

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“MAPEO Y ANÁLISIS DE CALIDAD FÍSICA Y QUÍMICA DE LOS
SUELOS AGRÍCOLAS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL
AGRARIA LA MOLINA APLICANDO HERRAMIENTAS SIG”**

Presentado por:

Kevin Fernando Cruz Fajardo

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE:
INGENIERO AGRÍCOLA

Lima – Perú

2019

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a **Dios, mis padres, mis abuelos, mi hermano, mi pareja y mi hija** que fueron en todo momento el motivo por el cual me esforcé al máximo, y siempre tuvieron fé en mí a pesar de las adversidades.

“Hay dos formas de ver la vida: una es creer que no existen los milagros, otra es creer que todo es un milagro”- Albert Einstein.

AGRADECIMIENTO

Principalmente, a **Dios**, por haberme apoyado siempre en cada pequeño paso, en cada momento de temor y desconcierto, por ser siempre la luz que me guió.

A mi padre **Fernando Cruz Burga**, por haberme presionado durante toda mi carrera induciéndome el miedo para lograrlo.

A mi madre **Rossana Fajardo Torres**, por su cariño y apoyo incondicional quitándome el miedo fundido por mi padre, y soportarme a cada momento.

A mi hermano **Giorgio Cruz Fajardo**, que siempre dudo de que lo lograría, y me generó cierta rivalidad al lograr mis metas, gracias hermano.

A mi novia **Wendy Salvatierra Castillo**, que durante estos 6 años has sido mi compañera, y que con un carácter demasiado renegón me ayudó a definir metas clara, para poder lograr metas colectivas, gracias por soportar mi carácter, siéntete orgullosa, si se pudo.

A mi hija **María Fernanda Cruz Salvatierra**, que durante toda tu vida me ayudaste a mejorar, a querer crecer para darte lo mejor, para que cuando tengas la edad de leer esto puedas sentirte orgullosa de tu padre, que ciertamente te tuvo a una edad muy temprano, pero siempre te amo, te ama y te amará, y todo logro mio se reflejará en ti, porque tu siempre has sido mi mas grande apoyo, eres mi y serás mi creación mas perfecta.

A mi asesor **Ingeniero José Bernardino Arapa Quispe**, por sus sabios conocimientos de la carrera y su apoyo para culminar este gran trabajo. Me honra haberlo realizado con usted.

Al **Doctor Sady García Bendezu**, por haberme confiado a mi un trabajo dentro del LASPAF que permitió solventar mis gastos, que se volvió un padre en la universidad, gracias Doc.

A mis amigos **Ingeniero Juan Guerrero Lázaro y Enrique Yman Litano**, gracias por cada conversación, por cada consejo o broma, ustedes calmaron todo el estrés que llevaba en mis hombros al ingresar al trabajo he hicieron de el mi segunda casa, gracias amigos.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LA LITERATURA	4
2.1. El suelo.....	4
2.2. Muestreo de Suelos	4
2.3. Calidad del suelo.....	6
2.4. Indicadores de la calidad del suelo.....	7
2.5. Indicadores físicos	8
2.5.1. Textura del suelo.....	9
2.5.2. Infiltración	11
2.5.3. Densidad aparente.....	11
2.5.4. Capacidad de retención de agua.....	11
2.6. Indicadores químicos.....	12
2.6.1. Materia orgánica	12
2.6.2. pH.....	13
2.6.3. P y K extraíbles.....	14
2.6.4. Conductividad eléctrica (CE.).....	15
2.6.5. Capacidad de intercambio catiónico	16
2.7. Sistemas de Información Geográfica	16
2.7.1. Cartografía y SIG.....	17
2.7.2. Elementos de un SIG	17
2.7.3. Funciones de los SIG	20
2.7.4. Bases de datos (BD).....	23

2.7.5. Análisis espacial - Geoprocesamiento	27
III. MATERIALES Y METODOLOGÍA	29
3.1 ÁMBITO DE ESTUDIO	29
3.1.2. Principales características de la zona de estudio.....	31
3.2 MATERIALES Y EQUIPOS	32
3.2.1. Materiales y equipos de campo.....	32
3.2.2. Materiales y Equipos de Laboratorio.....	32
3.2.3. Materiales y equipos de gabinete.....	35
3.3. METODOLOGÍA.....	35
3.3.1. Trabajo de pre-campo	39
3.3.2. Trabajo de campo.....	39
3.3.3. Trabajo de Gabinete.....	40
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
4.1. Información temática generada para el modelo de calidad física de suelos de la UNALM.....	55
4.1.1. Variable temática de contenido de arcilla.....	55
4.1.2. Variable temática de contenido de limo	55
4.1.3. Variable temática de contenido de arena	56
4.1.4. Variable temática de Velocidad de Infiltración	56
4.1.5. Variable temática de Capacidad de retención de agua disponible.....	57
4.1.6. Variable temática Densidad Aparente	57
4.1.7. Modelo Geoespacial de la calidad física de los suelos de la UNALM.....	58
4.2. Información temática generada para el modelo de calidad química de suelos de la universidad nacional agraria la molina	60
4.2.1. Variable temática de pH	60
4.2.2. Variable temática de C.E.	60
4.2.3. Variable temática de M.O.	61
4.2.4. Variable temática de P	61
4.2.5. Variable temática de K	62

4.2.6. Variable temática de capacidad de intercambio catiónico (CIC).....	62
4.2.7. Modelo Geoespacial de la calidad química de los suelos de la UNALM.....	63
4.2.8. Modelo Geoespacial de la Calidad Global de los suelos de la UNALM.....	66
V. CONCLUSIONES	68
VI. RECOMENDACIONES.....	69

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Conjunto de indicadores físicos propuesto para monitorear los cambios que ocurren en el suelo.....	8
Cuadro 2: Clasificación de suelos según su contenido de arcilla y capacidad de intercambio catiónico	10
Cuadro 3. Características más importantes de los suelos arcillosos, francos y arenosos. ...	10
Cuadro 4. Conjunto de indicadores químicos propuesto para monitorear los cambios que ocurren en el suelo.....	12
Cuadro 5. Características más importantes de los suelos arcillosos, francos y arenosos. ...	13
Cuadro 6. Clasificación de suelos según el contenido de fósforo extractable (ppm) según la textura de suelo.....	14
Cuadro 7. Clasificación de suelos según el contenido de potasio extractable (ppm) según la textura de suelo.....	15
Cuadro 8. Clasificación del suelo según su conductividad eléctrica.....	16
Cuadro 9. Datos meteorológicos obtenidos durante el desarrollo de la fase campo.	31
Cuadro 10. Coordenadas de los puntos donde se hicieron calicatas	37
Cuadro 11. Características y métodos empleados en el análisis de los suelos.	40
Cuadro 12. Indicadores físicos y químicos del suelo.	43
Cuadro 13. Escala de valoración para la variable temática de arcilla	46
Cuadro 14. Escala de valoración para la variable temática de limo	46
Cuadro 15. Escala de valoración para la variable temática de arena.....	47
Cuadro 16. Escala de valoración para la variable temática de velocidad de infiltración	47
Cuadro 17. Escala de valoración para la variable temática de la densidad aparente.....	47
Cuadro 18. Escala de valoración para la variable temática de la capacidad de retención de agua disponible.....	48
Cuadro 19. Grado de participación de las variables físicas en la calidad.....	49
Cuadro 20. Escala de valoración para la variable temática de la materia orgánica.....	50
Cuadro 21. Escala de valoración para la variable temática del pH	51
Cuadro 22. Escala de valoración para la variable temática del P	51

Cuadro 23. Escala de valoración para la variable temática del K	51
Cuadro 24. Escala de valoración para la variable temática de la conductividad eléctrica ..	52
Cuadro 25. Escala de valoración para la variable temática de la capacidad de intercambio catiónico	52
Cuadro 26. Grado de participación de las variables químicas en la calidad	53
Cuadro 27. Clasificación de áreas e índices según el contenido de Arcilla	55
Cuadro 28. Clasificación de áreas e índices según el contenido de limo	56
Cuadro 29. Clasificación de áreas e índices según el contenido de arena.....	56
Cuadro 30. Clasificación de áreas e índices según el contenido de la V.I	56
Cuadro 31. Clasificación de áreas e índices según el contenido de capacidad de retención de agua disponible	57
Cuadro 32. Clasificación de áreas e índices según el contenido de densidad aparente.....	57
Cuadro 33. Índices de calidad de suelos y áreas de incidencia	58
Cuadro 34. Clasificación de áreas e índices según el contenido de pH.....	60
Cuadro 35. Clasificación de áreas e índices según el contenido de C.E.	60
Cuadro 36. Clasificación de áreas e índices según el contenido de M.O.....	61
Cuadro 37. Clasificación de áreas e índices según el contenido de P	61
Cuadro 38. Clasificación de áreas e índices según el contenido de K.....	62
Cuadro 39. Clasificación de áreas e índices según el contenido de capacidad de intercambio catiónico	62
Cuadro 40. Índices de calidad de suelos y áreas de incidencia	63
Cuadro 41. Índices de la Calidad Global	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Elementos básicos que componen el SIG.	17
Figura 2: Relación de los elementos SIG.	19
Figura 3: Almacenamiento de datos.	21
Figura 4: Sobreposición de capas.	22
Figura 5: Relación entre los modelos lógicos y conceptuales de datos.....	25
Figura 6: Proceso de análisis espacial	27
Figura 7: Mapa de ubicación del área de estudio de la UNALM.	30
Figura 8. Ubicación de calicatas en la UNALM	35
Figura 9. Ubicación de calicatas en la UNALM	36
Figura 10: Modelo conceptual de la calidad del suelo	44
Figura 11: Modelo geoespacial de la calidad física de la UNALM	45
Figura 12: Modelo geoespacial de la calidad química de los suelos de la UNALM.....	50
Figura 13: Modelo geoespacial de calidad global	54
Figura 14. Mapa de calidad física de los campos de la UNALM.....	59
Figura 15: Modelo de calidad química del suelo.....	65
Figura 16: Mapa de clasificación de calidad global	67

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Mapa de los Programas donde se realizaron las calicatas	76
Anexo 2. Mapa de la calidad física de los campos agrícolas de la UNALM	77
Anexo 3: Mapa de la calidad química de los campos agrícolas de la UNALM.....	78
Anexo 4: Mapa de la calidad global de los campos agrícolas de la UNALM.....	79
Anexo 5: Mapa de contenido de Arcilla.....	80
Anexo 6: Mapa de contenido de Limo	81
Anexo 7: Mapa de contenido de Arena	82
Anexo 8: Mapa de Velocidad de Infiltración	83
Anexo 9: Mapa de Capacidad de retención de agua disponible	84
Anexo 10: Mapa de contenido de la Densidad Aparente	85
Anexo 11: Mapa de contenido de pH.....	86
Anexo 12: Mapa de contenido de Conductividad Eléctrica	87
Anexo 13: Mapa de contenido de Materia Orgánica.....	88
Anexo 14: Mapa de contenido de P.....	89
Anexo 15: Mapa de contenido de K ppm.....	90
Anexo 16: Mapa de la Capacidad de Intercambio catiónico	91

RESUMEN

En la actualidad el concepto de calidad de suelos tiene muchas definiciones, considerando para este proyecto el de la capacidad del suelo para funcionar dentro de un ecosistema natural o antrópico. El presente trabajo tiene como objetivo evaluar y caracterizar la calidad física y química del suelo en los campos agrícolas de la Universidad Nacional Agraria la Molina - UNALM, a partir de los principales parámetros analíticos y su representación mediante herramientas del Sistema de información geográfico dentro de las cuales se hallan parámetros físicos (clasificación textural, densidad aparente, velocidad de infiltración y capacidad de retención de agua disponible) y químicos (pH, conductividad eléctrica, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, K y P disponibles). los cuales son fundamentales para un estudio de suelo donde se indica y se determina sus usos a nivel agrícola. El generar a partir del estudio una base de datos donde cada uno de estos parámetros se normalizó para ser un indicador permitió la obtención de mapas en base al modelamiento geoespacial de las variables físicas y químicas, de las cuales a su vez según el grado de correlación de estos dos modelos se determinó un grado de influencia de 50 por ciento de cada uno, lo que dio como resultado el modelo geoespacial de calidad global de los campos agrícolas de la UNALM conociendo así en qué áreas existen suelos con calidades desde muy baja hasta muy alta, siendo así de gran utilidad, ya que permitirá saber las aptitudes del suelo, el tipo de riego a aplicar, y que cultivo es a fin a este. Concluyendo que la identificación de la calidad global en la UNALM, producto de la integración de las variables físicas y químicas, permitió determinar calidad alta (5.69 %), y las zonas de una moderada calidad (94.31 %), comprendiéndose así el 100% del área de los campos agrícolas de la UNALM

Palabras clave: Calidad de suelos, campos agrícolas, parámetros, indicador, modelo geoespacial.

ABSTRACT

At present the concept of soil quality has many definitions, considering for this project the capacity of the soil to function within a natural or anthropic ecosystem. The objective of this work is to evaluate and characterize the physical and chemical quality of the soil in the agricultural fields of the National Agrarian University of La Molina - UNALM, based on the main analytical parameters and their representation using Geographic Information System tools within the which are physical parameters (textural classification, bulk density, infiltration speed and water retention capacity available) and chemicals (pH, electrical conductivity, content of organic matter, capacity of cation exchange, K and P available). which are fundamental for a soil study where it is indicated and its uses at agricultural level are determined. The generation from the study of a database where each of these parameters was normalized to be an indicator allowed the obtaining of maps based on the geospatial modeling of the physical and chemical variables, of which in turn according to the degree of correlation of these two models a degree of influence of 50 percent of each was determined, which resulted in the global quality geospatial model of agricultural fields of the UNALM knowing in what areas there are soils with qualities from very low to very high high, being thus of great utility, since it will allow to know the aptitudes of the ground, the type of irrigation to apply, and what culture is in order to this. Concluding that the identification of the global quality in the UNALM, product of the integration of the physical and chemical variables, allowed to determine high quality (5.69%), and the zones of a moderate quality (94.31%), thus comprising 100% of the area of the agricultural fields of the UNALM

Keywords: Soil quality, agricultural fields, parameters, indicator, geospatial model.

I. INTRODUCCIÓN

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. En las últimas décadas y con el auge de las tecnologías de la información y la comunicación, se ha producido una serie de mapas digitales, incluidos en una base de datos georreferenciada que contiene toda aquella información referente a suelos (IICA, 2016).

IICA (2016), define que los mapas de suelos en base a su calidad son recursos mundialmente necesarios, con distintos fines como en estudios agrícolas, presentando cierta escasez pues no hay inversión en investigaciones de este tipo y ante la problemática de escasez de mapas con usos específicos del suelo, es necesario conocer lo que representan y sus beneficios al ser estudiados y modelados, siendo uno de los bienes naturales más importantes y degradados a nivel mundial, a su vez crucial para planificaciones de ordenamiento territorial. El mapeo de suelos mediante modelamiento de áreas de caracterización textural del mismo, favorecen considerablemente a un superior empleo y disposición para la siembra de cultivos, mejor tipo de riego; determinando así la capacidad de uso mayor; teniendo en cuenta características físicas (densidad aparente, densidad real, CC, PM, Humedad equivalente) y químicas del suelo (pH, CE, CIC, MO).

La característica más importante de la realización de un inventario del suelo como recurso, es determinar el patrón de cobertura de cada suelo (Instituto Nacional de Ecología, 2007) para así caracterizarlo y presentarlo de una manera entendible a todos sus usuarios, para poder realizar predicciones numerosas, precisas y útiles para propósitos específicos, que permitan el uso adecuado del suelo según la caracterización de estos.

Por calidad de suelo nos referiremos a la capacidad del suelo para funcionar dentro de un ecosistema natural o antrópico; para sostener o mejorar la productividad animal o vegetal; para mantener y controlar la calidad ambiental, y para soportar la habitabilidad y salud del hombre y se evalúa midiendo un grupo mínimo de datos que corresponden a sus propiedades químicas y físicas (Doran & Parkin, 1994), dentro de las cuales se hallan parámetros que permiten determinar lo mencionado; sea: pH, conductividad eléctrica, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, clasificación textural, densidad aparente, densidad real, entre otras pruebas; son fundamentales para un estudio de suelo donde se indica y se determina sus usos a nivel agrícola, el tener datos y representarlos en un mapa brindará de manera exacta conocer e identificar en qué puntos existen suelos con características ya estudiadas, siendo así de gran utilidad, ya que permitirá saber el tipo de riego a aplicar, y que cultivo es a fin a este. Los indicadores de la calidad son considerados una herramienta rápida en la toma de decisiones, ya que son sensibles al manejo en el corto, mediano y largo plazos, en dependencia de la propiedad y del suelo que se evalúe. Por ejemplo, en el caso de la textura, si se quiere percibir cambios se necesitan 1 000 años (Arnold et al., 1990); sin embargo, estos en la tasa de infiltración se perciben en menos de un año (Arshad y Coen, 1992).

La Universidad Nacional Agraria La Molina, que cuenta con área 220 ha, es una casa de estudios de 6424 estudiantes de diversas carreras comprendidas entre estas las de agronomía y la agrícola, las cuales desarrollan muy importantes cursos prácticos, y se hace necesario y de gran utilidad identificar los propios suelos de nuestra universidad, para poder facilitar el uso adecuado del suelo y de esta manera generar una enseñanza más didáctica teniendo en consideración un material de referencia, por lo tanto es posible realizar mapas de suelos de la UNALM que favorezca el desarrollo de actividades académicas con mayor facilidad. (UNALM, 2011).

El presente trabajo está referido a la obtención de un mapa de calidad de suelos, considerando sus principales parámetros físicos y químicos de los campos agrícolas de la Universidad Nacional Agraria la Molina - UNALM, empleando herramientas SIG, debido a la escasez de mapas con una distribución detallada de las unidades de suelo, esto representa una limitante frecuente para la toma de decisiones, siendo esta una problemática a nivel mundial, nacional y local. Ante tal incierto se establecieron los siguientes objetivos.

Objetivo principal:

- Evaluar y caracterizar la calidad física y química del suelo en los campos agrícolas de la Universidad Nacional Agraria la Molina - UNALM, a partir de los principales parámetros analíticos y su representación mediante herramientas del Sistema de información geográfica (SIG).

Objetivos específicos:

- Estructurar, organizar y planificar la ubicación y ejecución de la apertura de calicatas, muestreo de suelos y análisis en laboratorio de las muestras, de acuerdo a la información cartográfica y de suelos existente de los campos agrícolas de la UNALM.
- Diseñar e implementar un mapa geoespacial con herramientas SIG de las características y atributos de los suelos de los campos agrícolas, con información cartográfica existente de la Universidad Nacional Agraria la Molina - UNALM.
- Obtener e integrar mediante el modelamiento con herramientas SIG, los mapas de indicadores de los parámetros físicos, químicos y la calidad de suelos de los campos agrícolas de la UNALM.

II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1. El suelo

El suelo se compone por organismos diminutos de vegetales y animales, materia orgánica, minerales, agua y aire. Su formación es muy lenta, debido a la desintegración de rocas superficiales por acciones del viento, temperatura y agua, dando así el origen de una capa delgada. La materia orgánica surge por descomposición de restos vegetales o animales por los microorganismos, y esto se mezcla con el suelo (FAO, 1994).

Desde las zonas erosionadas son arrastrados por viento y agua los minerales provenientes de la roca madre que se deshace lentamente. Existen dos tipos de microorganismos: los que descomponen la materia orgánica liberando así los nutrientes (hongos, bacterias), estos viven dentro del suelo y ayudan a que la materia orgánica sea utilizada nuevamente por las plantas, y los que despedazan la materia orgánica (lombrices e insectos). Las lombrices e insectos forman poros que permiten el almacenamiento del agua, la aireación y el crecimiento de raíces.

En el suelo se multiplican miles de formas de vida, la mayoría invisibles para nuestros ojos. Una hectárea de tierra fértil puede contener más de 300 millones de pequeños invertebrados: insectos, arañas, lombrices y otros animales diminutos. Una cucharada llena de suelo fresco puede encerrar un millón de bacterias, además de cientos de miles de células de levaduras y pequeños hongos (FAO, 1994).

2.2. Muestreo de Suelos

Es de suma importancia conocer cuándo, dónde y cuán profundo debe ser el muestreo, y qué cantidad de muestras hay que tomar, esto va a depender primariamente de las preguntas y problemas que se plantean (James et al., 1982).

El momento del muestreo es importante, pues las propiedades del suelo varían con las estaciones y con las operaciones de manejo, como la labranza. Usualmente, para la evaluación general de la calidad del suelo, se recomienda un muestreo por año de un predio. El muestreo anual permite la detección de cambios a largo plazo en la calidad edáfica. Un buen momento para muestrear es aquel en el que el clima está más estable, y durante el cual el suelo no fue disturbado, tal como después de la cosecha o hacia el final del período de crecimiento (James et al., 1982).

Una consideración importante al determinar dónde muestrear en un lote es la variabilidad del área (Pierzynski et al., 1994). Las propiedades del suelo naturalmente varían a lo largo de un lote y hasta a lo largo de un mismo tipo de suelo. La variabilidad edáfica también es afectada por las operaciones de manejo. Las características generales a considerar dentro del predio son:

- Áreas de surcos y de intersurcos.
- Diferencias en el tipo de suelo.
- Diferencias de manejo.
- Áreas con y sin paso de maquinaria.
- Diferencias en el crecimiento de cultivos.
- Áreas afectadas por salinidad versus áreas no afectadas.
- Diferencias en la pendiente.
- Áreas húmedas versus áreas no húmedas (drenaje).

La cantidad de muestras a tomar dependerá de la versatilidad en el campo. Se recomienda la recolección de un mínimo de tres mediciones de cada una de las combinaciones de tipo de suelo y manejo. En general, cuanto más sea la variabilidad mayor será el número de medidas necesarias para conseguir un valor representativo a la escala de lote. Al medir CE, pH, y nitratos, ocho o nueve muestras de barreno, tomadas a través del lote, podrán ser agrupadas y mezcladas, y dos submuestras, de este material mezclado, analizadas. Al seleccionar muestras a través de un lote, manténgase apartado de áreas manifiestamente diferentes y que no sean representativas del mismo, tales como caminos de tierra y bordes, bandas de fertilización, sectores ubicados a menos de 150 pies (45 m) de un camino mejorado, baches, sectores erosionados, etc. (James et al., 1982).

El Decreto Supremo N° 013-2010-AG que incluye el reglamento actualizado de Levantamiento de Suelos aprobado por el Decreto Supremo N°033-85-AG, que decreta el Reglamento de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor:

“Artículo 18°.- Del nivel detallado o segundo orden

La realización de por los menos (04) calicatas y (10) chequeos por cada 100 hectáreas, distribuidos regularmente.” (SENACE, 2010).

2.3. Calidad del suelo

La calidad del suelo es un concepto equivalente a la salud de este, aunque no siempre son considerados sinónimos, este se refiere a la capacidad del suelo para funcionar dentro de un ecosistema natural o antrópico; para sostener o mejorar la productividad animal o vegetal; para mantener y controlar la calidad ambiental, y para soportar la habitabilidad y salud del hombre y se evalúa midiendo un grupo mínimo de datos que corresponden a sus propiedades químicas y físicas (Doran y Parkin, 1994). La utilidad es la forma de interpretar la calidad del suelo, con un propósito específico en una amplia escala de tiempo (Carter et al., 1997).

La preocupación por la calidad del suelo no es nueva; ha sido un tema amplio a tratar durante varios años para poder considerar en esta, ciertos indicadores que ayuden a establecerla (Lowdermilk, 1953; Doran, et al., 1996; Karlen et al., 1997; Singer y Ewing, 2000). En el pasado, este concepto fue igualado o comprendido con el de productividad agrícola debido a la pequeña diferenciación que se hacía entre lo considerado como tierras y suelo. Tierras de buena calidad eran aquéllas que permitían maximizar la producción y minimizar la erosión. Para clasificarlas se generaron sistemas basados en esas ideas (Doran y Parkin, 1994). Esos incluían términos como tierras agrícolas de primera calidad. El concepto de calidad del suelo ha estado relacionado con el de sostenibilidad. Entre sus acepciones se define como el número de individuos que se pueden mantener en un área dada (Budd, 1992). En cambio, según Buol (1995), el uso del suelo se debe basar en la capacidad de éste para proporcionar elementos esenciales, pues éstos son finitos y limitan, por ende, la productividad.

La calidad del suelo, ha sido percibida de muchas formas desde que este concepto se popularizó en la década anterior, el cual ha sido relacionado con la capacidad del suelo para funcionar. Incluye atributos como fertilidad, productividad potencial, sostenibilidad y calidad ambiental (Karlen et al., 1997). Simultáneamente, la calidad del suelo es un instrumento que sirve para comprender la utilidad y salud de este recurso. A pesar de su importancia, la ciencia del suelo no ha avanzado lo suficiente para definir claramente lo que se entiende por calidad.

La calidad del suelo está determinada por sus componentes físicos, químicos y biológicos (Karlen et al., 1997), de los cuales nos centraremos en los dos primeros a lo largo de este trabajo.

2.4. Indicadores de la calidad del suelo

A pesar de la preocupación creciente acerca de la degradación del suelo, de la disminución en su calidad y de su impacto en el bienestar de la humanidad y el ambiente, aún no hay criterios universales para evaluar los cambios en la calidad del suelo (Arshad y Coen, 1992).

Para hacer operativo este concepto, es preciso contar con variables que puedan servir para evaluar la condición del suelo. Estas variables se conocen como indicadores, pues representan una condición y conllevan información acerca de los cambios o tendencias de esa condición (Dumanski et al., 1998). Según Adriaanse (1993), los indicadores son instrumentos de análisis que permiten simplificar, cuantificar y comunicar fenómenos complejos. Estos indicadores son aplicables en varios campos del conocimiento (economía, salud, recursos naturales, etc). Los indicadores de calidad del suelo pueden ser propiedades físicas, químicas y biológicas, o procesos que ocurren en él (SQI, 1996).

Hünemeyer et al. (1997), establecieron que los indicadores deberían permitir: (a) analizar la situación actual e identificar los puntos críticos con respecto al desarrollo sostenible; (b) analizar los posibles impactos antes de una intervención; (c) monitorear el impacto de las intervenciones antrópicas; y (d) ayudar a determinar si el uso del recurso es sostenible.

Los indicadores de calidad del suelo para que las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo sean consideradas indicadores de calidad deben cubrir las siguientes condiciones (Doran y Parkin, 1994): a) describir los procesos del ecosistema; b) integrar propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo; c) reflejar los atributos de

sostenibilidad que se quieren medir; d) ser sensitivas a variaciones de clima y manejo; e) ser accesibles a muchos usuarios y aplicables a condiciones de campo; f) ser reproducibles; g) ser fáciles de entender; h) ser sensitivas a los cambios en el suelo que ocurren como resultado de la degradación antropogénica; i) y, cuando sea posible, ser componentes de una base de datos del suelo ya existente.

En virtud de que existen muchas propiedades alternativas para evaluar la calidad del suelo, Larson y Pierce (1991), Doran y Parkin (1994) y Seybold et al. (1997); plantearon un conjunto mínimo de propiedades del suelo para ser usadas como indicadores para evaluar los cambios que ocurren en el suelo con respecto al tiempo (Cuadro 1). Los indicadores disponibles para evaluar la calidad de suelo pueden variar de localidad a localidad dependiendo del tipo y uso, función y factores de formación del suelo (Arshad y Coen, 1992).

2.5. Indicadores físicos

Las características físicas del suelo son una parte necesaria en la evaluación de la calidad de este recurso porque no se pueden mejorar fácilmente (Singer y Ewing, 2000). Chen (2000) modificado por Acevedo et al. (2005), refieren que las propiedades físicas que pueden ser utilizadas como indicadores de la calidad del suelo (Cuadro 1) son aquellas que reflejan la manera en que este recurso acepta, retiene y transmite agua a las plantas.

Cuadro 1: Conjunto de indicadores físicos propuesto para monitorear los cambios que ocurren en el suelo

Indicador	relación con las funciones y condiciones del suelo	valores o unidades relevantes
Textura	retención y transporte de agua y minerales; erosión del suelo	% (arena, limo y arcilla); pérdida de sitio o posición del paisaje
Infiltración	potencial de lixiviación, productividad y erosión	cm/ hora
Densidad aparente	porosidad, aireación, erosión y productividad.	g/cm ³
Capacidad de retención de agua	contenido en humedad, transporte, erosión, humedad aprovechable, textura, materia orgánica	% (cm ³ /cm ³); cm de humedad aprovechable/30cm

Fuente: Chen (2000) modificado por Acevedo et al. (2005)

2.5.1. Textura del suelo

Los componentes de la fase sólida del suelo son arena, limo y arcilla, los cuales difieren en su tamaño. La proporción respecto del total en que se encuentren estas partículas determina la textura, característica que se asocia a la capacidad de retención, velocidad de infiltración, curva característica de desorción y conductividad hidráulica. Una de las formas precisas y cuantitativas de determinar este parámetro es mediante el método del hidrómetro de Bouyoucos, considerando el triángulo textural del Sistema Internacional o del USDA (Añó et al., 1997).

Como es sabido las partículas del suelo son pequeñas, los diámetros de los canales que existen entre ellas son muy finos, estos suelos son los de textura fina, y un suelo es de textura grosera cuando estos canales son muy anchos.

- a) Así se tiene las dos clases de suelos ligeros y pesados, lo que tiene que ver con la potencia necesaria para labrar el suelo habiéndose medido por el número de caballos necesarios para arrastrar el arado, número que puede ser de 4 para un suelo pesado y 1 o 2 para un suelo ligero. Esto quiere decir que la fuerza de cohesión del suelo se hace más fuerte conforme disminuye el diámetro de los canalículos que se encuentran entre sus partículas. Todo esto nos da a entender la importancia de la textura del suelo en el uso de la maquinaria agrícola.
- b) También desde el punto de vista de los riegos es importante el conocimiento de la textura, tanto en el avenamiento de los suelos, como en la cantidad de agua que pueden retener en sus poros.

La existencia de un sistema de poros anchos desde la superficie del suelo hasta el manto acuífero, o hasta los tubos de avenamiento, a través de los cuales pueda moverse rápidamente el exceso de agua, es una buena característica para los suelos, pues da un buen avenamiento. Esto se presenta en los suelos de textura media o ligera, mientras que en los suelos pesados el exceso de agua generalmente no sale del suelo en su totalidad, produciendo síntomas de mal drenaje.

Además, es necesario que los suelos presenten espacios entre los poros, que retienen la mayor cantidad posible de agua contra el avenamiento y que sean de fácil penetración por las raíces de las plantas.

En lo que respecta a la textura, los suelos se pueden clasificar en tres grandes grupos atendiendo a su contenido en arcilla y a la capacidad de intercambio catiónico.

Cuadro 2: Clasificación de suelos según su contenido de arcilla y capacidad de intercambio catiónico

Tipo de suelo	Arcilla (%)	C.I.C. media (meq/100g)
Arenoso	< 10	10
Franco	10 - 30	15
Arcilloso	> 30	20

Fuente: Andrades et al. (2014)

Esta propiedad para Andrades et al. (2014), influye en la fertilidad de los suelos al influir en:

- La aireación.
- La capacidad de retención de agua.
- La capacidad de retención de nutrientes.

Cuadro 3. Características más importantes de los suelos arcillosos, francos y arenosos.

Suelo arcilloso (>30% arcilla)	Suelo franco (10-30% arcilla)	Suelo arenoso (<10% arcilla)
Retienen el agua y los nutrientes con fuerza.	Adecuada retención de agua y nutrientes.	Retiene poca humedad y tienden a secarse.
Suelos encharcados y mal aireados.	Buena aireación.	Poseen baja fertilidad y necesitan aportes de
Difícil drenaje y labranza.	Buena penetración de raíces.	elementos orgánicos e
Apelmazamiento, formación de costras.	Se trabajan con poca resistencia.	inorgánicos.
		Buena aireación.

Fuente: Andrades et al. (2014)

2.5.2. Infiltración

Es el proceso mediante el cual el riego o agua de lluvia, ingresa al suelo a través de la superficie hacia sus capas inferiores, en forma vertical y horizontal (Portal Agrícola, 2008).

Conocer la velocidad de infiltración (VI) o cantidad del agua que entra por unidad de superficie y de tiempo. Esto permite, a través de un modelo matemático, llegar a predecir el tiempo (tiempo de riego) que se necesita para reponer una cantidad de agua en el suelo (Infiltración Acumulada, IA) para satisfacer las necesidades de mi cultivo (Portal Agrícola, 2008).

2.5.3. Densidad aparente

La densidad aparente se define como la relación entre la masa de suelo seco y el volumen que ocupa dicha masa. El volumen incluye tanto las partículas sólidas como el espacio poroso existente entre ellas, definido en gran medida por la textura del suelo y por el grado de agregación entre las partículas o estructura del suelo. A diferencia de la textura, la densidad aparente es una propiedad dinámica, que varía con las condiciones estructurales del suelo, las que dependen de condiciones de manejo, tales como el paso de maquinaria u otras labores agrícolas. Este parámetro puede servir como un indicador del grado de compactación que tiene el suelo y la restricción relativa al desarrollo radical de las plantas (Selles et al., 2000).

2.5.4. Capacidad de retención de agua

La capacidad de retención de agua disponible (CRAD) es el intervalo de humedad disponible que se define como el agua del suelo que puede ser absorbida a un ritmo adecuado para permitir el crecimiento normal de las plantas (Cavazos et al., 1992). Se suele calcular como la diferencia entre los valores de la capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente:

$$\text{CRAD} = \text{CC} - \text{PM}$$

CRAD: capacidad de retención de agua disponible (%)

CC: capacidad de campo (%) (Contenido de humedad a 10-33 kPa)

PM: punto de marchitamiento permanente (%) (Contenido de humedad a 1500 kPa)

2.6. Indicadores químicos

Los indicadores químicos propuestos (cuadro 4) se refieren a parámetros que afectan las relaciones suelo-planta, la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo, la disponibilidad de agua y nutrimentos para las plantas y microorganismos (SQI, 1996).

Cuadro 4. Conjunto de indicadores químicos propuesto para monitorear los cambios que ocurren en el suelo

INDICADORES QUÍMICOS DE LA CALIDAD DEL SUELO		
Indicador	relación con las funciones y condiciones del suelo	valores o unidades relevantes
Contenido en materia orgánica	fertilidad de suelo, estabilidad y grado de erosión, potencial productivo	kg (C ó N)/ha
pH	actividad química y biológica	Comparación entre los límites superiores e inferiores para la actividad vegetal y microbiana
Conductividad eléctrica	actividad microbiológica y crecimiento de plantas	dS/m; comparación entre los límites superiores e inferiores para la actividad vegetal y microbiana
P, K extraíbles	disponibilidad de nutrientes para las plantas, indicadores de productividad y calidad ambiental	kg/ha; niveles suficientes para el desarrollo de los cultivos
CIC	fertilidad del suelo, potencial productivo	meq/100g

Fuente: Chen. (2000), modificado por Acevedo et al. (2005).

2.6.1. Materia orgánica

La materia orgánica ha sido considerada tradicionalmente uno de los factores fundamentales de la fertilidad de los suelos. Es el reservorio de alrededor del 95 % del nitrógeno edáfico e influye favorablemente sobre propiedades físicas como la estabilidad de la estructura, la erodabilidad y la densidad aparente. Se la considera también uno de los componentes principales de la sustentabilidad de los agroecosistemas. Asimismo, influye decisivamente en sus propiedades físicas (retención de agua, estructuración y aireación del suelo) y químicas (C.I.C., poder de amortiguación del suelo, etc.). Para Swift y Woomeer

(1991), la materia orgánica puede ser determinada por el proceso de oxidación del Ca CO_2 . Considera dos procedimientos que son generalmente utilizados:

- a) Oxidación de la materia orgánica por calentamiento.
- b) Oxidación usando un agente fuertemente oxidante ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) en una solución de H_2SO_4 .

La cantidad de materia orgánica de un suelo depende del material vegetal, de la textura del suelo y del pH (Andrades et al., 2014). Su adecuada proporción favorece el desarrollo de una buena estructura, mejorando la aireación del suelo y la capacidad de retención de agua.

Cuadro 5. Características más importantes de los suelos arcillosos, francos y arenosos.

Clasificación	arenoso	franco	arcilloso
Muy bajo	< 0,7	< 1,0	< 1,2
Bajo	0,7 - 1,2	1,0 - 1,5	1,2 - 1,7
Normal	1,2 - 1,7	1,5 - 2,0	1,7 - 2,2
Alto	1,7 - 2,2	2,0 - 2,5	2,2 - 3,0
Muy alto	> 2,2	> 2,5	> 3,0

Fuente: (Andrades et al. 2014)

2.6.2. pH

Buckman y Brady (1966) consideran al pH una de las características más importantes del suelo, siendo tres condiciones son posibles: acidez, neutralidad, y alcalinidad; por lo general la acidez del suelo es común en todas las regiones donde la precipitación es alta, lo que ocasiona la lixiviación de grandes cantidades de bases intercambiables de los niveles superficiales de los suelos; en este caso, la solución del suelo contiene más iones hidrógeno (H^+) que oxidrilos (OH^-).

Los suelos alcalinos son característicos de las regiones áridas y semiáridas; la alcalinidad se presenta cuando existe un alto grado de saturación de bases. La presencia de sales especialmente de calcio, magnesio y sodio en formas de carbonatos da también preponderancia a los iones (OH^-) sobre los iones (H^+) en la solución del suelo (Millar et al., 1971).

2.6.3. P y K extraíbles

La razón principal para medir P en el suelo es para evitar su deficiencia en la planta y predecir el requerimiento de fertilizante. Otra razón es para investigar el P disponible para la planta a través del tiempo (López Ritas, 1990).

Fósforo

Un contenido adecuado de fósforo en el suelo es de gran importancia para el desarrollo de las plantas (Porta et al., 2003), por intervenir en funciones fundamentales, como son:

- Favorecer el desarrollo de las raíces.
- Estimular el crecimiento y el desarrollo vigoroso de las plantas.
- Favorecer la floración y fructificación y con ello la cantidad y calidad de los frutos y semillas.

Es necesario considerar ante el comportamiento del fósforo en el suelo:

- El fósforo debe aplicarse en una sola vez en cada cultivo anual, puesto que se almacena en el suelo, y la planta lo va tomando en función de sus necesidades.
- Al moverse muy poco en el suelo, es preciso enterrarlo para colocarlo cerca de las raíces.
- La asimilación del fósforo se favorece cuando hay un buen nivel de materia orgánica y de este elemento. Cuando se abona con escasez se aprovecha un porcentaje menor del fósforo que cuando se abona con una dosis adecuada.

Cuadro 6. Clasificación de suelos según el contenido de fósforo extractable (ppm) según la textura de suelo.

P (ppm)	Clasificación		
	bajo	normal	alto
		Secano	
Arenoso	< 8	9 - 12	> 13
Franco	< 12	13 - 18	> 19
Arcilloso	< 15	16 - 24	> 25
		Regadío	
Arenoso	< 12	13 - 18	> 19
Franco	< 15	16 - 25	> 26
Arcilloso	< 20	21 - 30	> 31

Fuente: Porta et al. (2003)

Potasio

Según Porta et al. (2003), el mantenimiento de determinados niveles de potasio en el suelo es decisivo para que éste pueda desempeñar sus distintas funciones en las plantas, entre las que se pueden señalar:

- Favorecer a la formación de hidratos de carbono
- Incrementar la consistencia y dureza de los tejidos de la planta dando una mayor resistencia a ciertas enfermedades.
- Se considera como un factor de calidad de los productos al aumentar el peso, la coloración y el sabor de los productos.

Cuadro 7. Clasificación de suelos según el contenido de potasio extractable (ppm) según la textura de suelo.

K (ppm)	Clasificación		
	bajo	normal	alto
Secano			
Arenoso	< 95	96 - 135	> 136
Franco	< 125	126 - 195	> 196
Arcilloso	< 155	156 - 255	> 256
Regadio			
Arenoso	< 135	136 - 215	> 216
Franco	< 155	156 - 295	> 296
Arcilloso	< 175	176 - 330	> 331

Fuente: Porta et al. (2003).

2.6.4. Conductividad eléctrica (CE.)

La conductividad eléctrica (CE) permite estimar las sales solubles en el suelo, a partir de un extracto acuoso. Este extracto sirve también para determinar los aniones y cationes solubles (Andrades et al., 2014).

El extracto es obtenido a partir de una pasta saturada o de filtración de una relación suelo-agua 1:2 o 1:5. El extracto de una pasta saturada, da mejor representación de las condiciones de la salinidad del suelo con relación a las plantas (Andrades et al., 2014).

Los principales cationes que dan origen a la salinidad son: sodio, calcio, magnesio, potasio; y los principales aniones son: sulfatos, cloruros, carbonatos y bicarbonatos.

Cuadro 8. Clasificación del suelo según su conductividad eléctrica

CE (dS/m)	Clasificación
< 0,35	No salino
0,35 - 0,65	Ligeramente salino
0,65 - 1,15	Salino
> 1,15	Muy salino

Fuente: Porta et al. (2003)

2.6.5. Capacidad de intercambio catiónico

Una de las propiedades más importantes de los suelos es su capacidad de intercambio catiónico (CIC). La CIC se puede definir como la capacidad del suelo para retener iones cargados positivamente (cationes). Esta retención se debe a que, en el suelo, el complejo coloidal presenta cargas negativas originadas por procesos de rotura en los bordes de las arcillas o por hidrólisis de los grupos $-COOH$ y $-OH$ en los coloides orgánicos (Andrades et al., 2014).

Actualmente se usan diferentes procedimientos para determinar la CIC. Todos ellos, están basados en el principio del lavado del suelo con una solución que contiene un catión que no está presente en el suelo. El método más ampliamente usado para suelos, es el desplazamiento de cationes con acetato de amonio (NH_4OAc). El complejo es saturado con el catión amonio (NH_4^+), luego el exceso de este catión es lavado con el alcohol etílico. El NH_4^+ adsorbido es determinado cuantitativamente por destilación, por titulación o por colorimetría.

2.7. Sistemas de Información Geográfica

Un Sistema de Información Geográfica (SIG), es un conjunto de elemento físicos y lógicos, de personas y metodologías, que interactúan de manera organizada, para adquirir, almacenar y procesar datos georeferenciados, para luego producir información útil en la toma de decisiones (Vergara, 2008).

La utilidad principal de un Sistema de Información Geográfica radica en su capacidad para construir modelos o representaciones del mundo real a partir de las bases de datos digitales

y utilizarlos en la simulación de los efectos que un proceso de la naturaleza o una acción antrópica produce sobre un determinado escenario en una época específica (IGAC, 1995).

Indudablemente la tecnología SIG, permite almacenar y manipular información usando la geografía, contribuyendo a tomar mejores decisiones para solucionar amplias necesidades técnicas y al mismo tiempo, espaciales o territoriales (Zamora, 2009).

2.7.1. Cartografía y SIG

La cartografía automatizada constituye la principal vertiente de la cartografía contemporánea. Comprende un conjunto de técnicas para el diseño y producción de mapas mediante computadoras, basado en la creación y aplicación de paquetes y programas para el manejo de cartografía digital (Franco y Valdez, 2003).

2.7.2. Elementos de un SIG

Los sistemas de información geográfica se caracterizan por cuatro componentes: hardware del computador (parte física del sistema), software del computador (programas de aplicación), datos o información y liveware o equipo humano (Gomez y Barredo, 2006). Además, es necesario que un SIG, disponga de un buen diseño y se base en reglas de actividad definidas, que son los modelos y las prácticas operativas exclusivas en cada organización (Peña, 2008).

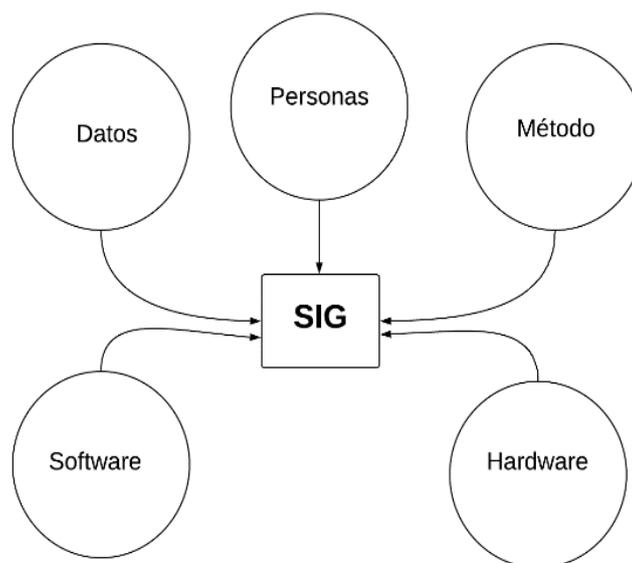


Figura 1: Elementos básicos que componen el SIG.

Fuente: Olaya, 2011.

Según Olaya (2011), una forma de ver el sistema SIG es atendiendo a los elementos básicos que lo componen, cinco son los elementos principales que se contemplan tradicionalmente en este aspecto:

- Datos: Los datos son la materia prima necesaria para el trabajo en un SIG, y los que contienen la información geográfica vital para la propia existencia de los SIG.
- Métodos: Un conjunto de formulaciones y metodologías a aplicar sobre los datos.
- Software: Es necesaria una aplicación informática que pueda trabajar con los datos e implemente los métodos anteriores.
- Hardware: El equipo necesario para ejecutar el software.
- Personas: Las personas son las encargadas de diseñar y utilizar el software, siendo el motor del sistema SIG.

Cada uno de los elementos anteriormente mencionado tiene características propias que deben estudiarse. No obstante, el hardware no es un elemento especialmente particular de un SIG, y las aplicaciones SIG que encontramos actualmente se ejecutan en su mayoría sobre computadoras personales sin requerimientos altamente específicos. Más aún, la expansión de las tecnologías SIG ha alcanzado hoy en día otros ámbitos como las plataformas móviles, haciendo de estas unas tecnologías poco específicas en lo que a hardware se refiere. Por esta razón, no es necesario tratar en detalle este elemento del sistema SIG, siendo más adecuado tratar el resto de elementos, más característicos e importantes para el aprendizaje de los conceptos SIG y la descripción de estos (Olaya, 2011).

Por su parte, las personas tienen importancia tanto de forma individual como en su conjunto, siendo diferentes las necesidades que plantean como usuarios y beneficiarios de un SIG. En la sociedad actual, las tecnologías y planteamientos han calado hondo en el ámbito del SIG, y la información geográfica es, por su propia naturaleza, propensa a ser compartida y utilizada por diferentes personas con fines muy distintos. Es por ello que el aspecto de mayor relevancia respecto a las personas como partes del sistema SIG es el de sus relaciones y su organización, siendo además en este campo donde se han producido en mayor medida los últimos avances, y donde ha tenido lugar un cambio más profundo, no ya sólo dentro de los SIG, sino también en otras tecnologías de similar índole. Puede entenderse esto como un nuevo subsistema: el subsistema de gestión, que es responsable de gestionar la interacción de los restantes y definir y controlar el marco en que esta tiene

lugar. Las personas a su vez dan forma a los distintos ámbitos de trabajo, definiendo estos en función de sus necesidades. Puede tratarse el conjunto de campos de especialización como un nuevo elemento del sistema SIG, en lugar de incorporarlo dentro de otro. Algunos autores proponen modificar el esquema clásico de cinco elementos para reflejar más correctamente la nueva realidad de los SIG. Por ejemplo, propone un esquema como el mostrado: (Olaya, 2011).

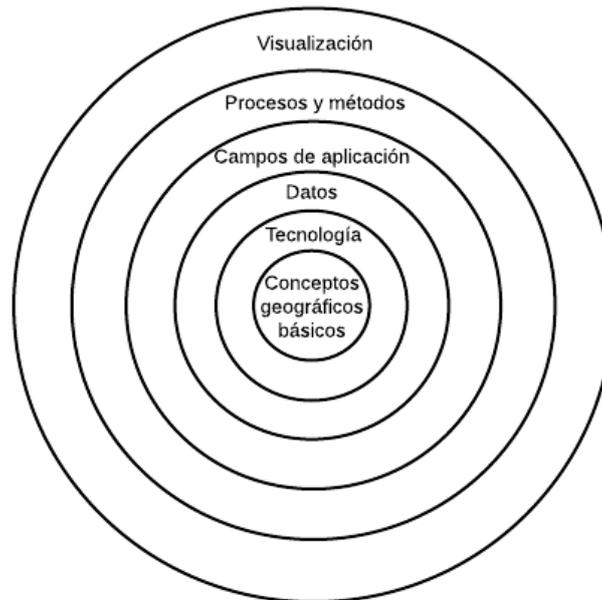


Figura 2: Relación de los elementos SIG.

Fuente: Olaya, 2011.

La incorporación de la visualización es una diferencia notable con respecto al esquema clásico, si volvemos al enfoque basado en subsistemas, el subsistema de visualización resulta de enorme importancia en un SIG, siendo pese a ello habitual que no sea tratado con la suficiente profundidad en textos dedicados a los SIG desde un punto de vista genérico. Precisamente por no ser considerado un elemento independiente, no se le concede la necesaria atención como parte que debe estudiarse al tratar la disciplina de los SIG. Esto contrasta con el hecho de que, a pesar de que las capacidades de los SIG son mucho más amplias que las relacionadas con la visualización, muchos usuarios usan estas por encima de las restantes, desconociendo incluso en muchos casos gran parte de las otras capacidades que un SIG puede brindarles (Olaya, 2011).

Correcto o no, desde el punto de vista del usuario medio, las capacidades de visualización están en primera línea del conjunto de funcionalidades de un SIG. Abordar el estudio de un

SIG acudiendo al esquema clásico de cinco elementos deja de lado la visualización, en cuanto que la engloba como una funcionalidad derivada de dichos elementos en su conjunto pese a que esta tiene unas características peculiares en el entorno de un SIG y una vital importancia en la concepción actual de este. Es decir, el esquema de partes de un SIG no resulta el más adecuado para estructurar el estudio de los SIG, al menos en lo que respecta a la visualización como parte fundamental de estos (Olaya, 2011).

- Datos.
- Procesos: métodos enfocados al análisis de los datos.
- Visualización: métodos y fundamentos relacionados con la representación de los datos.
- Tecnología: software y hardware SIG
- Factor organizativo: engloba los elementos relativos a la coordinación entre personas, datos y tecnología, o la comunicación entre ellos, entre otros aspectos.

2.7.3. Funciones de los SIG

Rodgers (1993), menciona algunas de las operaciones de un SIG conforme la entrada y salida de datos:

a. Ingreso de datos

El ingreso de datos se refiere a todas las operaciones por medio de las cuales los datos espaciales de mapas, sensores remotos y otras fuentes son convertidos a un formato digital. Se deben ingresar dos tipos diferentes de datos al SIG: referencias geográficas y atributos. Los datos de referencias geográficas son las coordenadas (latitud, longitud) que fijan la ubicación de la información que se está ingresando, los datos de atributos asignan un código numérico a cada conjunto de coordenadas y a cada variable, sea para representar los valores actuales (precipitación) o para connotar tipos de datos categóricos (usos del terreno, tipo de vegetación, etc.).

b. Almacenamiento de datos

Almacenamiento de datos se refiere al modo como los datos espaciales son estructurados y organizados dentro del SIG, de acuerdo a la ubicación, interrelación, y diseño de atributos. La estructura de la base de datos espaciales puede ser representada de dos formas: el modelo vectorial y el modelo raster (Bernhardsen, 2002).

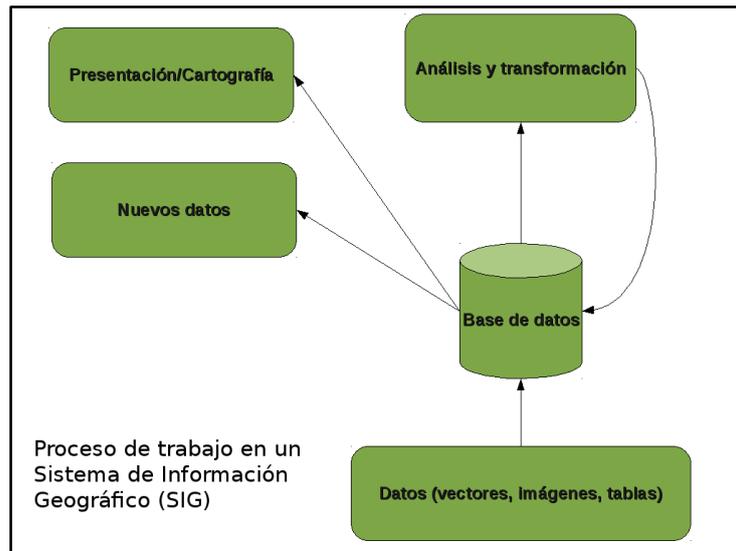


Figura 3: Almacenamiento de datos.

Fuente: Olaya, 2011.

El modelo raster funciona a través de una retícula que permite asociar datos a una imagen; es decir, se pueden relacionar paquetes de información a los píxeles de una imagen digitalizada (Bernharsen, 2003).

El modelo vectorial almacena tres objetos cartográficos básicos: puntos, líneas y polígonos, los mismo que se almacena como una colección de coordenadas x, y.

La ubicación de una característica puntual (casas, núcleos de población), pueden describirse con un solo punto x, y. Las características lineales (vías, curvas de nivel, ríos), pueden almacenarse como con un conjunto de puntos de coordenadas x, y.

Las características poligonales (límites administrativos, parcelas), pueden almacenarse como un circuito cerrado de coordenadas (Musso y Cotos, 2005).

c. Manipulación y procesamiento de datos

Según Olaya (2011), la manipulación y procesamiento de datos se hace para obtener información útil de los datos previamente ingresados al sistema. La manipulación de datos abarca dos tipos de operaciones: (1) operaciones para eliminar errores y actualizar conjuntos de datos actuales (editar); (2) operaciones que hacen uso de técnicas analíticas

para dar respuestas a preguntas específicas formuladas por el usuario. El proceso de manipulación puede ser desde una simple superposición de dos o más mapas, hasta una extracción compleja de elementos de información dispares, de una gran variedad de fuentes (Figura 4).

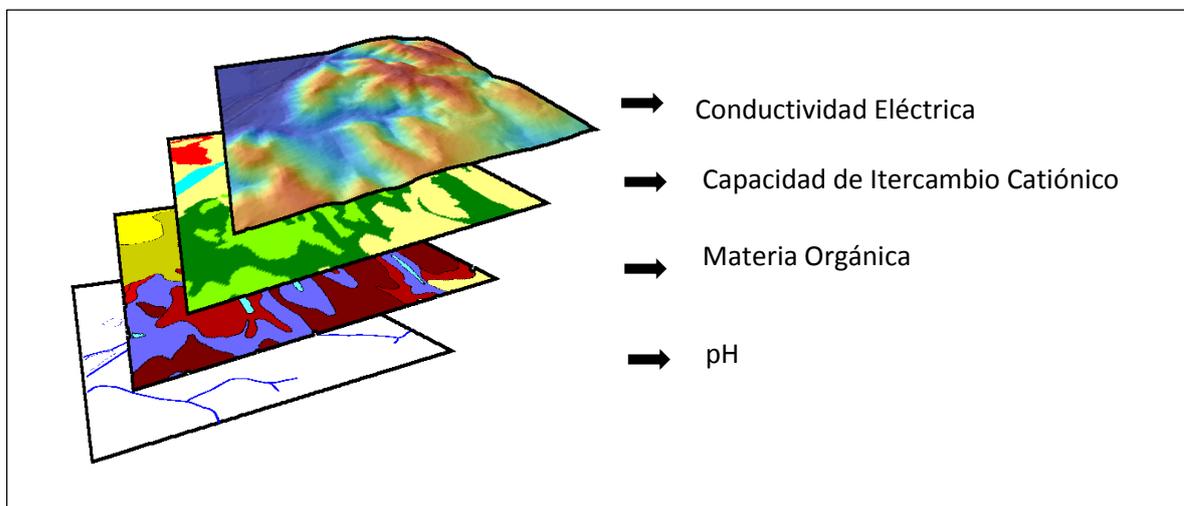


Figura 4: Sobreposición de capas.

Fuente: Olaya, 2011

d. Producción de datos

La producción de datos se refiere a la exhibición o presentación de datos empleando formatos comúnmente incluyendo mapas, gráficos, informes, cuadros y cartas.

e. Aplicaciones de los SIG

Los SIG pueden ser usados en gran variedad de aplicaciones agrícolas, pecuarias y agroindustriales, entre ellas; manejo de campos de cultivos, monitoreo de la rotación de cultivos, proyección de pérdida de suelos y manejo de sistemas de irrigación (Escobar, 1997).

Según Chartuni et al. (2007), La adopción de esta tecnología representa un potencial para la racionalización del sistema de producción agrícola moderno, pues permite:

- Optimizar la cantidad de agroquímicos, fertilizantes o correctivos aplicados en los suelos y cultivos.
- Determinar la disponibilidad de nutrientes, materia orgánica, acidez, disponibilidad de agua, textura, distribución de enfermedades, plagas, malezas, entre otros.
- Reducir costos de producción y de la contaminación ambiental.

- Mejorar la calidad de las cosechas.

2.7.4. Bases de datos (BD)

Una preocupación recurrente para todo tipo de organización es la necesidad de almacenar información a la que se pueda acceder para consultar y realizar tareas propias de la empresa. Ante ello, la aparición de la informática significó el ingreso de nuevas herramientas para administrar eficientemente los datos buscando satisfacer las necesidades que puedan generarse tras el incremento exponencial de la información disponible y la necesidad de acceder a ellos paralelamente por distintos usuarios. En relación a lo expuesto, Date (2001), define la base de datos como un conjunto de datos a los cuales puede accederse para su edición únicamente por un sistema informático especializado para tal fin, denominado Sistema Gestor de Base de Datos (SGBD) del cual más adelante nos explayaremos. Sin embargo, Ramos et al. (2006), expanden el concepto mencionando la necesidad de reconocer en la colección de datos sus relaciones para conseguir estructurarlos y organizarlos de manera tal que expresen la realidad. Sánchez (2004) conceptualiza una base de datos como una serie de datos relacionados que forman una estructura lógica que contiene, además de los datos, la forma en que se relacionan.

En la actualidad, existe una necesidad de estudiar y entender problemas de la realidad mediante un sistema que permita valorar la información espacial y no limitar su procesamiento a estudios estadísticos. Por esto, la utilización de un SIG incorpora la capacidad de trabajar con la información en su dimensión espacial; sin embargo, genera al mismo tiempo la imperiosa necesidad de adaptar el manejo de base de datos a dicha realidad. Bajo este contexto nace el concepto de Base de Datos Geográfica (BDG) referido a una colección de datos organizados de tal manera que sirvan efectivamente para una o varias aplicaciones SIG. Esta base de datos comprende la asociación entre sus dos principales componentes: datos espaciales y atributos o datos no espaciales (ESRI, citado por Morales, 2001).

a) Ventajas y desventajas de las bases de datos

El manejo de bases de datos ha evolucionado la forma de administrar información otorgando al usuario una serie de ventajas. Como lo argumenta Sánchez (2004) y Morales (2001), las BD permiten:

- Independencia de datos y los programas y procesos; permitiendo modificar datos sin necesidad de variar la estructura de las aplicaciones.

- Menor redundancia
- Mantenimiento de la calidad e integridad de los datos
- Mayor seguridad en los datos, al imponer restricciones de seguridad para su acceso.
- Datos más documentados por la descripción de metadata.
- Acceso más eficiente a los datos
- Menor espacio de almacenamiento a causa de una correcta estructuración de entidades y vínculos entre ellas.

A ello, podemos adicionar lo antes mencionado para las BDG que permiten almacenar y vincular atributos no espaciales con las implicancias que las relaciones espaciales puedan aportar. Facilitan entonces el análisis espacial de la información.

Sin embargo, como toda tecnología, presenta también desventajas que a cada usuario le corresponde evaluar a fin de optimizar su trabajo. Sánchez (2004), rescata la necesidad de contar con personal cualificado en el manejo de BD, lo que significa a su vez una implementación dificultosa si no se cuenta con un grupo de profesionales capacitados y/o equipamiento adecuado. Luego, por parte de las BDG, el principal inconveniente se presenta en el mantenimiento de los datos espaciales y otros componentes geográficos (Morales 2001).

b) Diseño de bases de datos

Los modelos simbolizan una parte de la realidad de forma que su manipulación sea más fácil. Para el caso en particular, se busca manipular información real para almacenarla en un sistema informático (Sánchez 2004). Por otra parte, denominaremos esquema a la descripción de una BD mediante un modelo de datos. Este esquema se especifica durante el diseño de la misma (Ramos et al., 2006).

Ramos et al. (2006), expone el siguiente esquema para representar la clasificación de los modelos de datos:

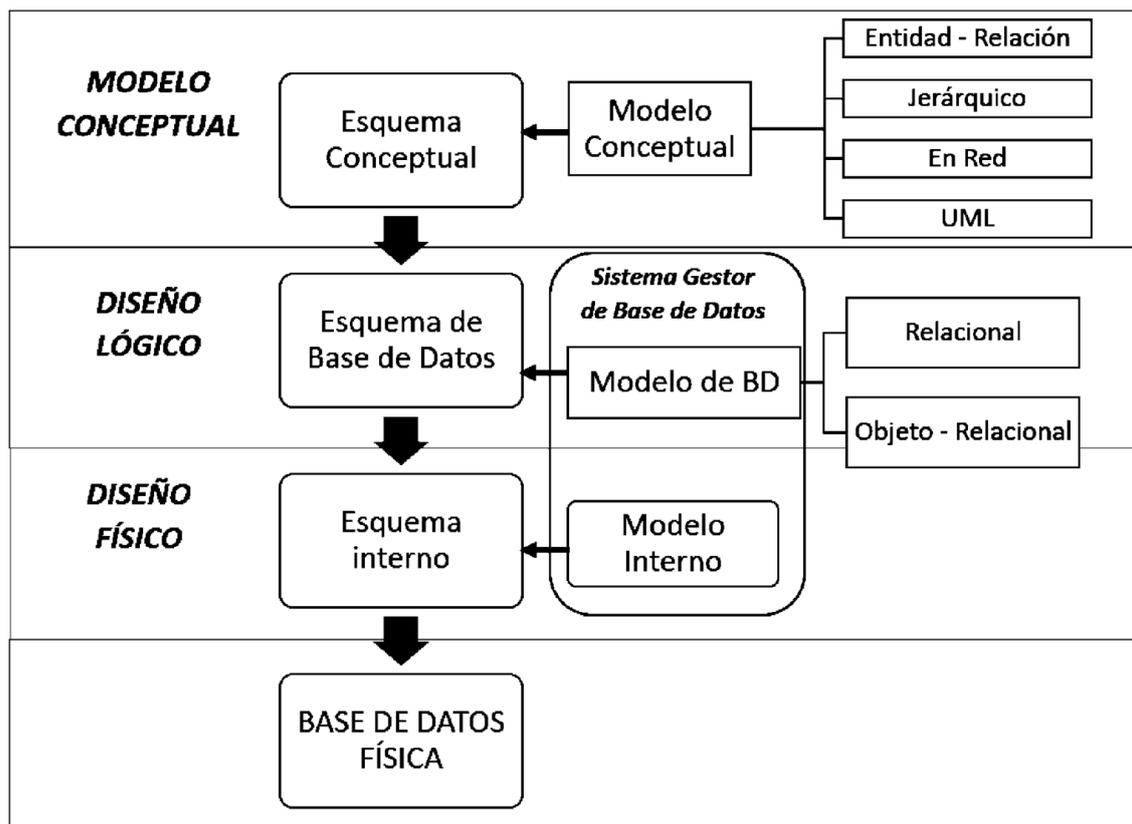


Figura 5: Relación entre los modelos lógicos y conceptuales de datos

Fuente: Ramos et al. (2006)

Etapa del diseño conceptual

En esta etapa se obtiene una estructura de la información de la futura BD independiente de la tecnología a emplear, Costa (2007). El propósito es definir en términos amplios y genéricos el ámbito y requerimientos, entidades, atributos, relaciones y realizando el esquema conceptual (Lo y Teung, citados por García y Otálvaro 2009). Algunos de los modelos más conocidos para esta etapa son el modelo E/R (entidad/relación), modelo de red, modelo jerárquico y el modelo UML Lenguaje de Modelado Unificado – (*Unified Modeling Language*) (Costa 2007).

Etapa del diseño lógico

En esta etapa se parte del resultado del diseño conceptual (una estructuración lograda en un ámbito conceptual), que se adapta a la tecnología, con el que se desea implementar la base de datos (Costa 2007). Esto a través de tres pasos: i. Proyectar el esquema conceptual al esquema lógico; ii. Identificar las claves principales y foráneas; y iii. Normalizar los

cuadros de atributos; para el caso de bases de datos geoespaciales se realiza adicionalmente el diseño de capas o coberturas. El propósito es representar la BD e identificar los problemas potenciales que podrían existir en el modelo conceptual (Lo y Teung, citados por García y Otálvaro, 2009). Algunos de los modelos lógicos más difundidos son el modelo relacional, y el modelo objeto-relacional (Costa, 2007).

Etapa del diseño físico

En esta etapa se transforma la estructura obtenida en la etapa del diseño lógico, con el objetivo de conseguir una mayor eficiencia. Ésto consiste normalmente en la elección de estructuras físicas de implementación de las relaciones, la selección del tamaño de las memorias intermedias (buffers) o de las páginas, etc. (Costa, 2007). El resultado es un esquema físico conocido como diccionario de datos que contiene las características de los ítems y las especificaciones de la base de datos física (Lo y Teung, citados por García y Otálvaro, 2009).

c) Modelos de base de datos

En la actualidad, los modelos de mayor presencia son el de datos relacionales y el modelo orientado a objetos, ambos fácilmente explicados en la amplia bibliografía que existe del tema (Ramos et al., 2006). Sin embargo, durante la primera década del siglo XXI, nace un modelo híbrido denominado modelo Objeto-Relacional (OR), éste busca mantener el esquema de cuadros entre las que se establecen relaciones, pero permitiendo atributos más complejos, denominados tipos abstractos de datos (ATD), que admiten objetos geométricos. Para ello, el lenguaje SQL (*Structured Query Language*) se extiende para manipular los datos espaciales; sin embargo, sigue siendo necesaria la presencia de herramientas de SIG para representar dicha información (Sarría, 2006).

Ramos et al. (2006), recomienda el empleo del Lenguaje de Modelado Unificado (Unified Modeling Language – UML) para desarrollar la etapa de diseño conceptual de las BD, pues, las relaciones que permite (generalización, asociación, multiplicidad, realización y dependencia) asemejan las capacidades de relacionamiento del modelo OR.

• Tipos de relaciones

Como lo presenta el resumen del Departamento de Informática de la Universidad de Fasta (2012) para este ítem:

- Relación uno a uno: aquella en que cada registro de una entidad A puede tener un solo registro coincidente en el cuadro de atributos de B y viceversa.
- Relación uno a varios: aquí, un registro de A puede tener muchos registros coincidentes en B; pero, un registro de B únicamente coincide con un registro de A. Es el tipo más común.
- Relación varios a varios: en este caso un registro de A puede tener muchos registros coincidentes en B y viceversa. Una relación de varios a varios no es sino dos relaciones de uno a varios con una tercera.

d) Bases de datos geoespaciales - Geodatabase

Sarría (2006), define la geodatabase en su sentido más simple como una base de datos que almacena, administra y automatiza toda la información relativa a un conjunto de entidades espaciales tales como geometría, topología, identificadores, datos temáticos, entre otros. ESRI (2012) indica que la geodatabase, como fuente de datos nativa para ArcGIS, se implementa utilizando la misma arquitectura de aplicación de varios niveles que se encuentra en otras SGBD avanzados conocida como modelo relacional de objetos.

2.7.5. Análisis espacial - Geoprocesamiento

ESRI (2012), define el análisis espacial como el proceso de modelar información de diversos orígenes, ejecutar el procesamiento informático de diversos operadores espaciales y luego examinar e interpretar los resultados analíticos del modelo. El análisis espacial resulta útil para evaluar, calcular, predecir, interpretar y tomar decisiones de los fenómenos en estudio.

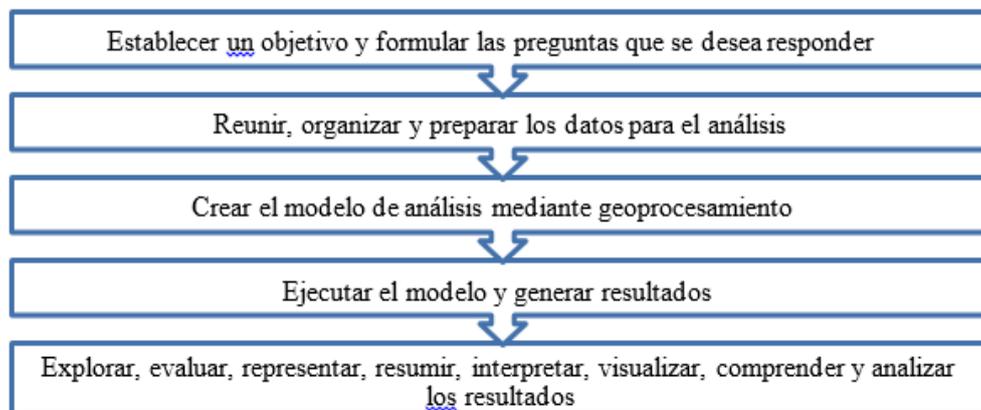


Figura 6: Proceso de análisis espacial

Fuente: Adaptado de ESRI (2012).

En la práctica, este proceso de análisis es iterativo; pues, se va reincorporando conocimiento obtenido durante el proceso. Para los análisis correspondientes los datos a de salida son representados espacialmente (mapas, informes de resumen, gráficos científicos y estadísticos, y resúmenes de análisis) a fin de facilitar comparaciones, calibraciones, iteraciones, entre otros.

El geoprocésamiento es la ejecución metódica de una secuencia de operaciones en los datos geográficos para crear nueva información con la finalidad de realizar el modelado, el análisis y la automatización de las tareas del SIG. Como parte del proceso de análisis, está automatización de tareas puede iterativa y permitir retroalimentación (ESRI, 2012).

III. MATERIALES Y METODOLOGÍA

3.1 ÁMBITO DE ESTUDIO

El presente estudio se desarrolló en los campos de la Universidad Nacional Agraria (Figura 7 y 8), localizada en el distrito de la Molina de la región de Lima. Comprende un área de 100.98 Ha que comprende los campos agrícolas:

Latitud: 12° 05' 04"

Longitud: 76° 57' 06"

Altitud: 243.7 m.s.n.m.

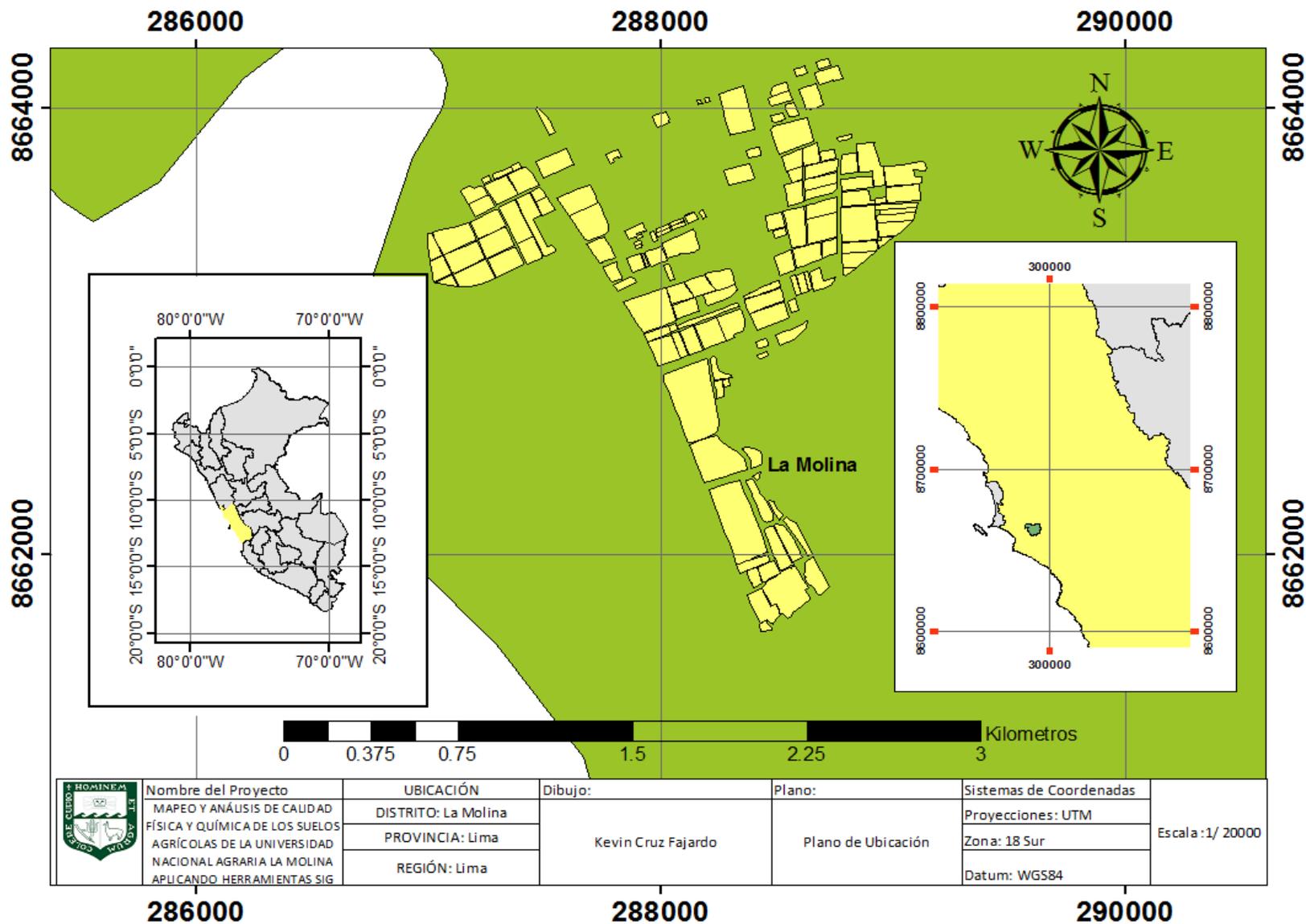


Figura 7: Mapa de ubicación del área de estudio de la UNALM.

3.1.2. Principales características de la zona de estudio

a. Clima

Los datos de temperatura, radiación solar y humedad relativa se obtuvieron de la estación meteorológica “Alexander Von Humboldt” ubicada en la Universidad Nacional Agraria La Molina.

Durante el proyecto se presentó una temperatura máxima promedio de 31.6 °C y una temperatura mínima promedio de 13.7 °C en los meses de febrero y agosto, respectivamente (Cuadro 9).

Cuadro 9. Datos meteorológicos obtenidos durante el desarrollo de la fase campo.

Mes	Temperatura C°			Radiación solar (W/m ²)	Humedad Relativa %
	Media	Máxima	Mínim a		
Febrero	27.2	31.6	21.5	192.668	70
Marzo	27.1	31.3	21.8	199.469	74
Abril	24.1	28.4	18.7	177.123	79
Mayo	21.2	24.9	17.6	128.543	85
Junio	18.3	21.2	15.7	90.942	88
Julio	17.6	21.0	15.0	113.337	86
Agosto	16.5	20.2	13.7	109.499	90

Fuente: Observatorio Meteorológico Alexander Von Humboldt - UNALM (2018)

b. Fisiografía

Los suelos agrícolas de la UNALM, fisiográficamente presenta un relieve geográfico poco accidentado, con pendientes en la parte media poco pronunciadas. Su relieve es característico de la mayoría de los suelos de Lima.

3.2 MATERIALES Y EQUIPOS

3.2.1. Materiales y equipos de campo

- Herramientas de obra civil: pico, lampa, pala, carretilla, barreta
- Para enumerar las calicatas se utilizará una pizarra y un plumón.
- 3 anillos para sacar las muestras de suelo.
- Bolsas de plástico para llevar las muestras de suelo al laboratorio.
- Mapa de la ubicación de las calicatas en el campus de la UNALM.
- Equipo GPS para obtener las coordenadas de la ubicación de las calicatas

3.2.2. Materiales y Equipos de Laboratorio

Textura del suelo:

- Agitador para la dispersión del suelo con su respectivo vaso.
- Hidrómetro con escala Bouyoucos ASTM 152H.
- Termómetro.
- Probeta de 1 litro.
- Solución dispersante: calgón (hexametáfosfato y carbonato de sodio).
- Alcohol amílico.

Capacidad de retención de agua

- Latas rectangulares.
- Papel Filtro Rápido.
- Centrífuga.
- Estufa Haber (105 °C).

Velocidad de infiltración

- Anillo de 6 pulgadas de diámetro.
- Envoltura plástica.
- Botella plástica o cilindro graduado de 500 mL.
- Agua destilada.
- Cronómetro o programador de horario.

Densidad aparente

- Anillo de 3 pulgadas (7.62 cm) de diámetro.
- Bloque de madera.
- Palita de jardinero.
- Cuchillo de hoja ancha.
- Bolsas sellables y marcador.
- Balanza (precisión 0,1 g).
- Cucharón para medir de 1/8 de taza (30 mL).
- Taza de papel.
- Vara metálica de 18 pulgadas.
- Acceso a un horno de microondas.

Materia orgánica

- Mufla hasta 500 °C
- Crisoles o cápsulas de porcelana.
- Balanza de precisión.
- Desecador.
- Dicromato de potasio 1 N.
- Sulfato ferroso amoniacal $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot \text{FeSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$ 0.5 N.
- Indicador Ortrofenantrolina - sulfato ferroso 0.025 M Conocido con el nombre de ferroina.
- Acido sulfurico Q.P. 96 %; $d = 1.84 \text{ g/cm}^3$.

pH

- Potenciometro con electrodos o con electrodo de combinacion.
- Baguetas para agitacion.
- Vasos de vidrio.
- Solucion de cloruro de calcio 0.01 M.
- Solucion de cloruro de potasio 1 M.
- Solucion buffer de pH 4.0.
- Solucion buffer de pH 6.86.
- Agua destilada.

Conductividad eléctrica

- Bomba de tipo eléctrica o de agua para producir vacío.
- Celda de conductividad y conductímetro.
- Vasos de plástico.
- Embudos Buchner.
- Embudos de vidrio o de plástico.
- Solución de cloruro de potasio (KCl) 0.01 M.

Fósforo extractables (P)

- Espectrofotómetro o colorímetro.
- Plancha de digestión.
- Agitador de tubos, y otros materiales de laboratorio.
- Acido perclórico (HClO₄) 60%.
- Molibdo - vanadato de amonio en HNO₃ Q.P.
- Solución stock Standard.

Potasio extractable (K)

- Equipo de espectrofotometría (fotómetro de llama o absorción atómica).
- Equipo de centrífuga.
- Agitador mecánico.
- Solución de acetato de amonio (NH₄OAc) 1 N.
- Soluciones estándar de K.

Capacidad de intercambio catiónico CIC

- Matraces de 500 ml.
- Pipeta Volumetrica (10, 25, 50 ml).
- Dispensadores de 100 ml.
- Agua destilada.
- Acetato de amonio (NH₄OAc), pH 7.00.
- Alcohol etílico de 96°.
- Cloruro de potasio.
- Fenoltaleina.

- Formaldehído.
- NaOH al 0.02N.

3.2.3. Materiales y equipos de gabinete

- Laptop Samsung (Windows 8.1. Pro).
- Software Arcgis 10.3.

3.3. METODOLOGÍA

La metodología que se usó para el cumplimiento de cada uno de los objetivos propuestos, consistió en el desarrollo de tres etapas secuenciales: trabajo de pre-campo, trabajo de campo y trabajo de gabinete, como se muestra en la Figura 9.

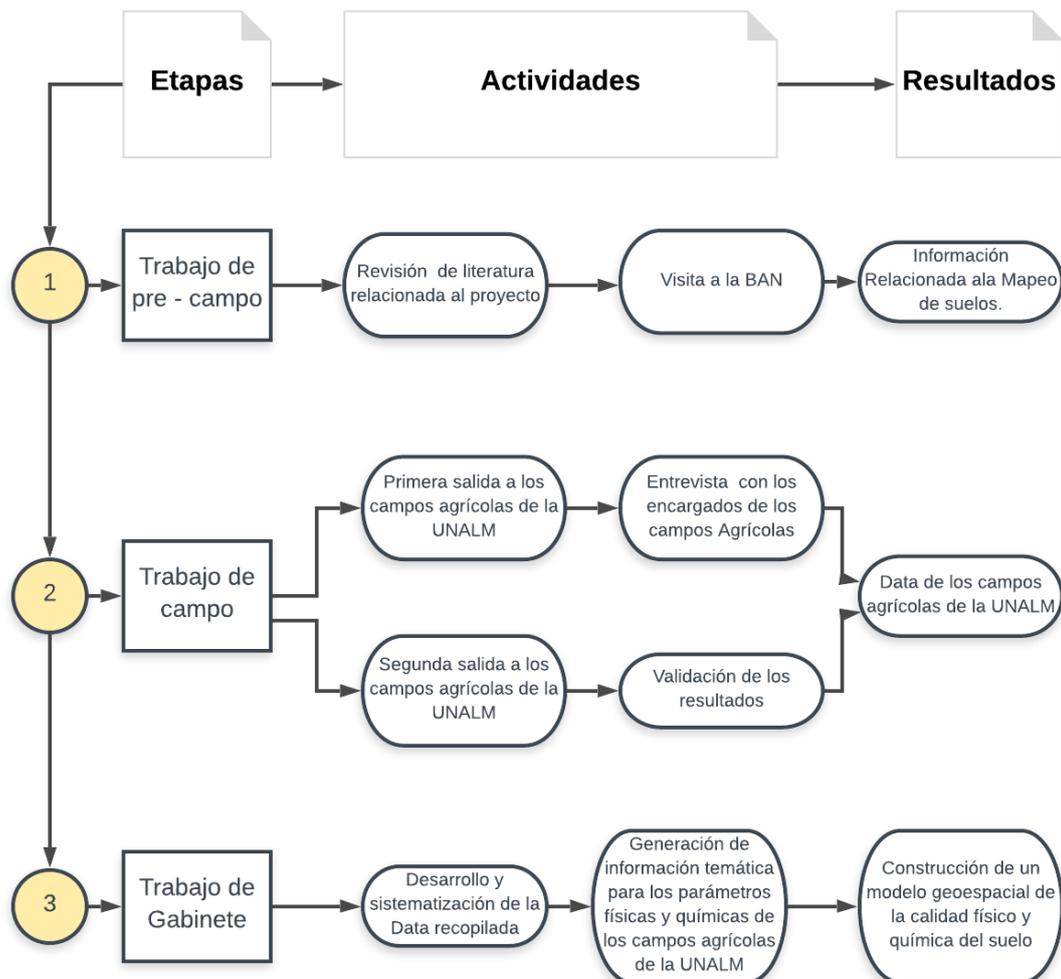


Figura 8. Ubicación de calicatas en la UNALM

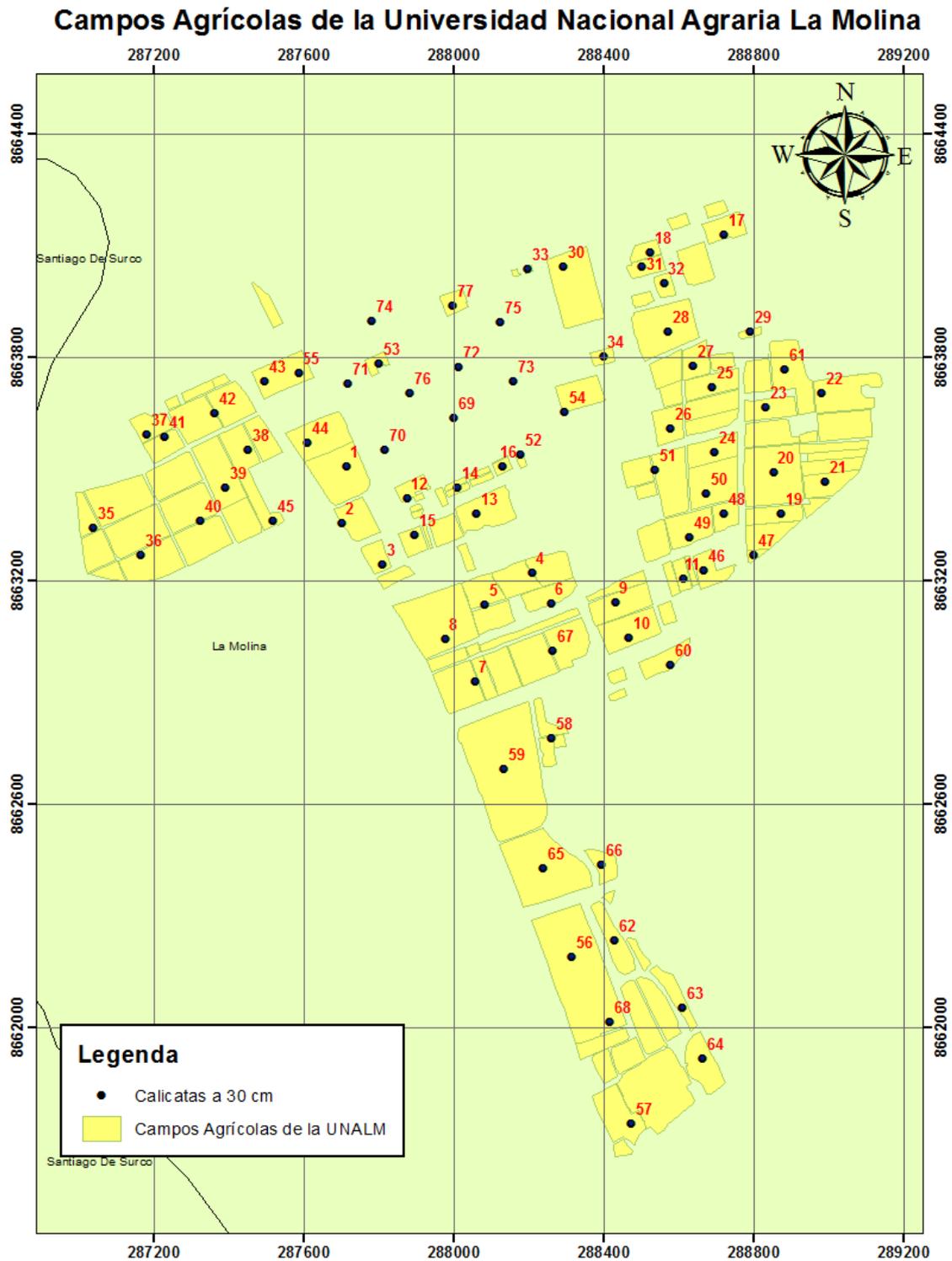


Figura 9. Ubicación de calicatas en la UNALM

Cuadro 10. Coordenadas de los puntos donde se hicieron calicatas

Calicatas	este	norte	nombre del programa	área (m ²)
1	287714	8663507	fundo	17922
2	287702	8663356	maiz	8363
3	287811	8663245	papa	4515
4	288209	8663222	algodon	8176
5	288084	8663137	algodon	7025
6	288261	8663140	poca	6868
7	288058	8662929	ciencias	12373
8	287978	8663045	vivero forestal	27692
9	288431	8663141	frutales	10514
10	288466	8663048	frutales	12277
11	288613	8663207	frutales	2697
12	287875	8663423	agronomia	3853
13	288061	8663382	ornamentales	12435
14	288010	8663452	agronomia	1070
15	287897	8663323	ornamentales	4126
16	288129	8663509	zootecnia	1592
17	288721	8664131	campo ferial	6393
18	288523	8664081	cereales	2996
19	288873	8663382	frutales	7077
20	288853	8663491	frutales	24043
21	288990	8663467	frutales	7377
22	288981	8663704	frutales	14334
23	288833	8663668	frutales	7187
24	288695	8663545	huerto	8502
25	288690	8663720	huerto	8109
26	288578	8663610	huerto	7181
27	288638	8663778	poca	6032
28	288571	8663870	campo ferial	19763
29	288790	8663869	campo ferial	1137
30	288294	8664043	jardin botanico	22067
31	288502	8664046	cereales	4037
32	288561	8663999	maiz	2719
33	288198	8664037	ingenieria agricola	361
34	288399	8663803	ciencias biologicas	2240
35	287038	8663342	maiz	4369
36	287164	8663270	fundo	13083
37	287181	8663593	fundo	5751
38	287451	8663553	fundo	14613
39	287392	8663450	fundo	14469
40	287324	8663363	fundo	12414

Continuación.....

Calicatas	este	norte	nombre del programa	área (m²)
41	287229	8663587	fundo	5661
42	287362	8663651	maiz	9675
43	287496	8663737	ingenieria agricola	11464
44	287611	8663571	fundo	13881
45	287517	8663363	fundo	14613
46	288668	8663229	frutales	6120
47	288801	8663271	frutales	1238
48	288721	8663382	huerto	4648
49	288630	8663317	huerto	9921
50	288673	8663435	huerto	14637
51	288536	8663499	huerto	13829
52	288179	8663540	zootecnia	655
53	287799	8663785	ingenieria agricola	2242
54	288297	8663655	educacion fisica	8562
55	287586	8663758	ingenieria agricola	11464
56	288314	8662190	vivero forestal	50816
57	288475	8661741	vivero forestal	12333
58	288260	8662777	pastos y forrajes	2726
59	288133	8662696	cereales	58000
60	288578	8662973	banco de semen	6103
61	288883	8663769	frutales	14593
62	288430	8662234	vivero forestal	8518
63	288610	8662052	vivero forestal	5940
64	288665	8661916	vivero forestal	10212
65	288240	8662427	vivero forestal	31888
66	288393	8662439	vivero forestal	4824
67	288264	8663011	fundo	10826
68	288417	8662014	vivero forestal	50816
69	288000	8663638	ingenieria agricola	ND
70	287815	8663551	ingenieria agricola	ND
71	287717	8663729	ingenieria agricola	ND
72	288014	8663773	ingenieria agricola	ND
73	288158	8663737	ingenieria agricola	ND
74	287781	8663897	ingenieria agricola	ND
75	288125	8663894	ingenieria agricola	ND
76	287882	8663706	ingenieria agricola	ND
77	287997	8663939	centro de ventas	3390

3.3.1. Trabajo de pre-campo

Se basó en la recolección de información de estudios, tanto básica y temática, que involucren la zona de estudio, a fin de conocer sus características físicas y sociales de la zona, se obtuvo información cartográfica del distrito de La Molina a través de Carta Nacional correspondiente a Lima.

En la BAN se recopiló información cartográfica existente de la UNALM y de las características de sus suelos con el fin de crear una base de dato primaria para el modelamiento posterior de la calidad físico y química.

Se revisaron diferentes tipos de literatura para tener una secuencia en el procedimiento del desarrollo de mapas temáticos, y la interpretación de la influencia de las variables dentro de la calidad física y química del suelo.

3.3.2. Trabajo de campo

Mediante el uso de los sistemas de información geográfica y de acuerdo a la formación de uso del suelo se procederá de la siguiente manera:

- Mediante el uso del software ARCGIS se tendrá la ubicación de las calicatas.
- Visita a las juntas de usuarios para el ingreso respectivo a los campos que tienen a su disposición.
- Replantar el lugar de las calicatas haciendo uso del GPS y del mapa dado por el programa ARCGIS.
- Recopilar información de los campos agrícolas para saber el cultivo y el estado de producción de las parcelas.

a. Calicatado y muestreo en campo:

En esta etapa se procederá a hacer el trabajo de calicatas, para ello se necesitará de la información obtenida en la primera etapa, que es la de conocer la ubicación de las calicatas y conocer el estado de los campos que tienen la junta de usuarios a su disposición.

- Verificar si es posible realizar la calicata a mano o la necesidad de una máquina retroexcavadora, dado lo dificultoso que pueda resultar el terreno o la disponibilidad para ingresar a ello.

- Realización de calicatas en los campos de la UNALM, previa autorización del encargado de campo.
- Toma de muestras de suelo usando una espátula y cilindros rotulados.
- Tapar la calicata luego de haber sacado la muestra de suelo.
- Toma de puntos con GPS navegador para la ubicación exacta de las calicatas.

b. Ensayos de laboratorio

Cuadro 11. Características y métodos empleados en el análisis de los suelos.

Características	Métodos	Expresión
Parámetros físicos		
Textura de suelos	método de sedimentación con el hidrómetro de bouyoucos	%
Velocidad de infiltración	método del cilindro infiltrómetro (usda,1999)	cm/ hora
Densidad aparente	método del cilindro	g/cc
Capacidad de retención de agua disponible	metodología para la determinación de los parámetros hídricos; cc y pm	%
Parámetros químicos		
pH	método del potenciómetro, relación de agua 1: 1 v/v	pH
Conductividad eléctrica	lectura del extractp de saturación en radiómetro, extracto 1:1	mmhos/ cm
Materia orgánica	método de walkley y black, oxidación del carbono	%
Fósforo disponible	método de olsen modificado, extracción con $\text{NaHCO}_3= 0.5\text{m}$, pH 8.5.	ppm
Potasio disponible	extracción con acetato de amonio ($\text{ch}_3\text{--coonh}_4$)n, ph 7.0	ppm
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	método del acetato de amonio 1n, ph 7.0	meq/100g

3.3.3. Trabajo de Gabinete

a. Consolidación y sistematización de la información temática

La información de carácter espacial y tabular recolectada en la primera etapa de la metodología, y validadas en la etapa de campo, fue consolidada y sistematizada para que represente la realidad de la UNALM. De esta manera, la información temática se

uniformizó a una misma escala 1:60,000 y a un mismo sistema de referencia espacial Datum WGS – 84, proyección UTM, Zona 18S.

b. Generación de información temática de parámetros físicos y químicos de los campos Agrícolas de la UNALM

- El mapa base se generó en base a información disponible en la Carta Nacional de Lima y en la BAN donde se obtuvo información de un mapa de suelos de la UNALM del año 1942
- Los mapas de contenido de arcilla, limo y arena se generó en base a información recopilada de las 77 calicatas y de sus posterior análisis de laboratorio donde se obtuvo dichos resultados; usándose la ayuda del software ArcGis 10.1, a partir del cual se creó una superficie TIN y su consiguiente superficie raster, obteniéndose mediante interpolación con el IDW del acuerdo a la distribución de nuestros puntos el contenido de toda el área de la UNALM clasificada en cinco rangos y con unidad de medición en porcentaje.
- El mapa de velocidad de infiltración se generó en base a información recopilada en campo, obteniendo las isoyetas para luego generar el mapa a partir de la interpolación realizada de acuerdo a los intervalos de infiltración.
- El mapa de densidad aparente, fue resultado de la interpolación de los datos obtenidos en laboratorio las isoyetas se realizaron en función a tres clasificaciones de niveles, que van de bajo hasta alto.
- El mapa de capacidad de retención de agua disponible, fue resultado de la interpolación de los datos obtenidos en laboratorio mediante el punto de marchitez y capacidad de campo; las isoyetas se realizaron en función a tres clasificaciones de niveles, que van de bajo hasta alto.
- El mapa de materia orgánica, es el resultado de usar IDW en los 77 puntos calicateados, dando como resultado el área total de la UNALM, clasificando los tipos de suelo según su contenido en 3, bajo, medio y alto.

- El mapa de pH, fue obtenido según tres clasificaciones, las que se obtuvieron mediante el análisis de suelo realizado en el LASPAF.
- El mapa de P y K, resultado de las 77 calicatas y la toma de muestras de suelo a 30cm de profundidad respectivamente, estas fueron analizadas en los equipos de absorción atómica para poder determinar estos elementos.
- El mapa de CE, es el resultado de la interpolación de cada uno de los puntos calicateados, las clasificaciones fueron 3 de acuerdo a los criterios tomados.
- El mapa de la CIC, se basó en el análisis de caracterización que se dio a cabo en el LASPAF, donde se desarrolló los 77 muestras, a partir de las cuales se pudo mediante el IDW de ArcGis 10.0, realizar las interpolaciones que permitieron dar como resultado la cobertura de cada una de las áreas de cultivos de la UNALM.

c. Construcción de la base de datos geoespaciales

Para efectos de la presente investigación y tomando en cuenta las condiciones y antecedentes presentes en la zona objeto de estudio, se determinó la calidad en función de sus indicadores de tipo físico y químico de los suelos de UNALM. Dónde para cada uno de ellos se identificó sus relaciones con las funciones y condiciones del, que cuantitativa y cualitativamente permitiera evaluar la calidad en la UNALM (Cuadro 12). Dentro del sistema de información geográfica se construyó la base de datos geoespacial de cada una de las variables para el modelo de calidad física y química, diseñándose una proyección del esquema lógico de cada variable estudiada, tal como se muestra en la Figura 10.

Cuadro 12. Indicadores físicos y químicos del suelo.

	Indicador	Relación con las funciones y condiciones del suelo	Valores o unidades relevantes, comparaciones para evaluación
Físicos	Textura	Retención y transporte de agua y minerales; erosión del suelo	% (arena, limo y arcilla); pérdida de sitio o posición del paisaje
	Velocidad de Infiltración	Potencial de lixiviación, productividad y erosión	min/2,5cm agua
	Densidad aparente	Porosidad, aireación, erosión y productividad	g/cm ³
	Capacidad de retención de agua	Contenido en humedad, transporte, erosión, humedad aprovechable, textura, materia orgánica	% (cm ³ /cm ³); cm humedad aprovechable/30cm; intensidad de precipitación (mm/h)
Químicos	Contenido en materia orgánica	Fertilidad de suelo, estabilidad y grado de erosión, potencial productivo	kg (C ó N)/ha
	pH	Actividad química y biológica	Comparación entre los límites superiores e inferiores para la actividad vegetal y microbiana
	Conductividad eléctrica	Actividad microbiológica y crecimiento de plantas	dS/m; comparación entre los límites superiores e inferiores para la actividad vegetal y microbiana
	P, K extraíbles	Disponibilidad de nutrientes para las plantas, indicadores de productividad y calidad ambiental	Ppm
	Capacidad de intercambio catiónico	Fertilidad del suelo, potencial productivo	meq/100g

Fuente: (Chen, 2000) modificado por Acevedo et al (2005)

d. Modelos geospaciales de calidad

Los modelos geospaciales, permitieron determinar el grado de la calidad del suelo, mediante el análisis de las variables físicas- químicas. Para hacer el modelamiento geoespacial se hizo uso de los sistemas de información geográfica, donde se integró los indicadores de cada parámetro y en primer término se generó los modelos individuales de cada uno de los parámetros comprendidos dentro de la calidad, para luego obtener el modelo integrado de calidad. En la figura 10 se presenta el modelo conceptual donde se muestra la estructura de las variables consideradas para obtener el modelo de calidad física y química del suelo.

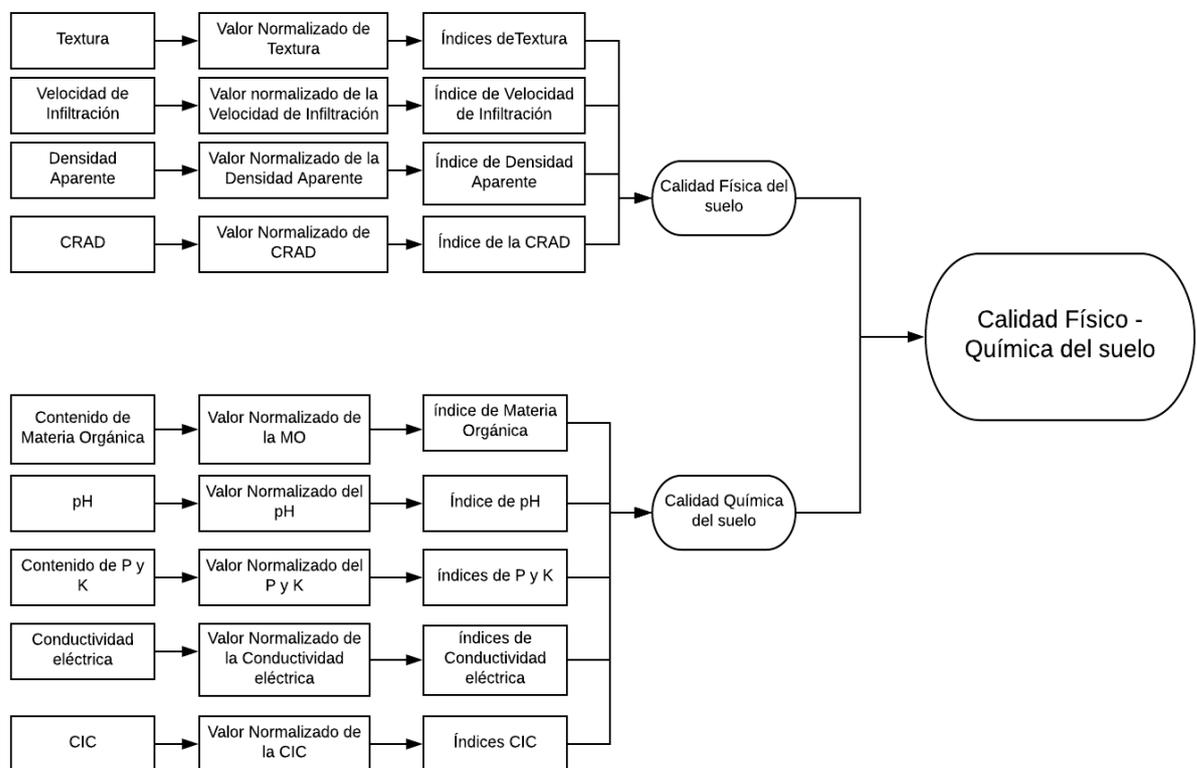


Figura 10: Modelo conceptual de la calidad del suelo

Modelo geoespacial de calidad física (MGCF)

En el modelo de calidad física se consideró seis variables temáticas respectivamente, que reflejan las condiciones físicas de la UNALM y son de gran importancia para determinar la calidad en la zona de estudio (figura 11), cuya expresión se presenta en la ecuación 1, esta ecuación se determinó que es de forma lineal, debido a los análisis previos de relación de los indicadores (Andrews et al., 2002).

$$MGCF = a*Ar + b* A + c*L + d* VI + e*DA + f*CRAD \quad (1)$$

Donde:

Ar= Índice de Arcilla

A= Índice de Arena

L= Índice de Limo

VI= Índice de Velocidad de Infiltración

CRAD= Índice de Capacidad de retención de agua disponible

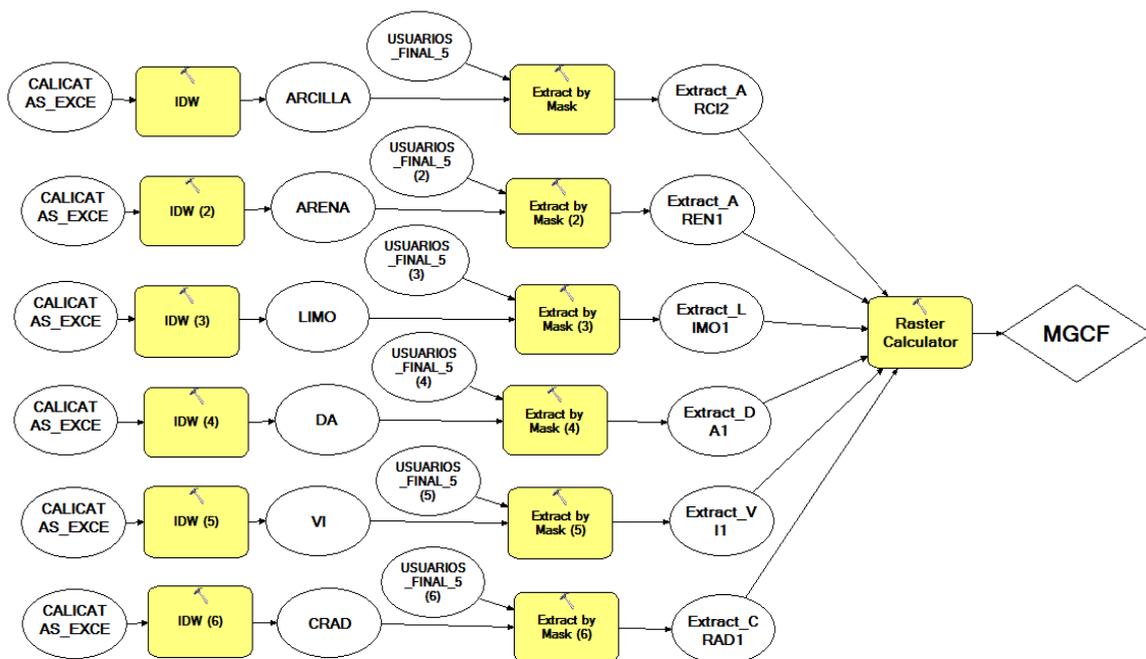


Figura 11: Modelo geoespacial de la calidad física de la UNALM

Indicadores físicos

Los valores (pesos) asignados a la unidad de cada variable temática, se trabajó en base a los criterios de valoración establecidos en estudios realizados por Cantú et al. (2007, 2009), Andrews et al. (2002), y opinión de expertos. Se tomó una escala de 0 a 1, en donde el valor de cero fue asignado a la situación del indicador que presenta menor calidad y 1 a la situación de mayor calidad. En los Cuadros 12 al 17, se muestra las respectivas escalas de

valoración para cada variable física: textura (arcilla, arena, limo), velocidad de infiltración, densidad aparente y capacidad de retención de agua disponible.

Para la determinación de los índices existen diversas maneras de trabajarse (Cantú et al., 2007, 2009): la primera es cuando el valor máximo del indicador (Imáx) corresponde a la mejor situación de calidad de suelo (Valor del índice normalizado Vn= 1) y el cálculo es: $V_n = (I_m - I_{min}) / (I_{max} - I_{min})$. La otra situación es cuando el valor Imx corresponde a la peor situación de calidad de suelo (Vn = 0) y se calcula como: $V_n = 1 - (I_m - I_{min} / I_{max} - I_{min})$ donde Vn = valor del índice normalizado, Im =medida del indicador, Imax = valor máximo del indicador, Imin = valor mínimo del indicador.

Im = Valor medido.

Imin = Valor mínimo considerado.

Imáx = Valor máximo considerado.

Cuadro 13. Escala de valoración para la variable temática de arcilla

Arcilla %	Índices
< 10	0.00 - 0.25
10 - 15	0.25 - 0.63
15 - 30	0.63 – 1.00

Fuente: Adaptación de Cantú et al. 2007, 2009

$$\text{Índice de Arcilla} = \left(\frac{I_m - I_{min}}{I_{máx} - I_{min}} \right)$$

La escala de valoración para el cálculo de los índices del contenido de arcilla (%), consideró el Imin= 10% y el Imáx= 30%.

Cuadro 14. Escala de valoración para la variable temática de limo

Limo %	Índices
< 10	0.00- 0.33
10 – 30	0.33 – 1.00
30 – 60	1.00 – 0.00

Fuente: Adaptación de Cantú et al. 2007, 2009

$$\text{Índice de Limo (<30\%)} = \left(\frac{I_m - I_{min}}{I_{máx} - I_{min}} \right)$$

$$\text{Índice de Limo (> 30\%)} = 1 - \left(\frac{I_m - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} - 1 \right)$$

De la escala de valoración de el limo se considero los índices el $I_{\min} = 0\%$ y el $I_{\max} = 30\%$.

Cuadro 15. Escala de valoración para la variable temática de arena

Arena %	Índices
10 – 30	0.17 - 0.50
30 – 60	0.50 – 1.00

Fuente: Adaptación de Cantú et al. 2007, 2009

$$\text{Índice de Arena} = 1 - \left(\frac{I_m - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \right)$$

La escala de valoración para el cálculo de los índices del contenido de arena (%), consideró el $I_{\min} = 0\%$ y el $I_{\max} = 60\%$

Cuadro 16. Escala de valoración para la variable temática de velocidad de infiltración

Velocidad de Infiltración (m/s)	Índices
< 5	1.00 - 0.80
5 – 10	0.80 - 0.60
10 – 20	0.60 - 0.20
> 20	0.20 – 0.00

Fuente: Adaptación de Cantú et al. 2007, 2009

$$\text{Índice de V.I.} = 1 - \left(\frac{I_m - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \right)$$

La escala de valoración para el cálculo de los índices de velocidad de infiltración consideró el $I_{\min} = 0$ y el $I_{\max} = 25$.

Cuadro 17. Escala de valoración para la variable temática de la densidad aparente

DA (g/cm ³)	Índices
< 1.25	1.00 - 0.72
1.25- 1.55	0.72 - 0.39
> 1.55	0.61 – 0.00

Fuente: Adaptación de Cantú et al. 2007, 2009

$$\text{Índice de la DA} = 1 - \left(\frac{I_m - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \right)$$

La escala de valoración para el cálculo de los índices de la densidad aparente consideró el $I_{\min} = 1$ y el $I_{\max} = 1.9$.

Cuadro 18. Escala de valoración para la variable temática de la capacidad de retención de agua disponible

CRAD %	Índices
< 7	0.28
7 – 10	0.28- 0.55
> 10	0.55-1.00

Fuente: Adaptación de Cantú et al. 2007, 2009

$$\text{Índice de la CRAD} = \left(\frac{I_m - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \right)$$

La escala de valoración para el cálculo de los índices de la densidad aparente consideró el $I_{\min} = 4\%$ y el $I_{\max} = 15\%$.

Grado de participación de las variables temáticas físicas

En la ecuación 1 se presenta la expresión del modelo de calidad física en función a las variables: Textura (arcilla, arena y limo), Velocidad de Infiltración, Densidad Aparente y Capacidad de Retención de Agua Disponible. Dichas variables están afectadas por un coeficiente de participación (a, b, c, d, e y f), los cuales fueron determinados en función a su mayor incidencia e importancia de la variable sobre el modelo (Cuadro 19). Fuente: Opinión de experto de la Facultad de Agronomía, el departamento de suelos: Nazario Ríos, Julio (2019), y (Andrews et al., 2002). Donde se emplea la matriz de correlación de Pearson para saber la correlación de las variables entre si. En la textura se dio tres grados de significancia diferentes dentro de lo que es la arcilla, arena y limo; siendo estos respectivamente 40 por ciento, 15 por ciento y 5 por ciento, la arcilla se le consideró el valor más alto dentro de las variables físicas por su capacidad de retener los nutrientes, porque en el área de estudio es predominante dentro de los suelos Francos, al igual que la arena. La velocidad de infiltración se le asignó un peso de 5 por ciento y al de la densidad aparente el segundo valor más alto de 25 por ciento, debido a su relación estrecha con el contenido de arcilla; por último, la capacidad de retención de agua disponible con un 10 por ciento.

Cuadro 19. Grado de participación de las variables físicas en la calidad

VARIABLES FÍSICAS	Grado de Participación
Arcilla	0.40
Arena	0.15
Limo	0.05
Velocidad de Infiltración	0.05
Densidad Aparente	0.25
Capacidad de retención de agua disponible	0.10

Fuente: Adaptación de Cantú et al. (2007, 2009) y Andrews et al.(2002)

Modelo geoespacial de calidad química (MGCQ)

Para el modelo de calidad química se consideró la incidencia de seis variables que reflejan las condiciones químicas de los suelos de la UNALM y son de gran importancia para determinar la calidad en la zona de estudio (Figura 12), cuya expresión se presenta en la ecuación 2, esta ecuación se determinó que es de forma lineal, debido a los análisis previos de relación de los indicadores (Andrews et al., 2002).

$$\text{MGCQ} = a * \text{pH} + b * \text{MO} + c * \text{CIC} + d * \text{P} + e * \text{K} + f * \text{CE} \quad (2)$$

Donde:

pH= Índice de pH

MOR= Índice de Materia Orgánica

CIC= Índice de Capacidad de Intercambio Catiónico

P= Índice de Fósforo

K= Índice de Potasio

CE= Índice de Conductividad Eléctrica

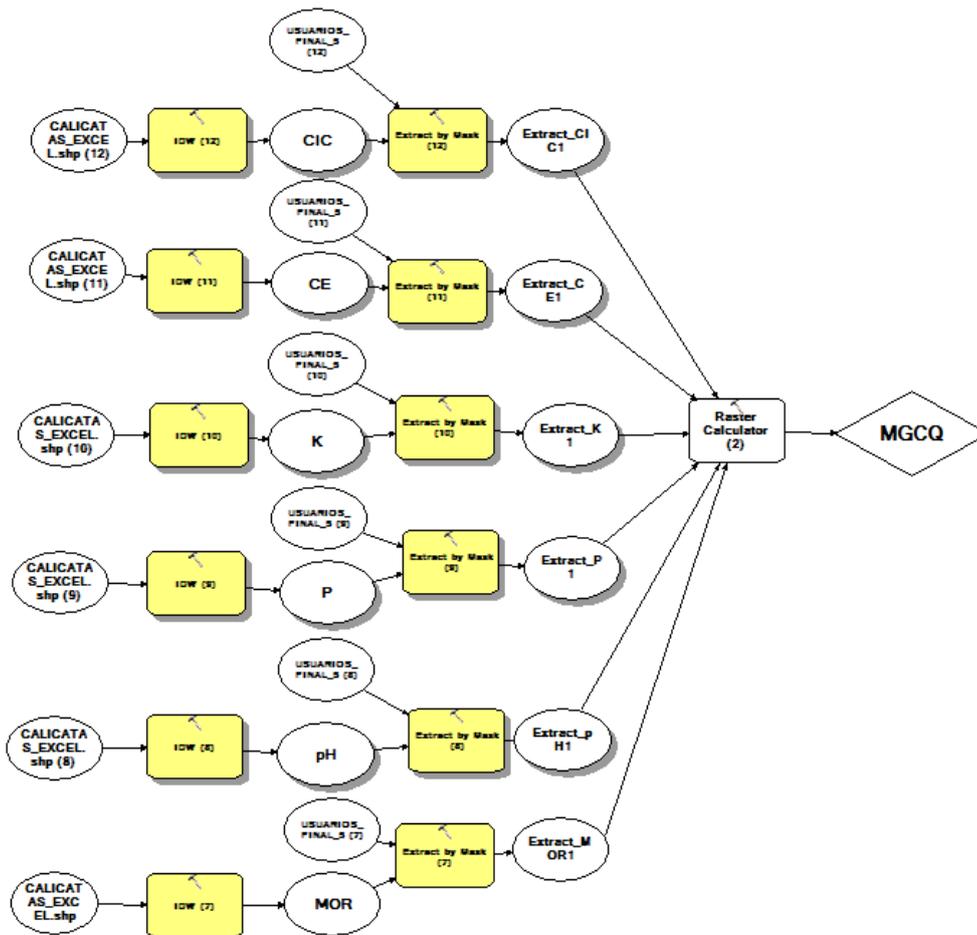


Figura 12: Modelo geoespacial de la calidad química de los suelos de la UNALM

Valoración de los indicadores químicos

Se utilizó una escala de calificación de 0 a 1, en donde el valor de 0 fue asignado a la situación del indicador que presente menor calidad y 1 a la situación de mayor calidad. En las Cuadros 20 y 25, se presenta la escala de valoración de las unidades de las variables químicas: Materia Orgánica, pH, P, K, Conductividad eléctrica, y CIC.

Cuadro 20. Escala de valoración para la variable temática de la materia orgánica

Materia orgánica oxidable%	Índices
< 2	0.00- 0.50
2 - 4	0.50- 1.00
> 4	1.00

Fuente: Adaptación de Cantú et al. 2007, 2009

$$\text{Índice del contenido de M.O.(\%)} = \left(\frac{I_m - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \right)$$

La escala de valoración para el cálculo de los índices del contenido de la Materia Orgánica (%), consideró el $I_{\min}= 0\%$ y el $I_{\max}= 4\%$.

Cuadro 21. Escala de valoración para la variable temática del pH

pH	Índices
6.7- 7.0	0.79 – 1.00
7.0 - 7.8	1.00 – 0.43
7.8 - 8.39	0.43 - 0.01

Fuente: Adaptación de Cantú et al. 2007, 2009

$$\text{Índice del pH} > 7 = 1 - \left[1 - \left(\frac{I_m - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \right) \right] \times -1$$

$$\text{Índice del pH} < 7 = 1 - \left[1 - \left(\frac{I_m - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \right) \right]$$

La escala de valoración para el cálculo de los índices del pH consideró el $I_{\min}= 5.6\%$ y el $I_{\max}= 7\%$.

Cuadro 22. Escala de valoración para la variable temática del P

Fósforo asimilable (ppm)	Índices
< 7	< 0.13
7.0-14.0	0.13 - 0.25
14.0 - 55	0.25 – 1.00

Fuente: Adaptación de Cantú et al. 2007, 2009

$$\text{Índice del contenido P} = \left(\frac{I_m - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \right)$$

La escala de valoración para el cálculo de los índices del contenido del P consideró el $I_{\min}= 0$ y el $I_{\max}= 55$.

Cuadro 23. Escala de valoración para la variable temática del K

Potasio asimilable (ppm)	Índices
< 100	0.00
100 - 240	0.00 - 0.47
> 240	0.47 – 1.00

Fuente: Adaptación de Cantú et al. 2007, 2009

$$\text{Índice del contenido K} = \left(\frac{I_m - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \right)$$

La escala de valoración para el cálculo de los índices del contenido del K consideró el $I_{\min} = 100$ y el $I_{\max} = 400$.

Cuadro 24. Escala de valoración para la variable temática de la conductividad eléctrica

CE(dS/m)	Índices
0.01 - 0.45	1.00 – 0.85
0.45 - 1.5	0.85 – 0.48
1.5 - 2.9	0.48 – 0.00

Fuente: Adaptación de Cantú et al. 2007, 2009

$$\text{Índice de la CE} = 1 - \left(\frac{I_m - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \right)$$

La escala de valoración para el cálculo de los índices del contenido del K consideró el $I_{\min} = 0.01$ y el $I_{\max} = 2.90$.

Cuadro 25. Escala de valoración para la variable temática de la capacidad de intercambio catiónico

C.I.C. (meq/100g)	Índices
0 - 3	0.00
3 - 18	0.00 – 0.60
> 18	0.60 – 1.00

Fuente: Adaptación de Cantú et al. 2007, 2009

$$\text{Índice de la CIC} = \left(\frac{I_m - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \right)$$

La escala de valoración para el cálculo de los índices del contenido del K consideró el $I_{\min} = 3$ y el $I_{\max} = 28$.

Grado de participación de las variables temáticas químicas

En la ecuación 2 se presenta la expresión del modelo de calidad química en función a las variables: materia orgánica, pH, P, H, conductividad eléctrica y CIC. Dichas variables están afectadas por un coeficiente de participación (a, b, c, d, e y f), los cuales fueron

determinados en función a su mayor incidencia e importancia de la variable sobre el modelo (Cuadro 26).

Cuadro 26. Grado de participación de las variables químicas en la calidad

Variables Químicas	Grado de Participación
Materia orgánica	0.15
pH	0.25
P	0.15
K	0.15
CE	0.10
CIC	0.20

Fuente: Adaptación de Cantú et al. (2007, 2009) y Andrews et al.(2002)

Modelo geoespacial de la calidad global (MGCG)

El objetivo de generar el modelo global de calidad en la UNALM La Molina- Lima es el determinar las zonas críticas de calidad, para ello se integró el modelo de: calidad física y calidad química; a través del modelamiento geoespacial que permitió determinar el grado de calidad teniendo en cuenta las condiciones físicas y químicas, el esquema se presenta en la Figura 21 y la expresión del modelo en la ecuación 3, esta se determinó que es de forma lineal, debido a los análisis previos de relación de los indicadores (Andrews et al., 2002), donde para ellos ya cada uno de los indicadores correspondientes a la MGCF y MGCQ, fueron normalizados utilizando una escala de 1 a 0, Cantú et al. 2007, Cantú et al. 2009.

$$\mathbf{MGCG = a * MGCF + b * MGCQ} \quad \mathbf{(3)}$$

Donde:

MGCF= Modelo calidad física del suelo

MGCQ= Modelo de la calidad química del suelo

a y b = Grado de participación

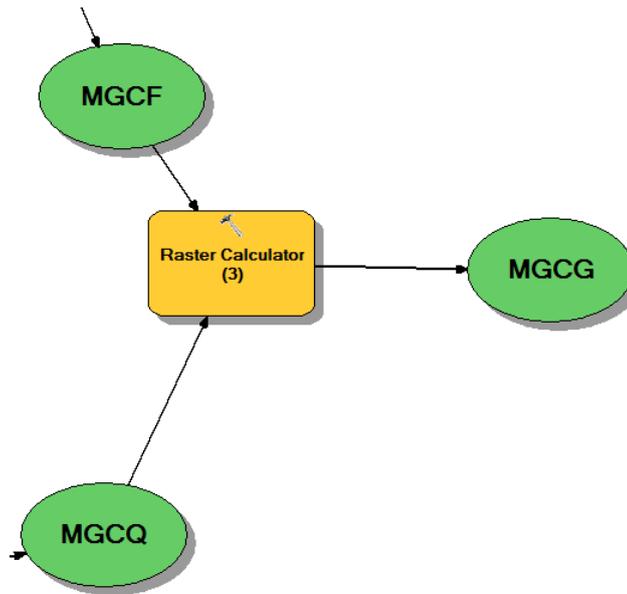


Figura 13: Modelo geoespacial de calidad global

Grado de participación

Para generar el modelo de calidad global (ecuación 3) se le asignó la participación de los sub modelos físico y químico de acuerdo a su incidencia sobre la calidad en la UNALM, teniendo en cuenta trabajos realizados en España, México, Ecuador y juicio de expertos. En los Cuadros 19 y 26 se muestran los grados de participación de los parámetros de los sub modelos de calidad física y química.

Modelo de calidad física y química se le asignó respectivamente un valor de 50 por ciento de participación, por tener una influencia similar en el grado de calidad del territorio de trabajo.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Información temática generada para el modelo de calidad física de suelos de la UNALM

4.1.1. Variable temática de contenido de arcilla

De acuerdo a los resultados obtenidos en rangos que van desde 9 % a un 29 % (cuadro 27). Resultando hasta 60 por ciento con grado de influencia de 1; como muy alto valor; entre 30 – 60 por ciento, alta concentración; 10 – 30 media concentración; y de 0 a 10, bajo porcentaje; los pesos se dieron considerando el mínimo de 0 y el máximo de 40, que corresponden a un 0 y 1 en clasificar la calidad.

Cuadro 27. Clasificación de áreas e índices según el contenido de Arcilla

Clasificación	Arcilla %	Índices	Área (ha)
Bajo	< 10	0 - 0.25	0.340
Medio	10 - 15	0.25 - 0.63	97.051
Alto	15 - 30	0.63 - 1.00	3.589

Fuente: Adaptación de Cantú et al. 2007, 2009.

4.1.2. Variable temática de contenido de limo

De acuerdo a los resultados obtenidos se clasificó el contenido de limo en rangos que van desde 6% a 34% (cuadro 28). Resultando mayores a 60 por ciento, como muy alto valor; entre 30 – 60 por ciento, alta concentración; 10 – 30 regular concentración; y de 0 a 10, bajo porcentaje; los pesos se dieron considerando el mínimo de 0 y el máximo de 30, que corresponden a 0 y 1 en clasificar la calidad.

Cuadro 28. Clasificación de áreas e índices según el contenido de limo

Clasificación	Limo %	Índices	Área (ha)
Bajo	< 10	0.00 - 0.33	0.858
Medio	10 - 30	0.33 – 1.00	96.792
Alto	30 - 60	1.00 – 0.00	3.330

Fuente: Adaptación de Cantú et al. 2007, 2009.

4.1.3. Variable temática de contenido de arena

De los resultados obtenidos se clasificó el contenido de la arena en rangos que van desde 37% a un 85% (cuadro 29). Resultando mayores a 60 por ciento, como muy alto valor; entre 30 – 60 por ciento, alta concentración; 10 – 30 media concentración; y de 0 a 10, bajo porcentaje; los pesos se dieron considerando el mínimo de 0 y el máximo de 60, que corresponden a 0 y 1 en clasificar la calidad.

Cuadro 29. Clasificación de áreas e índices según el contenido de arena

Clasificación	Arena %	Índices	Área (ha)
Alto	30 - 60	0.50 – 1.00	63.098
Muy alto	60 -85	1.00 – 0.58	37.882

Fuente: Adaptación de Cantú et al. 2007, 2009.

4.1.4. Variable temática de Velocidad de Infiltración

Las velocidades de infiltración obtenidas en campo fueron de mínimo de 4.50 cm/hora y un máximo de 24. 60 cm/hora; la clasificación de estos valores comprenden de bajo a muy alto como se pueden observar en el cuadro 30; donde se detallan los pesos de los 77 puntos muestreados; el peso más alto se da progresivamente para las velocidades inferiores a 20 cm/hora.

Cuadro 30. Clasificación de áreas e índices según el contenido de la V.I

Clasificación	Velocidad de Infiltración (VI-)	Índices	Área (ha)
Bajo	< 5	1.00 - 0.80	12.807
Medio	5 - 10	0.80 - 0.60	81.810
Alto	10 - 20	0.60 - 0.20	5.882
Muy alto	> 20	0.20 - 0.00	0.481

Fuente: Adaptación de Cantú et al. 2007, 2009.

4.1.5. Variable temática de Capacidad de retención de agua disponible

Los datos obtenidos de laboratorio de la CRAD van desde 5.77% a 12.07% (cuadro 31). Resultando mayores a 10 por ciento, como alto valor; entre 7 – 10 por ciento, mediana capacidad; y menores a 7 por ciento de baja capacidad; los pesos se dieron considerando el mínimo de 0 y el máximo de 15, que corresponden a 0 y 1 en clasificar la calidad.

Cuadro 31. Clasificación de áreas e índices según el contenido de capacidad de retención de agua disponible

Clasificación	CRAD %	Índices	Área (ha)
Bajo	< 7	0.00 - 0.28	-
Medio	7 - 10	0.28 - 0.55	100.040
Alto	> 10	0.55 - 1.00	0.940

Fuente: Adaptación de Cantú et al. 2007, 2009.

4.1.6. Variable temática Densidad Aparente

Del análisis de laboratorio los resultados de la densidad aparente estuvieron en rangos que van desde 1.12 a 1.81, a los cuales mediante una normalización de valores se obtuvieron índices que van desde 0 hasta 1, (cuadro 32). Resultando los valores bajos de la clasificación de la densidad aparente de 1.25 con índice alto de 0.73; como valores medios entre 1.25 a 1.55, con pesos promedios decreciendo entre valores de 0.73 a 0.39; y de alta incidencia los mayores a 1.55, con índices bajos que varían entre 0.39 a 0 por ciento; los pesos se dieron considerando el mínimo de 1 y el máximo de 1.9.

Cuadro 32. Clasificación de áreas e índices según el contenido de densidad aparente

Clasificación	DA(g/cc)	Índices	Área (ha)
Bajo	< 1.25	1.00 - 0.73	0.185
Medio	1.25- 1.55	0.73 - 0.39	92.131
Alto	> 1.55	0.39 – 0.00	8.664

Fuente: Adaptación de Cantú et al. 2007, 2009.

4.1.7. Modelo Geoespacial de la calidad física de los suelos de la UNALM

El modelo de calidad física (MGCF) fue generado utilizando las variables:

Limo (LIMO %), Arena (ARENA %), Arcilla (ARCILLA %), Densidad Aparente (DA), Capacidad de retención de Agua disponible (CRAD) y Velocidad de Infiltración (VELOCIDAD), en la que se realizó la calificación de las unidades variables y se le asignó el grado de participación de cada variable, se aprecia en la ecuación (4), donde para ellos ya cada uno de los indicadores correspondientes a la MGCF, fueron normalizados utilizando una escala de 1 a 0, (Cantú et al., 2007, 2009).

En los resultados se puede observar (cuadro 33 y figura 14) que existen zonas de alta calidad física (39.954 ha), y de moderada calidad (59.465 ha), cuyas características principales son texturales y que comparten densidades aparentes similares, encontrándose los campos pertenecientes a los programas: fundo, centro de ventas, ing. agrícola, agronomía, zootecnia, frutales, jardín botánico, huerto, algodón, ornamentales, papa, maíz, banco de semen, cereales, ciencia, leguminosas, pastos y forrajes etc.

$$\text{MGCF} = 0.40 \cdot \text{Ar} + 0.15 \cdot \text{A} + 0.05 \cdot \text{L} + 0.05 \cdot \text{VI} + 0.25 \cdot \text{DA} + 0.10 \cdot \text{CRAD} \quad (4)$$

Cuadro 33. Índices de calidad de suelos y áreas de incidencia

Índice de calidad de suelos	Escala	Clase	Área (ha)	%
Muy alta calidad	0.80 – 1.00	1	-	-
Alta calidad	0.60 – 0.79	2	39.954	39.57
Moderada calidad	0.40 – 0.59	3	59.465	58.88
Baja calidad	0.20 – 0.39	4	1.561	1.55
Muy baja calidad	0.00 – 0.19	5	-	-

Fuente: Adaptación de Cantú et al. (2007, 2009) y Andrews et al. (2002)

También, se presenta un índice de baja calidad (1.562 ha), donde presentan una menor densidad aparente menor contenido arcilla en comparación a los campos de moderada calidad, donde se comprende a los programas de:

Vivero Forestal (zona sierra 1 y zona sierra 3).

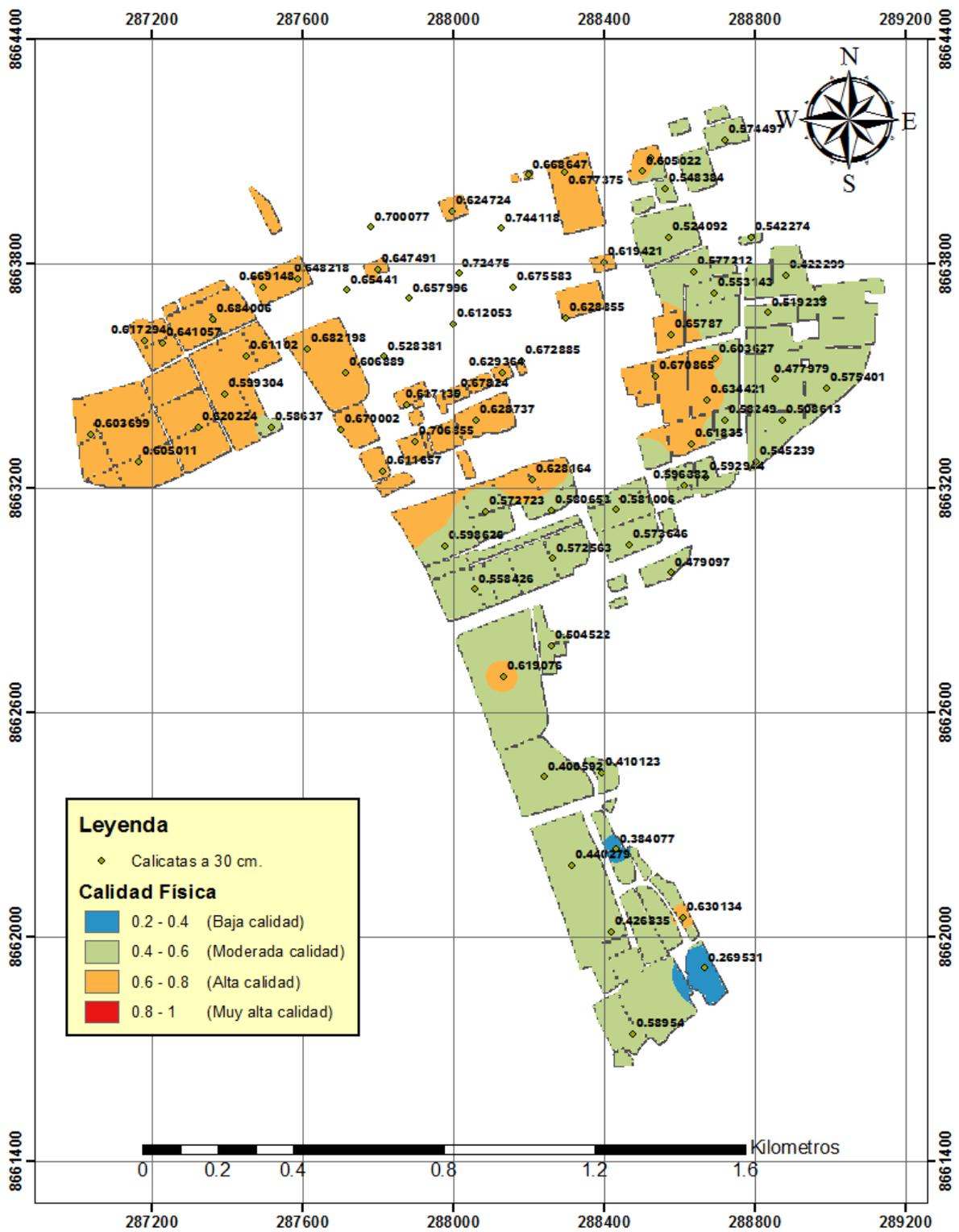


Figura 14. Mapa de calidad física de los campos de la UNALM

Fuente Propia

4.2. Información temática generada para el modelo de calidad química de suelos de la universidad nacional agraria la molina

4.2.1. Variable temática de pH

Para esta variable temática se clasificó en rangos que van desde cero hasta mayor de 8.39 (cuadro 34). Resultando valores entre 7.9 – 8.39, como fuertemente alcalino donde existe presencia de carbonato sódico; entre 7.1 – 7.8, ligeramente alcalino con problemas de clorosis; 6.6 – 7.0, efectos tóxicos mínimos al ser neutro y por último de 6.1 – 6.5, ligeramente neutro que es el más adecuado para la asimilación de nutrientes. Así mismo, se le asignó los pesos de acuerdo a su incidencia a la máxima calidad donde 1 es el 100% y 0 es lo mínimo.

Cuadro 34. Clasificación de áreas e índices según el contenido de pH

Clasificación del Suelo	pH	Índices	Área (ha)
Neutron	6.7- 7.0	0.79 – 1.00	1.132
Ligeramente alcalino	7.0 - 7.8	1.00 – 0.43	16.788
Moderadamente alcalino	7.88 - 8.39	0.43 - 0.01	83.06

Fuente: Adaptación de Cantú et al. 2007, 2009.

4.2.2. Variable temática de C.E.

Se clasificó (cuadro 35) según la distribución del rango de valores máximos de conductividad eléctrica, que van desde cero hasta mayor a 2.65 mmhos/cm, con valores entre 0.01 – 0.45, como un conductividad baja (no salina), inapreciable (todos los cultivos puede soportarla); entre 0.45 – 1.5 bajo (ligeramente salina), sólo afecta cultivos muy sensible y 1.5 – 2.9 medio (moderadamente salino), tomar precauciones con toda clase de cultivos sensibles.

Cuadro 35. Clasificación de áreas e índices según el contenido de C.E.

Clasificación	CE(mmhos/cm)	Índices	Área (ha)
Baja (no salina)	0.01 - 0.45	1.00 – 0.85	55.329
Bajo (Ligeramente salina)	0.45 - 1.5	0.85 – 0.48	45.274
Medio (Moderadamente salino)	1.5 - 2.9	0.48 – 0.00	0.377

Fuente: Adaptación de Cantú et al. 2007, 2009.

4.2.3. Variable temática de M.O.

Se considero (cuadro 36) los valores máximos y mínimos como los picos que puedan afectar de manera positiva y negativamente respectivamente; siendo de los pesos el mejor 1 y el de la peor situación 0. Se obtuvo de esta forma los valores de 1 al considerar 4% como valor máximo de materia orgánica siendo de clasificación alta, entre rangos de 2 % - 4 % considerados de media; y los < 2% de clasificación baja.

Cuadro 36. Clasificación de áreas e índices según el contenido de M.O.

Clasificación	Materia orgánica (%)	Pesos	Área (ha)
Bajo	< 2	0.00 - 0.50	99.841
Medio	2 - 4	0.50 - 1.00	1.139
Alto	> 4	1.00	-

Fuente: Adaptación de Cantú et al. 2007, 2009.

4.2.4. Variable temática de P

En base a la información recopilada de campo se identificaron tres clasificaciones para el suelo según su contenido de P extractable, tal y como se muestra en el cuadro 37. Considerando esas características, se transformaron en índices de acuerdo a las condiciones más favorables para una mejor calidad de suelo, los de más bajo contenido son los que dieron índices mínimos, siendo el menor de 0.13, los índices de suelos de significancia media varán entre 0.13 y 0.25 cuyo contenido de ósforo asimilable varía entre los 7.0 – 14.0 ppm, y los de más alta clasificación para la calidad varían de 0.25 – 1 de peso.

Cuadro 37. Clasificación de áreas e índices según el contenido de P

Clasificación	Fósforo (ppm)	Índices	Área (ha)
Bajo	<7	< 0.13	2.338
Medio	7.0-14.0	0.13 - 0.25	46.361
Alto	14.0 - 0.55	0.25 – 1.00	52.281

Fuente: Adaptación de Cantú et al. 2007, 2009.

4.2.5. Variable temática de K

El contenido de potasio (K), un factor importante en la determinación de calidad de los suelos agrícolas, se generó el mapa de acuerdo a la información obtenida en campo del análisis de caracterización de las 77 calicatas, que se presentan en el cuadro 38. Considerando los pesos más bajos para el potasio admisible menor a 100 ppm correspondientes a peso 0; entre 100 – 240 ppm de evaluación media con pesos entre 0 y 0.46 respectivamente; y los más favorables a la calidad de suelo de valores altos entre 0.46 a 1. En nuestros resultados obtuvimos el potasio mínimo de los suelos de la UNALM de 302 ppm a un máximo de 398 ppm.

Cuadro 38. Clasificación de áreas e índices según el contenido de K

Clasificación	Potasio (ppm)	Pesos	Área (ha)
Bajo	< 100	0.00	-
Medio	100 - 240	0.00 - 0.46	-
Alto	> 240	0.46 – 1.00	1009.800

Fuente: Adaptación de Cantú et al. 2007, 2009.

4.2.6. Variable temática de capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Con los resultados obtenidos del análisis en laboratorio de los suelos procedentes de las 77 calicatas, los pesos variaron desde un mínimo de 0.08 a un máximo de 0.92, correspondientes a las CIC de 4.16 y 16.80, estos se establecieron conforme a lo que es la calidad agrícola del suelo, siendo correlativamente una mayor CIC una mayor calidad como se observa en el cuadro 39, donde se detallan los pesos y su evaluación baja, media y alta.

Cuadro 39. Clasificación de áreas e índices según el contenido de capacidad de intercambio catiónico

Clasificación	C.I.C. (meq/100g)	Pesos	Área (ha)
Baja	0 - 3	0.00	-
Media	3 - 18	0.00 - 0.60	100.98
Alta	> 18	> 0.60	-

Fuente: Adaptación de Cantú et al. 2007, 2009.

4.2.7. Modelo Geoespacial de la calidad química de los suelos de la UNALM

El modelo de calidad química (**MGCQ**) fue generado utilizando las variables:

pH (pH calidad), C.E.(C.E. calidad), M.O.(M.O.% calidad), P (P ppm calidad), K (K ppm calidad) y C.I.C (C.I.C. calidad), en la que se realizó la clasificación de las unidades en cada una de las variables y se le asignó el grado de participación de cada variable en el modelo de calidad química, cuya ecuación (5) presenta, donde para ellos ya cada uno de los indicadores correspondientes a la MGCF y MGCQ, fueron normalizados utilizando una escala de 1 a 0 (Cantú et al., 2007, 2009.)

$$\text{MGCQ: } 0.25*\text{pH} + 0.15*\text{Kppm} + 0.15*\text{Pppm} + 0.20*\text{CIC} + 0.10*\text{CE} + 0.15*\text{M.O. \%} \quad (5)$$

En los resultados se puede observar (cuadro 40 y figura 15) que existen zonas de calidad química de alta calidad (8.923 ha), cuyas características que dan mayor aporte al índice de calidad son el pH, la conductividad eléctrica y la CIC, siendo estos para esta clase de calidad similar, encontrándose los campos pertenecientes al programa de:

Vivero Forestal (parte costa, zona sierra, bosque, zona de compost), ingeniería agrícola, maíz, papa, y ornamentales.

Cuadro 40. Índices de calidad de suelos y áreas de incidencia

Índice de calidad de suelos	Escala	Clase	Área (ha)	%
Muy alta calidad	0.80 - 1.00	1	-	-
Alta calidad	0.60 - 0.79	2	8.923	8.84
Moderada calidad	0.40 – 0.59	3	91.894	91
Baja calidad	0.20 – 0.39	4	0.163	0.16
Muy baja calidad	0.00 – 0.19	5	-	-

Fuente: Adaptación de Cantú et al. (2007, 2009) y Andrews et al. (2002)

También, se presenta un índice de moderada calidad (91.894 ha), donde presentan una menor pH, y CIC, pero se se compenza con los índices de la Conductividad eléctrica y del Potasio, las zonas con esta calidad son comprendidas en los programas de: Fundo, Centro de ventas, ingeniería agrícola, maíz, papa, ornamentales, agronomía, zootecnia, algodón,

vivero forestal, ciencias, leguminosas, frutales, huerto, educación física, ciencias biológicas, jardín botánico, campo ferial, banco de semen, cereales, y pastos y forrajes.

Por último, se tiene zonas de baja calidad (0.163 ha), caracterizadas por presentar los parámetros químicos más bajos, como un índice de pH, CE, CIC, K, P, etc, que se encuentran en el programa de: vivero forestal (ichal 1), pastos y forraje (jardín experimental 1), ornamentales (arboretum), agronomía (unidad experimental de riego), frutales (lote 3), campo ferial (área de espectáculo y ring principal), y maíz (camp 1a)

En la figura 16 se observa el modelo de la calidad química del suelo, y en la figura 17 su clasificación de acuerdo a las clases de calidad existentes.

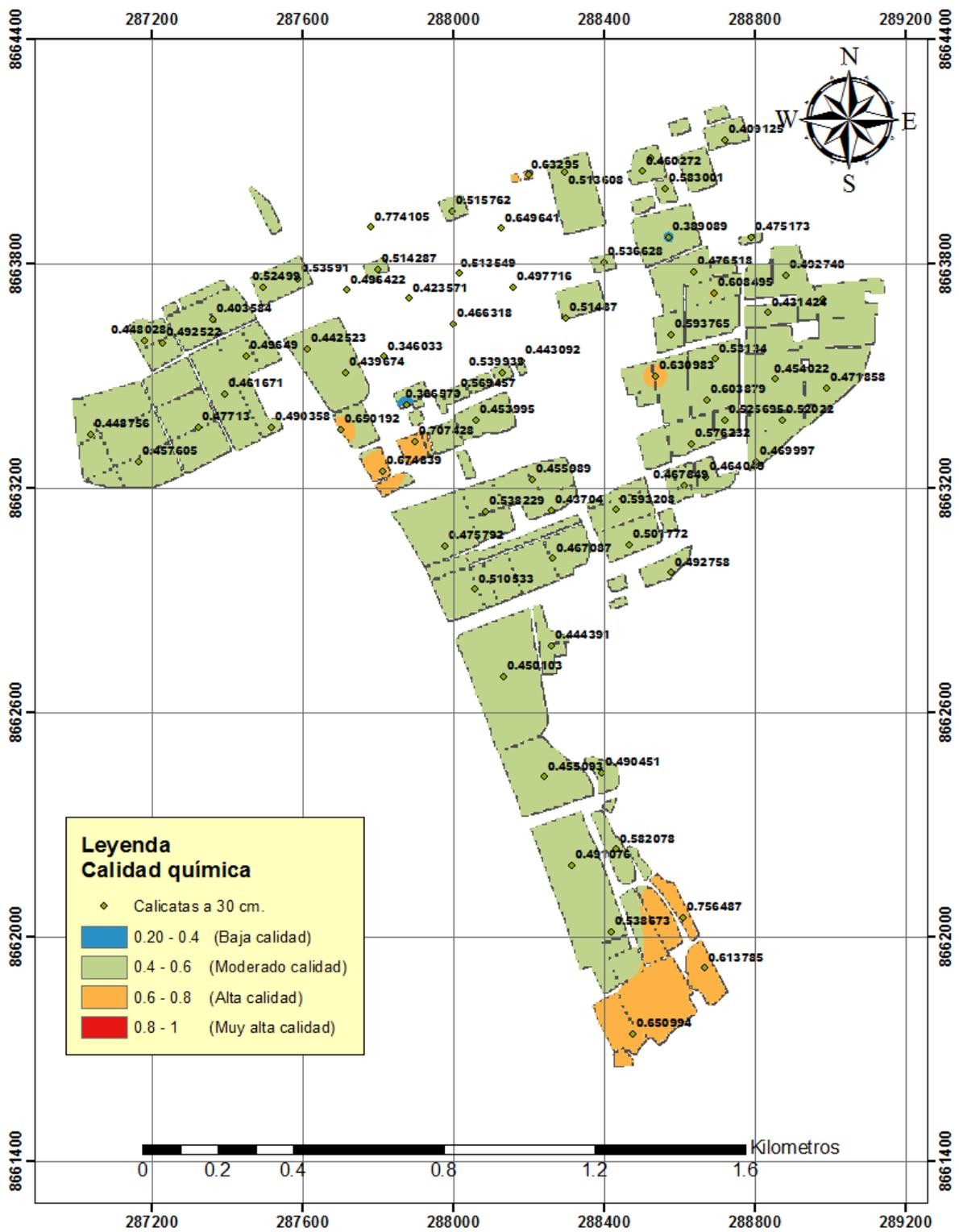


Figura 15: Modelo de calidad química del suelo

Fuente Propia

4.2.8. Modelo Geoespacial de la Calidad Global de los suelos de la UNALM

El modelo de calidad global (MGCG), fue generado apartir del modelo de calidad física (MGCF) y de calidad química (MGCQ), el modelamiento emplea la ecuación (6), donde para ellos ya cada uno de los indicadores correspondientes a la MGCF y MGCQ, fueron normalizados utilizando una escala de 1 a 0, Cantú et al. 2007, Cantú et al. 2009.

$$\text{MGCG} = a * \text{MGCF} + b * \text{MGCQ} \quad (6)$$

Cuadro 41. Índices de la Calidad Global

Índice de calidad de suelos	Escala	Clase	Área (ha)	%
Muy alta calidad	0.80 - 1,00	1	-	
Alta calidad	0,60 - 0,79	2	5.742	5.69%
Moderada calidad	0,40 - 0,59	3	95.238	94.31%
Baja calidad	0,20 - 0,39	4	-	
Muy baja calidad	0,00 - 0,19	5	-	

Fuente: Adaptación de Cantú et al. (2007, 2009) y Andrews et al.(2002)

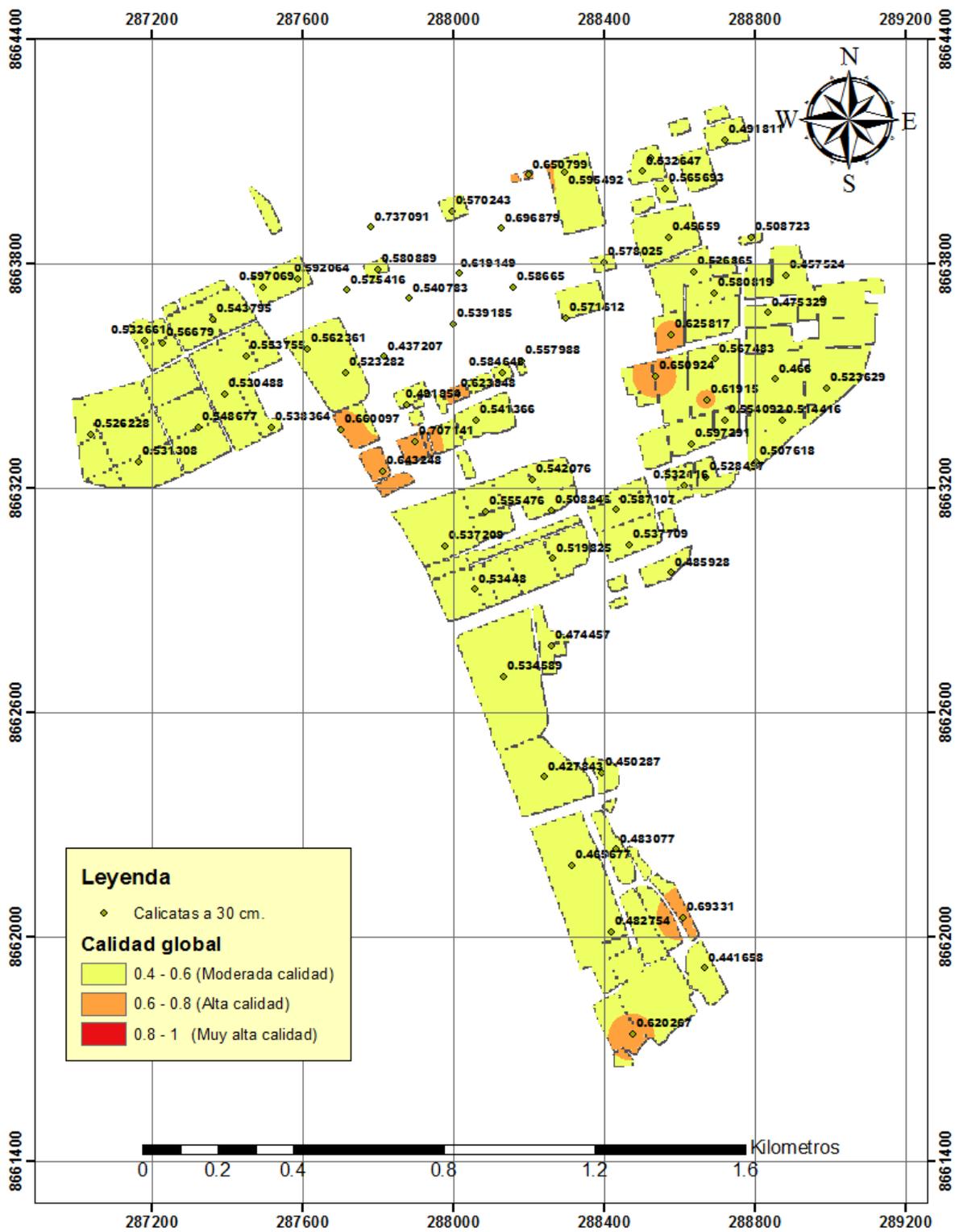


Figura 16: Mapa de clasificación de calidad global

Fuente propia

V. CONCLUSIONES

- En el análisis físico se determinó tres de cinco clases establecidas: alta (39.57%), moderada (58.88%), y baja (1.55%). Existiendo así áreas con un índice de baja calidad, que presentan una mayor densidad aparente; y contenido arcilla y arena inferior en relación a las áreas de moderada calidad.
- El análisis de los parámetros químicos se determinó tres de cinco clases de calidad química establecidas: alta (8.84 %); moderada (91.0 %), y baja (0.16 %). Siendo las áreas críticas la que tienen un índice de baja calidad, caracterizadas por presentar los parámetros químicos más bajos, como un índice de pH, CE, CIC, K,P.
- La identificación de la calidad global en la UNALM, producto de la integración de las variables físicas y químicas, permitió determinar calidad alta (5.69 %), y las zonas de una moderada calidad (94.31 %), comprendiéndose así el 100% del área de los campos agrícolas de la UNALM..

VI. RECOMENDACIONES

- Para el modelamiento de la Calidad Global del suelo de la UNALM se consideraron parámetros físicos y químicos, obviándose los biológicos, los que influirían de forma positiva en gran parte de mayoría de las áreas agrícola de la universidad, y despreciándose dentro de los físicos, la profundidad efectiva, por tal motivo nuestras áreas de calidad alta en comparación a las de moderada calidad son bajas. La inclusión de los parámetros biológicos aumentaría las áreas modeladas de baja calidad (respiración del suelo; para medir actividad microbiana estimar la actividad en la biomasa).
- Empleamos el IDW del Arcgis permite realizar interpolaciones con un mínimo de 70 puntos y una distribución cuadrangular en toda el área, esto a nosotros en gran parte de los mapas se vio reflejado de manera correcta en las intepolaciones sin embargo al no contar con una distribución muy uniforme de las calicatas en algunos casos se apreciaran puntos circulares de un solo color.
- Durante el levantamiento perimétrico de los campos agrícolas de la UNALM se realizó con un GPS diferencial, a lo que se sugiere en su uso el situarse en sonas con espacio aéreo libre, es decir sin arboles que obstruyan la recepcion satelital de nuestra estación.
- Tener en cuenta para la clasficación de calidades la zona de estudio los parámetros mas importantes, para que puedan ser cuantificados de manera correcta.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevedo, E., M. Carrasco, O. León, P. Silva, G. Castillo, I. Ahumada, G. Borie, y S. González.. 2005. Criterios de calidad de suelo agrícola. Ministro de la Agricultura. Servicio agrícola y ganadero. Gobierno de Chile. 205 p. Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952009000400009 [8/2/2010]
- Adriaanse, A. 1993. Environmental Policy Performance Indicators. A Study on the Development of Indicators for Environmental Policy in the Netherlands. Sdu Uitgeverij Koninginnergrach, The Netherlands.
- Andrades, M.; Martínez, E. (2014). Fertilidad del suelo y parámetros que la definen. Rioja, España. Disponible en <http://Dialnet-FertilidadDelSueloYParametrosQueLaDefinen-267902.pdf>
- Andrews, S., Karlen, D. & Mitchell, J. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 90(1), 25–45. [http://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00174-8](http://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00174-8)
- Añó, Vidal C; Sánchez Díaz, J; Antolín Tomás C. 1997. Análisis y valoración de los sistemas de evaluación de suelos en España: Evolución, tendencias actuales y perspectivas futuras. Ed. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. España, pág. 23.
- Arnold, R.W., Szabolcs, V. & Targulian, O. 1990. Global soil change: report of an International Institute for Applied System Analysis, International Society of Soil Science, United Nations. Environmental Programme: task force on the role of soil in global change. International Society of Soil Science, UNEP. Laxenburg, Austria. 110 p.
- Arshad, M.A., Coen, G.M. 1992. Characterization of soil quality: Physical and chemical criteria. *American J. of Alternative Agriculture* 7: 25-31.
- Ernhardsen, T. 2002. Geographic information systems: an introduction. 3rd ed. Jonh Wiley & Sons Editor. New York, United States. 428 p.

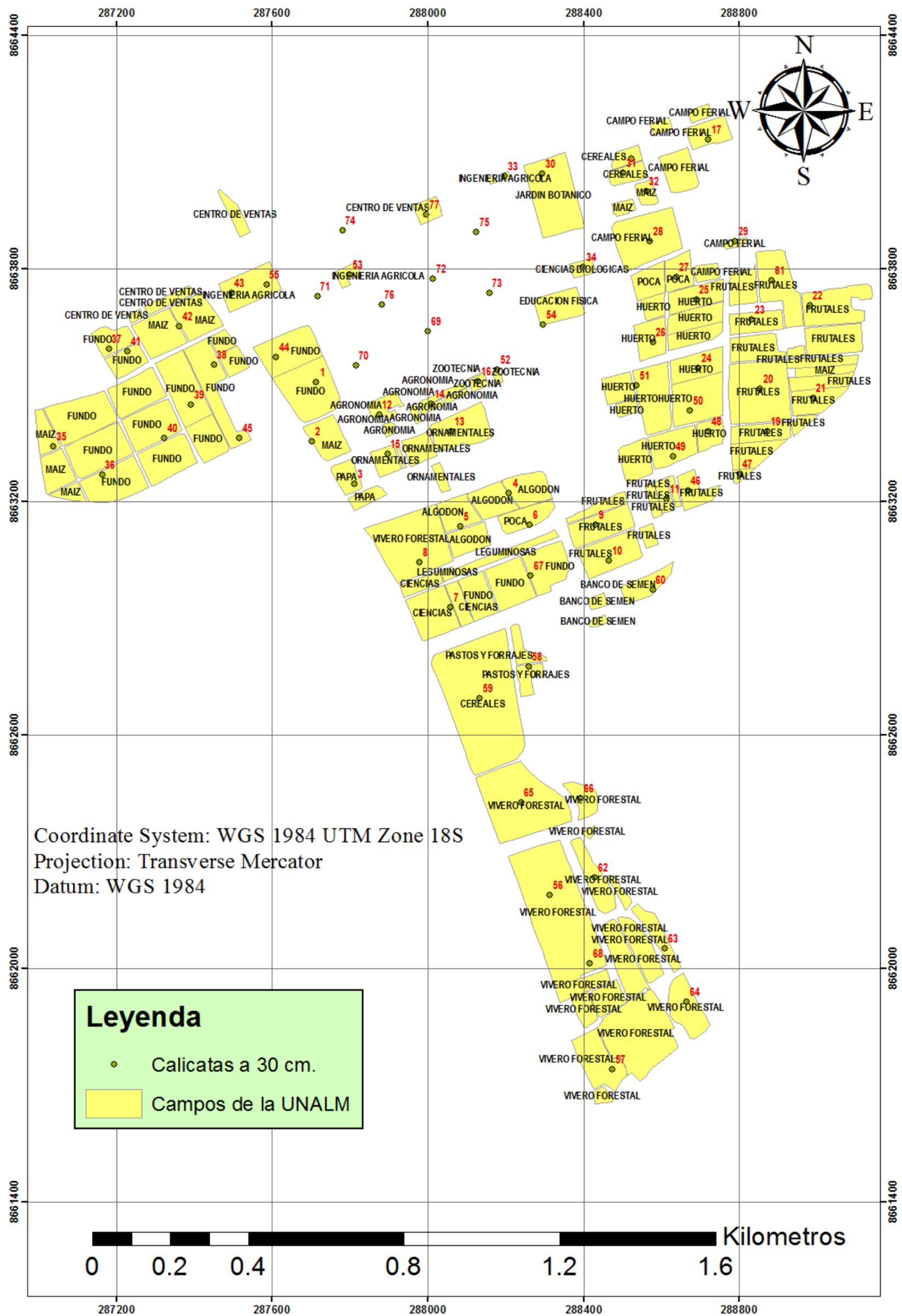
- Buckman, H. and Brady, N.C. 1966. The Nature and Properties of Solis. The Macmillan company. 590 pp.
- Budd, W.W. 1992. What capacity the land? J. Soil Water Conservation 47: 28-31.
- Buol, S. W. 1995. Sustainability of soil use. Annual Review of Ecology and Systematic 26:25-44.
- Cantú, MP; Becker, A; Bedano, AC; Schiavo, HF. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices en la Pampa Argentina. Ci. Suelo (Argentina) 25(2):173-178
- Cantú, MP; Becker, AR; Bedano, JC; Schiviano, HF; Parra, BJ. 2009. Evaluation of the impact of land use and management change by means of soil quality indicators, Cordoba, Argentina. Cadernos Lab. Xeoloxico de Laxe. Coruna 34:203-214.
- Carter, M.R., Gregorich, E.G., Anderson, D.W., Doran, J.W., Janzen, H.H. y Pierce, F.J. 1997. Concepts of soil quality and their significance. En Soil quality for crop production and ecosystem health (eds. Gregorich, E.G. y Carter, M.). Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands.
- Cavazos, T; Rodríguez, O; Rodríguez MJ. 1992. Manual de Práctica de física de suelos. Trillas: Escuela Superior de Agricultura Hermanos Escobar. México.
- Doran, J.W. y Parkin, B.T. 1994. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Soil Science Society of America, Inc. Special Publication. Number 35. Madison, Wisconsin, USA.
- Doran, J.W., Sarrantonio, M. y Liebigh, M.A. 1996. Soil Health and Sustainability. Advances in Agronomy Vol. 56. Academic Press, Inc. San Diego, California.
- Dumanski, J., Gameda, S. y Pieri, C. 1998. Indicators of land quality and sustainable land management. The World Bank, Washington DC, USA.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 1994. FAO: Ecología y enseñanza rural. Nociones ambientales básicas para profesores rurales y extensionistas. (en línea, sitio web). Consultado 20 oct. 2018. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/006/W1309S/w1309s04.htm>
- Franco, S.; Valdez, M. 2003. Principios Básicos de cartografía y cartografía automatizada. Editorial Universidad autónoma del Estado de Mexico. Mexico. 160 p.

- Gomez, M. y Barredo, J. 2006. Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. Editorial Afaomega. México. 243p.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). 1995. Conceptos Básicos sobre sistemas de Información Geográfica y Aplicaciones en Latinoamérica. Graficas Colorama. Santa Fe de Bogotá, D.C. Colombia. 100p
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). 2016. Buenas prácticas en la elaboración en mapas de suelo (en línea). San José, Costa Rica. 21 p. Consultado el 11 de Feb. 2019. Disponible en <http://repiica.iica.int/docs/B4062e/B4062e.pdf>
- Instituto Nacional de Ecología. 2007. La conservación de suelos: un asunto de interés público (en línea). Gaceta ecológica, México. 7 p. Consultado el 11 de Feb. 2019. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/539/53908302.pdf>).
- James, D.W., R.J. Hanks, and J.J. Jurinak. 1982. Modern irrigated soils. John Wiley & Sons, New York.
- Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F. y Schuman, G.E. 1997. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. Soil Science Society of America J. 61: 4-10.
- Larson, W.E. y Pierce, F.J. 1991. Conservation and Enhancement of Soil Quality. In Evaluation for sustainable land Ecosistemas 13 (2). Mayo 2004. 96 management in the developing world. En Proc. of the Int. Work-shop on Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World, Chiang Rai. pp. 175-203. 15-21 Sept. 1991. Int. Board of Soil Res. and Manage., Bangkok, Thailand.
- López R., J. (1990). El diagnóstico de suelos y plantas. Madrid: Mundiprensa
- Lowdermilk, W.C. 1953. Conquest of the Land Through Seven Thousand Years. Agriculture Information Bulletin N° 99, USDA, Soil Conservation Service, Washington, D.C.
- Millar, CE.; Turk, L.M. y Foth, H.D. 1971. Fundametnos de la Ciencia del Suelo.
- MUSOO, E., COTOS, J. 2005. Sistemas de información medioambiental. Editorial Netbiblo. España. 272 p.
- OLAYA V. 2011. “Sistemas de Información Geográfica”. Versión 1.0. Marzo 2011. Disponible en: ftp://ftp.ehu.es/cidra/profis/iipbaiza/Libro_SIG.pdf.

- PEÑA, J. 2008. 2 ed. Sistemas de información geográfica aplicados a la gestión del territorio. Editorial Club Universitario. España. 310 p.
- Pierzynski, G.M., J.T. Sims, and G.F. Vance. 1994. Soils and environmental quality, Lewia Publi., Boca Raton, FL.
- Porta, J; López-Acevedo, M. y Roquero, C. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Madrid: Mundiprensa.
- Portal Agrícola. 2008. Portal Agrícola: Infiltración de Agua en el suelo (en línea, sitio web). Consultado 20 set. 2018. Disponible en <https://www.portalfruticola.com/noticias/2017/09/04/infiltracion-del-agua-en-el-suelo-importancia-y-metodos-para-medirla/>.
- Ramos, MJ; Ramos, A; Montero, F. 2006. Sistemas gestores de bases de datos. In Grado superior. España, McGraw-Hill. p. 7-92
- RODGERS, K. 1993. Manual sobre el manejo de peligros naturales en la planificación para el desarrollo regional integrado. Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente. Organización de Estados Americanos. Washington, D.C. (en línea). Consultado septiembre 2012. Disponible en: <http://www.oas.org>
- SELLES V. G., FERREYRA E., R., AHUMADA B., R., MUÑOZ, I. 2000. Validación y transferencias de tecnologías de riego y sistemas productivos en áreas regadas. Provincias de San Felipe y Los Andes. Convenio INIA-CNR. Informe final. 187 p. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, San Felipe
- Servicio Nacional Certificación Ambiental Inversión Sostenible (SENACE). 2010. Aprueban Reglamento para la Ejecución de Levantamiento de Suelos DECRETO SUPREMO N° 013-2010-AG. Lima, Perú. 11 p. Disponible en <https://www.senace.gob.pe/wp-content/uploads/2016/10/NAT-3-7-03-DS-013-2010-AG.pdf>
- Seybold, C.A., Mausbach, M.J., Karlen, D.L. y Rogers, H.H. 1997. Quantification of Soil Quality. En Soil Process and the Carbon Cycle (eds. Lal, R., Kimble, J.M., Follet, R.F. y Stewart, B.A.), pp. 387-403, CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Singer, M.J. y Ewing, S. 2000. Soil Quality. En Handbook of Soil Science. Chapter 11 (ed. Sumner, M. E.), 271-298, CRC Press, Boca Raton, Florida.

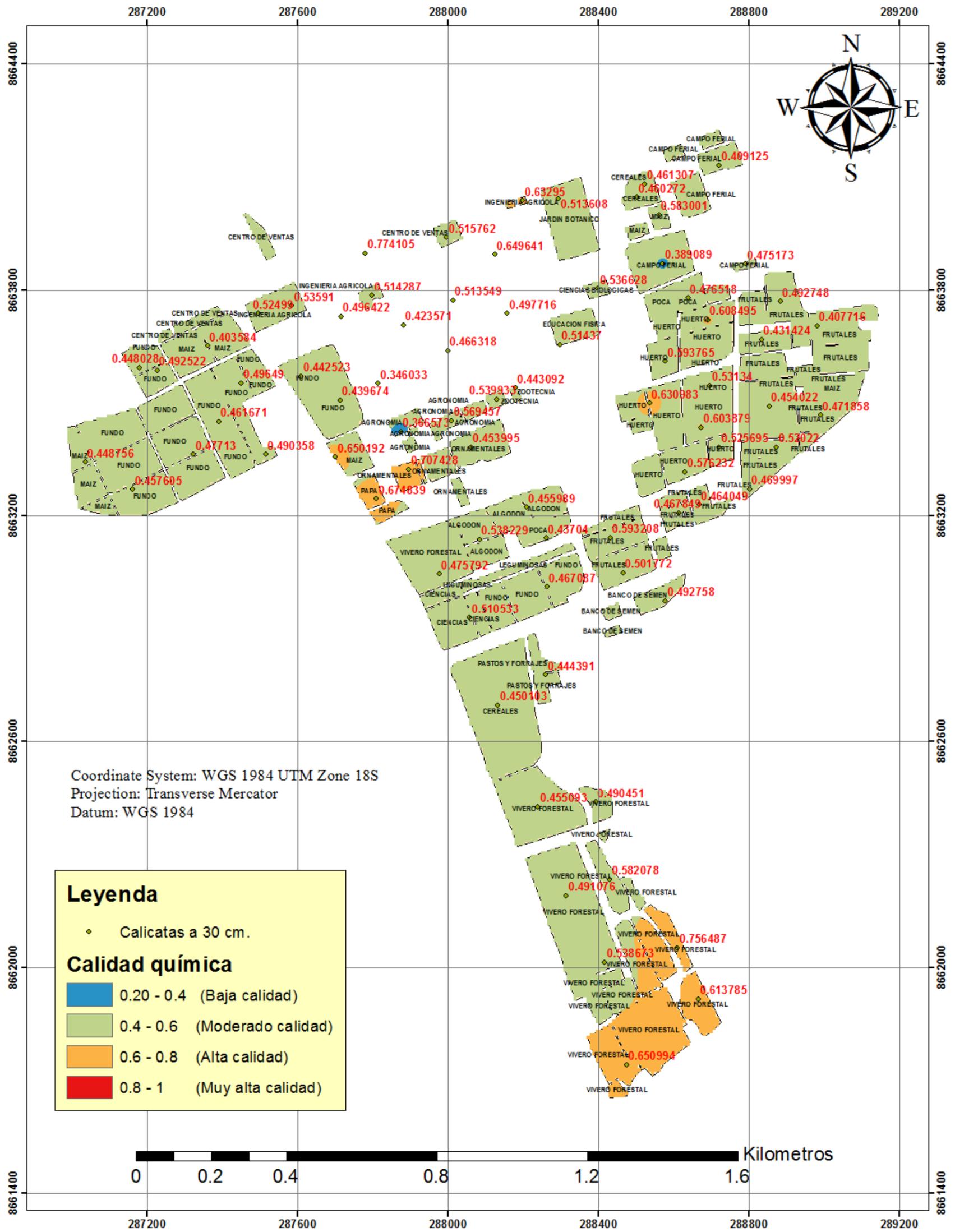
- Soil Quality Institute (SQI). 1996. Indicators for Soil Quality Evaluation. USDA Natural Resources Conservation Service. Prepared by the National Soil Survey Center in cooperation with The Soil Quality Institute, NRCS, USDA, and the National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service. USA.
- Swift, M.J. y Woomeer, P. 1991. Organica matter and the sustentainilby of agricultural systemes: definition and measurement. En: Soil organic matter dynamics and sustainability of tropical agricultura. Ed. Mulongoy K, Merckx R. John Wiley & sons. New York. pág. 3-17.
- UNALM. 2011. Agraria.edu al servicio de la información en la UNALM (en línea, sitio web). Consultado 11 de feb. 2019. Disponible en http://www.lamolina.edu.pe/portada/html/acerca/publicaciones_antteriores/Edicion12.pdf
- VERGARA, A. 2008. Sistemas de Información Geoespacial (en línea). Consultado el 10 de Sep. De 2012. Disponible en: <https://www.cs.cinvestav.mx/TesisGraduados/2008/tesisFlorRadilla.pdf>
- ZAMORA, G. 2009. Manual de ArcGis 9*: Básico e Intermedio. CEPEIGE Quito, Ecuador. 11 de feb.

ANEXOS



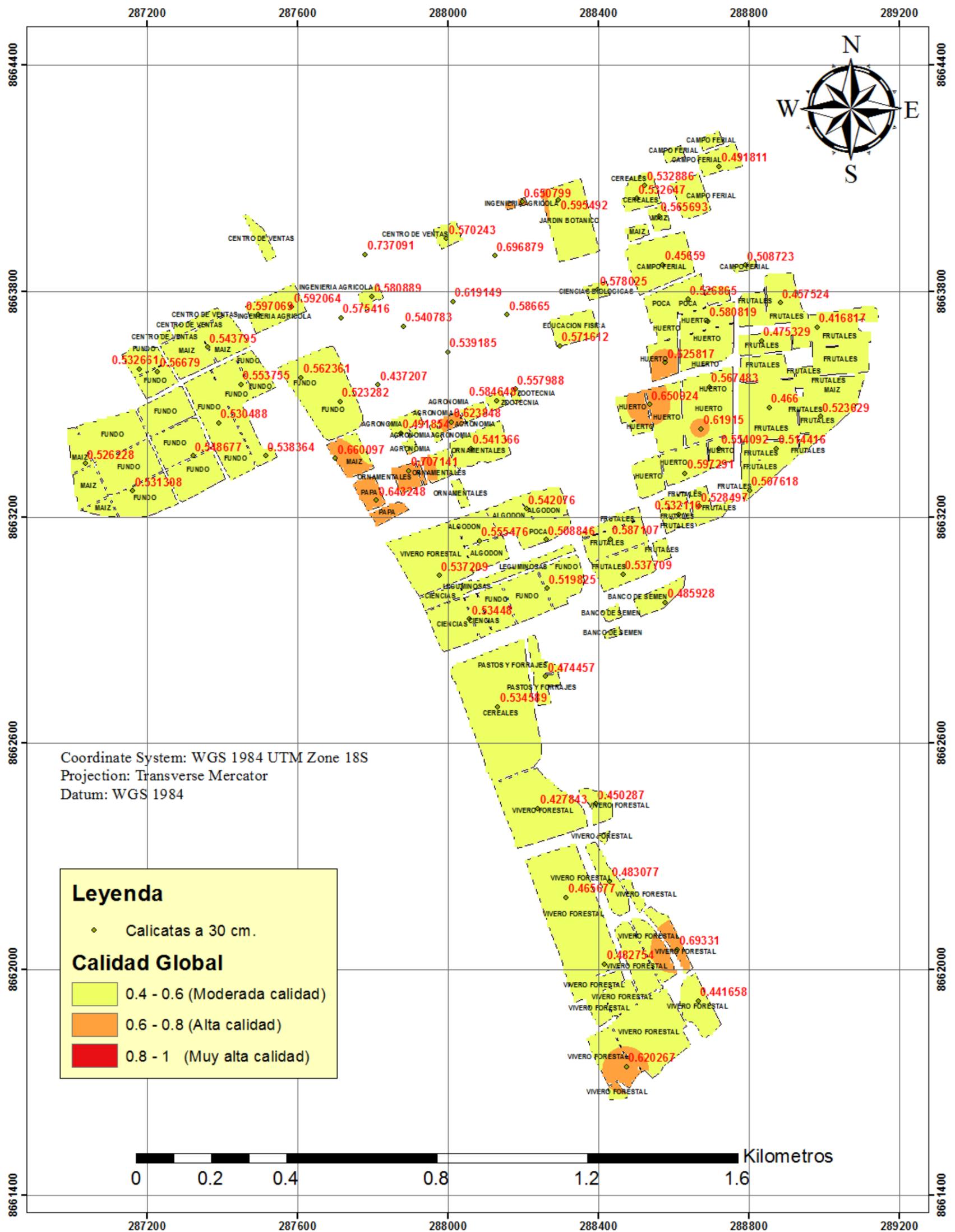
Anexo 1: Mapa de los Programas donde se realizaron las calicatas

Fuente propia



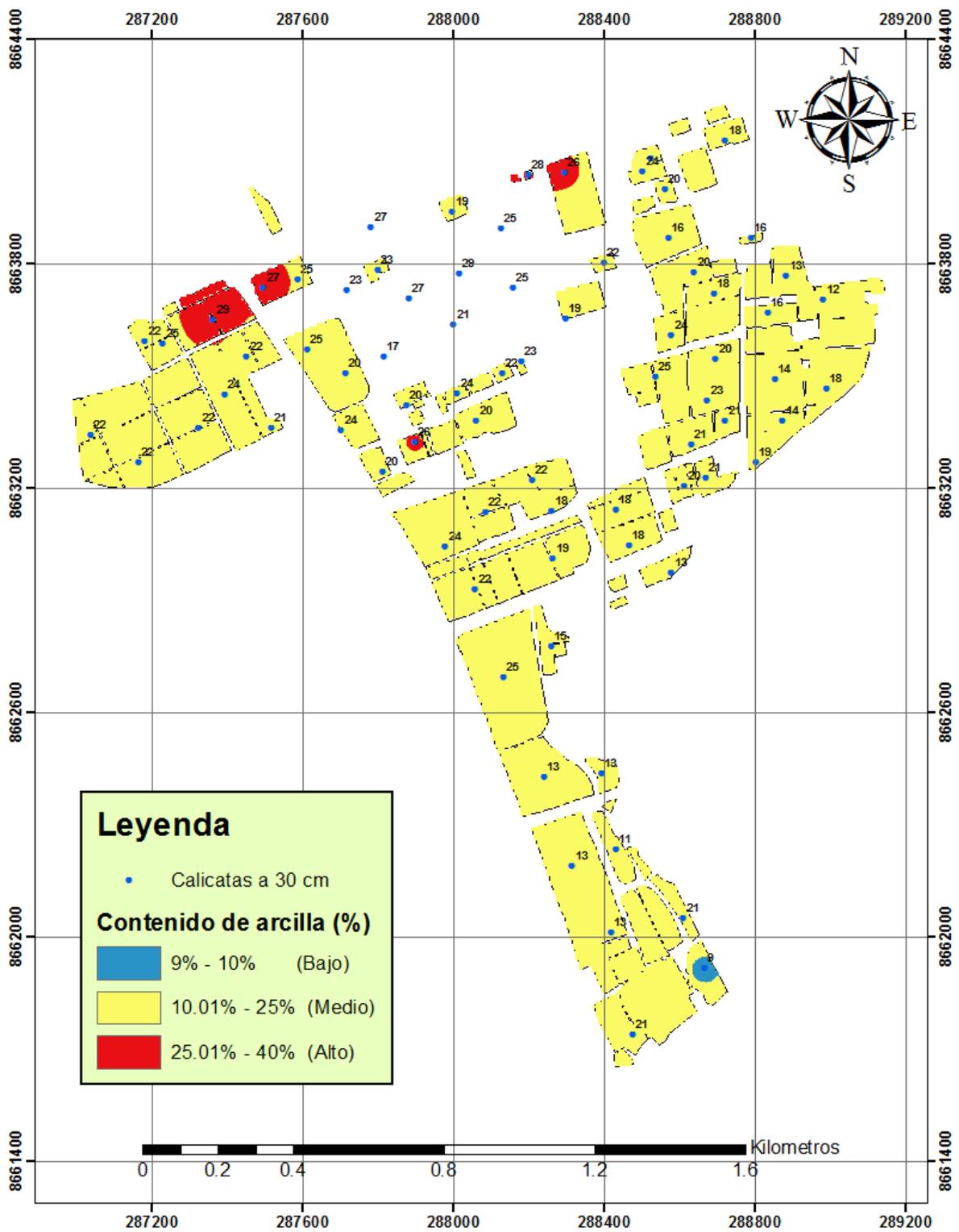
Anexo 3: Mapa de la calidad química de los campos agrícolas de la UNALM

Fuente propia



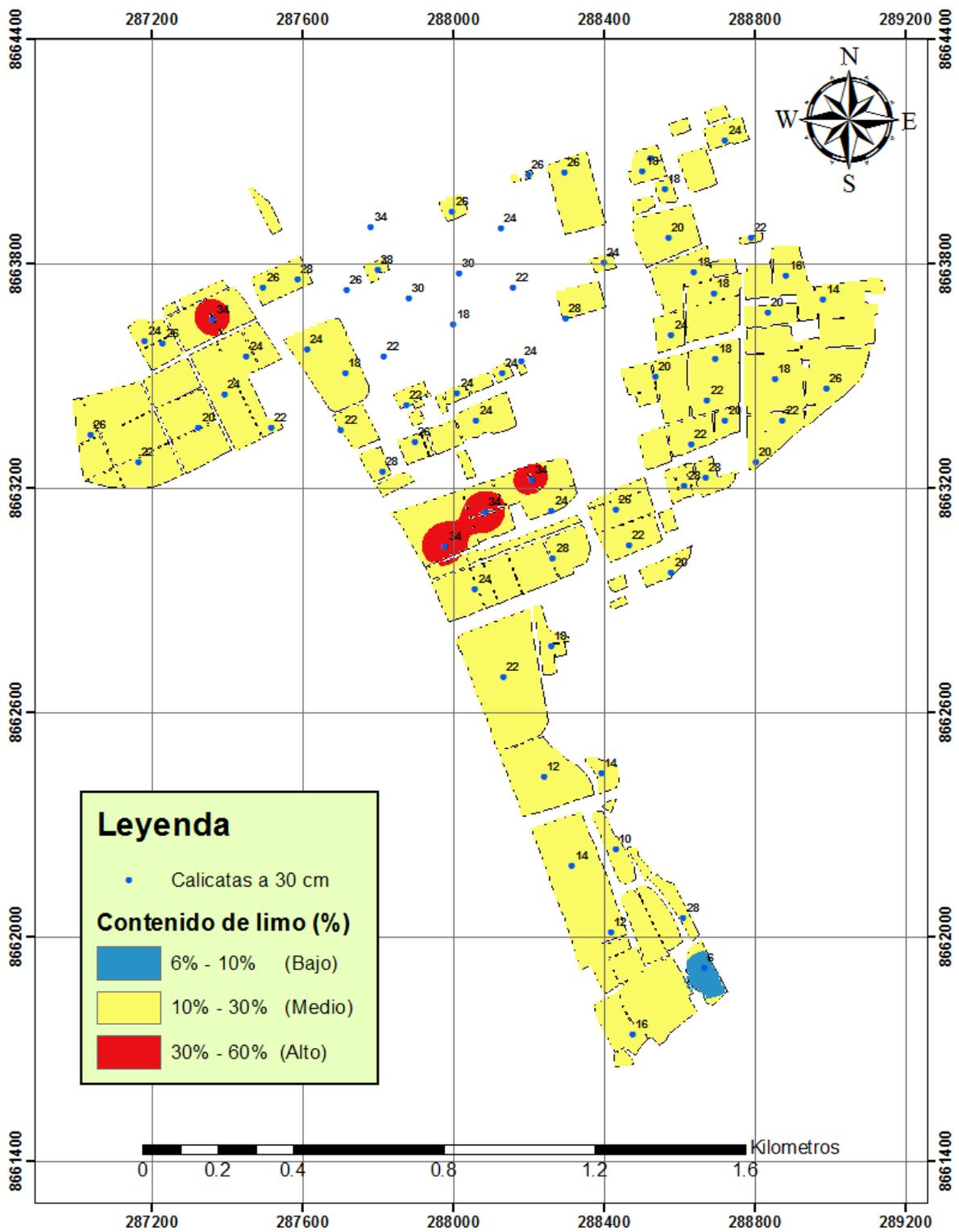
Anexo 4: Mapa de la calidad global de los campos agrícolas de la UNALM

Fuente propia



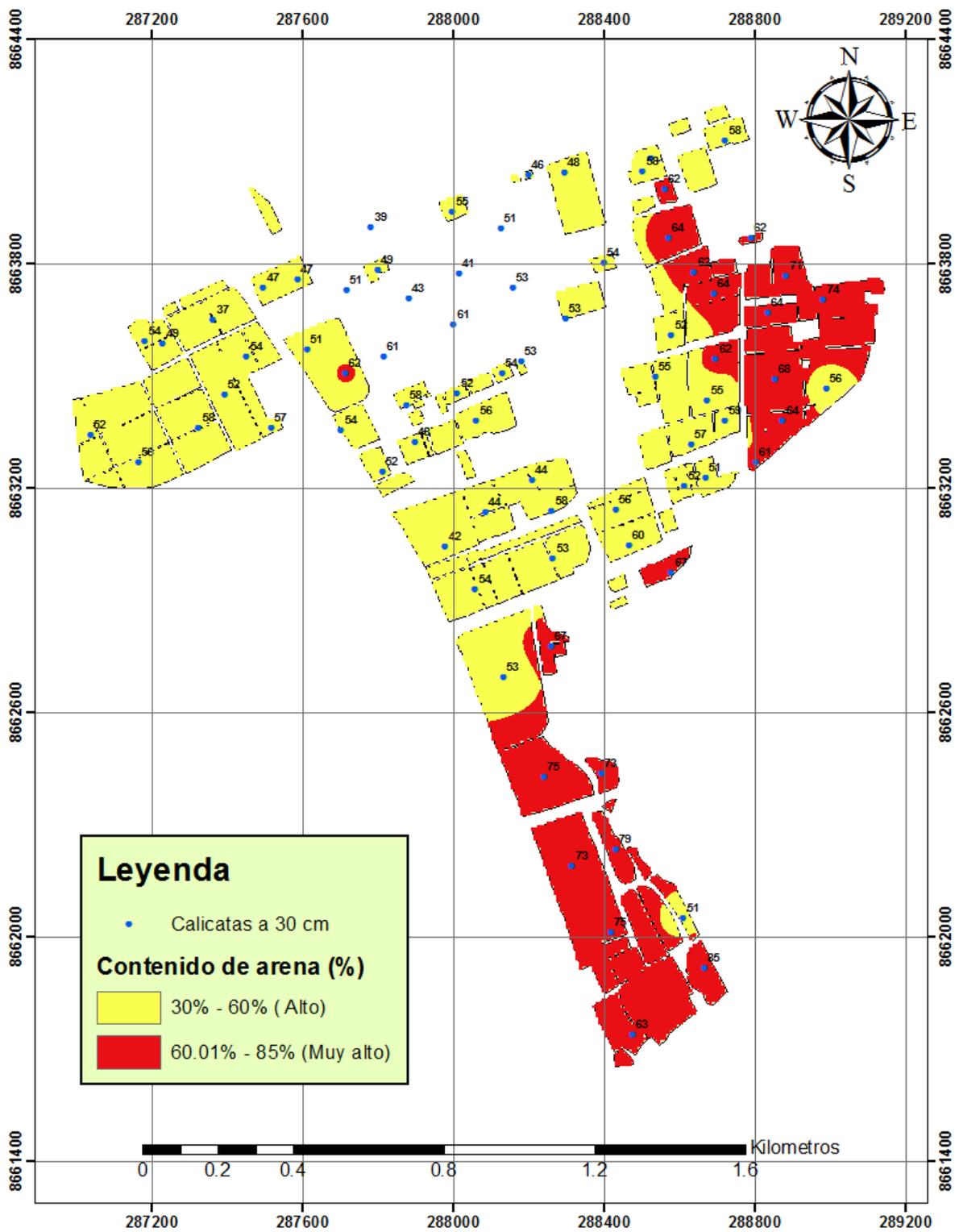
Anexo 5: Mapa de contenido de Arcilla

Fuente propia



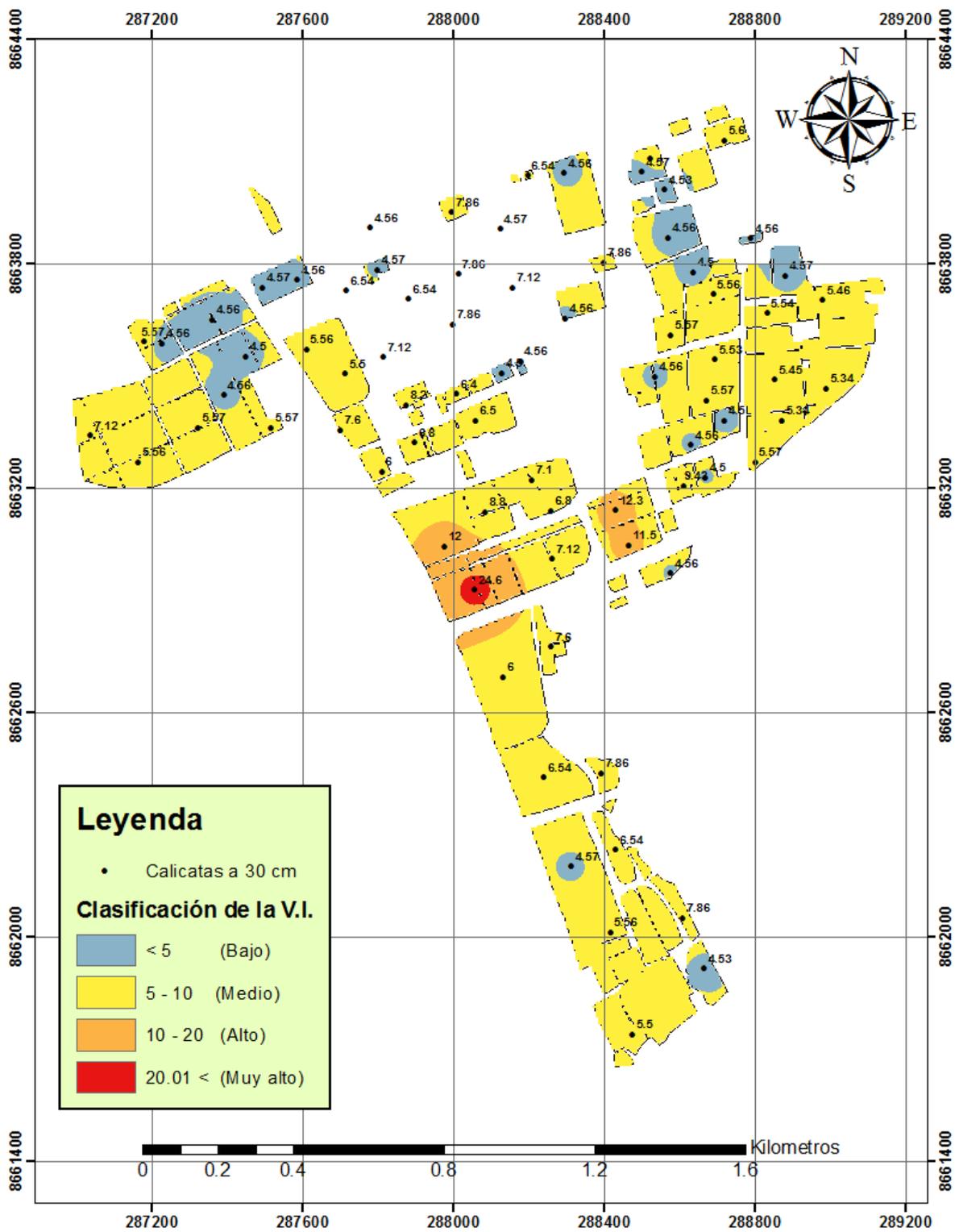
Anexo 6: Mapa de contenido de Limo

Fuente propia



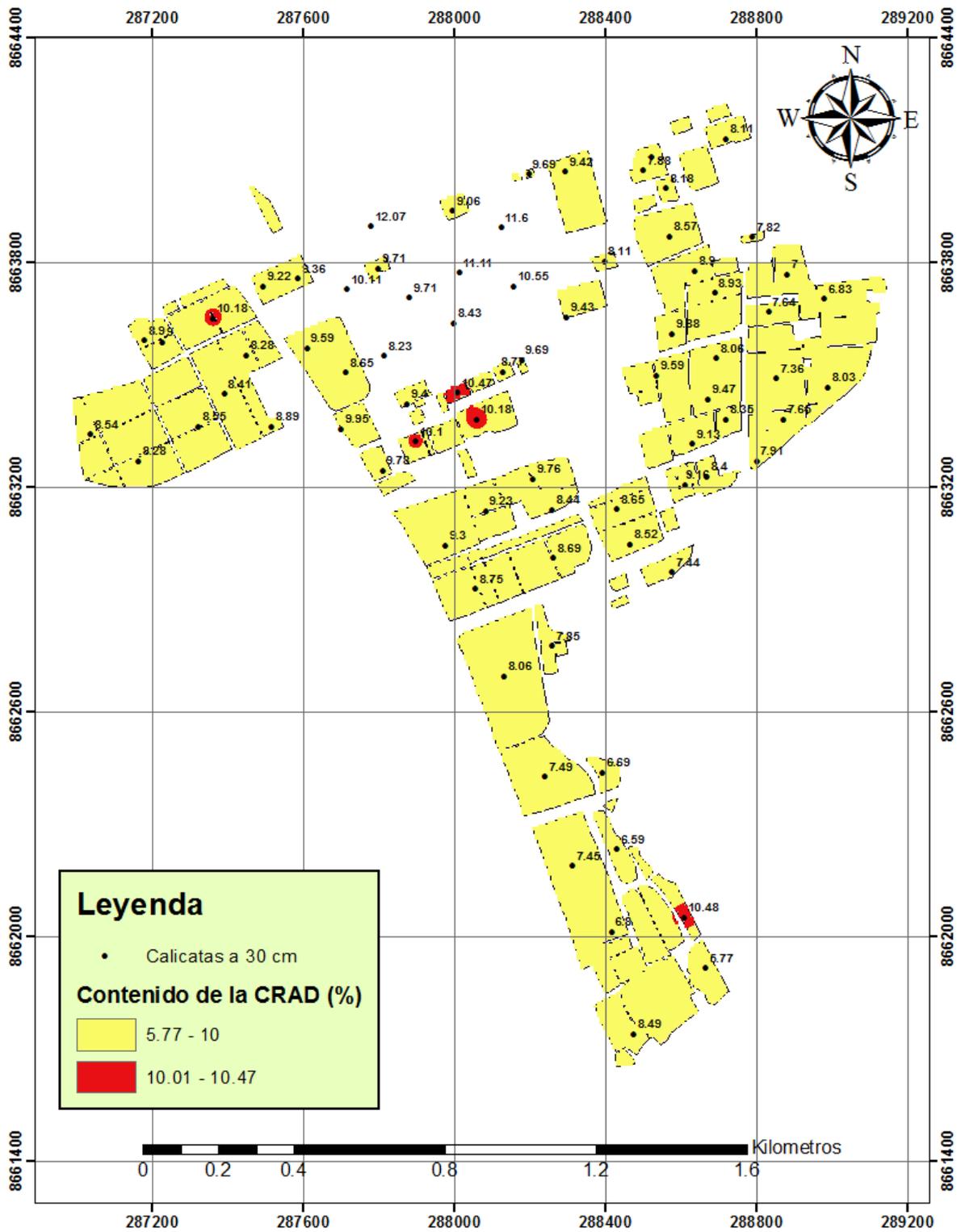
Anexo 7: Mapa de contenido de Arena

Fuente propia



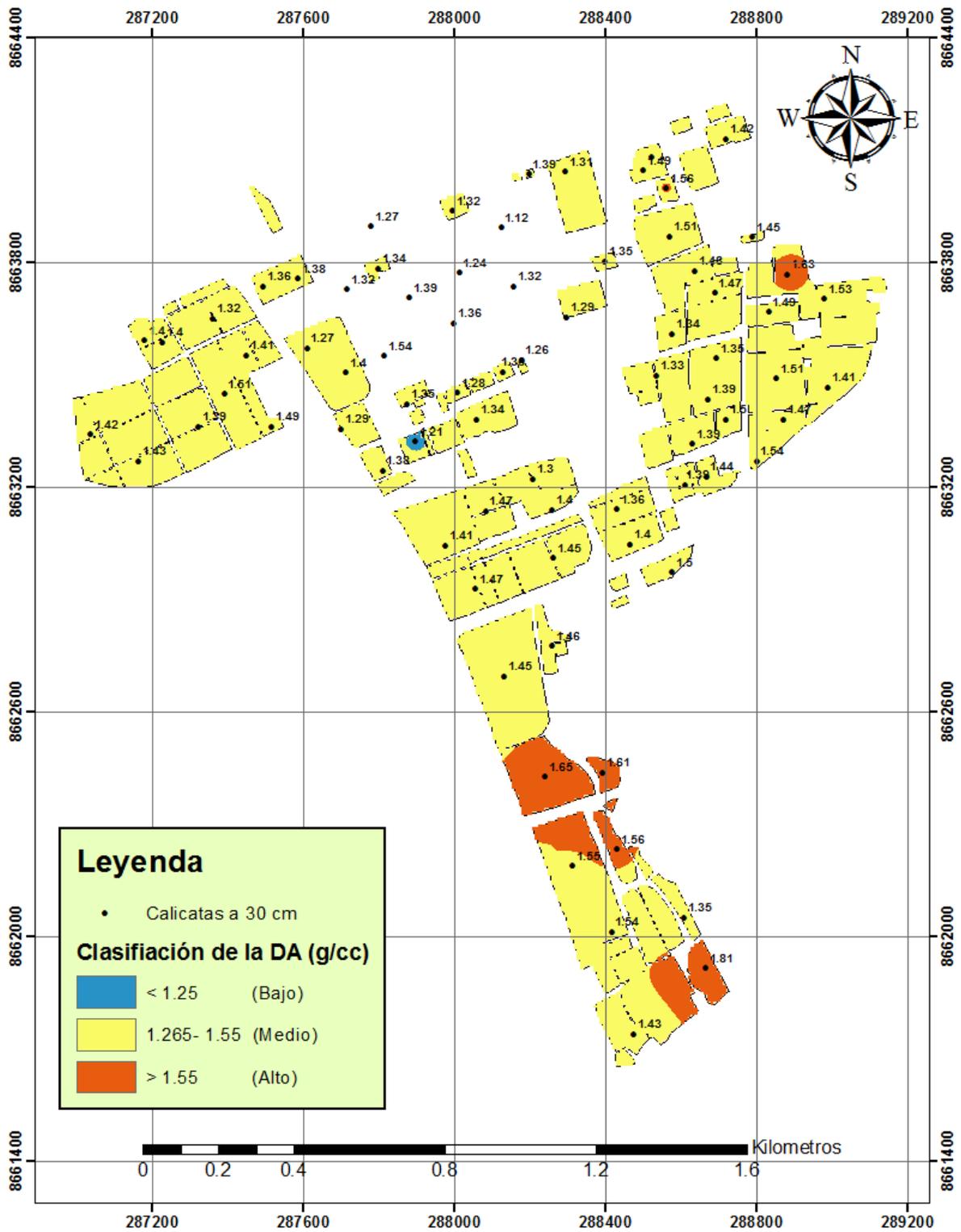
Anexo 8: Mapa de Velocidad de Infiltración

Fuente propia



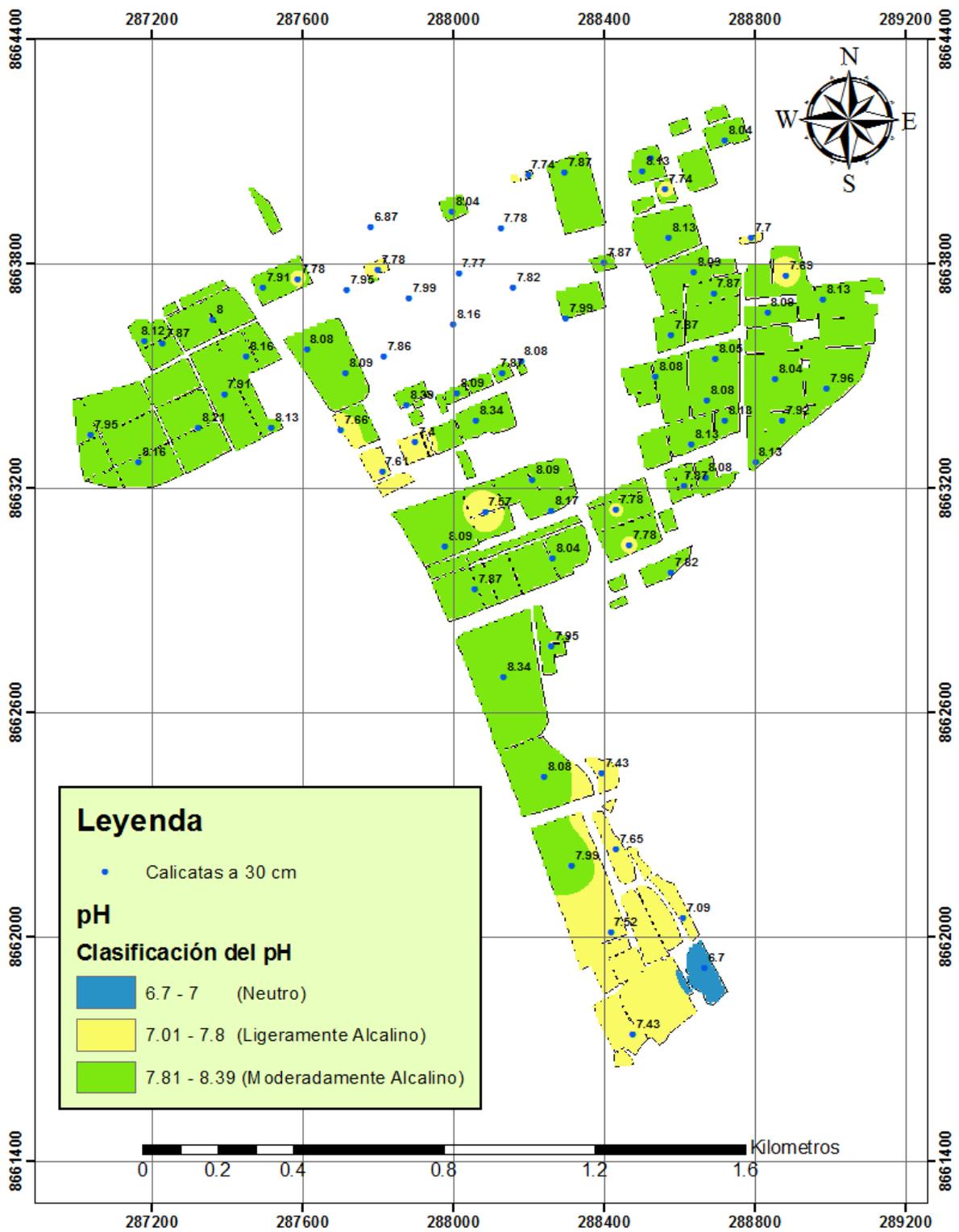
Anexo 9: Mapa de Capacidad de retención de agua disponible

Fuente propia



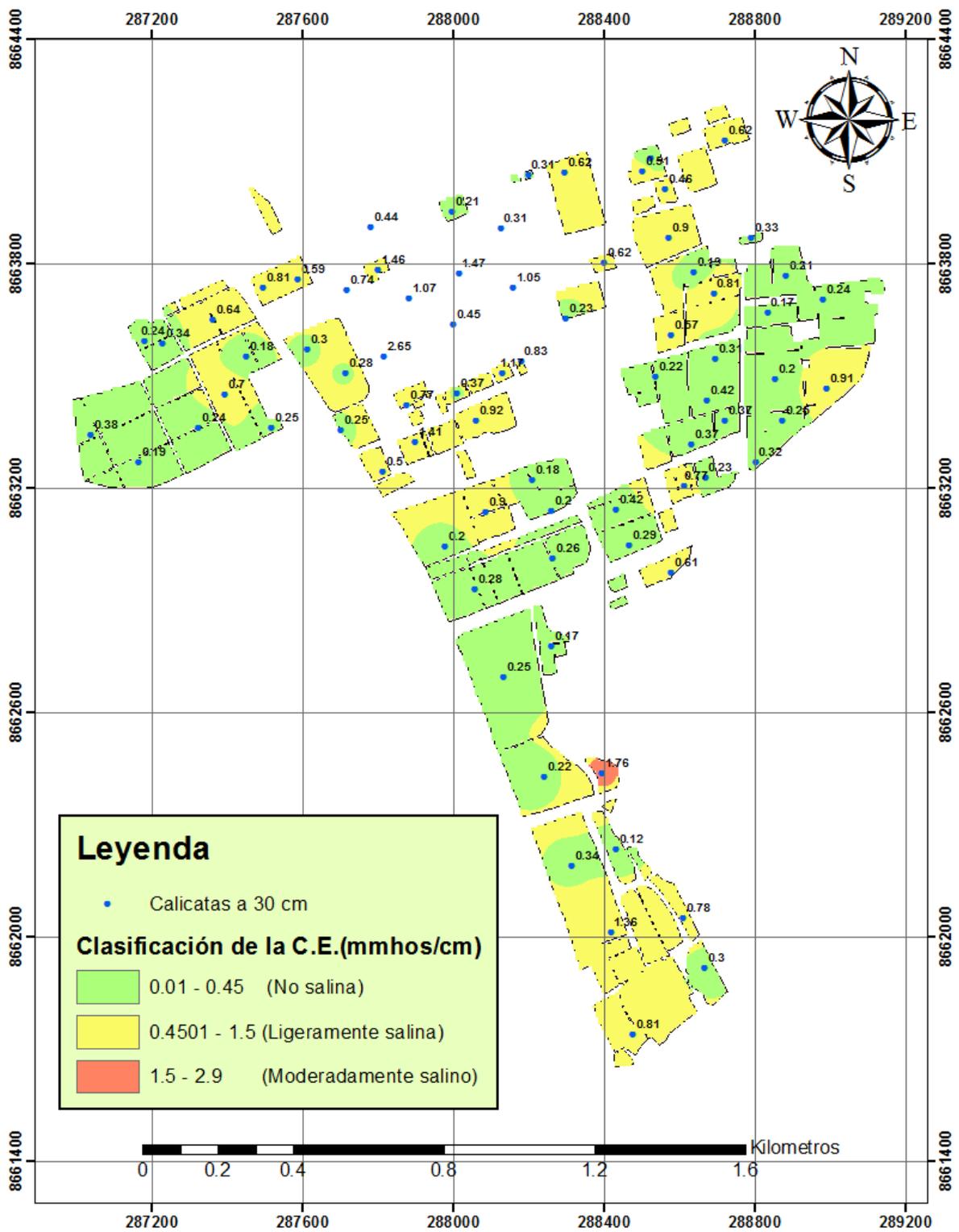
Anexo 10: Mapa de contenido de la Densidad Aparente

Fuente propia



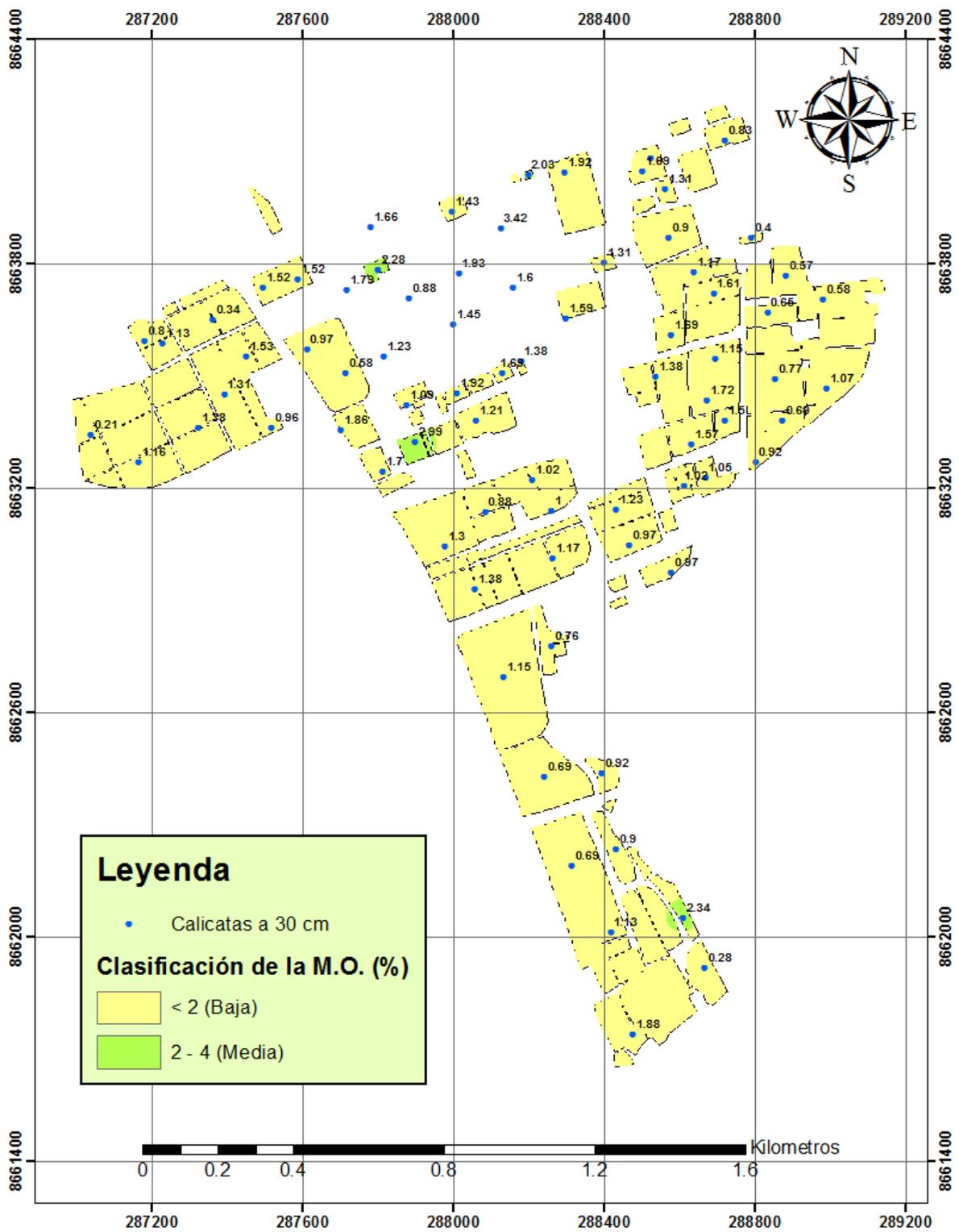
Anexo 11: Mapa de contenido de pH

Fuente propia



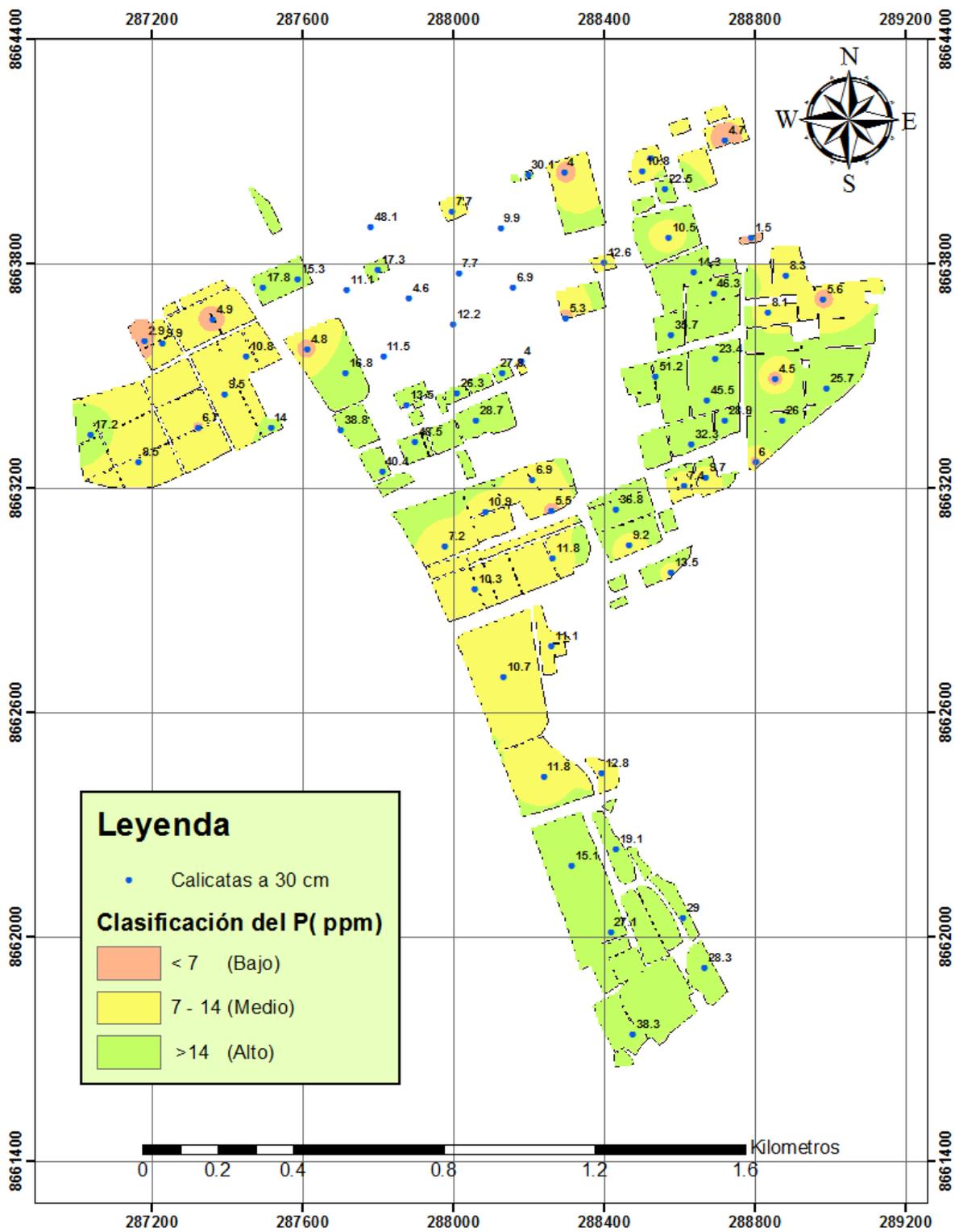
Anexo 12: Mapa de contenido de Conductividad Eléctrica

Fuente propia



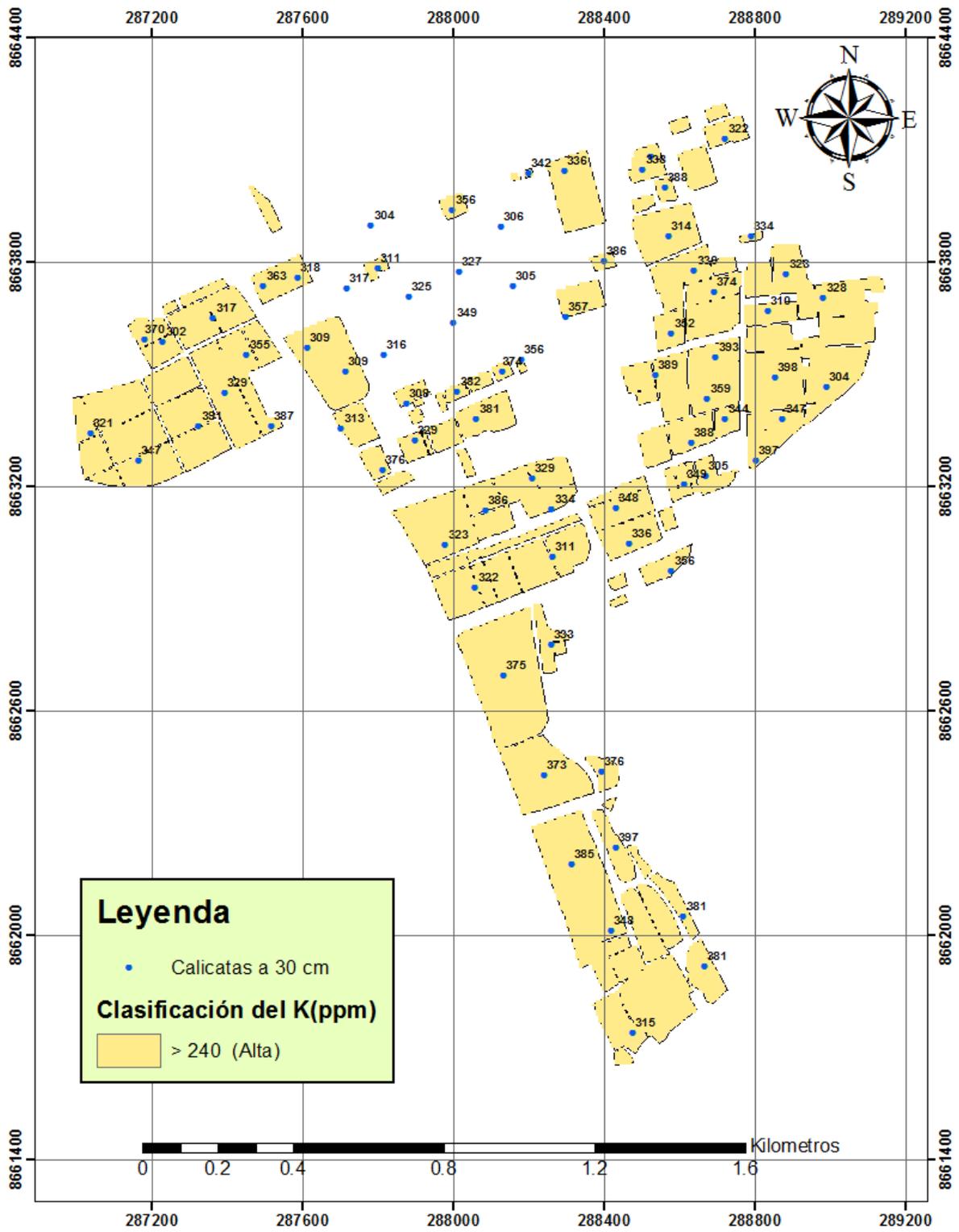
Anexo 13: Mapa de contenido de Materia Orgánica

Fuente propia



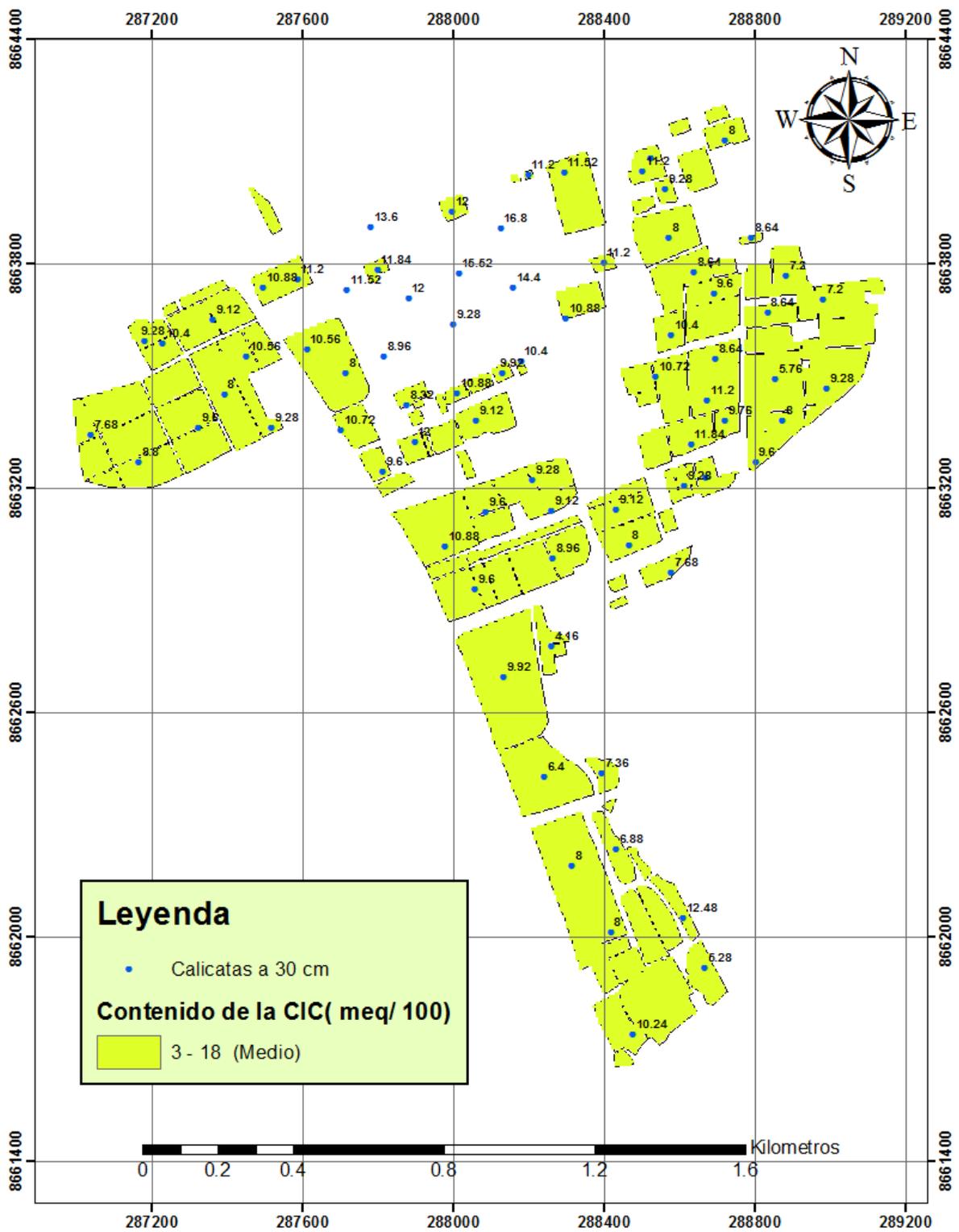
Anexo 14: Mapa de contenido de P

Fuente propia



Anexo 15: Mapa de contenido de K ppm

Fuente propia



Anexo 16: Mapa de la Capacidad de Intercambio catiónico

Fuente propia