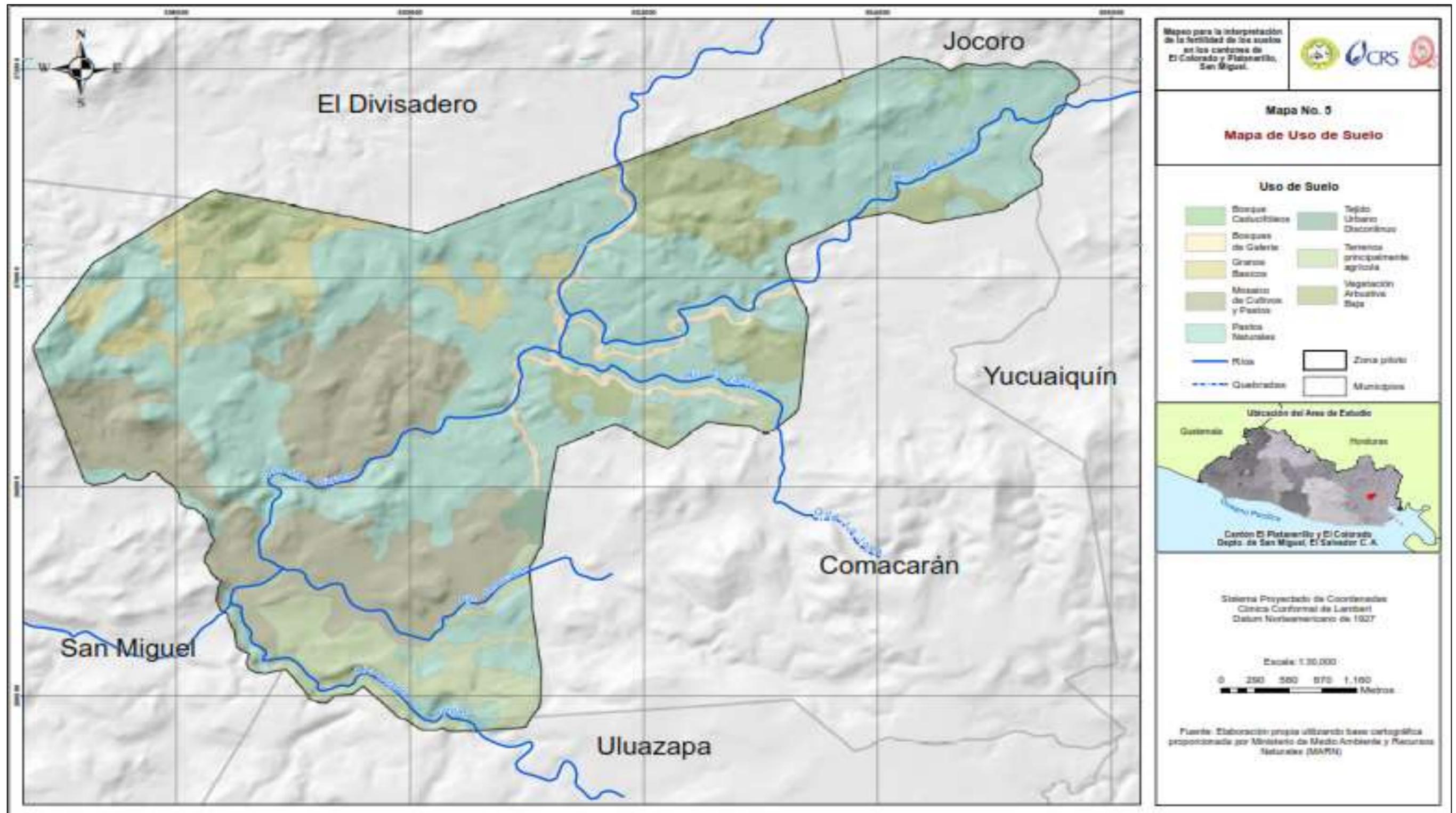


Figura A-18. Mapa de Modelo de elevación digital.

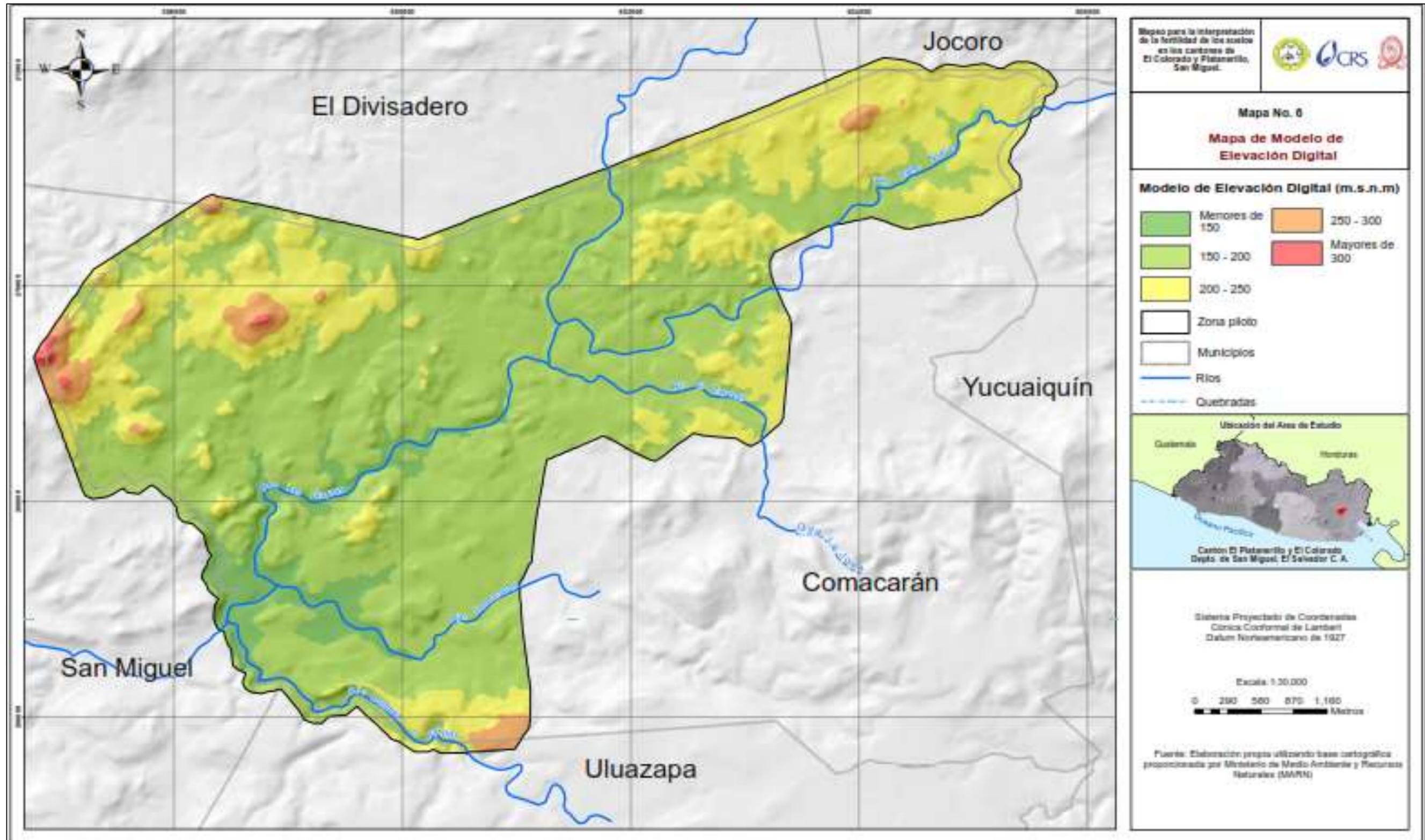


Figura A-19. Mapa de Pendiente.

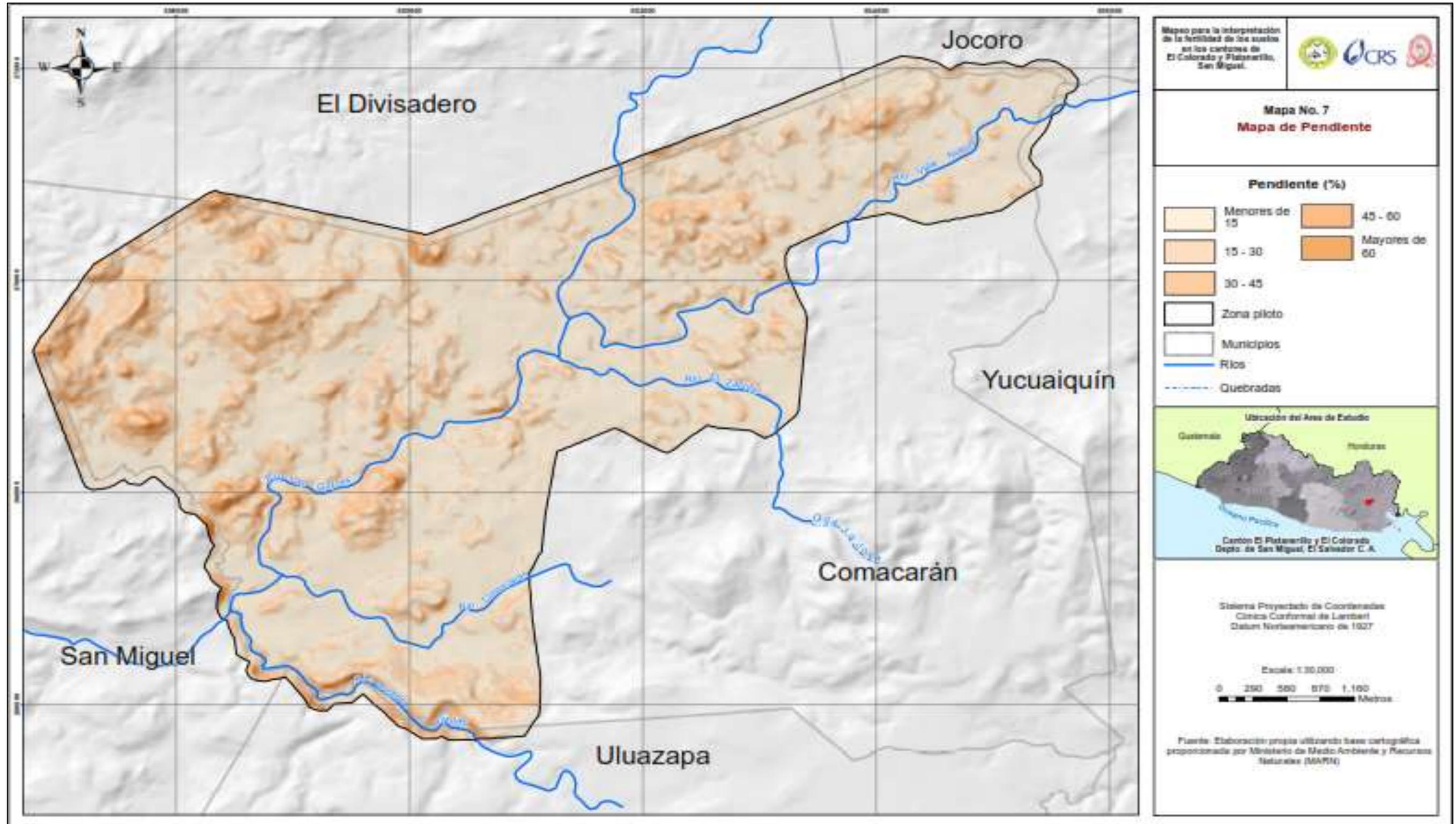


Figura A-20. Mapa de índice de humedad topográfico

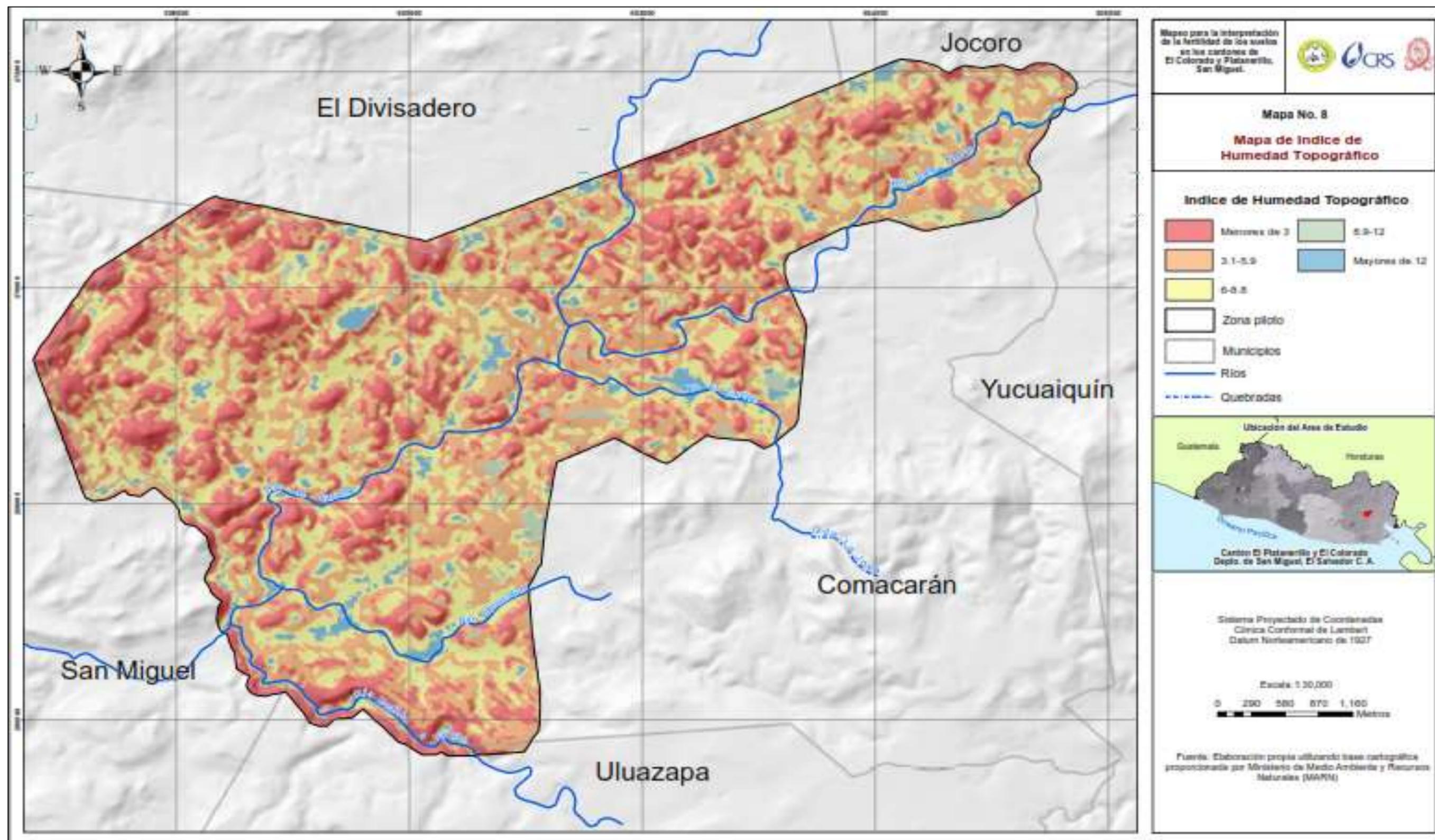


Figura A-21. Mapa de Índice de Posición Topográfica.

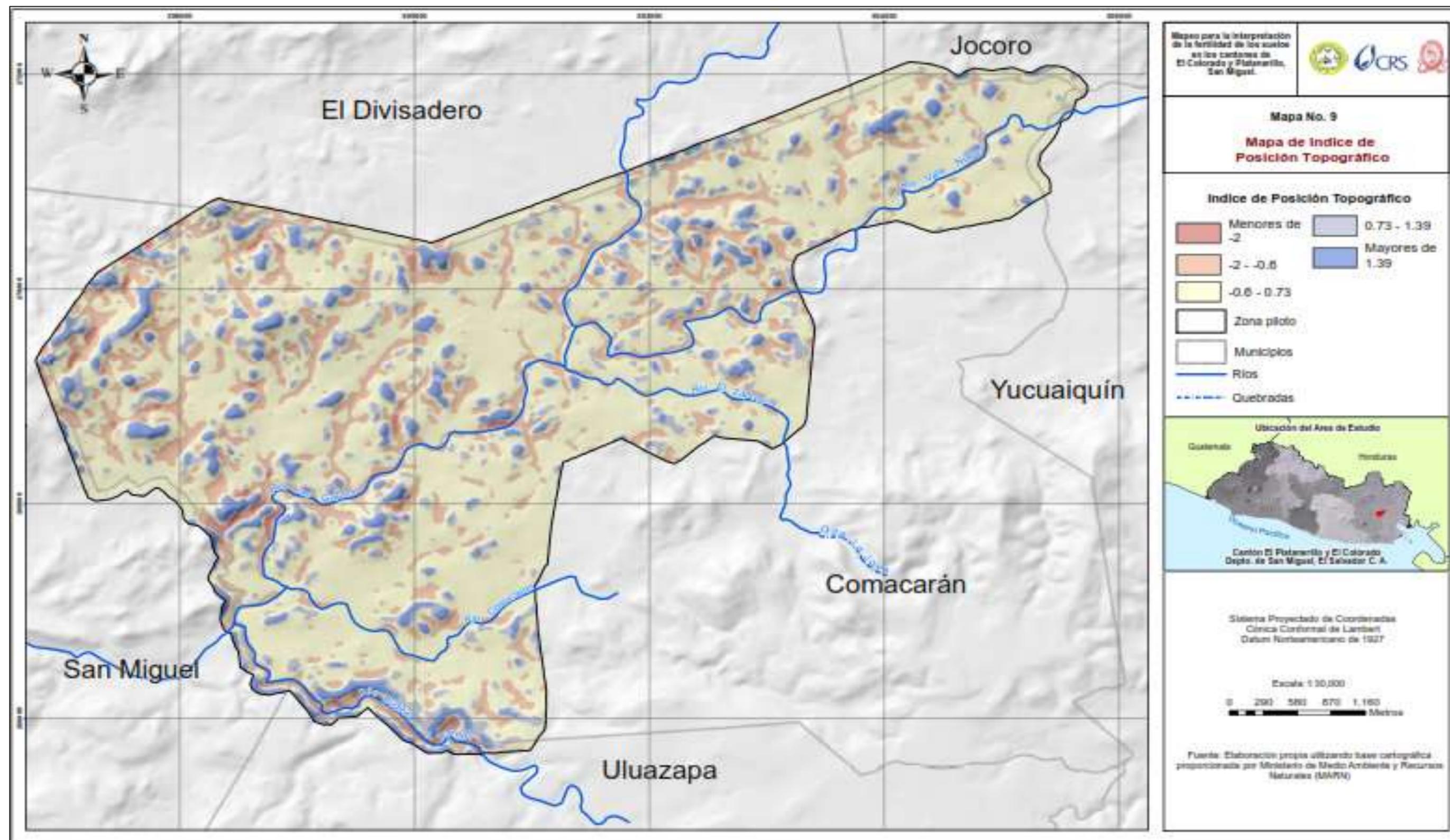


Figura A-22. Mapa de Índice de Multirresolución de Fondo de Valle

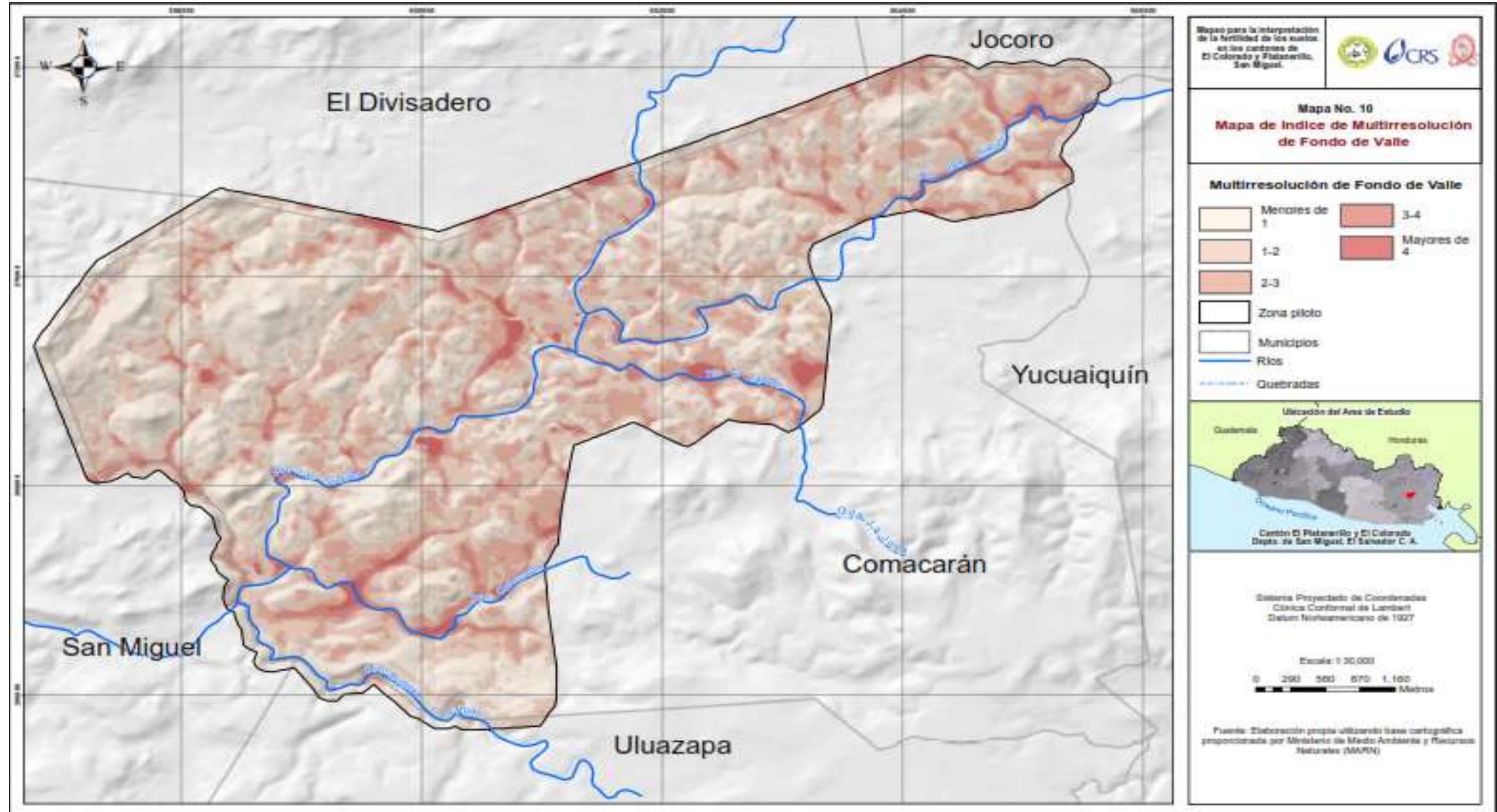


Figura A-23. Mapa de Puntos de Muestreo.

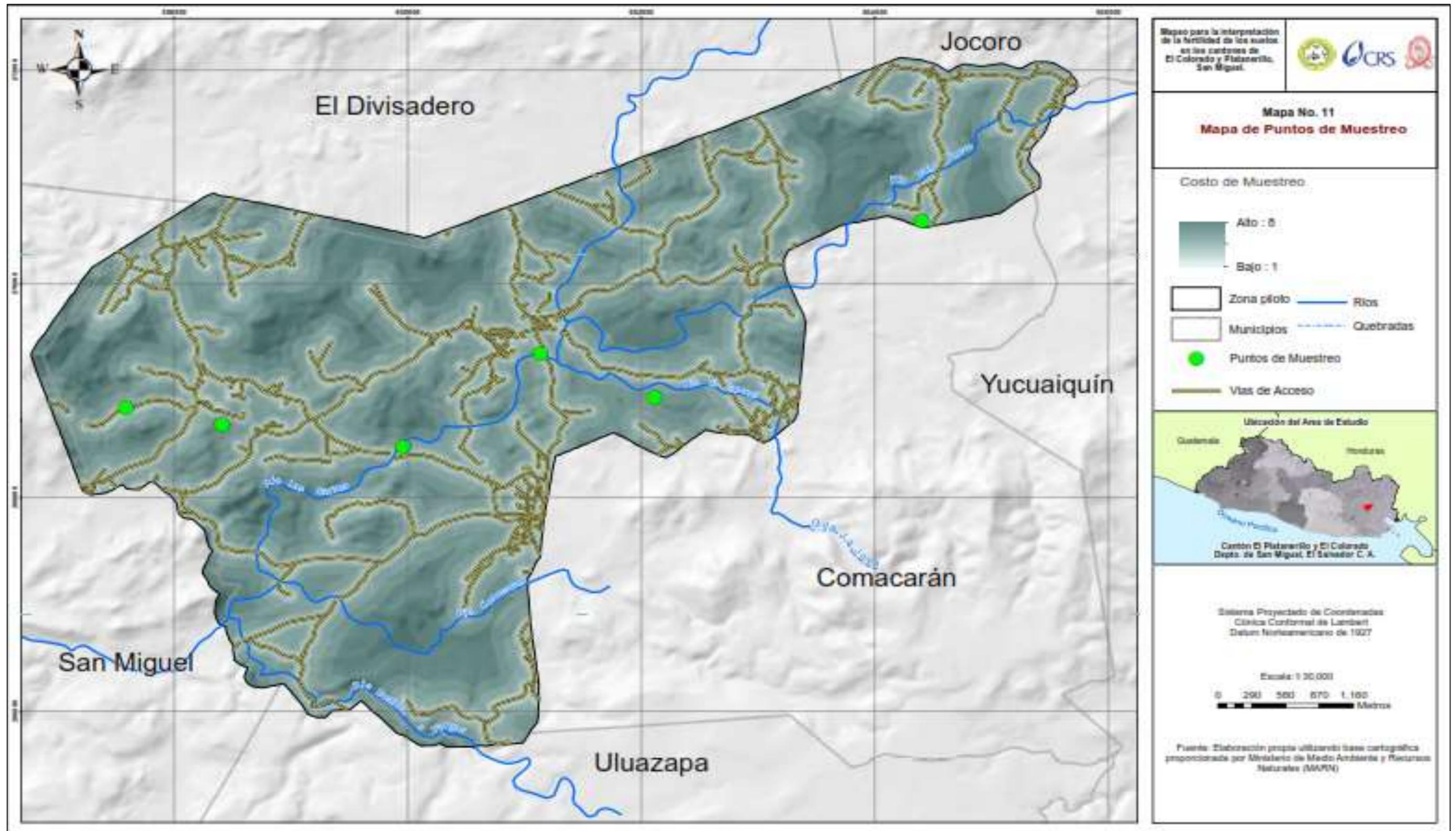


Figura A-24. Mapa de Clases Genéricas

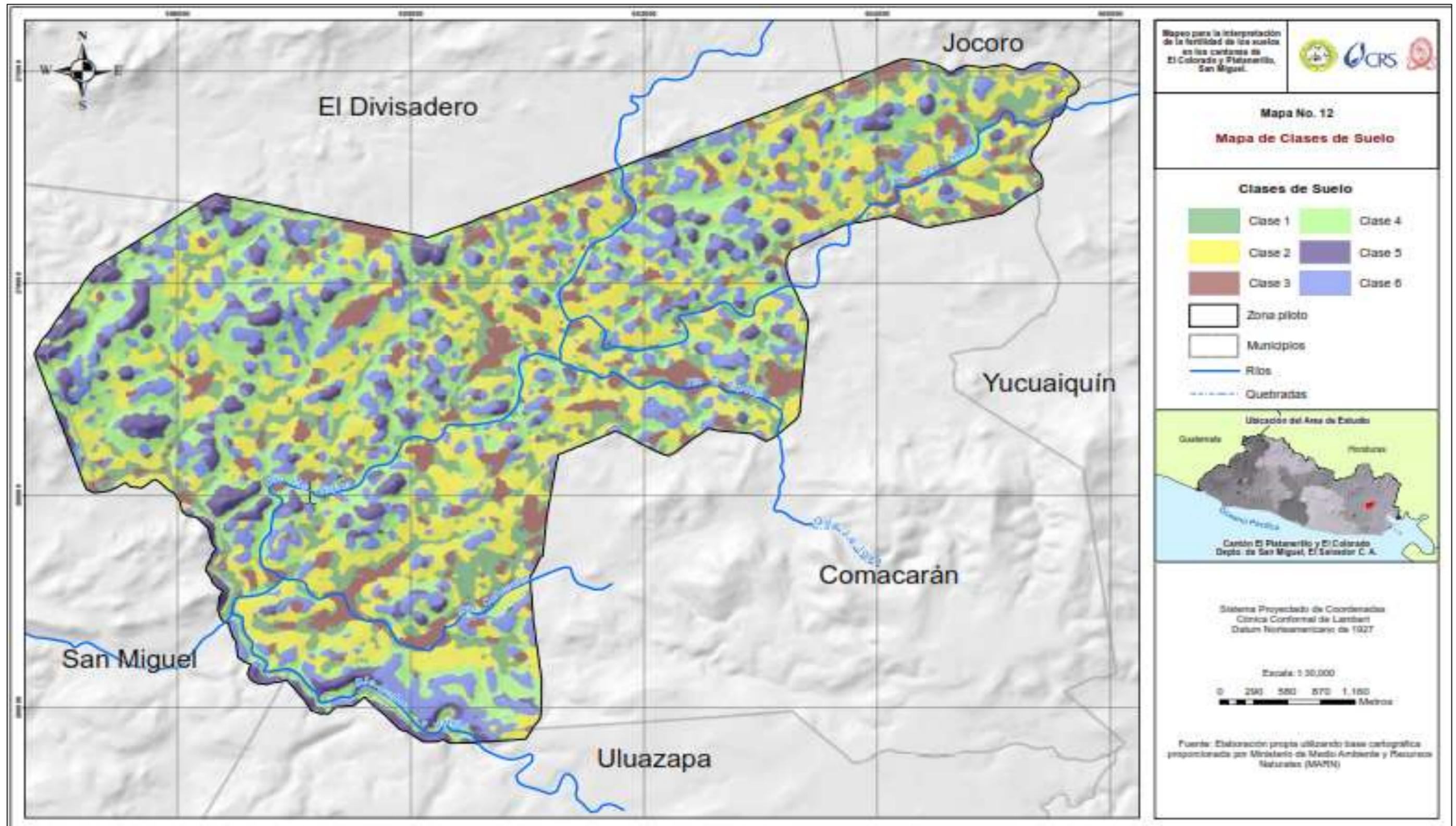


Figura A-25, Mapa de Profundidad Efectiva

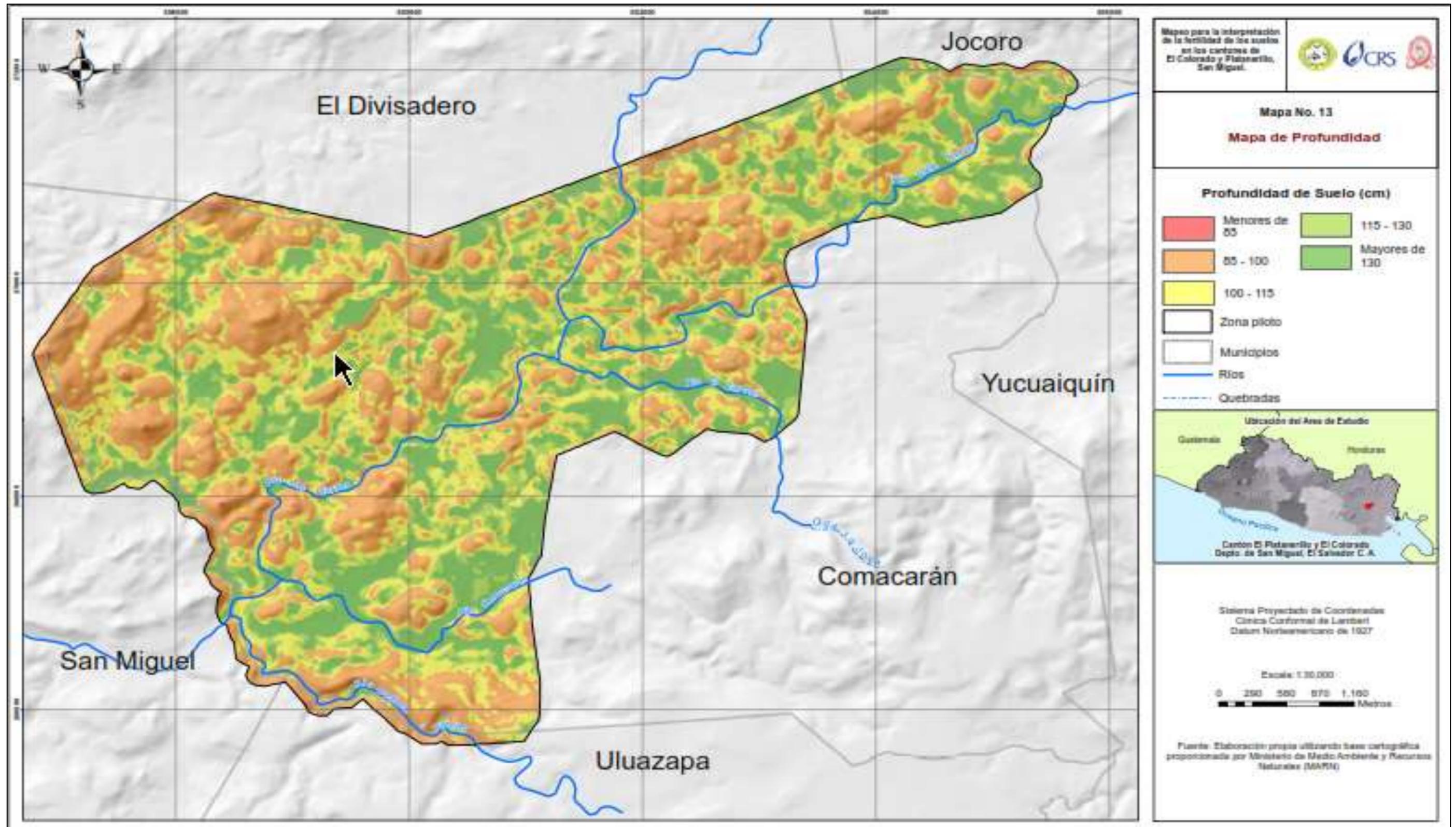


Figura A-26. Mapa Densidad Aparente

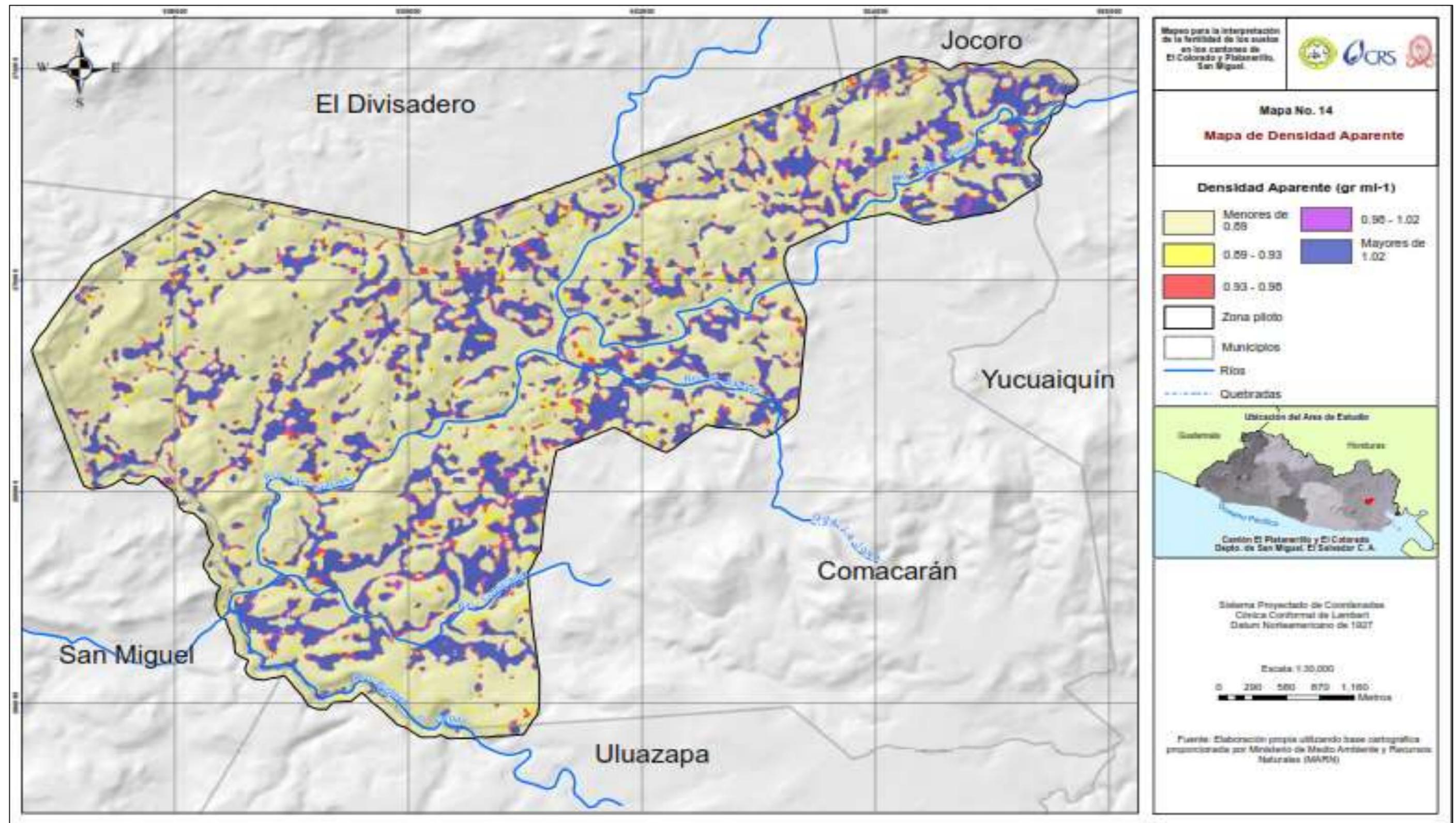


Figura A-27. Mapa de Texturas del Suelo

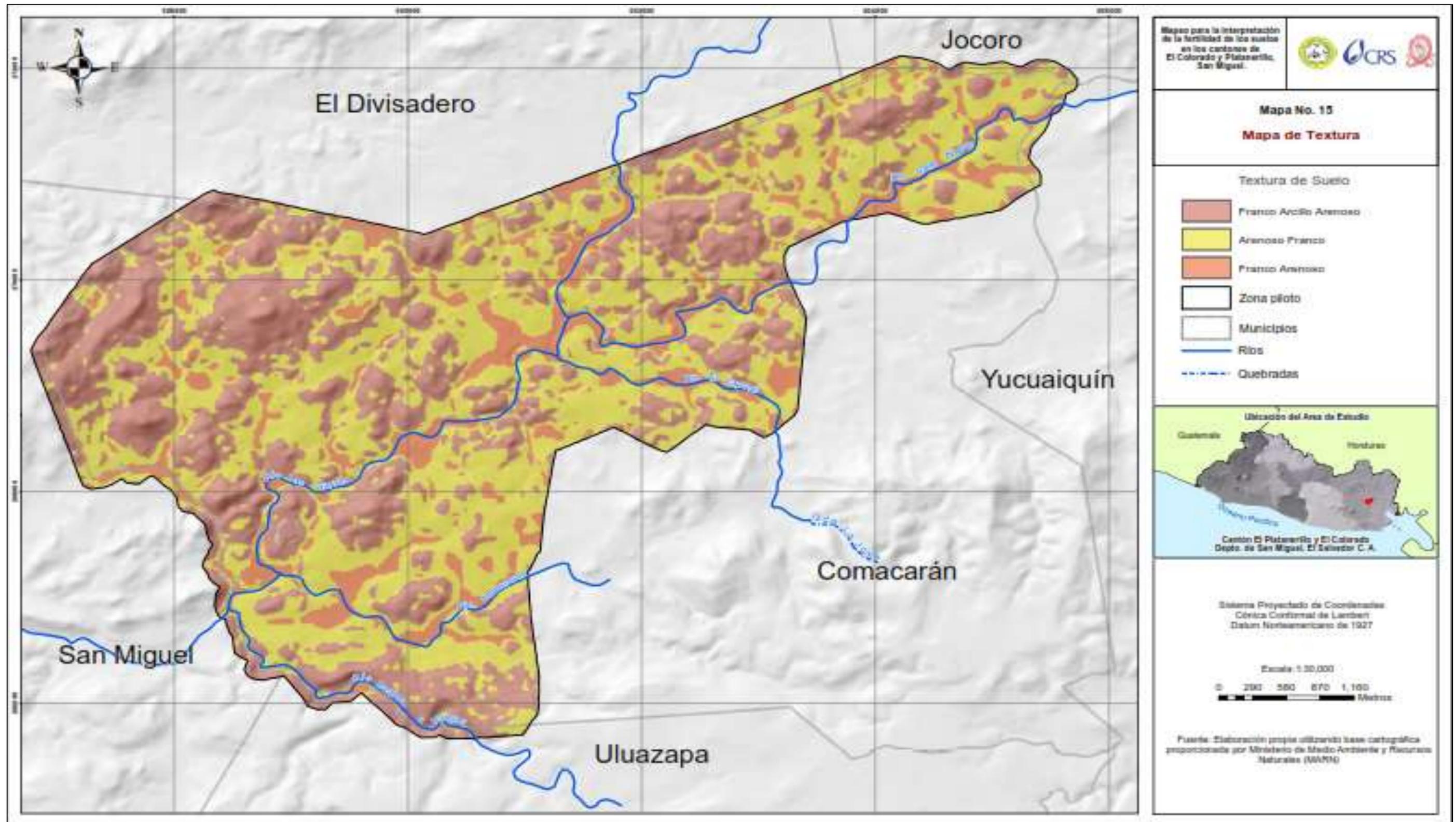


Figura A-28. Mapa de Capacidad de Intercambio Catiónico.

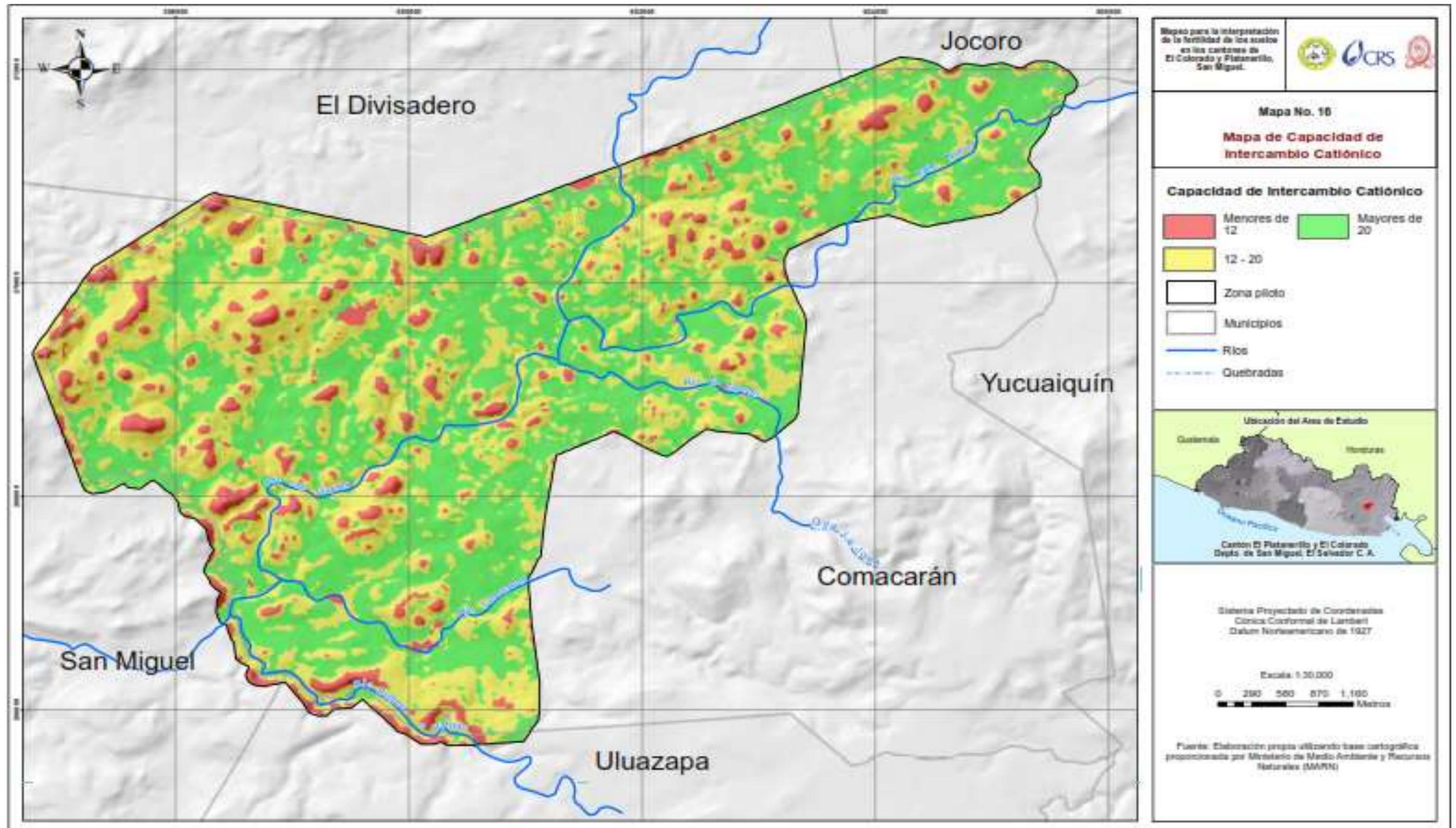


Figura A-29. Mapa de Acidez del Suelo (pH).

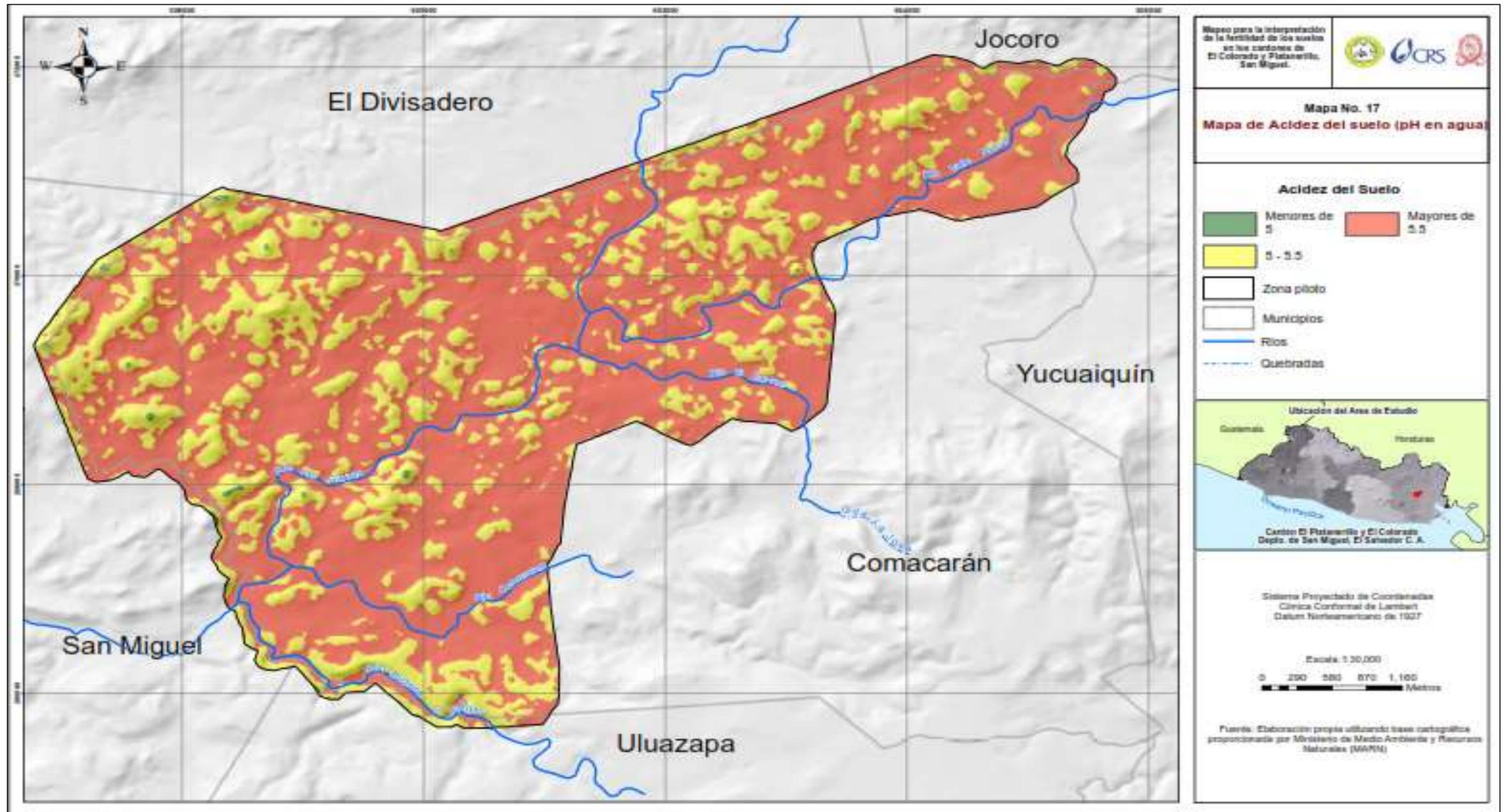


Figura A-30. Mapa de Materia Orgánica del suelo

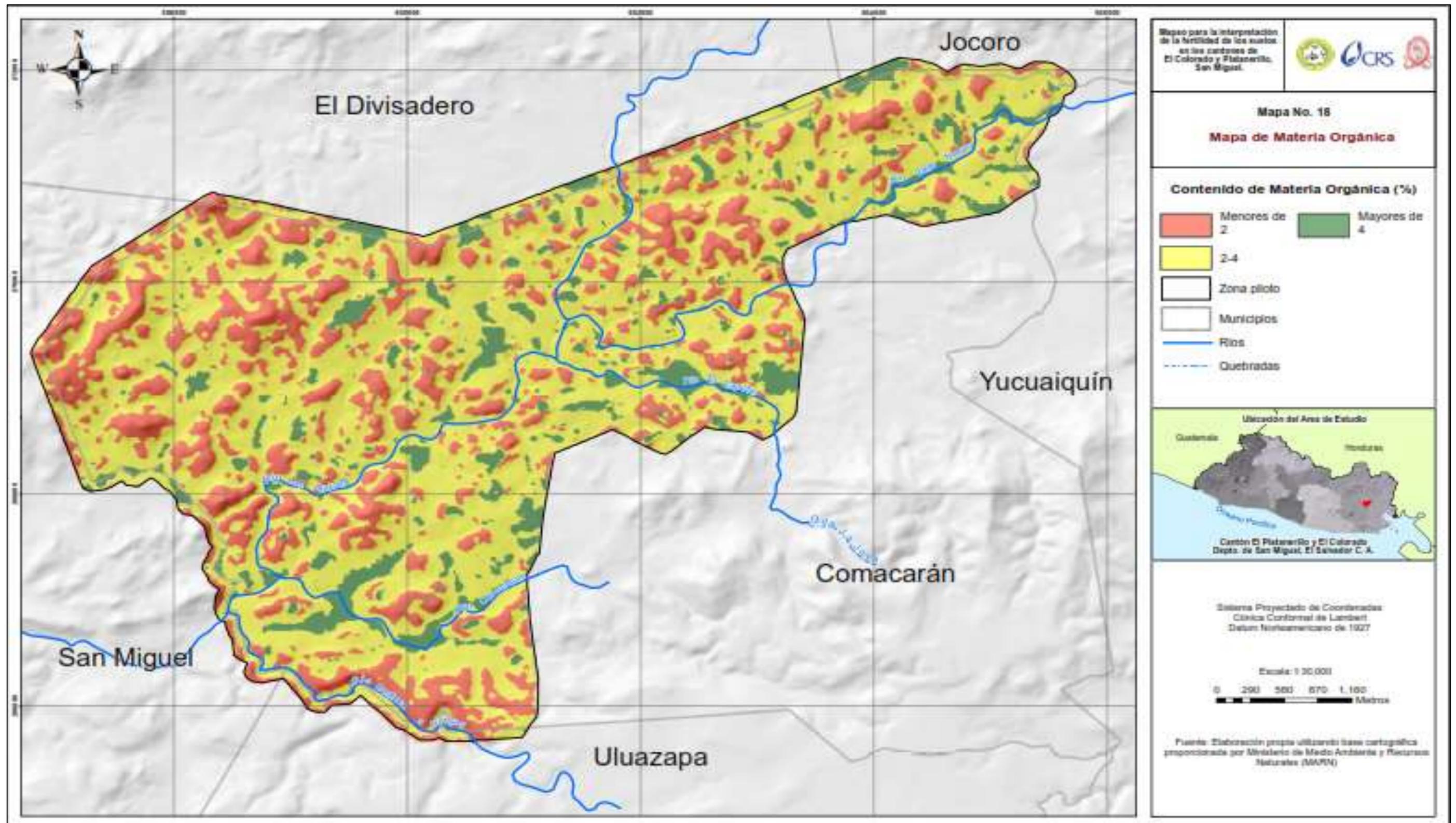


Figura A-31. Mapa de Fósforo

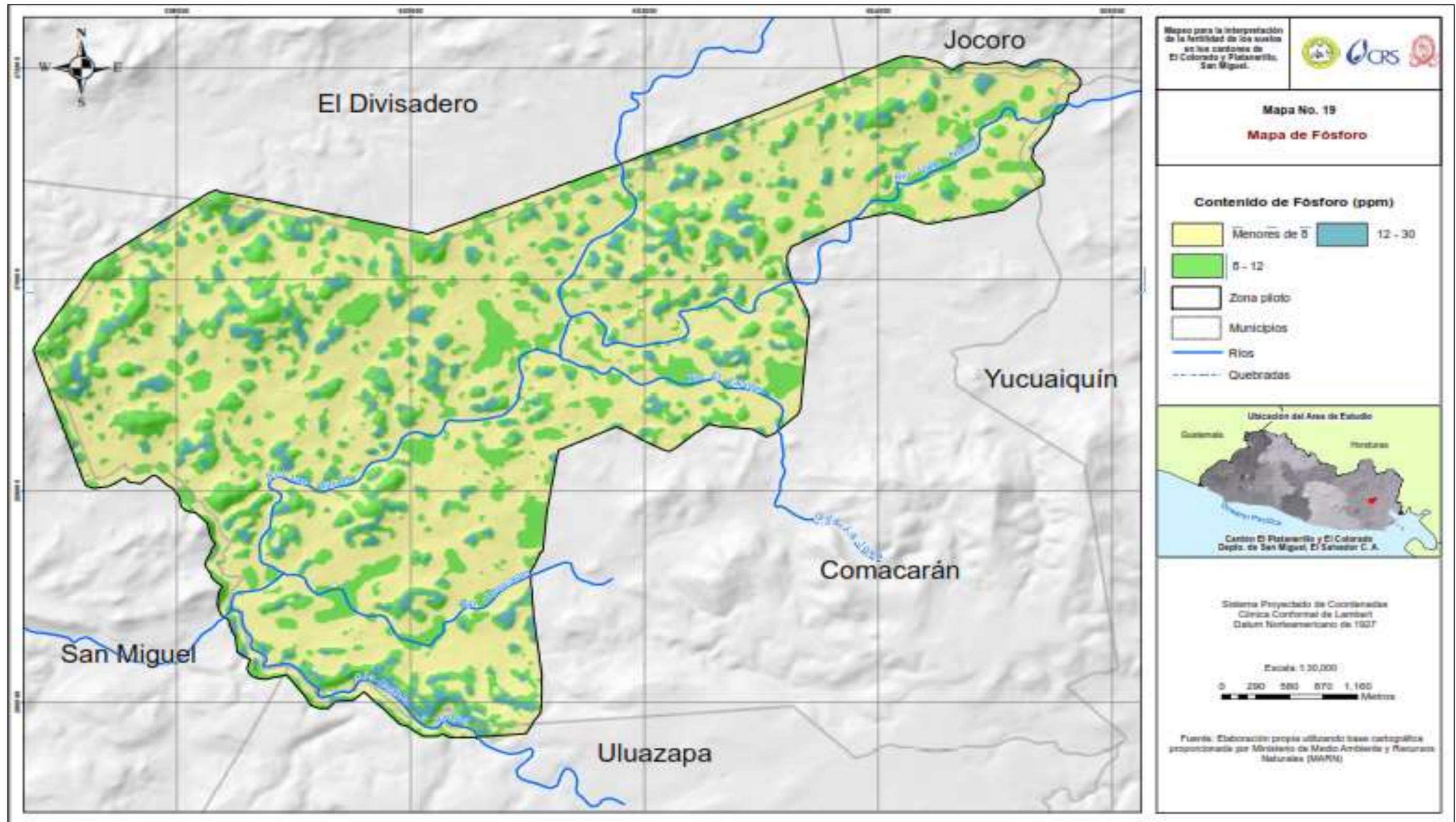


Figura A-32. Mapa de Potasio.

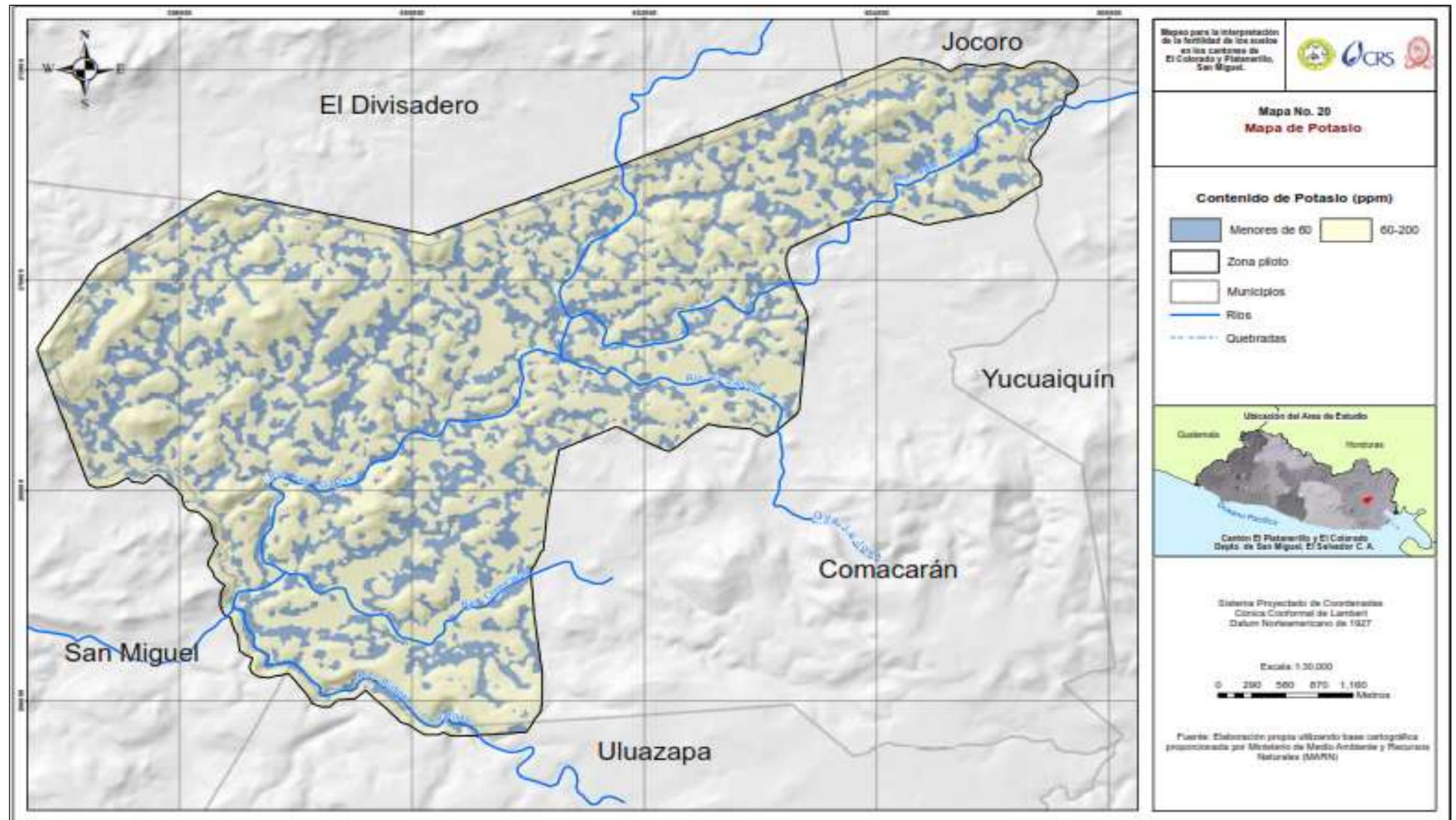


Figura A-33. Mapa de Calcio

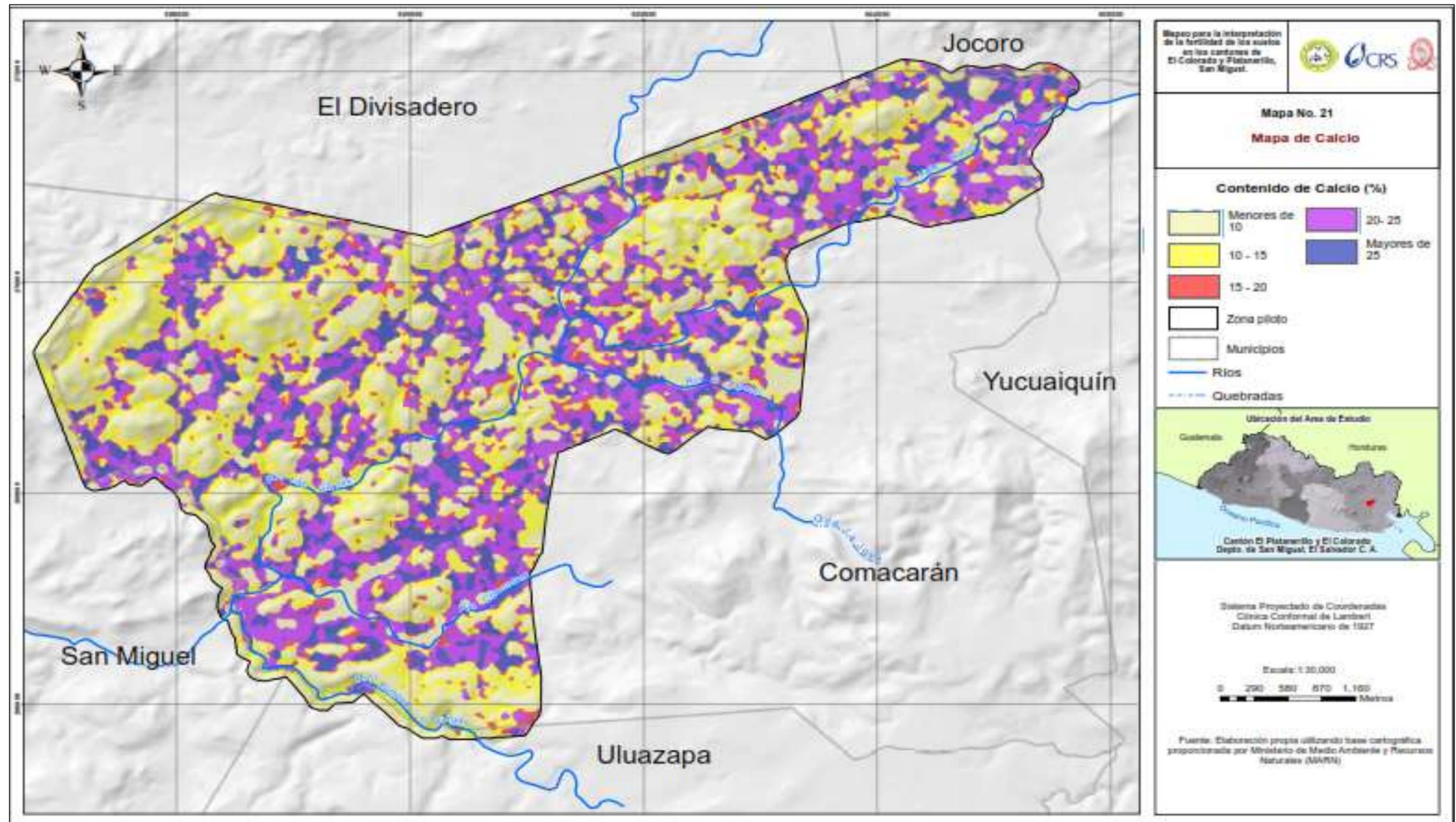


Figura A-34. Mapa de Magnesio.

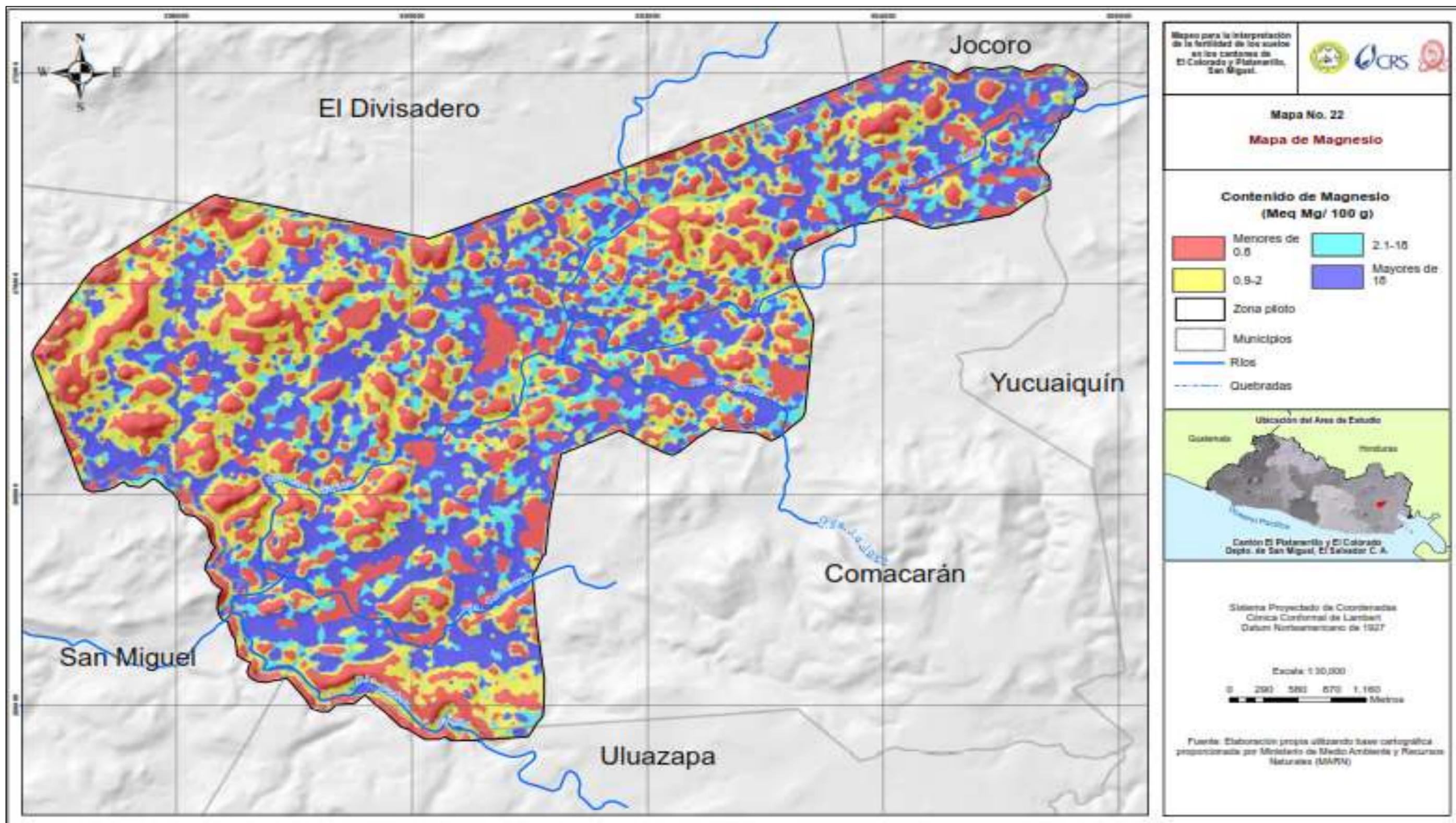


Figura A-35. Mapa de Zinc.



Figura A-36. Mapa de Cobre

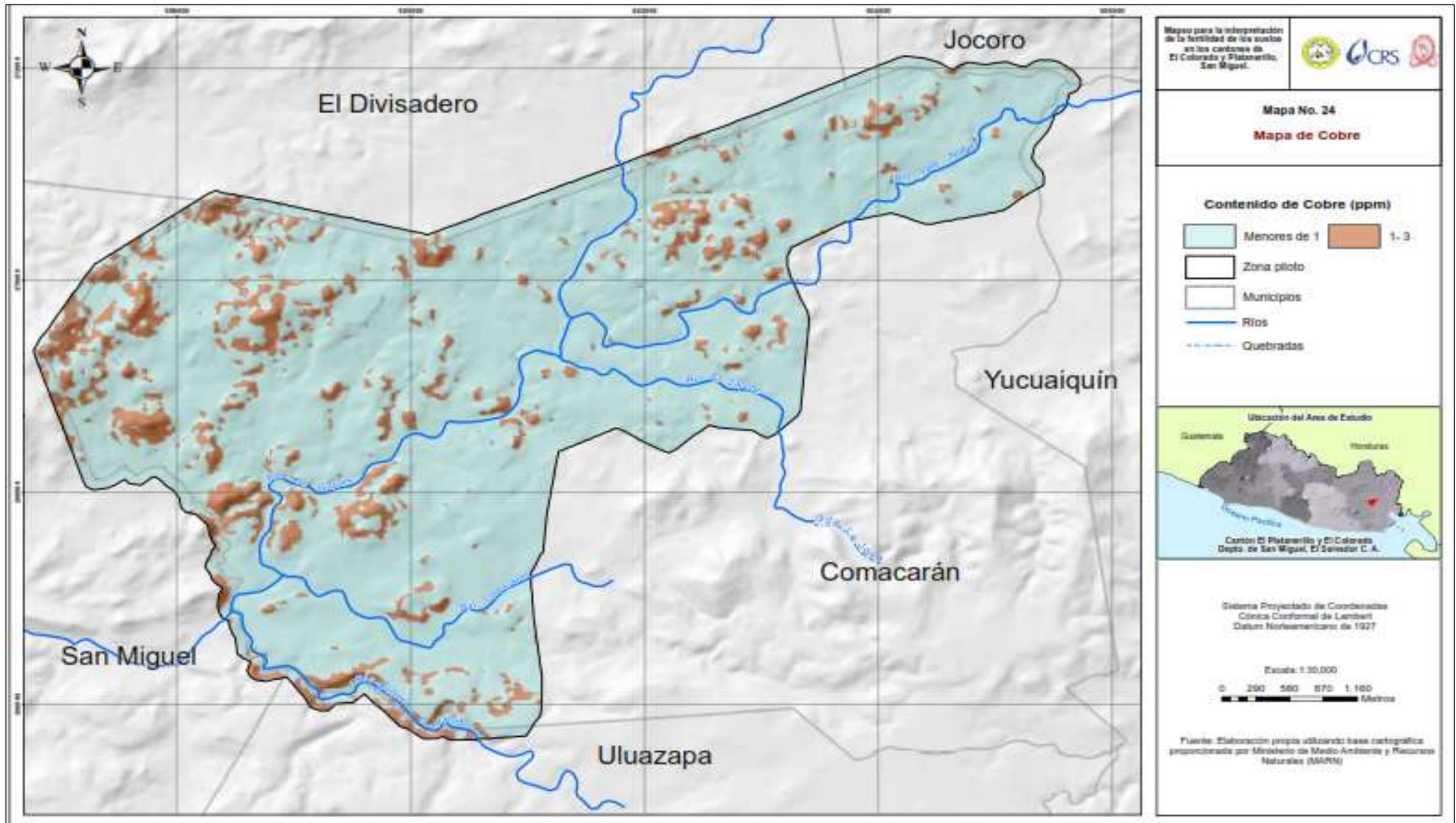


Figura A-37. Mapa de Hierro.

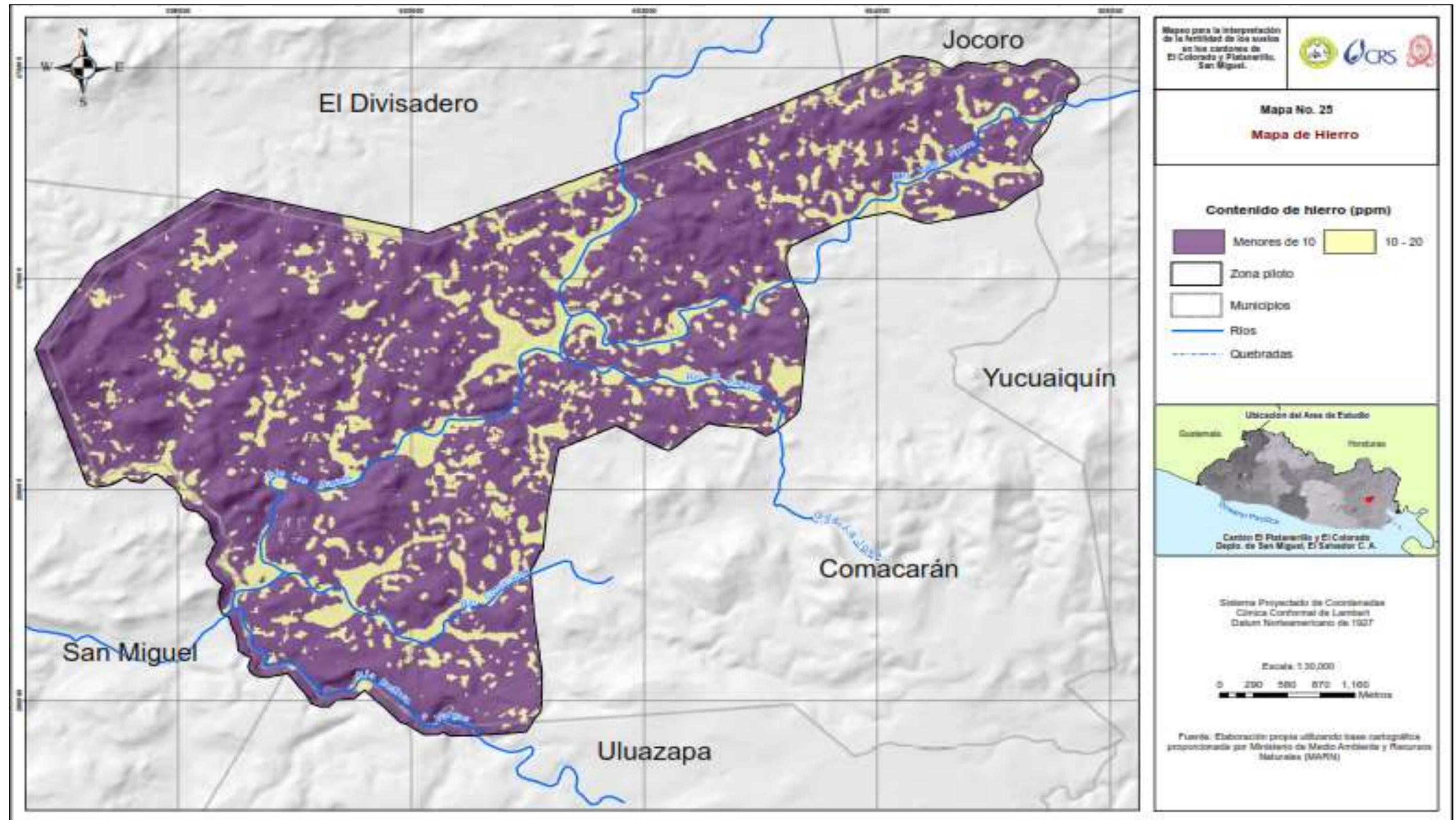


Figura A-38. Mapa de Manganeso.

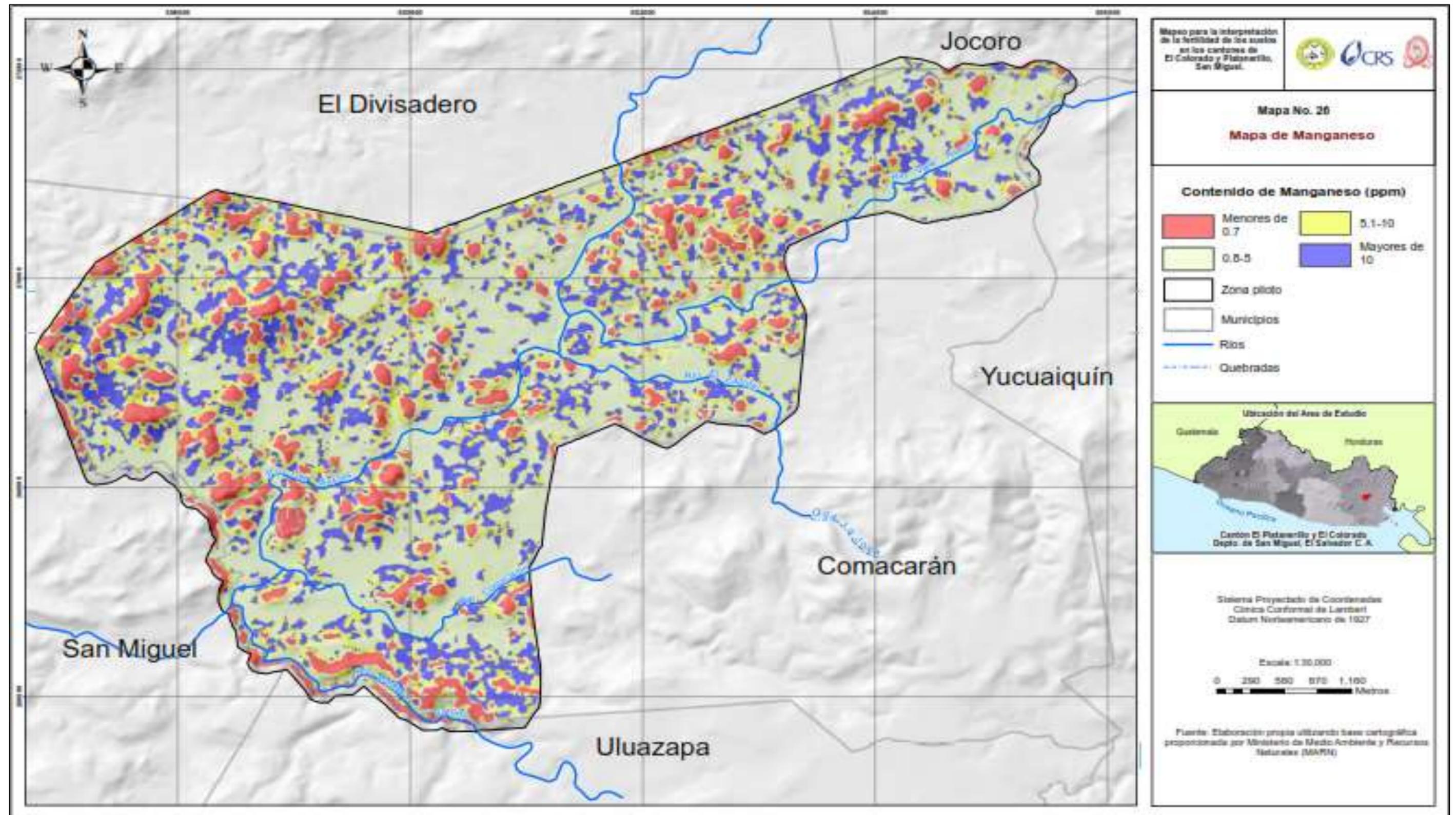


Figura A-39 Mapa de Rendimiento

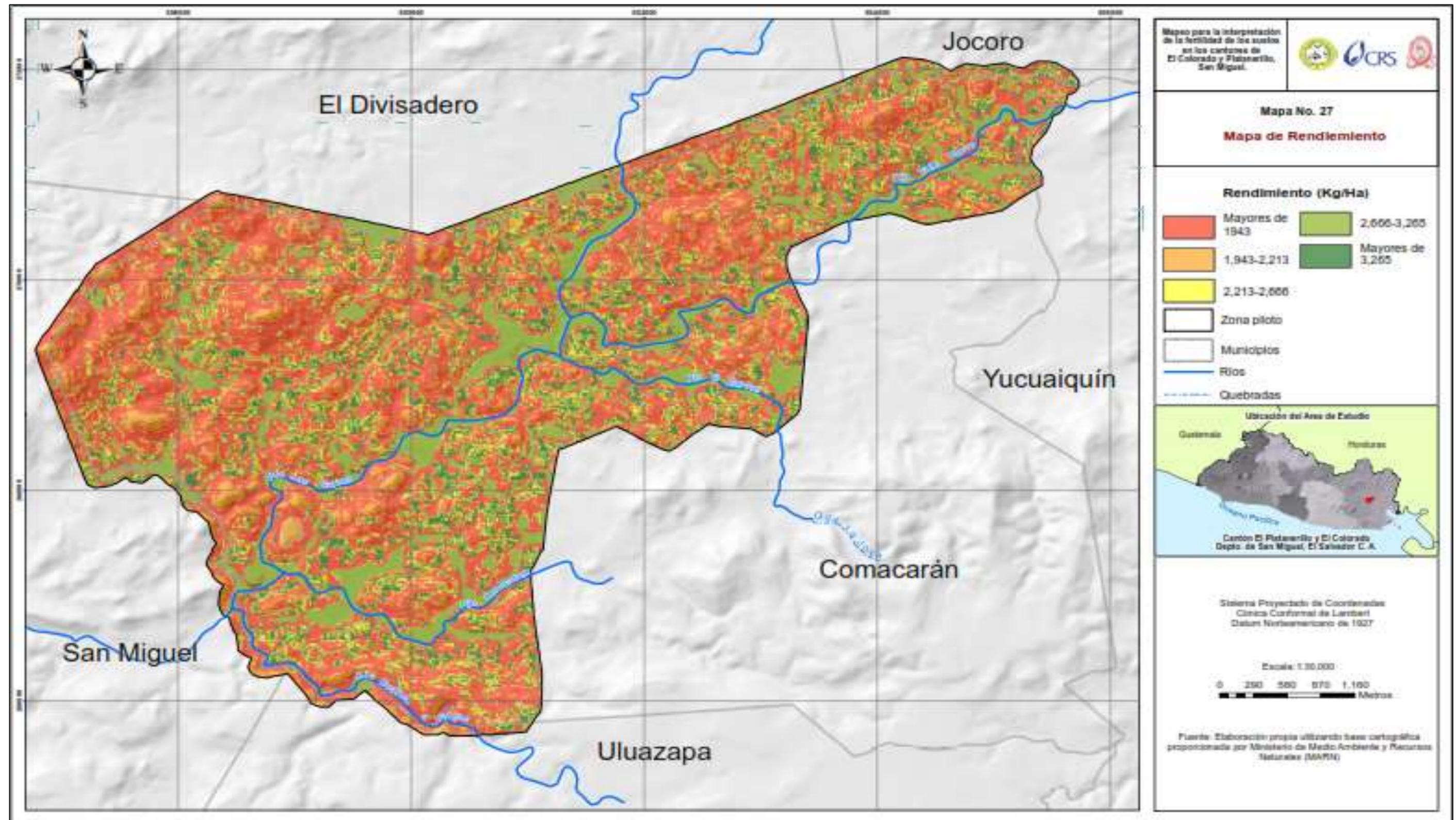


Figura A-40. Mapa de Fertilidad.

