



Universidad Autónoma del Estado de México
Facultad de Planeación Urbana y Regional

*Estimación de almacenes de carbono orgánico en el suelo:
complementación de un método directo con herramientas de
percepción remota en sistemas agrícolas de El Telar, Coatepec
Harinas, Estado de México.*

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

PRESENTA:

Colín Olivares Orlando

Directores:

Dra. Belina García Fajardo

Dra. en C. María Eugenia Valdez Pérez

AGRADECIMIENTOS

- *A mis papás, por su apoyo incondicional en todos los rubros de mi vida y ser mis principales ejemplos a seguir. A mi mamá por sus enseñanzas, empeño y dedicación a lo largo de mi vida académica, por hacer de mí un hombre de bien y que cierre sus ciclos. A mi papá por el esfuerzo realizado en todo este tiempo para darme las facilidades económicas para mis estudios, a pesar de los tiempos difíciles.*
- *A mis asesores de tesis, por su apoyo en el desarrollo de este proyecto, sus invaluable aportes, experiencia y su permanente disposición a orientarme en la temática de investigación y la gestión de los recursos que facilitaron la investigación. Gracias Dra. Belina García, por su apoyo y constante asesoría, orientación y resolución de problemas respecto al proyecto.*
- *Al Dr. Gustavo Álvarez Arteaga, por su disposición para orientarme en la metodología, darme soluciones y aportarme sus experiencias siempre enriquecedoras en el tema del carbono.*
- *Al profesor Sergio Esteban de León, por su tiempo, paciencia, orientación, enseñanza de ciertos temas, además de sus aportes metodológicos en la tesis, a pesar de sus propias ocupaciones. Pero sobre todo por su incondicional amistad.*
- *A mis colegas de la carrera, Eduardo Martínez, Lizbeth Carrillo, Abigail García, Janet Martínez, Israel Bernal, por su disposición a la realización del trabajo de campo, que sin ellos no hubiera sido posible.*
- *Al equipo de trabajo de la Unidad de Laboratorio de Ciencias Ambientales de la Facultad de Planeación Urbana y Regional, por las facilidades otorgadas para el desarrollo del proyecto, asesoramiento y apoyo en los análisis de laboratorio realizados.*

Contenido

AGRADECIMIENTOS.....	2
Índice de Ilustraciones.....	5
Índice de Tablas.....	6
Índice de Gráficos.....	6
Introducción.....	7
I. Planteamiento del problema.....	9
II. Justificación.....	11
III. Contribución de la propuesta.....	12
IV. Hipótesis.....	12
V. Objetivos.....	13
Objetivo general.....	13
Objetivos específicos.....	13
Capítulo 1. Marco de referencia.....	14
1.1 Cambio climático y el ciclo del carbono.....	15
1.1.1 Carbono orgánico del suelo.....	15
1.1.2 Secuestro de carbono y la agricultura como sumidero de carbono.....	16
1.1.3 Dinámica del carbono orgánico en el suelo.....	18
1.2 Percepción remota, sistemas de información geográfica y su importancia en el estudio del carbono.....	19
1.2.1 Percepción remota.....	21
1.2.2 Los SIG's y su relación con la agricultura.....	21
1.3 Métodos de estimación del contenido de carbono en el suelo.....	22
1.4 Estudios de caso.....	28
1.5 Aportes del capítulo y alcances del proyecto.....	32
1.6 Enfoques de la investigación.....	35
1.7 Esquema metodológico.....	36
Capítulo 2. Caracterización general de El Telar, Coatepec Harinas.....	37
2.1 Ubicación geográfica.....	39
2.2 Edafología y Uso de Suelo.....	42
2.3 Hidrología.....	45

2.4 Prácticas de manejo agrícola.....	47
2.5 Aspectos socioeconómicos generales	48
Capítulo 3. Estimación de Carbono Orgánico del Suelo.....	49
3.1 Etapa 1: Desarrollo de la metodología de suelos	50
3.1.1 Delimitación de la zona agrícola	50
3.1.2 Definición del tipo de muestreo	51
3.1.3 Número de muestras.....	53
3.1.4 Esquema de muestreo y profundidad de muestreo	54
3.1.5 Procedimiento de muestreo	55
3.1.6 Métodos de análisis fisicoquímicos	58
3.1.7 Identificación de prácticas agrícolas.....	64
3.1.8 Integración de base de datos referenciada	64
3.2 Identificación de valores digitales asociados a los contenidos de carbono en el estrato superficial de suelo agrícola, mediante el uso de imagen de satélite.....	65
3.2.1 Reseña metodológica	65
3.2.2 Fase previa.....	67
3.2.3 Variables elegidas y generación de raster	71
3.2.4 Conversión de valores digitales (DN) a valores de radiancia.....	75
3.2.5 Clasificación de Imagen SPOT	78
3.2.6 Correlación de variables.....	78
Resultados y Discusión	80
Conclusiones.....	111
Sugerencias a la investigación.....	113
Referencias	114
Anexos	118

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Ciclo terrestre del carbono (FAO, 2002).....	18
Ilustración 2. Localización del municipio de Coatepec Harinas	39
Ilustración 3. Ubicación geográfica de la zona de estudio.....	39
Ilustración 4. Colindancias del municipio Coatepec Harinas	40
Ilustración 5. Mapa de El Telar	41
Ilustración 6. Mapa Edafológico Coatepec Harinas.....	43
Ilustración 7. Principales corrientes de El Telar.....	46
Ilustración 8. Unidades (áreas cultivadas).....	52
Ilustración 9. Clasificación de pendientes	52
Ilustración 10. Esquema de muestreo en campo	54
Ilustración 11. Trazo de cuadrante para muestreo	56
Ilustración 12. Barrenacion	56
Ilustración 13. Disminución del tamaño de la muestra compuesta por cuarteo	57
Ilustración 14. Muestras preparadas para análisis	59
Ilustración 15. Pesaje de muestras	60
Ilustración 16. Cálculo de densidad aparente	60
Ilustración 17. Esquema del proceso metodológico para identificación correlación entre datos satelitales y contenido de carbono en suelo	67
Ilustración 18. Raster de pendientes y rangos	73
Ilustración 19. Raster de orientación del terreno.....	74
Ilustración 20. Fragmento de imagen SPOT, Banda 4	76
Ilustración 21. Datos espectrales de la imagen.....	77
Ilustración 22. Mapa de distribución de COS en "EL Telar"	87
Ilustración 23. Clasificación del contenido de M.O	89
Ilustración 24. Distribución de clústeres, 4 variables.....	95
Ilustración 25. Distribución de clústeres, 6 variables.....	97
Ilustración 26. Mapa de Almacenes de Carbono.....	102
Ilustración 27. Mosaico de imágenes compuestas	103

Índice de Tablas

Tabla 1. Métodos directos e indirectos de medición de carbono del suelo	23
Tabla 2. Características de métodos in situ emergentes para la medición de COS	26
Tabla 3. Estudios de caso de medición de COS	29
Tabla 4. Número de muestras por unidad y pendiente.....	53
Tabla 5. Métodos para el cálculo de parámetros de suelo	58
Tabla 6. Bandas espectrales SPOT 5.....	69
Tabla 7. Coordenadas de los puntos de muestreo.....	71
Tabla 8. Fórmula para el cálculo de radiancia.....	77
Tabla 9. Porcentaje de COS de las unidades muestreadas	81
Tabla 10. Contenidos de COS por rango de pendiente.....	82
Tabla 11. Carbono almacenado en las unidades de muestreo.....	84
Tabla 12. Contenido de CA en T/Ha por rango de pendientes	85
Tabla 13. Clasificación de las concentraciones de M.O (NOM-021-RECNAT-2000).....	88
Tabla 14. Coeficiente de correlación con el COS.....	93
Tabla 15. Valores por clúster	96
Tabla 16. Valores por clúster	98
Tabla 17. Correlación de Pearson entre COS y Radiancia.....	107

Índice de Gráficos

Gráfica 1. Contenidos de COS de las unidades muestreadas.....	82
Gráfica 2. Porcentaje de COS por unidad de pendiente.....	83
Gráfica 3. CA contenido en El Telar, por unidades de muestreo.....	85
Gráfica 4. CA contenido por rango de pendiente	86
Gráfica 5. Diagrama de dispersión entre %C y humedad.....	91
Gráfica 6. Diagrama de dispersión entre %C y pendiente	91
Gráfica 7. Diagrama de dispersión entre %C y tipo de cultivo.....	92
Gráfica 8. Diagrama de dispersión entre %C y altura.....	92
Gráfica 9. Dispersión del %C y los valores de radiancia Banda 1	105
Gráfica 10. Dispersión del %C y los valores de radiancia de la Banda 2.....	106
Gráfica 11. Dispersión del %C y los valores de radiancia de la Banda 3.....	106

Introducción

En la actualidad uno de los problemas más importantes en el contexto del cambio climático es el exceso de dióxido de carbono (CO₂) atmosférico que contribuye en gran medida al aumento de gases de efecto invernadero (GEI), de acuerdo con datos del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) las emisiones de CO₂ del 2004 contribuyeron en un 77% al porcentaje global de GEI, tomando en cuenta tanto el CO₂ emitido por combustibles fósiles como los emitidos por deforestación y descomposición de la materia orgánica (IPCC, 2007).

Para hacer frente a tal problemática se ha vuelto prioritario el desarrollo de estrategias que permitan mitigar el incremento de la emisión de GEI, principalmente la reducción de CO₂. El Protocolo de Kyoto reconoce que hay un cierto número de características que hacen que el secuestro de carbono en las tierras agrícolas pueda ofrecer posibilidades de estrategias de mitigación del incremento de la concentración de gases de efecto invernadero, siendo los suelos agrícolas uno de los mayores depósitos de carbono del planeta con potencial de expandir el secuestro de carbono (FAO, 2002).

A nivel internacional se han realizado estudios para conocer la distribución y los almacenes de carbono en el suelo principalmente en suelos forestales, sin embargo, a pesar de que se ha reconocido a los sistemas agrícolas como sistemas capaces de captar y almacenar carbono en el suelo y en la biomasa, los estudios en México relacionados con los almacenes de carbono en suelos agrícolas, su distribución y comportamiento, son incipientes por lo que se ha vuelto una necesidad su comprensión y la generación de alternativas de estimación y monitoreo.

La presente tesis describe la importancia de los suelos agrícolas como sumideros de carbono y describe también el proceso de estimación de los almacenes de carbono en la comunidad El Telar, Coatepec Harinas, comunidad que presenta uso de suelo agrícola, además plantea el uso de herramientas de percepción remota y sistemas de información geográfica como recursos complementarios

para el desarrollo de modelos de estimación de carbono en suelos agrícolas con la finalidad de facilitar el desarrollo de proyectos enfocados al análisis de los almacenes de carbono a nivel local en sistemas agrícolas del Estado de México.

La estructura de la tesis está conformada por tres capítulos, en el primero se establece el marco de referencia donde se plasman los conceptos básicos para identificar la importancia de los sistemas agrícolas como sumideros de carbono en el contexto del cambio climático, la dinámica del carbono orgánico en los suelos y los sistemas de información geográfica y percepción remota como herramientas facilitadoras del análisis y estimación de carbono.

En el segundo capítulo se describe el desarrollo de la metodología de estimación del carbono orgánico del suelo en la zona de estudio, una breve descripción de las características físicas que pueden ser determinantes a la hora de explicar la dinámica y contenidos de carbono, posteriormente se presentan los procedimientos de muestreo de suelo y los análisis realizados a las muestras en el laboratorio para determinar el contenido y los almacenes de carbono en el suelo, por otra parte se expone la metodología planteada para diseñar un modelo de estimación complementario a los métodos directos.

El capítulo tres expone los resultados obtenidos en los análisis de laboratorio, explica el comportamiento del carbono en el medio que se encuentra y la relación de los resultados con las prácticas agrícolas que se desarrollan en el sitio, además de que expone la discusión de los resultados y conclusiones entorno al uso de sistemas de información geográfica y el modelo de estimación de carbono.

I. Planteamiento del problema

El aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera y su relación con el problema ambiental del cambio climático, ha provocado el incremento de esfuerzos a nivel internacional para reducir las emisiones de GEI, especialmente de CO₂ a través de la captura y almacenamiento de carbono en suelo en biomasa de los ecosistemas terrestres (IPCC, 2000). Se estima que en los ecosistemas terrestres la vegetación y los suelos absorben aproximadamente el 40% de las emisiones globales de CO₂ generadas por actividades humanas (The Royal Society, 2001). En el pasado la agricultura era la principal responsable de las emisiones atmosféricas de CO₂, sin embargo, actualmente el almacenamiento de carbono en las tierras agrícolas es una opción que permite la reducción de CO₂ en la atmósfera (IPCC, 2000) debido a que estos sistemas de producción, particularmente los de conservación, presentan un gran potencial para capturar y almacenar carbono (LaSalle, 2008).

A nivel internacional el contenido de carbono orgánico del suelo (COS) se ha obtenido a partir de datos de perfiles de suelo que provienen de mapas edafológicos, que se generalizan con los sistemas de información geográfica (SIG) para estimaciones regionales y nacionales (Segura et al, 2005). Sin embargo, estos estudios realizados para la estimación de COS se han enfocado en gran parte a los suelos forestales, ya que las estimaciones en suelos bajo producción agrícola son complejas. Si bien, en México ya se han realizado estudios a nivel nacional de los contenidos de COS, tal es el caso del *Mapa de carbono orgánico de los suelos de la República Mexicana*; el cual se basa en los inventarios nacionales forestales y los perfiles de suelo de INEGI, es necesario mencionar que en México la cartografía de suelos carecen de datos analíticos, de tal forma que la utilización de los mapas es limitada (Segura et al, 2005). Además de que para un análisis del COS a un nivel espacial local donde es posible caracterizar y conocer el manejo del sistema agrícola que se realiza por parte comunidad, la cartografía

de suelos a escala nacional se vuelve una herramienta no funcional para términos de análisis.

Aunado a lo anterior para los estudios de nivel local, los métodos tradicionales de estimación de COS son métodos directos que conllevan la realización de muestreos en campo y análisis de muestras de suelo en laboratorio, estos métodos de cuantificación de COS como el Walkley-Black o el método de combustión seca (los más comunes), tienen algunas limitaciones para la evaluación de la variación espacial y temporal a escalas regionales (Gehl, 2006) además de la generación de residuos tóxicos, demanda de gran cantidad de tiempo, mano de obra intensiva (Milorí *et.al*, 2011) y la alteración del sistema agrícola.

Es por eso que surge la necesidad de encontrar alternativas de estimación de carbono del el suelo en sistemas agrícolas, que permitan la reducción de tiempo y número de muestras, sin dejar de lado la confiabilidad en los resultados, ni la capacidad de análisis a nivel local, pero que tampoco demanden instrumentos costosos. Metodologías que permitan el análisis de las prácticas de manejo y dinámica del COS a nivel parcela y poder contar con los beneficios de la generalización de datos a partir de los SIG's.

La presente investigación plantea el uso de herramientas de percepción remota y SIG's como complemento a los métodos directos de estimación de COS para generar un modelo de estimación y posterior monitoreo de carbono orgánico en suelos agrícolas de similares características a las presentes en la zona de estudio.

II. Justificación

La incertidumbre actual de los eventos climáticos y los cambios que se esperan, exigen nuevos métodos que permitan realizar la cuantificación de COS de manera rápida y poder generar información necesaria para avanzar en temas relacionados con la sostenibilidad agrícola y el ciclo del carbono (Gehl, 2006).

Los cambios en el manejo del suelo pueden impactar en gran medida en los niveles de acumulación y pérdida de COS, incluso sobre periodos cortos de tiempo, sin embargo la detección de los efectos de esos cambios presenta muchos desafíos, como, la consideración de la heterogeneidad temporal y espacial de las propiedades del suelo, las condiciones ambientales generales, y el manejo histórico (Post *et.al*, 1999).

Con base en lo anterior se vuelve prioritario para la comunidad científica el desarrollo de metodologías sencillas y eficaces para conocer, monitorear y estimar futuros cambios en el carbono del suelo desde escalas que van de una parcela, hasta los inventarios regionales y nacionales. El uso de herramientas de métodos indirectos como la percepción remota para la determinación de COS son importantes debido a los beneficios potencialmente rentables que nos pudiera otorgar, entre ellos los mencionados por (Gehl, 2006): “la reducción en el número de muestreo, posibles errores de laboratorio, su potencial para reducir al mínimo la perturbación del suelo y aumentar la capacidad para analizar grandes áreas de suelo, además de aumentar la velocidad de obtención de resultados”.

Los modelos generados con base en percepción remota pueden ser capaces de proporcionar mediciones repetitivas, secuenciales para la evaluación de la variación espacial y temporal del fenómeno estudiado.

Los estudios tradicionales que permiten producir la información para el análisis de los suelos a gran escala (1:100.000 a 1:50.000 a nivel de paisaje y 1:20.000 a 1:10.000 a nivel de parcela) resultan muy extensos en el tiempo, con muchas dificultades y muy costosos (Achkar, 2005), por lo que es necesario el desarrollo

de estudios de COS a una escala distinta de la usada tradicionalmente, en este caso la aproximación a nivel local/parcela.

III. Contribución de la propuesta

La presente investigación plantea el uso de herramientas de percepción remota y SIG's como complemento a los métodos directos de estimación de COS para generar un modelo de estimación y posterior monitoreo de carbono orgánico en suelos agrícolas de similares características a las presentes en la zona de estudio, lo que permitiría sentar las bases para la elaboración de cartografía temática regionalizada con la distribución y comportamiento del COS, además de un modelo flexible que permita la incorporación de variables conforme se necesiten, para enriquecer el análisis de los datos obtenidos en campo. El conocimiento generado sobre el comportamiento espectral del COS sería de gran utilidad para posteriores proyectos que pretendan el análisis y estimación de COS en diferentes sitios.

IV. Hipótesis

La integración de variables físicas junto con las prácticas de manejo permiten explicar la variabilidad espacial del contenido y distribución del carbono orgánico del suelo, las cuales pueden ser identificadas con elementos de percepción remota a nivel parcelario.

V. Objetivos

Objetivo general

Estimar los contenidos de carbono orgánico en el estrato superficial de parcelas agrícolas de la comunidad El Telar, Coatepec Harinas, Estado de México, partiendo del uso de un método directo y su complementación con percepción remota.

Objetivos específicos

- Determinar las propiedades físicas y químicas de las muestras de suelo.
- Estimar el porcentaje y almacén de COS en las parcelas de estudio mediante un método directo (Walkley-Black).
- Identificar las prácticas agrícolas asociadas a los contenidos de COS
- Identificar los valores digitales asociados a los contenidos de carbono en el estrato superficial de suelo agrícola, mediante el uso de imagen de satélite

Capítulo 1. Marco de referencia



1.1 Cambio climático y el ciclo del carbono

Se define al cambio climático como el posible aumento en la temperatura superficial del planeta que se produciría como consecuencia de un aumento importante y rápido de las concentraciones de gases de efecto invernadero como el CO₂, N₂O, CFC, CH₄ (IPCC, 1995).

El uso de combustibles fósiles y el cambio en el uso del suelo son considerados a nivel mundial como las dos principales fuentes netas de CO₂ a la atmósfera relacionadas con el cambio climático global (Mintzer, 1992) y se estima que el CO₂ es el responsable del 71.5% del efecto invernadero (Lashof, 1990).

En la actualidad, el exceso de CO₂ modifica el balance del ciclo del carbono, influyendo de manera decisiva sobre las condiciones climáticas debido a que, por una parte se produciría una captación de CO₂ de la atmósfera a partir de las plantas a través de la fotosíntesis, y por otra, la respiración de las plantas, las quemaduras, y las talas para usos agrícolas incrementan en la atmósfera la concentración de emisiones de CO₂, lo que unido a una tasa de deforestación alta y a las escasas medidas de reforestación aplicadas altera el balance entre emisión y captación (Carvajal 2011) aumentando la concentración de CO₂ en la atmósfera.

Respecto al tema del cambio climático, aunque los escenarios exactos todavía son inciertos, se esperan efectos negativos por lo que es esencial tomar medidas para reducir las emisiones de GEI, incrementando su captura en los suelos y en la biomasa, una opción se basa en las tierras usadas para la agricultura (FAO, 2002).

1.1.1 Carbono orgánico del suelo

El carbono orgánico del suelo (COS) es derivado de los tejidos vivos: hojas y raíces, savia, microbios, hongos y animales. Gran parte del COS es el resultado de procesos de integración y metabolismos microbianos, sus componentes como la glomalina, desempeñan un papel crítico en la formación de los agregados del

suelo que le dan estabilidad contra el intemperismo y la erosión, y su capacidad para retener agua y el aire para las plantas y microorganismos (Donovan 2013).

Las formas elementales e inorgánicas de carbono en el suelo resultan principalmente de la meteorización de minerales y son menos sensibles a la gestión de la tierra que el carbono orgánico del suelo, el cual es una mezcla compleja de compuestos orgánicos de tejido vegetal en descomposición, organismos microbianos, y carbono unido a los minerales del suelos, estos compuestos se originan a partir de las actividades fotosintéticas de las plantas (The World Bank 2012).

El carbono orgánico puede ser la forma más valiosa y abundante de carbono en el suelo pero en general la menos estable, se puede oxidar fácilmente (convertido en dióxido de carbono) por las bacterias comunes en presencia de oxígeno, pero también se puede aumentar fácilmente como resultado del crecimiento de la planta, incorporación de composta o estiércol, lixiviados de carbohidratos líquidos de raíces de las plantas, todos procesados por microorganismos (Donovan 2013). Este tipo de carbono es el de interés de la presente investigación ya que es el carbono que se fija de la atmósfera al suelo, convirtiendo al suelo en un almacén de carbono, para este proyecto se considera almacén de carbono como un sinónimo de sumidero de carbono.

1.1.2 Secuestro de carbono y la agricultura como sumidero de carbono

El secuestro de carbono es el proceso de transferencia del dióxido de carbono proveniente de la atmósfera hacia el suelo mediante residuos de cultivos y otros sólidos orgánicos y en una forma que no es remitido inmediatamente, dicha transferencia o “secuestro” ayuda a la compensación de las emisiones por combustión de combustibles fósiles y otras actividades que emiten carbono, este secuestro puede llevarse a cabo mediante estrategias de manejo que agreguen grandes cantidades de biomasa al suelo, provocar alteraciones mínimas en él,

conservación del agua y suelo, mejorar la estructura y actividad de la fauna del suelo. (Sundermeier et al, 2010)

Aunque el protocolo del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) ha priorizado el secuestro de carbono por encima del suelo a través de la reforestación y la forestación, el suelo puede representar incluso un sumidero de carbono más grande, en este sentido, uno de los desafíos para la incorporación de la agricultura en los acuerdos post-Kyoto (después de 2012) es el desarrollo de metodologías sencillas y eficaces para medir, monitorear y verificar el carbono del suelo en los sistemas agrícolas (Segnini 2011).

El concepto de sumidero o almacén en relación con el cambio climático fue adoptado en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) de 1992, en donde se define al sumidero como: “cualquier proceso, actividad o mecanismo que absorbe o elimina de la atmósfera un gas de efecto invernadero, un aerosol o un precursor de un gas de efecto invernadero” (F. E. M. P, 2011). El CO₂ secuestrado por las plantas es el resultado de las diferencias entre el CO₂ atmosférico absorbido durante el proceso de la fotosíntesis y el CO₂ emitido por la atmósfera durante la respiración, la diferencia se convierte en biomasa, por lo tanto la vegetación natural y los cultivos agrícolas pueden convertirse en sistemas efectivos que coadyuvan a la reducción de los niveles de CO₂ atmosférico (Carvajal 2011).

Muchas de las prácticas de manejo pueden aumentar carbono en el suelo, así como carbono sobre el suelo en forma de biomasa, en particular por las prácticas de conservación del suelo, por ejemplo: la siembra directa, labranza reducida, terrazas), la incorporación de residuos de cosecha, el aumento de la intensidad de cultivo, fertilización, y la conversión de tierras de cultivo a pastos permanentes o bosques (Segnini 2011).

1.1.3 Dinámica del carbono orgánico en el suelo

Para determinar carbono secuestrado en los ecosistemas terrestres se debe tener en cuenta el C (carbono) estable incorporado al suelo, si la acumulación de C en el suelo es un proceso más lento que la acumulación de la biomasa, la estabilidad del C en el suelo es mayor y por lo tanto la capacidad del suelo para almacenar C es importante debido al material vegetal acumulado en descomposición, llamado C del humus (Carvajal 2011).

El carbono fijado se distribuye dinámicamente entre la biomasa vegetal viva (tronco, ramas, hojas, raíces, etc), la biomasa vegetal muerta (madera muerta, ramas y raíces secas, hojarasca, M.O en descomposición) y el suelo; donde se localiza el carbono orgánico procedente del proceso de humificación, teniendo esta fracción gran importancia en el balance final de absorción de CO₂ (F. E. M. P, 2011). La poda de los árboles y las hojas caducas puede contar como pérdida de carbono del cultivo si se retira de la plantación o se quema, mientras que, si la poda se descompone naturalmente en el suelo, se convierte en un medio eficaz de inmovilización de CO₂ a largo plazo (Lal, 1997), quedándose de una quinta a una tercera parte en el suelo, ya sea como biomasa viva o como el humus del suelo (Brady, 2004).

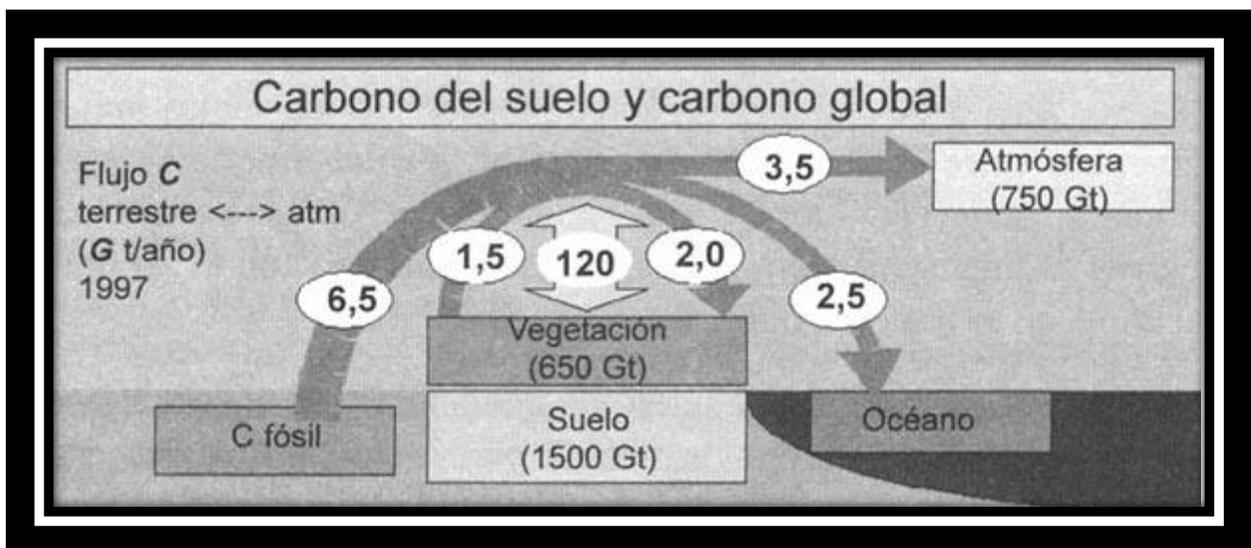


Ilustración 1. Ciclo terrestre del carbono (FAO, 2002)

Uno de los elementos principales importantes en el proceso del secuestro de carbono es la materia orgánica, debido a que la actividad biológica que esta genera tienen gran influencia sobre las propiedades químicas y físicas de los suelos, la agregación y la estabilidad de la estructura del suelo aumentan con el contenido de materia orgánica, incrementando la tasa de infiltración y la capacidad de agua disponible en el suelo además mejora la dinámica y la biodisponibilidad de los principales nutrientes de las plantas (FAO, 2002), lo anterior favorece la formación de agregados, que a su vez tiene una relación y efecto en el contenido de COS (Martínez E., 2008).

1.2 Percepción remota, sistemas de información geográfica y su importancia en el estudio del carbono

Históricamente, el muestreo ha sido el método preferido para determinar el carbono orgánico contenido en el suelo. Los muestreos recolectan información de campo y son llevados a laboratorio para el análisis del total de carbono a partir de métodos directos. Sin embargo, requieren de una labor extensa, costosa y para dar una representación espacial de la variabilidad del COS se requiere de un gran número de muestras. La percepción remota tiene el potencial de resolver estos problemas, actualmente se ha convertido en una herramienta invaluable en la investigación agrícola durante la última década debido a su capacidad de análisis no destructivo de las características del suelo y caracterización de la heterogeneidad del suelo. La necesidad de cartografía detallada de carbono orgánico del suelo, puede cubrirse con los avances recientes en percepción remota y cartografía (Stephens et al.).

De acuerdo con a partir del interés de la reducción de las concentraciones de CO₂ atmosférico por el Protocolo de Kyoto, se requiere de sistemas operacionales que permitan verificar el cumplimiento de sus metas, en ese sentido menciona que la teledetección (percepción remota) es una herramienta fundamental para cubrir las necesidades de información territorial pues permite el seguimiento y

cuantificación de la biomasa vegetal, los usos de suelo y sus variaciones. Además la percepción remota es el medio más adecuado para cuantificar la cantidad neta de carbono (Rosenqvist et al, 1999).

Dentro del contexto de los estudios de COS, la variabilidad de los factores dentro de una parcela de cultivo y el peso que se le da dentro de los planteamientos de la agricultura de precisión (descrita más adelante) hacen que los SIG tengan gran importancia y hasta sean imprescindibles gracias a elementos como: las herramientas de escritorio y sus capacidades analíticas (Olaya 2012), además de las capacidades de análisis de la distribución del carbono por el geoposicionamiento de las variables implicadas para su estudio.

Lo anterior muestra que las herramientas de percepción remota y los SIG pueden ser empleadas en el diseño de metodologías que faciliten la estimación de COS y el análisis de los datos que se obtengan en campo, en miras de su posterior monitoreo y estudio de su dinámica.

Por otra parte, es necesario comprender que el sistema de trabajo suelo-teledetección está constituido por aportes complementarios que permiten la retroalimentación entre ambos, y se debe destacar que ni la teledetección podrá aportar todas las informaciones necesarias para el estudio de la cobertura de suelos (es decir no podrá sustituir totalmente la obtención de información desde los estudios de terreno) ni la ciencia del suelo por sí sola podrá aportar toda la información necesaria para analizar la variabilidad espacial de las propiedades del suelo en el paisaje (Achkar, 2005).

1.2.1 Percepción remota

La percepción remota o teledetección es definida por el Instituto Nacional de Geografía Estadística e Informática (INEGI) como, la ciencia, arte o técnica que permite observar y obtener información de nuestro planeta desde el espacio sin estar en contacto con ella. Involucra varios elementos: A) Fuente de energía o iluminación. B) Atmósfera, ya que la energía interactúa con este elemento al viajar del sensor al objeto y viceversa. C) Objetos, dependiendo de sus propiedades es la interacción o respuesta a la energía recibida y reflejada. D) Sensor remoto, que recoge y graba la radiación electromagnética reflejada o emitida por el objeto y la atmósfera. E) Transmisión, recepción y procesamiento. La energía grabada por el sensor se transmite a una estación receptora, en donde los datos se procesan y son convertidos a imágenes digitales. F) Interpretación y análisis, consiste en interpretar la imagen para extraer la información de los objetos captados (INEGI 2014).

Desde luego el producto principal de la percepción remota son las imágenes satelitales que son representación visual de los datos reflejados por la superficie de la Tierra capturados por un sensor montado en un satélite artificial. Los datos son enviados a una estación terrena en donde se procesan y se convierten en imágenes, enriqueciendo nuestro conocimiento del suelo en diferentes escalas espaciales que van desde la local, regional, nacional y mundial, con sus diferentes resoluciones respectivas.

1.2.2 Los SIG's y su relación con la agricultura

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG's) son herramientas que facilitan la generación, manipulación y procesamiento de datos espaciales, cartográficos, sociales, matemáticos, etc., para el estudio de fenómenos sociales o naturales, en este caso el estudio del COS.

El concepto de agricultura de precisión es fundamental para entender el papel de los SIG en el panorama agronómico actual. La agricultura de precisión es un modelo de gestión agrícola que busca optimizar la gestión de las tierras agrícolas no solo desde el punto de vista económico, sino también desde el ecológico y para ello busca considerar explícitamente la variabilidad de los distintos factores que influyen en los procesos que se desarrollan en las parcelas (Olaya 2012), por ejemplo la formación de materia orgánica y los elementos relacionados con el COS. La necesidad de información detallada del COS en sistemas agrícolas ha recurrido al uso de los sistemas de percepción remota y los SIG's, y justamente, la agricultura es un área que ha experimentado un enorme desarrollo en los últimos tiempos, modernizando la agricultura tradicional con tecnología relacionada con los SIG.

1.3 Métodos de estimación del contenido de carbono en el suelo

De acuerdo con (Post et al, 1999), existen dos grupos de métodos básicos para medir el carbono almacenado en el suelo y sus cambios: Métodos directos y métodos indirectos (Tabla 1). Los métodos directos incluyen muestreos de campo y mediciones en laboratorio del total de carbono. Los métodos directos son esenciales para determinar cambios en el contenido de carbono en el suelo para diferentes manejos a escala de parcela, por otro lado, para determinar los almacenes y tasas de cambio para grandes áreas es necesario extrapolar los valores y relaciones obtenidos en campo y laboratorio.

Los métodos de medición de COS directos e indirectos están clasificados de esa manera, dependiendo si la cuantificación del contenido de carbono en el suelo se realiza de manera directa o si son inferidos aproximadamente mediante una variable.

Tabla 1. Métodos directos e indirectos de medición de carbono del suelo

Métodos directos	Métodos indirectos
<p>1. Muestreos en campo y mediciones de laboratorio (Combustión seca, Walkley Black).</p>	<p>Técnicas de conteo</p> <ul style="list-style-type: none"> • Conteo estratificado con base de datos • Percepción remota para inferir factores determinantes de las entradas de carbono sobre el suelo.
<p>2. Covarianza Eddy; mediciones de torre de flujo.</p>	<p>Modelos de simulación biogeoquímica para comprender los procesos biológicos del subsuelo, por ejemplo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • RothC • Century • DNDC • PROCOMAP • CO₂FIX
<p>3. Tecnologías emergentes para medición in situ</p> <ul style="list-style-type: none"> • Espectroscopia de ruptura inducida por láser (LIBS) • Dispersión inelástica de neutrones (Aún se evalúa para mejorar la fiabilidad de la medición. • Espectroscopía de infrarrojo medio e infrarrojo cercano. 	

Fuente: Traducción libre obtenido de (The World Bank, 2012) modificado de (Post, 2001).

A continuación se presentan los procedimientos de dos de los métodos mencionados en la tabla anterior: Walkley-Black y combustión seca descritos en (Ministerio del Ambiente Perú 2009):

✓ Walkley-Black

Método de oxidación húmeda, el cual es rápido y fácil, útil para cuando es no necesario análisis de carbono total y utilizado frecuentemente para el cálculo de carbono en el suelo.

La determinación consiste en la oxidación de carbono orgánico que contiene el suelo con un exceso de dicromato potásico en medio fuertemente ácido, valorando el exceso de dicromato con sal de hierro, se pesa 1gr. de suelo y se oxida con 10 ml. de dicromato potásico 1 N. y 20 ml de ácido sulfúrico concentrado, se agita la suspensión obtenida y se deja reposar durante 30 minutos, continuación se enrasa a 100 ml. con agua destilada.

El color de la disolución debe ser naranja pardusco, si es verde se descarta la muestra por exceso de materia orgánica y se repetirá con 0,5 gr. de muestra. Si es de color rojo se descartará por tener poca materia orgánica y se repetirá con 2gr. de muestra.

Se toman tres alícuotas de 10 ml. a las que se les añade 3 ml. de ácido fosfórico concentrado (para enmascarar el Fe III) y unas gotas de indicador de carbonatos y se valora con sal de Mohr hasta viraje de pardo a verde.

El método utiliza varios coeficientes empíricos tales como considerar que el 58% de carbono es la materia orgánica fácilmente asimilable y que solo el 77% de la materia orgánica total se oxida durante la reacción.

$$\% \text{ MO} = \% \text{ C} * (100/58) * (100/77)$$

Además se toma en cuenta que se toman alícuotas de 10 ml. de un volumen total de 100 ml.

$$\% \text{ MO total} = ((\text{VM}) \text{ dicr} - 1/6(\text{VM}) \text{ Fe II}) * 40,3/ \text{P muestra}$$

✓ Combustión seca

Se determina el carbono orgánico y carbono total mediante combustión de acuerdo al siguiente fundamento:

El carbón presente en el suelo se oxida a 900°C a CO₂ en una corriente de oxígeno exenta de gas carbónico, el CO₂ producido se mide por volumetría, conductimetría, cromatografía de gases o mediante un método de detección por absorción en el infrarrojo, dependiendo del aparato empleado.

El resultado del tratamiento directo de la muestra de suelo dará carbono total. Si se quiere evaluar el carbono orgánico hay que tratar previamente la muestra con ácido clorhídrico para eliminar el carbonato, o también si se ha determinado este por otro método, se calcula por diferencia.

Otro método directo mencionado en la Tabla 1, es el de Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) que permite el ahorro de tiempo y requieren menor labor en comparación con las mencionadas en los párrafos anteriores, (Gehl & Rice 2007) lo incluyen como una tecnología emergente en su artículo "*Emerging technologies for in situ measurement of soil carbón*", y menciona que:

"La instrumentación mediante óptica-láser, específicamente la espectroscopia de ruptura inducida por láser (LIBS por sus siglas en inglés), es una tecnología atractiva para las ciencias del suelo específicamente por la sensibilidad, selectividad y capacidad in-situ del método que hace análisis con una preparación mínima de la muestra. Este método basado en espectroscopia de emisión atómica, donde una intensa pulsación laser se centra en una muestra, formando un microplasma que emite características de iluminación de los elementos de composición de la muestra". Aunque esta tecnología es relativamente nueva, ha tenido resultados prometedores, pero falta mucho para aprovechar al máximo su potencial y requiere de aparatos especializados de accesibilidad limitada.

A continuación se presenta una tabla comparativa (Tabla 2) de los métodos in situ para la cuantificación de carbono del suelo con el fin de establecer sus ventajas y desventajas.

Tabla 2. Características de métodos in situ emergentes para la medición de COS

Método directo	Proceso	Tipo de radiación medida	Profundidad (cm)	Volumen muestreado (cm³)	Ventajas	Desventajas
Espectroscopia infrarrojo medio	Molecular/reflectancia difusa	Infrarroja	1	10	Mejor que el infrarrojo medio, al tiempo de distinguir COS.	Los costos están en función de las bases del proyecto y puede ser limitante.
Espectroscopia infrarrojo cercano	Molecular/reflectancia difusa	Infrarroja cercano	0.2	1	Rápido, bajo costo.	Menos imprecisa que el la infrarroja media, en la predicción de COS.
Espectroscopia de ruptura inducida por láser	Atómica/emisión inducida de plasma	Visible	0.1	0.1	Muy rápido, provee las mediciones del COS total en segundos.	Interferencia con compuestos de hierro alrededor de los 280 nm de longitud de onda. Actualmente

						e no puede distinguir el suelo inorgánico del carbono orgánico.
Dispersión inelástica de neutrones	Nuclear/reacciones nucleares	Rayos gama	30	100,000	Gran alcance y profundidad	La tecnología es reciente y requiere calibración para varios tipos de suelo y el escaneo debe adaptarse para captar grandes áreas

Fuente: Traducción libre, de (Gehl & Rice 2007) adaptado de (Chatterjee, 2009).

Tradicionalmente se ha usado la combustión húmeda propuesta por Walkley-Black (Bremner y Jenkinson, 1960) como método de estimación de carbono. Sin embargo, el uso de un agente cancerígeno y contaminante como el dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) ha determinado la búsqueda de metodologías alternativas menos contaminantes como “lost on ignition” (LOI) que requiere sólo una mufla que alcance $375^\circ C$, la digestión seca en un sistema cerrado a cerca de $1000^\circ C$ es la referencia actual, pero no siempre está disponible por el alto costo del equipo y de su mantenimiento (Padilla, 2011). Por otra parte, el uso de la espectroscopía con reflectancia difusa en el infrarrojo cercano, llamada NIRS, es una alternativa en estudio para determinar el COS, que no destruye la muestra, no es contaminante, ahorra reactivos y además es rápida (Morón *et.al*, 2007) una vez perfeccionada la calibración inicial del C medido por un método de referencia

estándar en muestras de suelos con un variado contenido de materia orgánica (Padilla, 2011).

Desde luego los métodos directos descritos anteriormente pueden resultar eficaces y con datos más reales que los métodos indirectos, no obstante, los métodos indirectos incluyen la contabilidad simple y estratificada en donde las estimaciones se multiplican por todas las áreas de aplicación que determine el levantamiento de suelos, cobertura, clima y otros datos espaciales como la topografía y el ambiente (relacionados con el almacenamiento de carbono), siendo posible la aplicación de modelación dependiendo su disponibilidad (Post et al, 1999). De esta manera, la teledetección y otra información geográfica son valiosos para la representación de áreas en estos métodos de estimación, además de permitir que en el estudio del COS se agreguen un mayor número variables posibles con la finalidad de un estudio holístico.

1.4 Estudios de caso

Como ya se ha mencionado a lo largo del capítulo, el creciente interés en la reducción de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera, ha aumentado la necesidad de cuantificar los contenidos de COS y representarlos espacialmente con la finalidad de tener los insumos suficientes que coadyuven a la toma de decisiones y aplicación de prácticas de manejo, que favorezcan la captura de carbono.

Se han realizado estudios y mapeos de los contenidos de COS en ecosistemas terrestres principalmente en suelos forestales, sin embargo, los suelos agrícolas son sistemas importantes que se han dejado de lado, sin aprovechar su potencial de sumidero de carbono, ni cuantificar y conocer los contenidos de COS, su distribución y su dinámica, ya sea a nivel parcela, regional o local.

Los estudios en México sobre el COS en sistemas agrícolas a nivel parcelario, son incipientes por lo que es necesaria la realización de investigación en este tipo de

sistemas y la percepción remota se exhibe como una herramienta con el potencial de apoyar el desarrollo de proyectos de estimación de COS, y generar resultados en un menor tiempo.

Para conocer algunos elementos que sustenten la realización de la presente tesis, se realizó una revisión bibliográfica de investigaciones que utilizaron herramientas de percepción remota, SIG o análisis de reflectancia como apoyo para la estimación de contenidos de COS en ecosistemas terrestres. A continuación se presenta un cuadro resumen de los estudios de caso consultados.

Tabla 3. Estudios de caso de medición de COS

Proyecto	Objetivo	Métodos	Resultados
Variabilidad del carbono orgánico en suelos de ladera del sureste de México. (Vergara et al, 2004)	Determinar los porcentajes del C del suelo en sistemas de uso con vegetación nativa secundaria y con cultivos agrícolas permanentes, anuales y mixtos, comunes en terrenos de ladera de tres regiones del estado de Oaxaca, México, así como su variabilidad espacial, para contribuir a tener mayores elementos para la estimación del potencial de secuestro del C en tales áreas.	Estimaron la variabilidad del COS a partir de muestras compuestas; cada una formada por 5 a 7 submuestras en cada tercio de la parcela. Calcularon el COS mediante combustión seca, con un analizador automático TOC y la variabilidad espacial del % de COS, se analizó mediante semivariogramas calculados con el programa GS+	La variabilidad espacial del % de COS fue considerable. Las semivarianzas tuvieron un rango de 0.14 a 7.86 en la profundidad de 0 a 20 cm y de 0.18 a 2.91 en la profundidad de 20 a 40 cm. La variabilidad es amplia, como resultado de la alta heterogeneidad en la distribución del carbono. En los sistemas no-agrícolas se obtuvieron mejores ajustes de los modelos geoestadísticos y espaciales que en los sistemas agrícolas. Sugieren la inclusión de los datos de las prácticas de manejo para el estudio de la variabilidad y distribución espacial en suelos agrícolas.
Remote Sensing	Analizar la humedad y los	Muestreos de suelo en	Sus resultados preliminares

<p>Organic Carbon in Soil (Stephens et al.)</p>	<p>efectos sobre reflectancia de la superficie para medición de carbono dentro de tanto bandas visibles y SWIR y propone una alternativa a la los modelos convencionales de reflectancia.</p>	<p>cada parcela de su área de estudio. Cálculo de COS, C inorgánico, humedad. Estimación de COS por oxidación de dicromato de potasio. Cálculo de reflectancia del suelo con espectoradiómetro en bandas visible y NIR (350-2500nm). Modelación de los resultados de COS y espectrales, obtenidos del espectoradiómetro y de imágenes de satélite de alta resolución.</p>	<p>demuestran que el COS puede estimarse mediante la reflectancia dentro de la banda SWIR. Dentro del visible se tiende a confundir la humedad con los contenidos de COS. Sugieren caracterización de las prácticas de riego y flujo de agua.</p>
<p>Carbono orgánico de los suelos de México (Segura et al, 2005)</p>	<p>Determinar el contenido de COS en el horizonte superficial de los suelos de México y establecer sus aportes por entidad federativa, región ecológica, uso del suelo y por áreas según su influencia humana.</p>	<p>Selección de sitios de muestreo: cuadrícula (5 km x 5 km) a los mapas 1:250 000 de INEGI (1995), con proyección UTM, cada vértice de la cuadrícula representó un punto potencial de muestreo. Recorrido de campo y muestreo de suelos: zonas áridas y semiáridas, trópico húmedo, selvas altas perennifolias y manglares; recolección muestras (0-20 cm) Análisis de laboratorio. Determinación de COS por Walkley Black. Generación de base de datos e interpolación de resultados en IDRISI software.</p>	<p>Los suelos de México presentan contenidos de COS que varían de 0.006 a 16.40% en el horizonte superficial (0 a 20 cm de profundidad). El COS por unidad de superficie varía desde 0.2 hasta 493 Mg ha⁻¹. En suelos con agricultura de riego hay menor contenido de COS; mientras que los usos pecuario intensivo y forestal manifiestan los principales aportes; en la medida en que el hombre incrementa sus actividades (agrícolas, pecuarias y forestales) disminuye el contenido de COS</p>

<p>Evaluación de la Distribución de la Materia Orgánica del Horizonte Superficial del Suelo mediante el uso de Imágenes Satelitales.</p> <p>Aplicación de metodología SIG.</p> <p>Caso: Cuenca del Arroyo Sánchez – Uruguay.</p> <p>(Achkar, 2005)</p>	<p>Evaluar la dinámica de la distribución de la materia orgánica del horizonte superficial del suelo en una cuenca hidrográfica, utilizando técnicas de teledetección.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Evaluación de las unidades del suelo -Elaboración de SIG: datos hidrológicos, pendientes, exposición etc. -Muestreo y análisis de suelos. -Estimación de materia orgánica -Análisis de reflectancia: radiómetro e imágenes Landsat -Correlaciones 	<p>El uso de todas las bandas para el análisis espectral es mejor que usar un solo compuesto.</p> <p>Los factores de MO y posición en el paisaje explican el 55% de la variabilidad del factor espectral. Variables que mejoran la capacidad de estimador.</p> <p>Se debe integrar la variabilidad mineral, rugosidad del suelo, entre otras más</p>
<p>Spectral reflectance based indices for soil organic carbon quantification.</p> <p>(Bartholomeus et al. 2008)</p>		<p>Investigaron 40 muestras de nueve tipos de suelo, de diversas zonas climáticas y con gran variedad de COS. Realizaron mediciones espectrales de las muestras, en ambiente controlado.</p> <p>Comprobaron el rendimiento de índices para detectar compuestos bioquímicos con capacidad de recuperar COS.</p>	<p>No encontraron buenas relaciones entre los índices basados en el espectro visible y características de absorción relacionada con celulosa. Se requiere de una gran varianza en el COS para la calibración del modelo, ya que la extrapolación más allá del rango de COS arroja errores en los datos</p>
<p>Mapping topsoil organic carbon of agricultural soils from Hyperspectral remote sensing data.</p> <p>(Jarmer et al. 2010)</p>	<p>Evaluación especial del de carbono orgánico de los suelos agrícolas con imágenes hiperespectrales.</p>	<p>Muestreos de suelo por cuadrantes de 30x30.</p> <p>Cuantificación de COS mediante un analizador elemental. (GmbH)</p> <p>Mediciones de reflectancia del suelo, con espectroradiómetro HyMAP. Relación de COS y reflectancia por mínimos cuadrados</p>	<p>La estimación de COS por mínimos cuadrados parciales con los resultados de reflectancia, es confiable. La transferencia del modelo de regresión para HyMAP permitió evaluar la distribución espacial de COS con exactitud razonable. Se mostró exceso de cálculo</p>

		parciales.	en las concentraciones más bajas.
Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field vis-NIR spectroscopy: An Australian case study.	Evaluar el potencial de medición de COS usando el sensor remoto Hyperion (imagen hiperespectral) y comparar las mediciones de COS con las predicciones de la recolección en campo del espectro del suelo.	146 muestras de suelo superficial. Espectro de reflectancia NIR. Medición de reflectancia con espectroradiómetro.. Comparación de ambos procesos, mínimos cuadrados parciales.	Este trabajo tuvo como resultado que, cualesquiera que sean los rangos de COS de las muestras de suelo y cualquiera que sea el número de muestras de suelo utilizadas en los modelos de predicción, la resolución espectral no modificó la precisión del modelo. El uso de datos de Hyperion es tan útil como los de vis-NIR, aunque puede ser menos preciso el modelo de Hyperion.

Elaboración propia.

1.5 Aportes del capítulo y alcances del proyecto

Con base en la información expuesta en el Marco de referencia, los métodos directos requieren de una extensa labor, desde la intensidad de muestreo, la preparación de muestras, y los análisis de laboratorio, agregando que, el uso de reactivos genera residuos contaminantes. Algunos son métodos destructivos, mientras que otros, requieren de tecnologías o aparatos costosos, lo que los vuelve una opción inviable en términos económicos para la realización de la presente tesis.

Las tecnologías y métodos analíticos de los sistemas de información geográfica (SIG), continúan en un creciente ímpetu global desde hace más de 25 años. No obstante, con el desarrollo de computadores de mayores capacidades tanto de procesamiento y visualización, como de almacenamiento y despliegue, así como las herramientas de adquisición y divulgación de datos (particularmente en línea) y

el perfeccionamiento y descubrimiento de técnicas de análisis más sofisticadas, se concede un rol de importancia y significancia mucho mayor a los datos espacialmente referidos. (Traducción libre, Rhind 1998, en (Atkinson, 2000).

Partiendo de estas ideas y de las expuestas a lo largo del capítulo, las imágenes de satélite y los sensores remotos, ofrecen en la actualidad sin número de aplicaciones en diversas disciplinas del conocimiento y se han convertido en herramientas de gran utilidad, particularmente para las investigaciones de carácter ambiental. De manera tal, que se vuelven la mejor opción para el ahorro de tiempo y la limitación de recursos económicos en los estudios de COS, aunado a los beneficios que aporta el uso de los SIG. Sin embargo, es indispensable partir de una metodología directa que arroje datos confiables de COS.

Los estudios de caso recopilados coinciden en la utilización de métodos directos para la estimación de COS, para validar el modelaje posterior para la estimación posterior que incluyen herramientas de percepción remota y SIG. Por otro lado la profundidad de muestreo la realizan en la capa superficial del suelo, la mayoría en el rango de 0 a 30 cm, debido que a medida que se aumenta la profundidad, se disminuye el contenido de COS. En todos los casos utilizaron métodos estadísticos para el estudio de las variables representativas de COS, y extrapolación o interpolación para la generalización de los resultados. En algunos casos, utilizaron el análisis espectral del suelo, como factor que apoya el estudio del COS, ya sea con el uso de espectroradiómetros o con el uso de imágenes satelitales de alta resolución de carácter hiper espectral, lo que mejora los resultados de reflectancia y el modelaje. Sin embargo es también un propósito de la presente tesis, verificar si el uso de imágenes multiespectrales de menor resolución a las mencionadas en los estudios revisados, arroja resultados confiables.

Para el presente proyecto, se emplea una práctica de clasificación de información espacial, como complemento a los análisis de laboratorio, realizados para identificar los contenidos de carbono C en el estrato superficial del suelo y de la caracterización de las prácticas de manejo en los sistemas. Para la cuantificación

de carbono se utilizó el método directo de Walkley-Black, partiendo de los resultados se utilizaron las herramientas de percepción remota para la identificación de las variables correlacionadas con el COS y su comportamiento espectral, para la generación de un modelo que permita la estimación y monitoreo posterior de los contenidos de COS en la zona de estudio. Se utilizará una imagen SPOT del año 2013 con una resolución espacial de 10 m, para el análisis de reflectancia. Inicialmente se planteó el uso de una imagen de alta resolución del sensor QuickBird, de una resolución menor a 1 m por píxel, debido a que este satélite es una excelente fuente de información ambiental para el análisis de los cambios en la utilización del suelo, en la agricultura y climatización forestal, sin embargo los altos costos de adquisición de dicha imagen limitaron la obtención de la imagen para su análisis en el presente proyecto, y se optó por la imagen SPOT en función de su disponibilidad.

La metodología anterior, podría permitir la reducción del número de muestras para estudios posteriores y por ende la reducción del uso de reactivos contaminantes, además de mapear los resultados obtenidos sin la necesidad del empleo de aparatos costosos de medición, dejando la oportunidad de utilizar más adelante métodos, técnicas, o insumos que eficiente la metodología.

La metodología empleada por (Achkar, 2005) en su Tesis Doctoral, revisada como caso de estudio, fue la que dio mayores aportes para la realización del proyecto, sobre todo, para el análisis espectral y generación de los compuestos a utilizar para la modelación.

La realización del presente proyecto sienta las bases para la creación de un modelo de estimación y monitoreo de COS, lo que permitirá actualizar datos, agregar variables al modelo y hacer estudios prospectivos del contenido de COS en diferentes épocas y años, además de poder replicar la metodología en estudios posteriores de estimación de COS en diferentes zonas de estudio.

1.6 Enfoques de la investigación

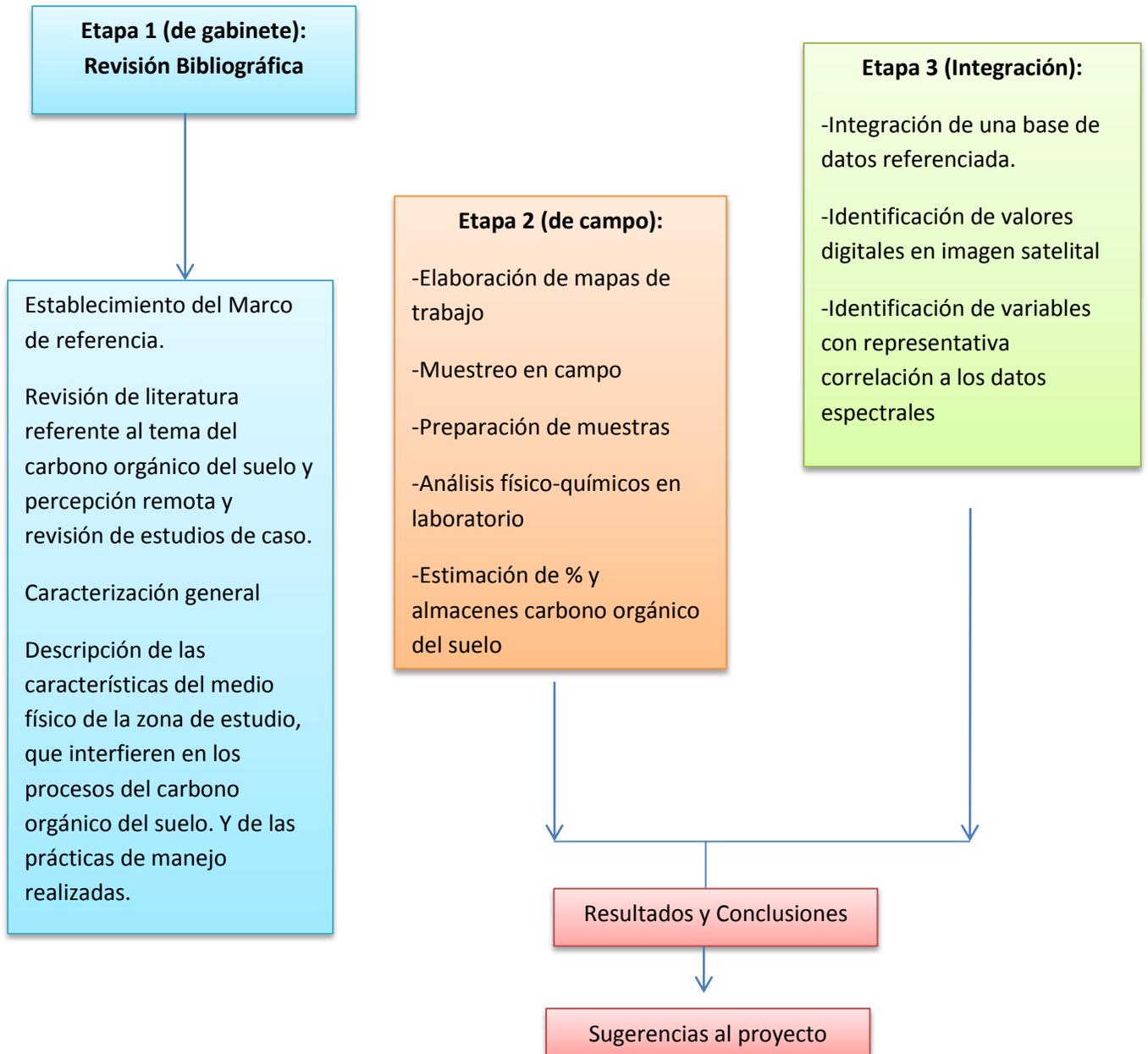
La presente investigación es de tipo cuantitativa debido a que los resultados esperados son numéricos, se requiere de correlaciones para identificar y explicar la dinámica de la variable estudiada. Esta investigación cuantitativa, se encuentra en una dimensión de generación-verificación, la cual, de acuerdo con (Orozco, 2013), intenta determinar la medida en que se cumple la proposición y probar empíricamente si la hipótesis es aplicable a varios conjuntos de datos, además de que establece generalizaciones con relación al universo de poblaciones al que es aplicable. No obstante también presenta condiciones del tipo cualitativas al incluir las prácticas de manejo agrícola, que apoyan la interpretación de las variables de estudio (medio físico) en el sistema desarrollado.

La investigación presente es de carácter multidisciplinario, asociado a las Ciencias Ambientales, que permite incorporar métodos variados correspondientes a más de un enfoque específico. El desarrollo del proyecto se aborda desde el estudio de un fenómeno socio ambiental como el cambio climático que repercute en los sistemas como el suelo. Se utilizaron enfoques como el agroecológico, que procura la evaluación de los agros ecosistemas y aprovechamiento de los recursos con análisis a nivel parcelario, en este caso el recurso suelo y su potencial para ser aprovechado como sumidero de carbono de zonas agrícolas. También se utilizó un enfoque relacionado a la edafología, que permitió explicar los procesos del suelo para el secuestro y almacén de carbono en las parcelas. Se complementó con un enfoque geográfico, con la finalidad de definir la distribución y comportamiento espacial de las variables de estudio, a partir de un análisis físico geográfico y del uso de herramientas de percepción remota.

La presente tesis busca la integración de las herramientas utilizadas en los estudios geográficos de gran escala, a los estudios con variables en un nivel local (parcela) en un sistema productivo como la agricultura para facilitar la interpretación de datos, además de definir alternativas de estimación y análisis del carbono orgánico del suelo. Lo anterior para coadyuvar en la generación de

información que permita la toma de decisiones ante la problemática, desarrollada en contexto socio ambiental como lo es el cambio climático.

1.7 Esquema metodológico



Elaboración propia.

Capítulo 2. Caracterización general de El Telar, Coatepec Harinas



En este capítulo se realizó una breve descripción de las características físicas presentes en la zona de estudio. La ubicación geográfica del municipio Coatepec Harinas y la comunidad El Telar, la unidad edáfica, de uso de suelo y sus características físicas que juegan un papel importante en los procesos del carbono en el suelo y que pueden explicar el comportamiento del COS. Se incluyen también algunos datos generales de las actividades productivas de la zona y las prácticas agrícolas desarrolladas en El Telar. Esta caracterización permitirá relacionar los aspectos descritos en este capítulo con los resultados que se obtengan de la estimación de COS, para tratar de entender cómo funciona el sistema en el contexto del carbono orgánico en los sistemas agrícolas de la zona de estudio.

La cantidad de C almacenada en el suelo, depende en gran medida de diferentes factores como condiciones climáticas locales, características específicas del suelo (textura, agregación, color, etc.) y muy especialmente del tipo de uso y manejo del suelo (Albadalejo).

2.1 Ubicación geográfica

El ejido El Telar se encuentra ubicado al norte de Coatepec Harinas, municipio del Estado de México que de acuerdo al Plan Municipal de Desarrollo de Coatepec Harinas, su ubicación se encuentran entre las coordenadas $18^{\circ}48'08''$ - $19^{\circ}04'43''$ latitud norte y entre $99^{\circ}42'56''$ – $99^{\circ}53'34''$ longitud oeste. Coatepec Harinas colinda con los municipios de Toluca, Zinacantepec, Villa Guerrero, Almoloya de Alquisiras, Texcaltitlán, Ixtapan de la Sal, Zacualpan y Temascaltepec, cuenta con una extensión de 280.53 km^2 que representa el 1.22% del territorio estatal, de acuerdo al (PMDCH 2013-2015).

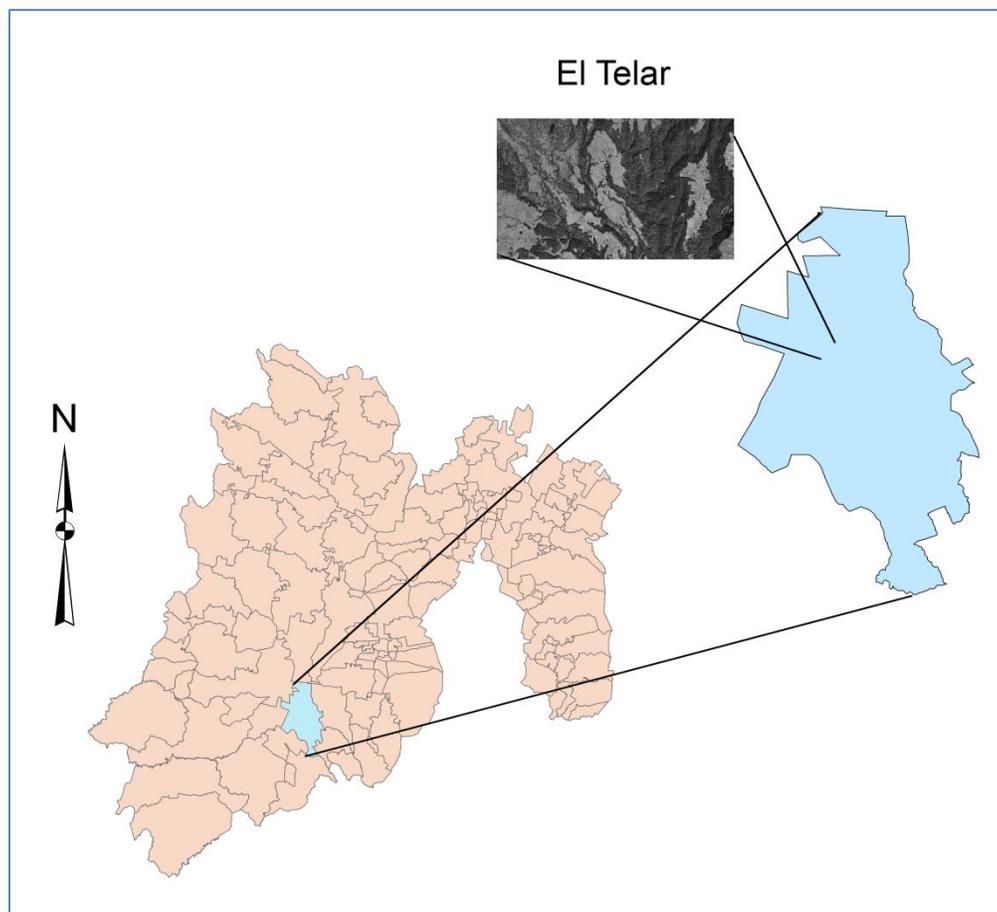


Ilustración 3. Ubicación geográfica de la zona de estudio

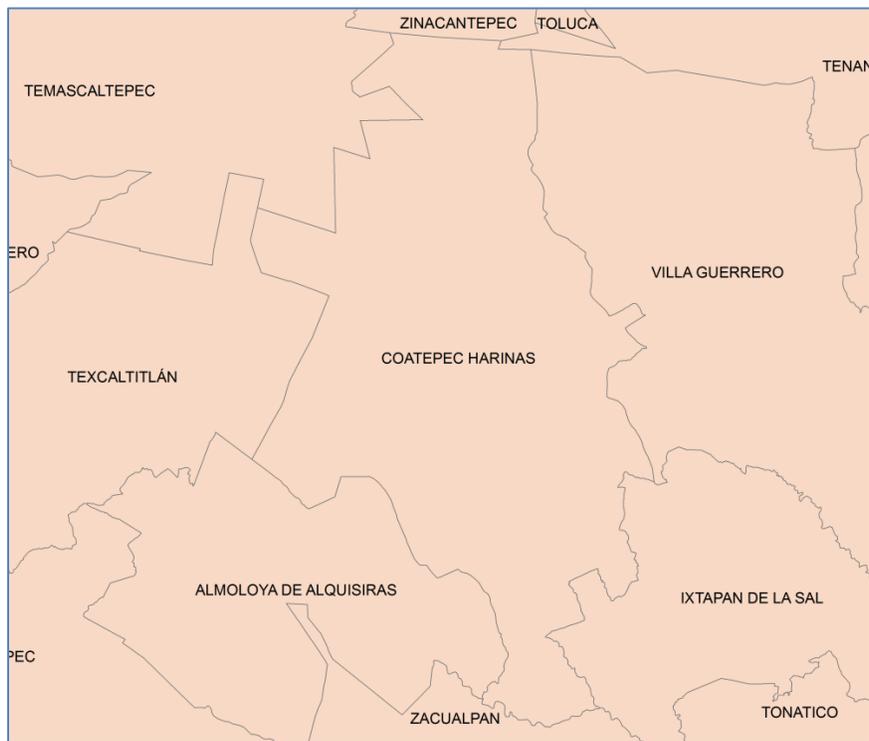


Ilustración 4. Colindancias del municipio Coatepec Harinas

El Telar se ubica en las coordenadas 99°49'43" de longitud y la 19°00'04" de latitud, a una altura que oscila los 2774 msnm, de acuerdo con datos del (INEGI, 2010). En la Ilustración 5 se muestra un mapa de la zona de estudio.

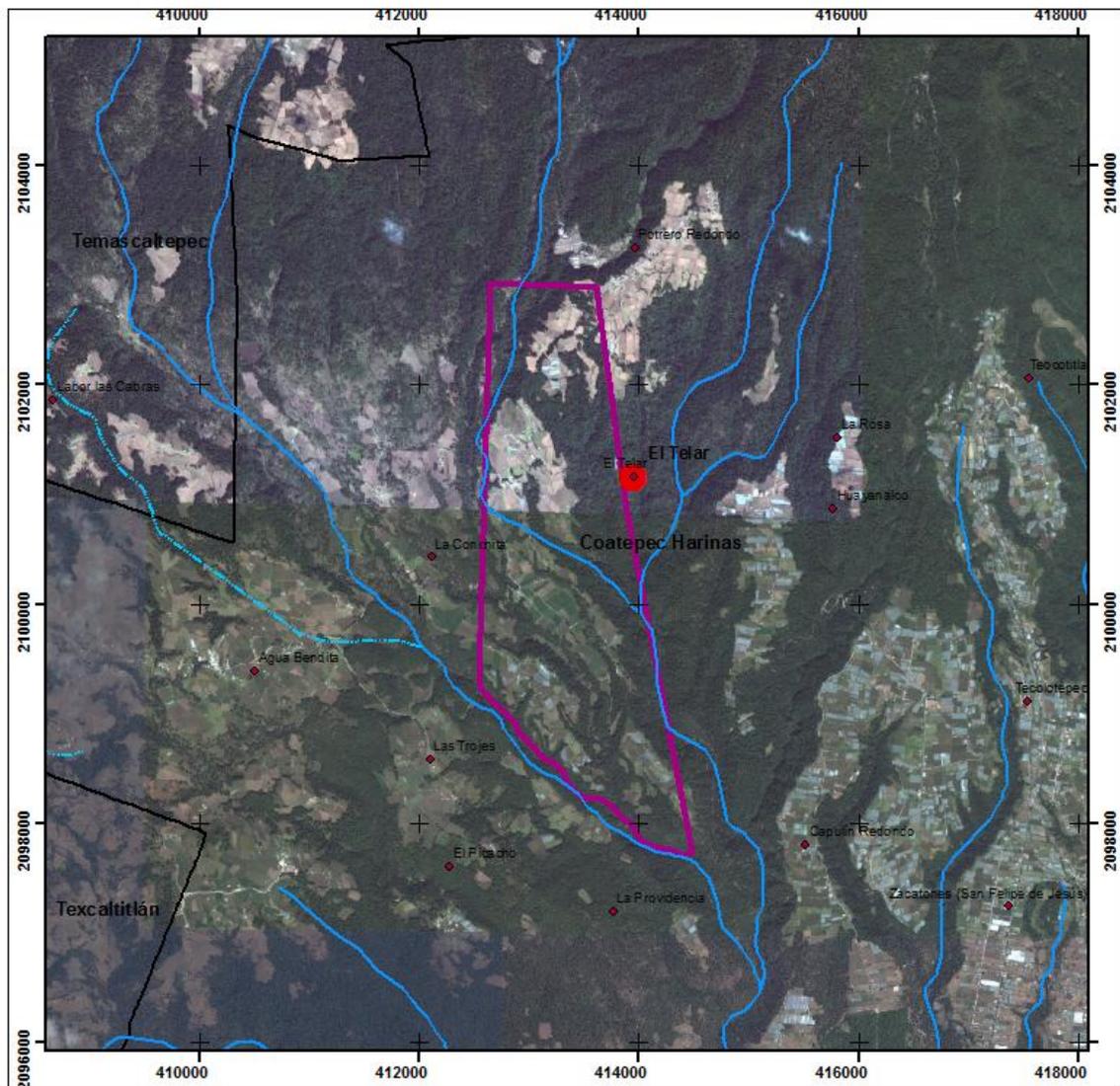


Ilustración 5. Mapa de El Telar

2.2 Edafología y Uso de Suelo

El municipio de Coatepec Harinas cuenta con una variabilidad en suelos, siete tipos principales de suelos presentes en el municipio, los cuales son: Andosol, Cambisol, Feozem, Litosol, Luvisol, Regosol y Vertisol (Ilustración 6) (INIFAP, 1995)

El Andosol se encuentra en la parte norte del municipio, (donde se encuentra El Telar), siendo el tipo de suelo que se encuentra en la zona de estudio. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO por sus siglas en inglés, describe a los Andosoles como un tipo de suelo que se desarrollan en zonas volcánicas, tienen un alto potencial para la producción agrícola, sin embargo la fuerte fijación de fosfato de los Andosoles (causada por Al y Fe libres) es un problema, requiere de mejoras para reducir este efecto (aplicación de calcáreo, sílice, material orgánico, y fertilización fosfatada), son fáciles de cultivar y tienen buenas propiedades de enraizamiento y almacenamiento de agua, pero en pendientes pronunciadas es mejor la presencia de bosque (FAO, 2007). En el mapa siguiente se pueden apreciar los tipos de suelo de la zona, y el correspondiente a El Telar.

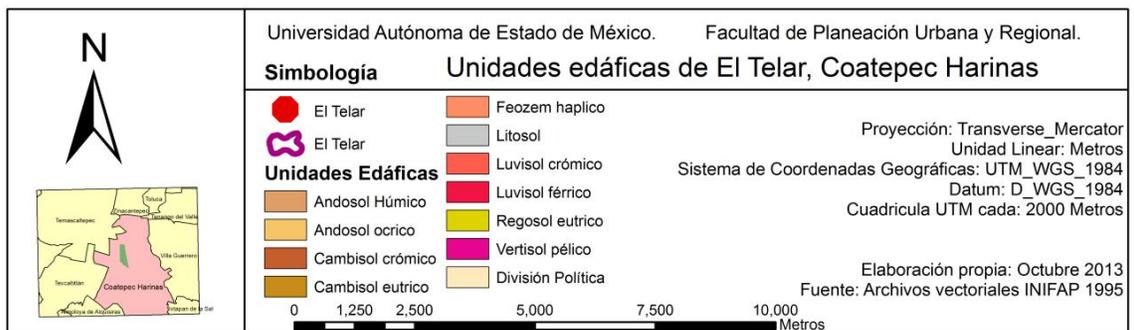
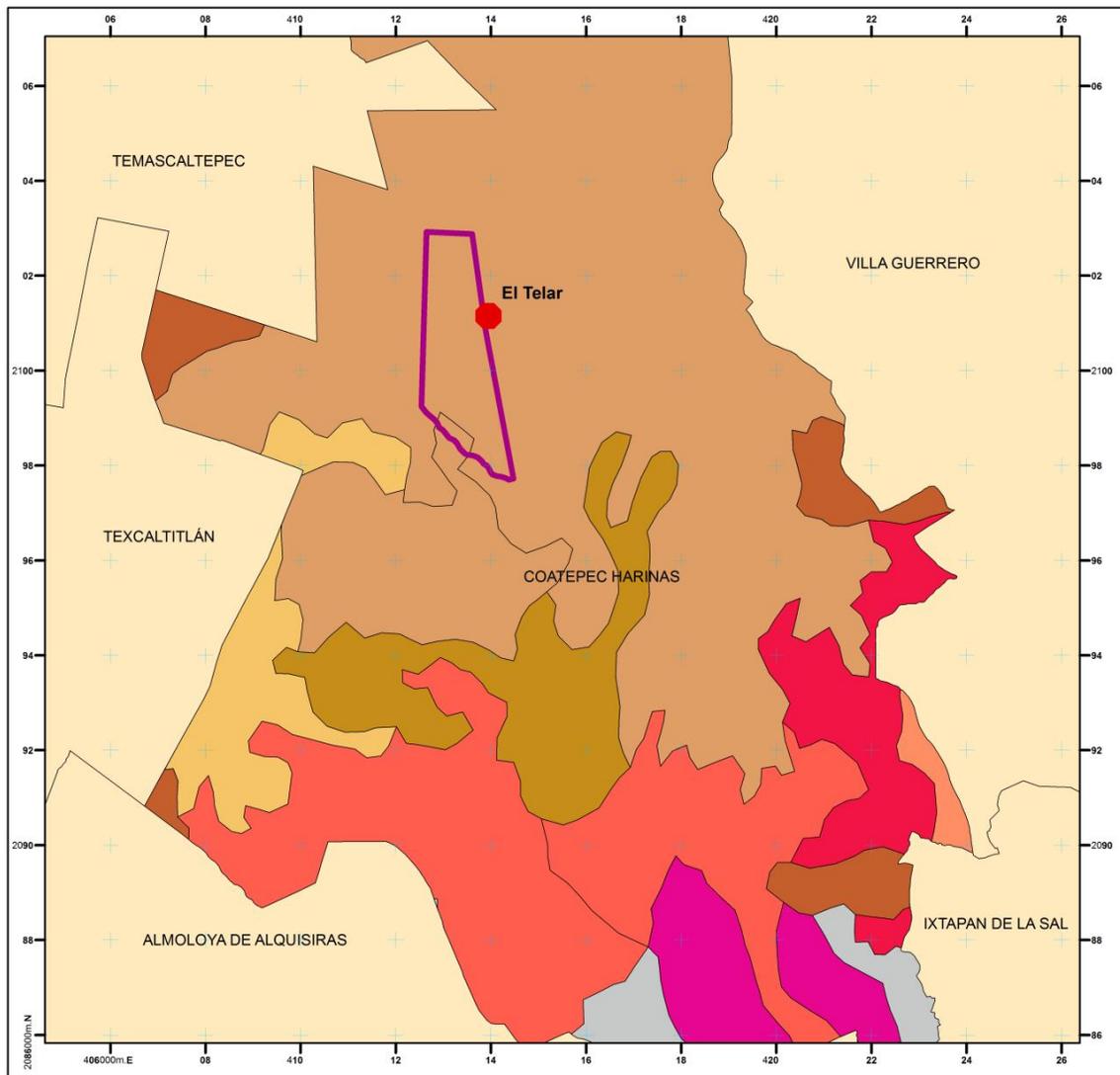


Ilustración 6. Mapa Edafológico Coatepec Harinas

Es muy importante conocer el tipo de suelo presente en la zona de estudio debido a que las cantidades de COS pueden variar dependiendo del tipo de suelo en el que se desarrollen los procesos de formación de materia orgánica y captura de carbono. De acuerdo a la FAO/UNESCO 1974, los contenidos medios de COS para los andosoles en diferentes profundidades son: 11.4 kg/m³ en una profundidad de 0 a 30 cm, 25.4 de 0 a 100 cm y 31 de 0a 200 cm. Siendo los andosoles la tercer unidad edáfica con mayor contenido de COS en la capa superficial (0-30 cm). Para el caso de zonas de bosque templado (como El Telar), las cantidades de COS a partir de los residuos de los bosques puede llegar a 8 o 9 kg/m³.

Lo anterior muestra una idea de las contenidos de COS que se pueden encontrar en el tipo de suelo en el que se encuentra El Telar, aunque, desde luego que las cantidades varían de acuerdo a otros factores como el uso de suelo, la humedad, entre otros y no se limita a la unidad edáfica presente.

El uso de suelo predominante en El Telar es el forestal con aproximadamente 369.17 ha de bosque certificado ante CONAFOR (Comisión Nacional Forestal), en segundo lugar se encuentra el uso agrícola con 115 ha. aproximadamente, donde los cultivos principales son la papa y el maíz, además de algunas parcelas de avena. Algunas áreas dentro de la zona agrícola y forestal se usan para el pastoreo no intensivo de ganado, quedando la superficie de El Telar destinada para esta actividad en tercer lugar.

El contenidos de COS cambian en diferentes usos de suelo, la capacidad de capturar y fijar carbono atmosférico es sin duda mayor en zonas forestales si se compara con zonas donde el uso de suelo es el agrícola, sin embargo, para poder hacer un balance adecuado en el contexto del cambio climático, es necesario estimar los contenidos de COS en las parcelas agrícolas, de esa manera se puede conocer la capacidad del sistema agrícola de capturar carbono atmosférico y transformarlo en carbono orgánico, además de poder identificar los factores determinantes en el contenido de COS. De acuerdo con la FAO, la materia orgánica que está sobre la superficie del suelo no es tomada en consideración en

la evaluación de las existencias de carbono en el suelo, lo que significa que, en los suelos cultivados los residuos vegetales son considerados fase transitoria, sin embargo, son parte importante del agrosistema pues las raíces vivas son consideradas como biomasa de carbono y pueden contribuir con la mayor parte del carbono en el suelo.

Lo anterior cobra importancia con los estudios realizados por (Post,1999), quien remarca lo importante que es tomar en consideración el uso del suelo y los cambios en el manejo de él, para la estimación del carbono orgánico.

2.3 Hidrología

El Telar se encuentra en la subcuenca Río Alto Amacuzac (Región Hidrológica del Balsas) que tiene 2,611.98 km², dentro de la cuenca del Río Grande Amacuzac, el lugar en donde drena es al Río Bajo Amacuzac. La corriente principal que pasa por El Telar es el Arroyo La Tortuga, proveniente del Nevado de Toluca y que descarga en el Arroyo El Chiquihuitero (SIATL. INEGI 2014).

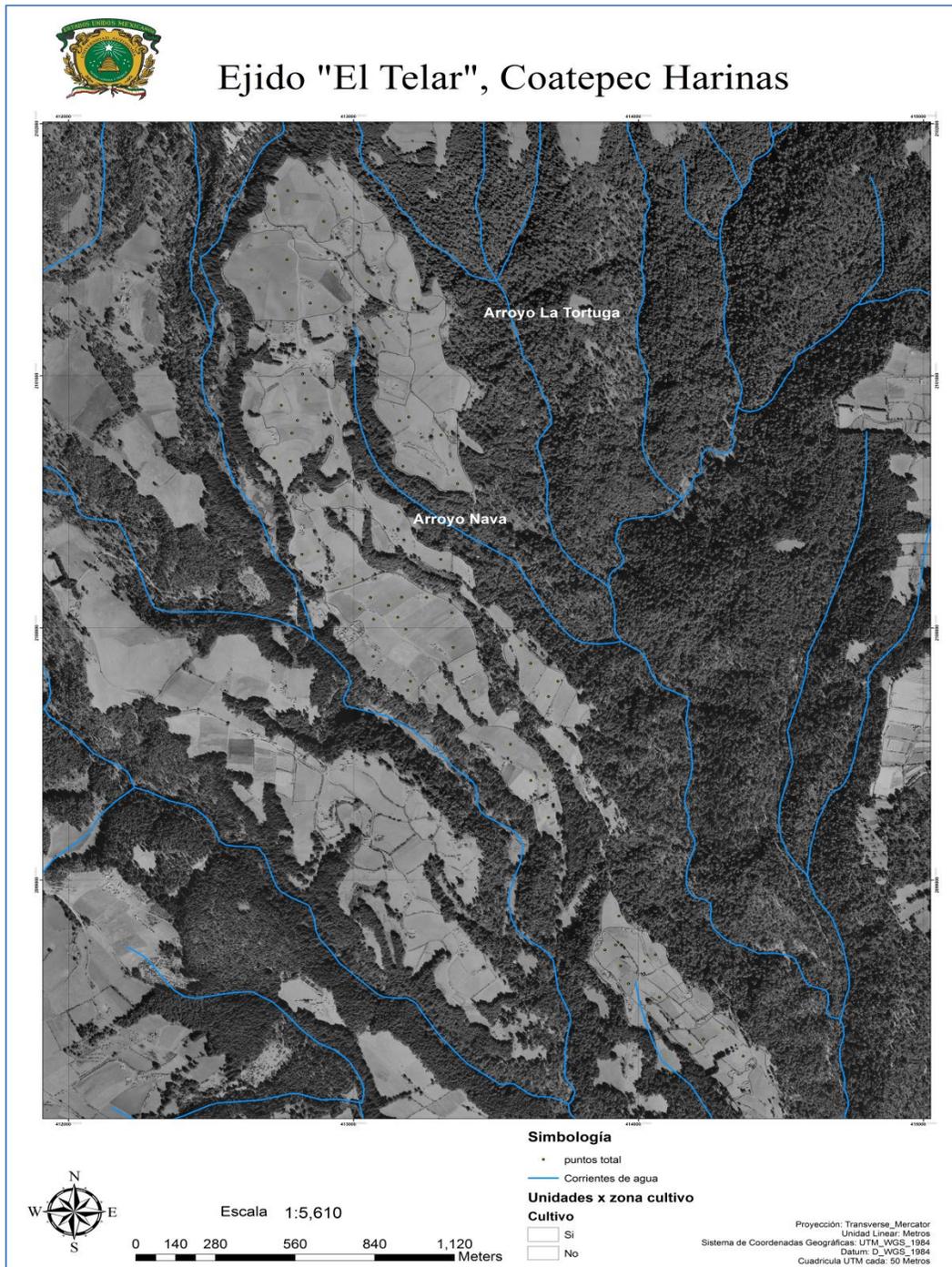
Las corrientes que pasan por el Telar, influyen en la formación del suelo, contenido de materia orgánica, y erosión. La erosión de la capa superficial es mayor en los suelos agrícolas que en los forestales, por lo que los sedimentos pueden ser arrastrados a las zonas de menor pendiente.

Para la topografía es probablemente el principal factor que controla el desarrollo del suelo, el contenido de carbono orgánico, directamente o a través de la hidrología. La posición en el paisaje, en ese sentido, influirá en las propiedades del suelo, formación y erosión, por lo que el desarrollo del suelo y el carbono orgánico aumentan hacia los pies de la ladera.

Una hipótesis para la zona de estudio es que, a mayor pendiente, menor será la cantidad de carbono orgánico del suelo, debido a la erosión y transporte de sedimentos de las partes altas hacia las partes bajas, por acción de la escorrentía.

En ese sentido, la cantidad de carbono orgánico puede ser significativa, si tomamos en cuenta que los andosoles son de los suelos con mayor contenido de carbono orgánico, además de que la zona agrícola se encuentra rodeada por zona forestal.

Ilustración 7. Principales corrientes de El Telar



2.4 Prácticas de manejo agrícola

El uso de suelo en el que se centra la presente investigación es el agrícola, El Telar cuenta con aproximadamente 155 has de parcelas agrícolas, dentro de las cuales predominan las parcelas en las que se cultiva papa, siendo éste el cultivo con mayor rendimiento que encuentran los productores de la zona. En segundo lugar están las parcelas que presentan maíz, el tipo de cultivo que lleva mayor tiempo en la zona, y con menor presencia se encuentra la avena, cultivo que se usa para alternar en las parcelas al fin del ciclo agrícola de la papa y avena.

El tipo de agricultura que se desarrolla en la zona es el de temporal, sin embargo cuentan con canales que les permiten mantener con riego exclusivamente a los cultivos de papa.

En la parte norte de la zona de estudio, de acuerdo con entrevistas realizadas a los productores, los cultivos de papa llevan aproximadamente 10 años, y anteriormente eran cultivos de maíz que ya llevaban más de 40 años sin rotar. Para los cultivos de papa aplican fertilizantes artificiales y orgánicos, dentro de los artificiales aplican aproximadamente 1800 kg/ha de una mezcla de 18-46, fertilizante de potasa, 16-16-16 y fosfonitrato, además de aprox. 1 ton/ha de una mezcla de estiércol de borrego y gallinaza principalmente, aunque también de estiércol de caballo y vacas. Las cantidades aplicadas a los cultivos y los fertilizantes utilizados son definidos gracias a la experiencia de años, pues ellos mismos aplican y modifican sus cantidades en función de la producción y su percepción económica. A los cultivos de maíz se aplica alrededor de 10 ton/ha de estiércol mezclado con 300 kg de fertilizante 18-46.

Para la zona centro del área agrícola, la aplicación de fertilizantes es similar, aunque las cantidades cambian, además de que a los cultivos de maíz les agregan un aproximado de 20 ton/ha de lama de champiñón, además de los fertilizantes: urea y 18-46. Para el caso de los cultivos de papa, la variante es que aplican 4 ton/ha de una mezcla entre gallinaza, 16-16-16, potasa, urea y 18-46. La

parte sur de la zona agrícola corresponde a parcelas donde los cultivos son de maíz y la aplicación de fertilizantes es similar a las zonas anteriores.

Como ya se mencionó, a pesar de que la aplicación de fertilizantes tanto orgánicos como artificiales es similar en toda la zona agrícola, las cantidades varían dependiendo de los recursos económicos y de la experiencia que los productores van adquiriendo en busca de mejorar sus producciones. El estiércol que aplican también está en función de los animales con los que cuentan los productores y la lama de champiñón no es producida por ellos.

Las prácticas anteriores influyen directamente en la cantidad de materia orgánica que hay en el suelo y por ende la cantidad de carbono orgánico que puede contener la capa superficial del suelo, siendo importante tomar en cuenta los datos anteriores a la hora de arrojar los resultados de los contenidos de COS en la zona y realizar un análisis.

2.5 Aspectos socioeconómicos generales

De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2010 (INEGI, 2010), El Telar cuenta con una población total de 581 habitantes, de los cuales 282 son población masculina y 299 población femenina. El Telar es un ejido con poca población pues representa el 1.6% de la población total del municipio Coatepec Harinas (36,174 habitantes).

La población económicamente activa (PEA) de El Telar es de 162 habitantes, de los cuales 153 tienen una ocupación que les permite percibir ingresos y 9 que no tienen una ocupación pero que ya cumplen con edad para aportar económicamente. Las actividades productivas principales son la agricultura, la ganadería y el manejo forestal, actividades con las que la población mantiene un sustento económico; principalmente por la producción de papa y por el manejo sustentable del bosque.

Capítulo 3. Estimación de Carbono Orgánico del Suelo



El capítulo se divide en dos etapas principales. En la primera se describen los métodos y técnicas utilizados durante el proyecto, para la estimación del carbono orgánico del suelo. Se presentan los procedimientos previos al trabajo de campo, el muestreo en campo, la preparación de muestras para realizar los análisis en laboratorio que permitieron determinar: Humedad, materia orgánica, densidad aparente, color del suelo y el contenido de carbono orgánico. Además se presentan los resultados obtenidos en dichos análisis.

En la segunda etapa se describe la elaboración de una base de datos georeferenciada, el tratamiento de la imagen SPOT para el análisis del comportamiento espectral del COS, la generación de rasters a partir de a interpolación de los datos de las variables obtenidas en la primer etapa, cómo datos de laboratorio y campo (Altura, orientación, % de COS, puntos de muestreo, pendiente) y como se relacionaron con los datos de reflectancia. Se delimitaron los factores implicados en el COS y se buscó la variable o conjunto de variables con mayor correlación con los datos de reflectancia.

3.1 Etapa 1: Desarrollo de la metodología de suelos

3.1.1 Delimitación de la zona agrícola

Antes de realizar salidas de campo para el muestreo en la zona de estudio, es necesario delimitar el área total que se contemplará para la medición del carbono, así como definir los puntos de muestreo y la cantidad de muestras a realizar. Para ello fue necesario el uso de sistemas de información geográfica, con ayuda del software ArcGis 9.3 se delimitó y digitalizó la zona agrícola de El Telar, Coatepec Harinas, utilizando ortofotos digitales escala 1:5000 del año 2008 (IGCEM) y apoyado con imágenes 2013 de Google Earth, para obtener el polígono base de la zona de estudio.. La zona agrícola delimitada coincide con el polígono asignado para esa zona por INEGI en sus archivos vectoriales, como zona de cultivos.

3.1.2 Definición del tipo de muestreo

Cuando se trabaja en suelos la definición del tipo de muestreo es importante para optimizar el muestreo de acuerdo a los objetivos planteados en el proyecto. En los muestreos de suelos se debe considerar la representatividad de la zona muestreada y la variabilidad que presenta el suelo, aún en distancias de muestreo muy cortas e incluso dentro de una misma parcela de cultivo (Bautista, 2004).

Para el desarrollo del muestreo buscó realizar lo más cercano posible a un muestreo estratificado, en el cual la población se divide en estratos (en este caso unidades), normalmente para la elección de estratos se utiliza información previa como el clima, geomorfología, tipo de suelo, entre otros (Bautista, 2004). Sin embargo, en este proyecto se utilizaron las unidades delimitadas cualitativamente de acuerdo a su homogeneidad y la variable pendiente, no se utilizó uso de suelo, tipo o geomorfología ya que la zona de estudio presenta las mismas características: andosol y uso de suelo agrícola, pero si se definió la heterogeneidad con la variable tipo de cultivo, y con la subdivisión de las unidades en tres rangos de pendiente (descritos más adelante).

Se digitalizaron 13 unidades dentro del área agrícola de acuerdo a la homogeneidad de los cultivos observada en las ortofotos digitales y en las imágenes de Google Earth (**Ilustración 8**), se discriminaron las zonas con uso de suelo distinto al agrícola. Posteriormente se subdividieron las 13 unidades acuerdo a la pendiente utilizando tres rangos, con la finalidad de lograr diferenciar algunos procesos dentro de las unidades, tomando como hipótesis de trabajo que, la pendiente es un factor determinante en el transporte de sedimentos y M.O, los cuales disminuyen a mayor pendiente (**Ilustración 9**). El primer rango de pendiente fue de 0° a 5°, el segundo fue de 5° a 10° y el tercer rango fue de 10° a 25, basado en la clasificación de (Colegio de Postgraduados, 1991).

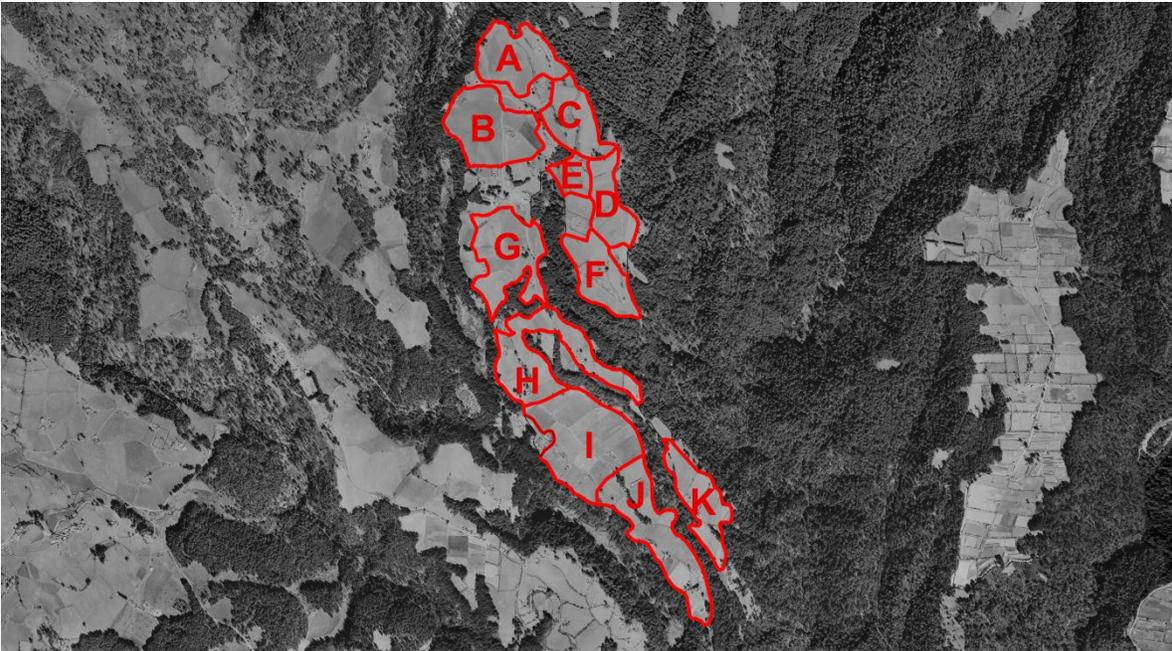


Ilustración 8. Unidades (áreas cultivadas)

Elaboración propia

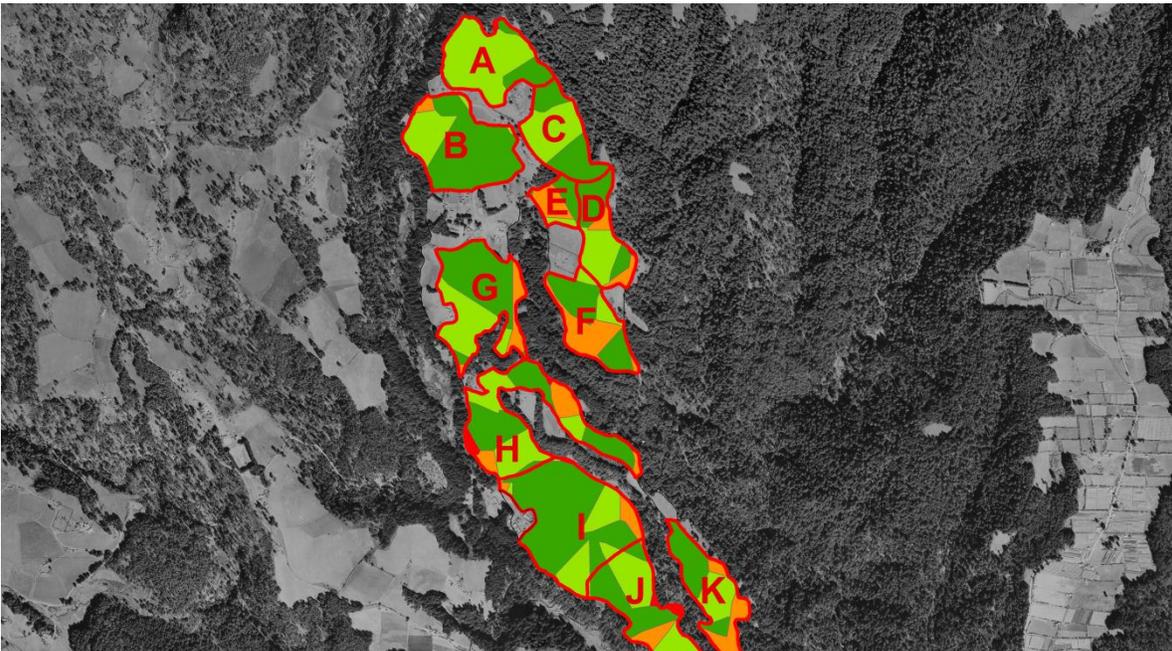


Ilustración 9. Clasificación de pendientes

Elaboración propia.

3.1.3 Número de muestras

Una vez obtenidas las 13 unidades y subunidades (rangos de pendiente), se definió el número de muestras necesarias en cada unidad en función de la cantidad de superficie total a muestrear, el cálculo de muestras se obtuvo por estimación de las proporciones directas (Tabla 4). La superficie total a muestrear tuvo que ser representativa, por lo que para un análisis geoespacial basta con el 3% de la superficie total de estudio. La superficie total de la zona de estudio es de 1,147,987 m², el 3% de esta superficie corresponde a 34,440 m², cifra que se dividió por 400m² (resultado de 20 x 20 m; medida de los cuadrantes de muestreo) para obtener el número total de muestras necesarias: 87, sin embargo se estipuló que se aumentara el número de muestras para tener holgura, dependiendo de las condiciones de las parcelas que se observaran en campo y su accesibilidad. El número de muestras totales fue de 93.

Tabla 4. Número de muestras por unidad y pendiente

				Pendiente 1	Pendiente2	Pendiente3	Total
No.	Unidad	Area	No. De Muestras	No.M	No. M	No.M	
1	A	84083	6	1	6	0	7
2	B	109267	8	6	2	0	8
3	C	66300	5	2	3	0	5
4	D	56783	4	2	2	1	4
5	E	24948	2	1	0	1	2
6	F	69510	5	3	1	2	5
7	G	104360	8	4	3	1	8
8	H	120350	9	4	3	1	9
9	I	154708	12	8	3	1	12
10	J	124717	9	3	5	1	9
11	K	68774	5	2	1	2	5
12	L	84561	6	4	0	2	6
13	M	79626	6	3	1	2	6
Total		1147987	87				87.033

Elaboración propia

3.1.4 Esquema de muestreo y profundidad de muestreo

El esquema de muestreo para realizar en campo se basa en un cuadrante de 20 x 20 m. El cuadrante se divide en cuatro partes iguales en donde se ubican 5 puntos potenciales para muestreo (Ilustración 10). Con las 5 muestras se obtiene una sola muestra compuesta por cuadrante. Para estudios de suelos la profundidad a ser muestreada depende del tipo de proyecto, condiciones de la zona de estudio, objeto de estudio, entre otros, sin embargo, generalmente las concentraciones de carbono orgánico del suelo son más altas en la capa superior y disminuyen conforme aumenta la profundidad (Rugnitz, 2009), por lo que se determinó que la profundidad a muestrear en cada sitio sería de 30 cm.

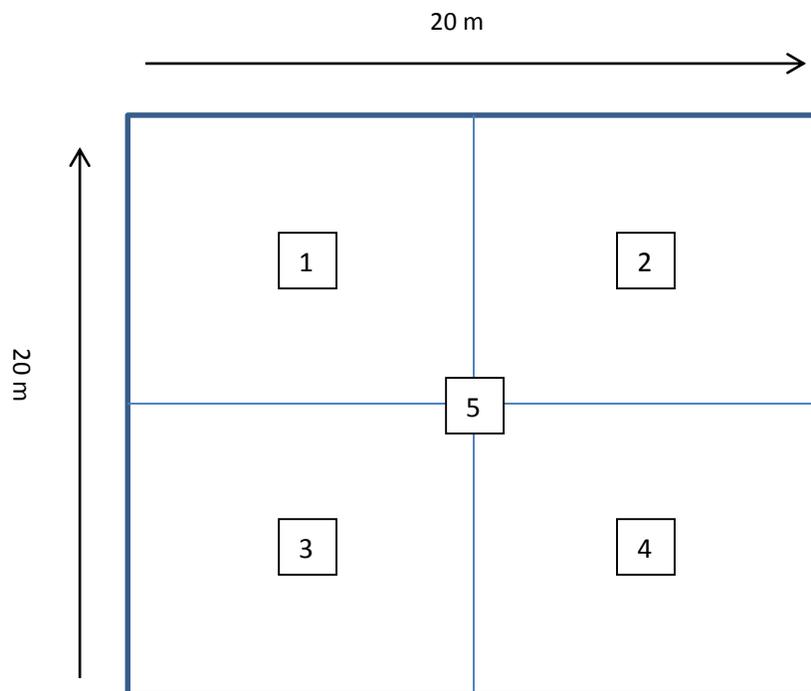


Ilustración 10. Esquema de muestreo en campo

3.1.5 Procedimiento de muestreo

Para la realización del muestreo se elaboraron mapas de trabajo que se utilizaron en campo con la intención de identificar las unidades delimitadas previamente y poder verificar que los puntos elegidos en campo para muestrear estuvieran dentro de las unidades delimitadas, dentro del rango de pendiente obtenido, además de rotular las muestras de acuerdo a su unidad y rango de pendiente correspondiente. La base de los mapas fueron las ortofotos digitales. Se utilizaron GPS Garmin con precisión de 12 m. aproximadamente para geoposicionar los puntos muestreados. El muestreo se realizó en la zona agrícola delimitada de El Telar, Coatepec Harinas, el 14, 15 y 16 de Marzo de 2014, cuando las parcelas no se encontraban cultivadas.

En cada punto de muestreo se trazó un cuadrante de 20 x 20 con rafia, se dividió en 4 partes iguales, en el centro de cada una de las partes y el centro del cuadrante se extrajo la muestra de 30 cm de profundidad (Ilustración 11). Para obtener las muestras se empleó una barrena, las 5 muestras de cada cuadrante se mezclaron en una cubeta desmenuzando los terrones con la mano y quitando varas y hierbas para posteriormente aplicar el cuarteo (Ilustración 13), técnica que consiste en colocar el suelo sobre un plástico, extenderlo y dividirlo en cuatro partes, se eliminan dos extremos y se repite el procedimiento hasta obtener una muestra compuesta de aproximadamente un kilogramo (Bautista, 2004).



Ilustración 11. Trazo de cuadrante para muestreo



Ilustración 12. Barrenacion

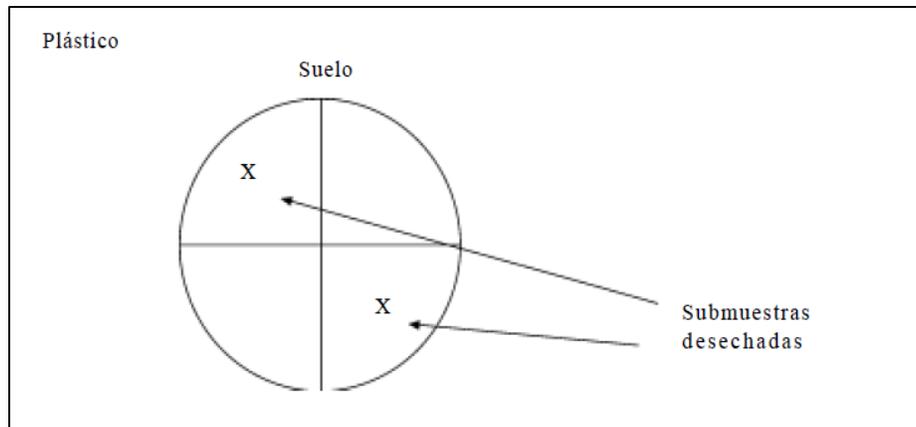


Ilustración 13. Disminución del tamaño de la muestra compuesta por cuarteo

Fuente: (Bautista, 2004).

El procedimiento se repitió en cada punto de muestreo hasta obtener las 93 muestras. Cada muestra compuesta se colocó en bolsas de plástico transparente de 2 kilogramos y se rotularon con marcador indeleble de acuerdo a su unidad y rango de pendiente, por ejemplo: si la muestra compuesta se obtuvo de un cuadrante ubicado en la unidad A y en el rango de pendiente 1, siendo ésta la primer muestra de dicha unidad, entonces el rótulo debió ser A1-M1 además de agregar la fecha y lugar:

Dónde:

A1= unidad A + rango de pendiente 1 (0°- 5°).

M1= muestra 1.

El muestreo se realizó sólo en las zonas de cultivo activas y en las que no se presentara sistema de riego. Las zonas que en campo presentaran uso de suelo distinto al agrícola y que en los mapas de trabajo fueron incluidos como agrícolas, se discriminaron dentro de las zonas posibles de muestreo y se corrigieron en los mismos mapas de trabajo. Por consecuencia, en algunas unidades se redujo el número de muestras en algunos rangos de pendiente y se compensaron en otros rangos de la misma unidad o de otras unidades.

3.1.6 Métodos de análisis fisicoquímicos

En este apartado se explica la metodología, complementaria a la de campo, utilizada para obtener los datos de cada uno de los análisis realizados a cada muestra obtenida en campo, los análisis que se realizaron en el laboratorio fueron Densidad Aparente (D.A), color del suelo, contenido de humedad, Materia Orgánica (M.O) y porcentaje de Carbono Orgánico. En la tabla siguiente se presentan los parámetros calculados, y los métodos y procedimientos en los que se basó el análisis.

Tabla 5. Métodos para el cálculo de parámetros de suelo

Parámetro	Método/Referencia
Densidad Aparente	AS-03, NOM-021-RECNAT-2000
Color	Munsell
Humedad	“oven-dry”. (van Reeuwijk, 2002) ISRIC
Materia orgánica	Walkley-Black, (van Reeuwijk, 2002) ISRIC
Carbono orgánico	Walkley-Black, (van Reeuwijk, 2002) ISRIC

Elaboración propia.

3.1.6.1 Preparación de las muestras

1. Las muestras obtenidas en campo se colocaron en periódico para que se secaran a temperatura ambiente durante 15 días.
2. El siguiente paso fue el tamizado; cada muestra de suelo se pasó por un tamiz con orificios de 2 mm, el suelo tamizado se colocó en frascos previamente rotulados con los mismos datos que las bolsas que contenían el suelo (**Ilustración 14**), el suelo restante se regresó a las bolsas correspondientes para guardarlas por si se necesitaba posteriormente. El suelo contenido en los frascos fue utilizado para analizarse posteriormente en el laboratorio.



Ilustración 14. Muestras preparadas para análisis

3.1.6.2 Densidad Aparente

1. Se pesó una probeta vacía y seca graduada de 10 ml en la báscula y se anotó.
2. Una vez pesada la probeta vacía, se le agregó suelo hasta los 10 ml, se golpeó ligeramente 10 veces y se volvió agregar suelo hasta llenar los 10 ml.
3. Se pesó la probeta con suelo hasta los 10 ml en la balanza y se anotó el dato.
4. Ya obtenidos los valores, se resta el peso de la probeta con suelo con el peso de la probeta vacía para obtener el peso del suelo y se aplica la siguiente fórmula: $D.A. = P/V$ (g/cm^3)
Dónde: D.A es densidad aparente
P es el peso del suelo y V el volumen.
En este caso el peso del suelo se divide en 10 que es el volumen.

5. Estos cuatro pasos se repitieron tres veces y se sacó el promedio de la densidad aparente para tener un valor más confiable.



Ilustración 15. Pesaje de muestras



Ilustración 16. Cálculo de densidad aparente

3.1.6.3 Color

Para la determinación del color se tomó como base el sistema de clasificación de suelos desarrollado en torno al *Munsell color system*, para ello se utilizaron las tablas Munsell (Munsell, 1975) que permite a través de sus propios códigos clasificar el color y utiliza tres variables: *hue*, *value* y *chroma*.

1. Se coloca en un godete de porcelana una pequeña muestra de suelo con la espátula, y en seguida otra muestra del mismo suelo.
2. A la segunda muestra se le agrega unas gotas de agua ya que se obtendrá el color del suelo en seco y el color del suelo en húmedo.
3. Con las tablas Munsell se identifica el color que se asemeje más al del suelo, una vez identificado se anota en la bitácora. Las tablas se leen de la siguiente manera:

Primero se anota el *hue*, que representa el color espectral dominante. La letra R representa el rojo (red), la letra Y representa el amarillo (yellow), y el *hue* YR es el naranja. La variación en tonalidad se representa a través de números preestablecidos que se encuentran en la tabla y forman el número de la página. Después se anota el *value* que representa la variación de tintes, pasando desde el oscuro que son los *value* más bajos al claro. Se representa como un número en el nominador de una fracción. Y por último se anota el *chroma*, el cual determina la mayor o menor fuerza del color espectral.

4. Se identifican los colores de ambas muestras, la de la muestra de suelo seca y la húmeda.

3.1.6.4 Humedad

1. Se colocaron 5 g. de suelo en un frasco para humedad y se pesó con 0.001 g. de precisión (peso A).

2. Se dejó secar durante una noche en el horno de secado a 105° C con la tapa del frasco retirada.
3. Posteriormente se retiró del horno, se colocó la tapa se dejó enfriar en el desecador y se pesó de nuevo (peso B).
4. Una vez obtenidos los pesos, el contenido de humedad en se calculó con la fórmula:

$$H (\% \text{ peso}) = \left(\frac{A-B}{B-\text{Peso del frasco}} \right) * 100$$

Después se aplicó el factor de corrección de humedad correspondiente a los resultados de los análisis de las muestras. El factor es el siguiente:

$$\text{Factor de corrección de humedad} = \frac{100+H}{100}$$

3.1.6.5 Materia orgánica y Carbono Orgánico del suelo

Se realizó utilizando el procedimiento Walkley Black, que implica una combustión húmeda de la M.O, con una mezcla de dicromato de potasio y ácido sulfúrico, a una temperatura aproximada de 125° C. Se titula con sulfuro ferroso. Se aplica un factor de corrección empírica de 1.3 en los resultados calculados.

1. Se pesó 1g. de suelo (0.01 precisión) tamizado previamente, dentro de un matraz Erlenmeyer de boca ancha. Se incluyó una muestra control.
2. Se agregaron 100 ml. de la solución de dicromato. Se incluyeron dos blancos, para determinar la molaridad de la solución de sulfato ferroso.
3. Se agregaron 20 ml. de ácido sulfúrico, se agitó el matraz y se dejó reposar por 30 minutos en la cámara de humos.
4. Posteriormente se agregaron 250 ml. de agua y 10 ml. de ácido fosfórico, y se dejaron enfriar.
5. Se agregó 1 ml. de la solución y se tituló con la solución de sulfato ferroso, al tiempo que la mezcla se agitaba. Cuando el color marrón de la solución se convierte en morado o azul-violeta, se debe detener la titulación.

6. Una vez terminada la titulación, el contenido de COS se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$\%C = (M) * \left(\frac{(V1-V2)}{s} * 0.39 * fch \right)$$

Dónde:

M = molaridad de la solución de sulfuro ferroso (solución titulada)

V1 = ml de la solución de sulfato ferroso requerida para el blanco

V2 = ml de la solución de sulfato ferroso requerida para la muestra de suelo

s = peso en gramos de la muestra secada

0.39 = $3 \times 10^{-3} \times 100\% \times 1.3$ (3 = peso equivalente de C)

fch = factor de corrección de humedad

El factor 1.3 es en compensación por la combustión incompleta de la materia orgánica en este procedimiento.

Para convertir el % de C a % de M.O se hace con una multiplicación con el factor 2:

$$\% \text{ de M.O} = 2 \times \% C$$

Una vez obtenida la concentración de COS en %, se estimó el almacén de COS de cada muestra, para ello se aplicó la siguiente fórmula:

$$CA: CS \times DA \times P \times 100$$

Donde:

CA: carbono almacenado, t/ha^{-1}

CS: contenido de materia orgánica en el suelo (%)

DA: densidad aparente

P: profundidad del suelo

Se multiplicó por 100 para convertir a t/ha^{-1}

3.1.7 Identificación de prácticas agrícolas

Con la finalidad de obtener datos específicos sobre las prácticas de manejo a las parcelas agrícolas que realizan los productores en la zona de estudio, se diseñó un cuestionario a través del cual se identificaron los tipos de fertilizantes que utilizan, las cantidades por hectárea aproximadas, el tipo de cultivo y los años que llevan cultivados.

La aplicación del cuestionario se realizó posterior al muestreo y se aplicaron directamente con los dueños de las parcelas. Con esta información se completó el trabajo de campo que inició con el muestreo, los datos arrojados permiten la asociación de los contenidos de COS con las prácticas agrícolas específicas de la zona.

3.1.8 Integración de base de datos referenciada

A partir de los datos obtenidos en campo, los análisis fisicoquímicos de las muestras de suelo tratadas en laboratorio y de los datos obtenidos en los cuestionarios de campo sobre las prácticas agrícolas, se diseñó una base de datos que contiene datos de las 92 muestras de suelo, correspondientes a las variables: Coordenadas, Unidad, Pendiente, Color del suelo, Densidad aparente, M.O, porcentaje de carbono, almacén de carbono, Cultivo actual, cultivo anterior, tipo de fertilizante, años cultivado, porcentaje de humedad, entre otras.

La base de datos fue diseñada en el programa Excel y exportada en el software ArcGis 9.3 en un archivo shape, teniendo así la base de datos debidamente georeferenciada y disponible para utilizarse tanto en ArcGis como en el software IDRISI, para su posterior análisis.

3.2 Identificación de valores digitales asociados a los contenidos de carbono en el estrato superficial de suelo agrícola, mediante el uso de imagen de satélite

Retomando parte de la información presentada en el marco de referencia, los métodos indirectos como la percepción remota y el uso de SIG son los complementos ideales para enriquecer la estimación de COS realizada previamente por un método directo, tal es el caso para esta tesis el uso del método directo Walkley-Black. El potencial que tienen las imágenes satelitales y sensores remotos para ser aplicados en investigaciones de carácter ambiental, permite el uso de dichos insumos en el estudio del COS con el objetivo de reducir los tiempos en investigación y mejorar el manejo de la información obtenida en campo en busca de un modelo predictivo de COS que pueda ser utilizado en investigaciones posteriores.

3.2.1 Reseña metodológica

Uno de los objetivos señalados en este proyecto de investigación fue el de Identificar el grado de relación entre los valores digitales de la imagen satelital y los porcentajes carbono almacenado en el suelo -determinados por análisis en laboratorio- correspondientes a predios agrícolas en el ejido El telar, Coatepec Harinas, Estado de México. Para efectuar dicho objetivo, se empleó una práctica para visualizar información satelital, con la intención de identificar los posibles grados de correlación entre los valores numéricos digitales, correspondientes a los puntos específicos de muestreo en campo y, los porcentajes determinados en laboratorio, del contenido de carbono almacenado en el estrato superficial del suelo.

Como insumo para esta tarea, se tiene una escena del sensor SPOT 5 (Systeme Probatoire de la Observation de la Terre), correspondiendo a la tercera generación de estos sensores. El cual, gracias a la resolución espacial y el ancho fragmento

del espectro electromagnético que emplea, es un sistema apto para la valoración de coberturas de suelo y aplicaciones para la agricultura.

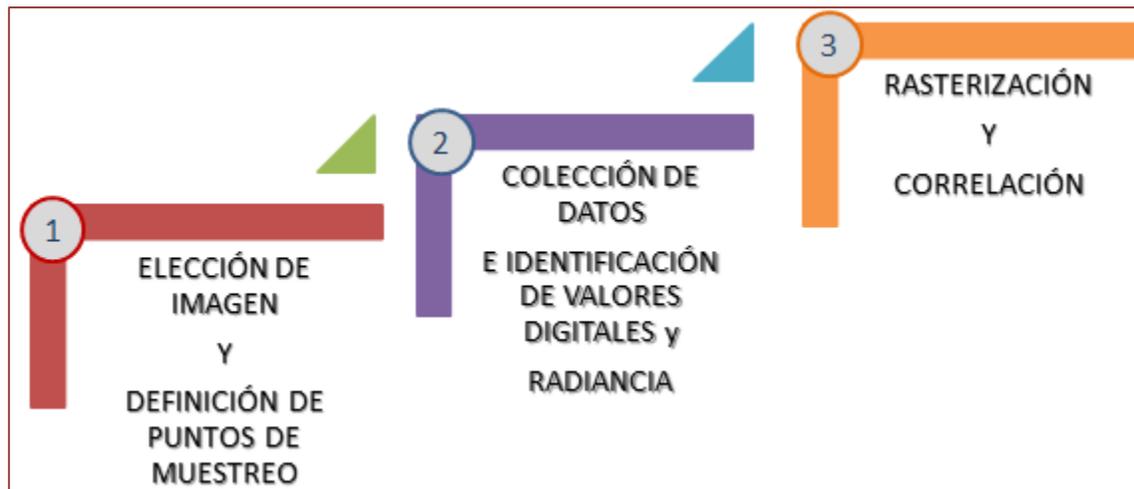
Este sensor se sitúa entre los de mayor nivel de fiabilidad en el mundo (77%), para la observación de las distintas coberturas de la superficie terrestre, entre ellas suelos agrícolas, urbanos, desprovistos, con vegetación, manglares, entre otras, de acuerdo al muestreo aleatorio estratificado contra clasificación SPOT, según Miettinen 2008 (Mas, 2011).

Para cumplir el objetivo, se toma la combinación de bandas espectrales más adecuada para el análisis visual de las coberturas, discriminando entre las distintas composiciones que ofrece el sensor. Posteriormente, para imprimir mayor confiabilidad a los datos provenientes de la imagen misma, es pertinente obtener los valores de radiancia, con los cuales se disminuye algunas de las distorsiones que sufre la energía electromagnética a través de la atmosfera, en sus trayectorias entre el sol, la superficie y el sensor.

Luego entonces, con las variables antes citadas, se estiman los índices de correlación y las pruebas de significancia mediante análisis bivariados –tanto con el método Spearman, como el de Pearson, empleando software tipo estadístico.

Contando con los recursos anteriores, se da pie a la segunda fase de esta metodología, con la cual se plantea mediante el uso de software SIG tipo Raster, la generación de las imágenes o retículas correspondientes a los factores del terreno como: altitud, pendiente y orientación, así como para los porcentajes de humedad, para realizar también, pruebas de correlación con los datos de carbono.

Ilustración 17. Esquema del proceso metodológico para identificación correlación entre datos satelitales y contenido de carbono en suelo



Fuente: Elaboración Propia.

Por último, con los resultados obtenidos, se propondrá la utilización de ciertos procedimientos que a partir, de la información de radiancia, auxilie en futuras aproximaciones para estimar la distribución espacial de los porcentajes de carbono contenidos en suelo, como aplicación en los estudios ambientales de un método predictivo, con mayor información y nuevos registros.

Para la realización de la metodología descrita, los materiales utilizados fueron: Equipo de cómputo, Imagen de satélite SPOT 5, Software IDRISI™ versión Selva, Software IBM™ SPSS Statistics 22, Software Excel™ 2010, GPS Trimble™ Modelo Juno SB, GPS Garmin™ Modelo Etrex.

3.2.2 Fase previa

Determinación de la zona de estudio

Con fechas previas a la realización de muestreo de suelo y su posterior análisis de laboratorio, se realizó una visita a la zona de estudio, para identificar a los

propietarios de las parcelas agrícolas y verificar si existía la viabilidad de muestrear en dichas parcelas, posteriormente se digitalizaron las parcelas y se definió el muestreo, tal como se describe en el capítulo 3.1.

Con buena parte del tiempo dedicado a la planeación del trabajo, se dividieron las actividades de gabinete en dos rubros, la primera en la selección de la imagen a utilizar, la segunda la distribución de los puntos de muestro (PDM).

Selección de la imagen

Con el conocimiento previo de la zona de estudio, de los productores y de la información cualitativa de los predios a analizar, se planteó la posibilidad de adquirir una imagen de alta resolución QuickBird 2014 con resolución de 1 metro x pixel, lo anterior debido a que la mayoría de los estudios de caso a nivel local consultados en la etapa de gabinete utilizaron imágenes de alta resolución. Sin embargo, el alto costo de la imagen y los tiempos determinados para la realización del proyecto, limitaron la opción de una imagen de dichas características, por lo que se buscó la utilización de otro tipo de imagen que al final fue una imagen tipo SPOT 5.

Se optó por esta plataforma satelital, debido a la facilidad de adquisición de la imagen (proporcionada por el Laboratorio de Geomática de la Facultad de Planeación Urbana y Regional), aunado a la actualidad de la información disponible, -acorde a la más reciente temporada agrícola-; siendo pertinente la resolución espacial de las bandas de la imagen –de 10 metros por pixel- y por su contenido multibanda, que proporciona información en los espectros del verde, rojo e infrarrojos cercano y medio, útiles para efectos del análisis y comparación visuales.

Es conocido que el sensor SPOT 5 ofrece entre sus bandas espectrales los siguientes rangos de la energía electromagnética:

Tabla 6. Bandas espectrales SPOT 5

MODO	BANDA	ESPECTRO	DENOMINACIÓN	RESOLUCIÓN ESPACIAL
Pancromático	Pancromático	(0,48 - 0,71 μm)	Pancromático	5 m.
Visible	Banda 1	(0,50 - 0,59 μm)	Verde	10 m.
	Banda 2	(0,61 - 0,68 μm)	Rojo	10 m.
Infrarrojo	Banda 3	(0,78 - 0,89 μm)	Infrarrojo cercano	10 m.
	Banda 4	(1,58 - 1,75 μm)	Infrarrojo medio (IRM/MIR)	20 m.

Fuente: Elaboración propia con base en: <http://www.astrium-geo.com/en/143-spot-satellite-imagery>

Por consiguiente, las bandas que permiten el mejor contraste visual para identificar tanto los predios donde fueron definidos los puntos de muestreo, como sus valores numéricos digitales, son las correspondientes al espectro visual del verde y del rojo, en presencia del infrarrojo cercano.

Distribución de los puntos de muestreo

Con el reconocimiento de la zona de estudio, se planteó la necesidad de recabar el mayor número de muestras de suelo posible para ser analizadas, teniendo en cuenta que la imagen SPOT tiene una resolución espacial de 10 metros por pixel.

El número de muestras realizadas fue de 93 correspondientes al 3% de la superficie total de la zona de estudio, como se describe en capítulo 3.1.3.

El uso del sistema GPS resulta de gran importancia para conocer la ubicación de los puntos muestreados. Sin embargo, se debe tener en consideración que las posiciones colectadas podrían variar en precisión, por las características de la zona y las condiciones inherentes al sistema, como la distribución de la constelación GPS, los errores atmosféricos y el manejo por parte del usuario, al momento de capturar las posiciones.

Por esta razón, se tomaron 10 lecturas para cada punto de muestreo, con la intención de minimizar el error en las posiciones, logrando un promedio de precisión entre 4 y 6 metros, lo cual es bueno para validar las coordenadas resultantes, puesto que la resolución de la imagen es de 10 metros por pixel.

Con los listados de coordenadas, se crearon archivos vectoriales de puntos para visualizarse en conjunto con la imagen de satélite.

Tabla 7. Coordenadas de los puntos de muestreo

P dm	Latitud	Longitud	P dm	Latitud	Longitud	P dm	Latitud	Longitud
1	2101664.862	412975.2307	32	2100641.440	413173.2638	63	2100060.671	413344.9685
2	2101657.762	412720.3692	33	2100612.802	413262.9191	64	2099661.690	413451.4243
3	2101714.403	412723.8992	34	2101007.938	412821.0940	65	2099777.360	413326.3798
4	2101735.102	412769.6783	35	2100972.500	412826.8219	66	2099248.289	413684.1429
5	2101692.015	412801.7893	36	2100907.400	412833.5680	67	2099376.507	413668.0019
6	2101612.674	412895.3054	37	2100883.463	412746.9302	68	2099395.202	413621.9807
7	2101767.443	412904.5593	38	2100823.110	412803.2769	69	2099434.367	413671.2189
8	2101712.585	413039.6618	39	2100773.183	412783.7789	70	2099538.838	413550.6459
9	2101274.251	412900.8712	40	2100673.882	412721.7325	71	2099748.139	413422.5634
10	2101413.405	412936.2611	41	2100661.885	412778.5180	72	2099847.479	413381.8679
11	2101288.553	412848.2035	42	2100883.489	412976.7168	73	2099859.086	413621.6161
12	2101262.740	412783.8736	43	2100292.202	412819.1995	74	2099930.287	413587.7362
13	2101329.588	412758.2946	44	2100304.549	412876.1007	75	2099727.775	413684.1650
14	2101460.903	412766.4919	45	2100522.962	412976.3915	76	2099788.705	413717.1870
15	2101548.555	412693.9610	46	2100272.322	413306.1680	77	2099456.569	413798.8039
16	2101348.047	412669.0166	47	2100176.163	412951.2884	78	2099529.185	413722.2950
17	2101420.988	412642.0985	48	2100205.018	413004.1620	79	2098657.745	413936.8941
18	2101378.081	413200.7159	49	2100526.931	412885.3570	80	2098676.940	414021.2024
19	2101306.332	413209.5372	50	2100459.364	413158.5156	81	2098704.316	414059.6490
20	2101373.905	413053.0181	51	2099922.546	413349.7965	82	2098742.256	413919.9161
21	2101416.914	413131.7430	52	2100121.285	413256.1969	83	2098722.735	413881.9270
22	2101505.041	413099.1053	53	2099887.010	413069.1981	84	2098857.289	413931.1880
23	2101158.384	413279.6839	54	2099994.479	413183.2851	85	2098538.360	414076.5660
24	2100996.629	413273.5582	55	2100042.526	413155.1935	86	2098587.562	413966.1505
25	2101235.659	413130.5770	56	2100089.375	413122.8858	87	2098302.633	414368.8783
26	2101148.733	413072.3814	57	2100122.136	413168.9354	88	2098394.487	414367.3022
27	2101170.116	413113.9542	58	2100034.512	413070.6269	89	2098368.900	414229.0624
28	2100821.761	413160.9512	59	2100075.904	413022.2933	90	2098348.772	414178.5422
29	2100836.435	413193.8617	60	2100121.212	413059.1385	91	2098416.155	414299.9207
30	2100572.376	413364.9406	61	2099752.769	413189.7321	92	2098137.172	414470.5490
31	2100765.303	413307.4222	62	2099788.685	413200.0060			

Fuente: Elaboración propia

3.2.3 Variables elegidas y generación de raster

De acuerdo con (Achkar, 2005) en sus tesis doctoral, las variables que tienen mayor incidencia en los valores espectrales de la imagen son la M.O y la posición en el paisaje (pendiente, orientación del terreno, altura), variables que explican

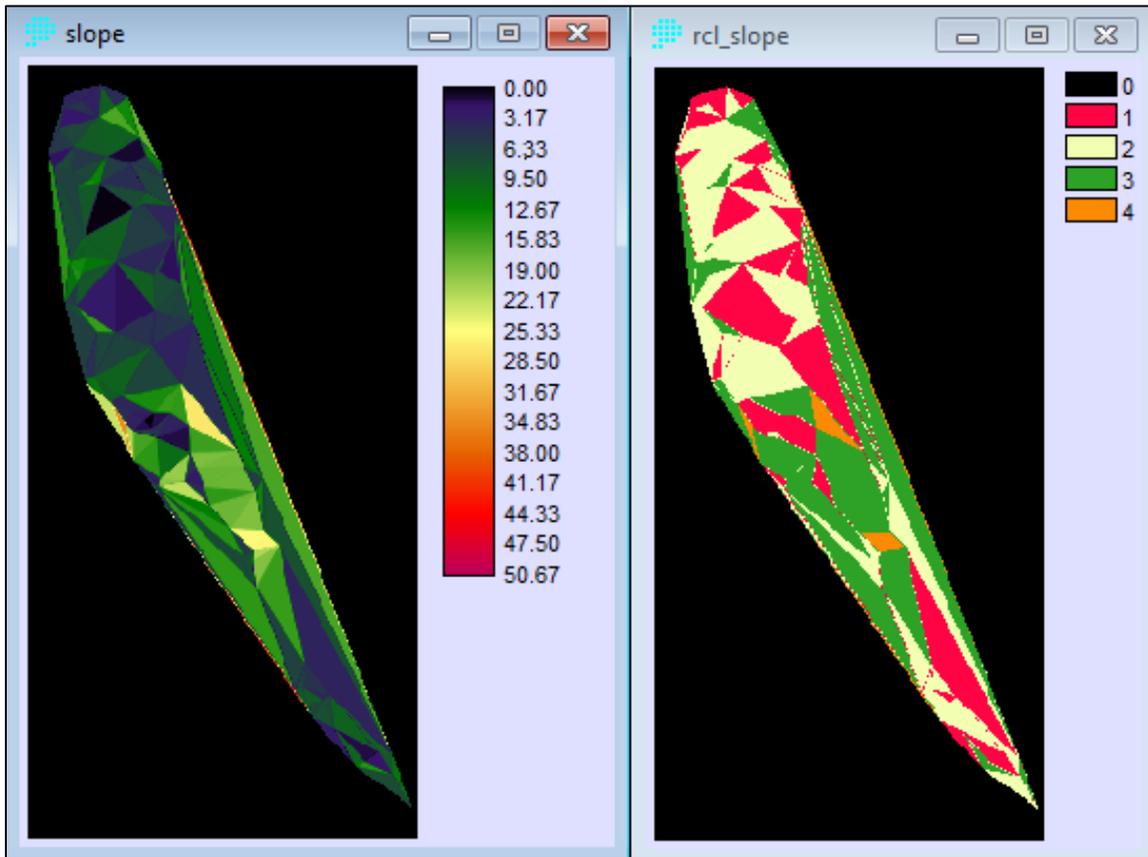
aproximadamente el 65% de los valores de reflectancia. Ante ello, se decidió obtener dichas variables además de otras como la humedad y el tipo de cultivo, para posteriormente y una vez obtenidos los DN de la imagen se pudieran correlacionar dichas variables con la finalidad de obtener las variables que expliquen los valores obtenidos en la imagen.

Para las variables de M.O, altura y humedad, se utilizaron los valores obtenidos en los análisis de laboratorio y levantamiento en campo (altura), pero para las variables pendiente y orientación del terreno se obtuvieron a partir del modelo de elevación (MDE) elaborado con los datos de altura de los PDM, usando el software IDRISI™.

En la etapa previa a campo se realizó una clasificación de pendientes preliminar, con apoyo del software ArcGis™ 9.3, en donde se utilizaron los siguientes rangos: 1=0-5°, 2=5-10°, 3=10-25° y 4= + 25°. Sin embargo, los polígonos obtenidos de acuerdo a la clasificación en un archivo vectorial se generalizaron, además de eliminar el rango de pendiente 4, por el ser el de menor significancia. Lo anterior para tener una aproximación de las pendientes en campo, a la hora de seleccionar las parcelas de muestreo.

A pesar de la clasificación preliminar, se obtuvieron los valores netos de pendiente, a partir de una clasificación de pendientes con base en los criterios de clasificación que en la primer etapa y utilizando el MDE con los valores de altura de cada una de los puntos de muestreo. Una vez obtenido el raster de pendientes, se extrajeron los valores de los puntos de muestreo para agregarlos a la base de datos general.

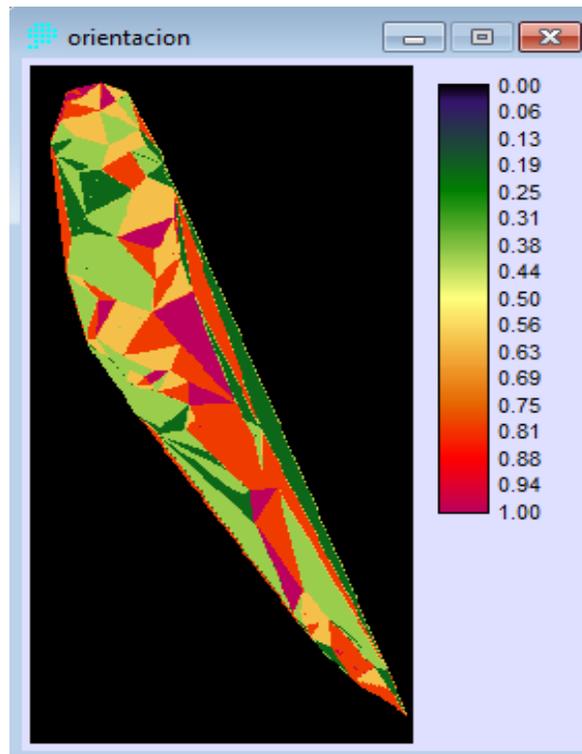
Ilustración 18. Raster de pendientes y rangos



Elaboración propia.

Para obtener los valores de orientación del terreno se utilizó el módulo "Aspect" de IDRISI, que nos generó el raster con los valores de orientación del terreno con base en el MDE realizado previamente. Una vez obtenido el raster se extrajeron los valores de orientación por PDM y se exportaron al igual que los valores de pendiente a la base de datos general.

Ilustración 19. Raster de orientación del terreno



Elaboración propia.

Una vez obtenidos los valores de pendiente y orientación del terreno, se extrajeron los valores de DN de cada una de las bandas de la imagen SPOT para agregarlas en la base de datos. De esta manera, los valores de las variables seleccionadas para analizar con los valores de DN quedaron listos en la base de datos para realizar las correlaciones correspondientes. Sin embargo, los valores digitales numéricos de la imagen, se consideran como datos crudos (simples valores de energía electromagnética en escala de 0 a 255 para los rangos del espectro visible e infrarrojo cercano; muy útil para el análisis visual de las imágenes, pero no lo suficiente para realizar análisis espectrales de mayor calidad.

Por ello, se convirtieron a valores de radiancia, que no es otra cosa más que la corrección de los valores numéricos de la imagen, mediante módulos y parámetros del sensor perfectamente calibrados, a una nueva escala, con la cual se limpian las pérdidas de información en los píxeles.

A ello se le denomina sensor's gains and bias, es decir, ganancias y sesgos del sensor en el momento en que la escena fue capturada, teniendo claro que al procesar la energía capturada en cada banda, podrán incrementarse la exhaustividad y la pertinencia para cuando se desee la comparación de las mismas coberturas y sus elementos, pero con diferencias de fechas.

3.2.4 Conversión de valores digitales (DN) a valores de radiancia

Las imágenes de satélite representan información sobre la cantidad de energía electromagnética que es captada por el sensor sobre el área que está cubriendo cada pixel, permitiendo con las distintas bandas de la imagen, conocer la intensidad de la energía de acuerdo a cada rango del espectro electromagnético utilizado.

Esta información se almacena en la imagen con valores numéricos en cada celda. Se conocen como (DN) o bien "Digital Numbers" y, la escala en que se miden estos valores comprende desde el valor 0 hasta el 255, que son las posibles intensidades en tonos de grises que podrían almacenarse en una imagen.

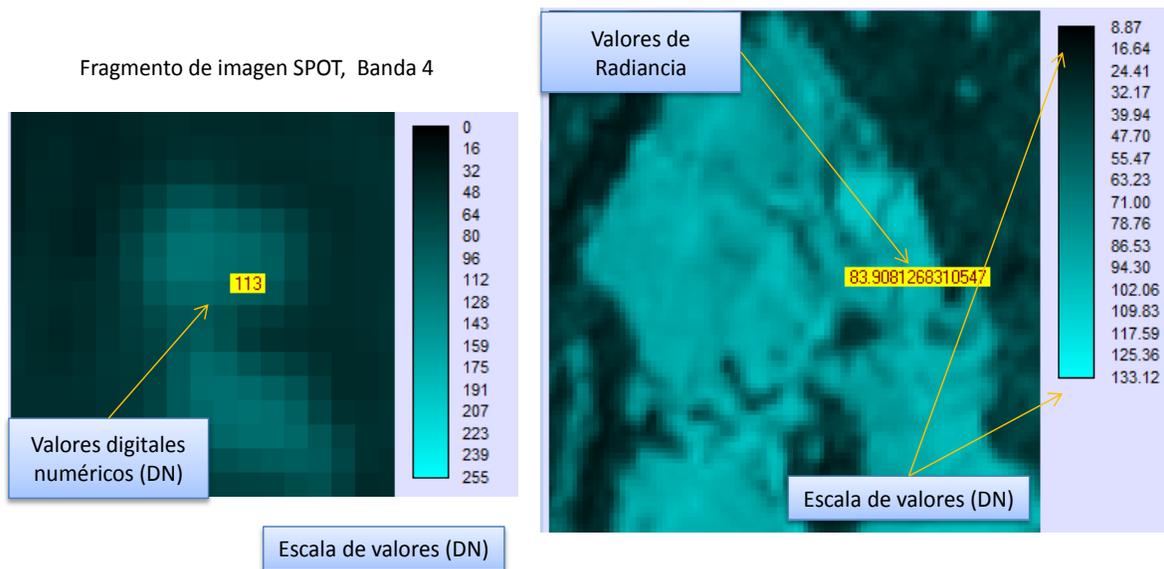
Los valores digitales o DN, son útiles para fines de apreciación visual sobre la imagen, para la creación de firmas espectrales con las distintas coberturas de la superficie y para las clasificaciones de las imágenes.

Sin embargo, los DN pueden ser convertidos a valores de radiancia con la intención de que los datos que contenga el pixel o celda, correspondan a valores de mayor precisión, corregidos y calculados mediante algunas operaciones, con fundamento en la Física óptica y, tomando en consideración los parámetros del sensor para cada una de las bandas, en el momento en que la imagen fue capturada.

La radiancia es la pérdida de la energía por dispersión en la atmosfera; sucede mientras la energía viaja desde el emisor (sol o sensor) hasta el objetivo o superficie y desde ésta hasta el sensor que captura la escena. Explicada en palabras de Chuvieco (2006), la radiancia es "el total de energía radiada en una

determinada dirección por unidad de área y ángulo sólido de medida. Es un término fundamental en Teledetección ya que describe precisamente lo que en realidad mide el sensor”. Estas dispersiones son diferentes en cada una de las bandas de la imagen y varían dependiendo de la posición del sensor, la inclinación de la superficie, la turbulencia en la atmosfera, el contenido de gases, la hora de toma, entre otras.

Ilustración 20. Fragmento de imagen SPOT, Banda 4



Fuente: Elaboración propia

Por esta razón, cuando se pretenden hacer estudios de mayor confiabilidad, los valores digitales DN deben someterse a ciertas correcciones. Al respecto, existen dos métodos para la conversión de los valores digitales a valores de radiancia.

El primero de ellos, basa su operación con los parámetros de ganancias y sesgos del sensor durante la colección de la escena y los datos de calibración disponibles en los archivos de encabezado. Este método podría definirse como el más simple, ya que solo es necesario conocer los datos proporcionados por el fabricante del sensor, los cuales para este caso son los siguientes:

Spectral band indicator	HI1	HI2	HI3	HI4
Gain number	8	7	6	4
Absolute calibration gains (1/W*m2*sr*µm)	2.633060	2.747636	2.314494	8.068089

Ilustración 21. Datos espectrales de la imagen

De esta manera, a través de los comandos del IDRISI™ Selva, la fórmula para el cálculo de la radiancia a partir de valores numéricos, la misma que se presenta a continuación:

$$L_{\lambda} = gain * DN + bias$$

En donde:

Tabla 8. Fórmula para el cálculo de radiancia

$L_{\lambda} =$	Valor de radiancia en el píxel
$gain$	Ganancia en el sensor
DN	Valores Numéricos Digitales
$bias$	Sesgos / compensaciones

Fuente: Elaboración propia

El otro método, tiene que ver con los sistemas de comparación entre máximos y mínimos para cada una de las bandas.

$$L_{\lambda} = ((LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}) / (QCALMAX - QCALMIN)) * (QCAL - QCALMIN) + LMIN_{\lambda}$$

Sin embargo, para la finalidad del estudio y teniendo en cuenta que el insumo principal es una imagen SPOT 5, solo se empleara el método de ganancias y sesgos.

3.2.5 Clasificación de Imagen SPOT

Para identificar el compuesto que resaltara mejor el suelo desnudo de la zona de estudio se utilizaron las 4 bandas de la imagen SPOT y se crearon composiciones para resaltar el suelo, de tal manera que se crearon imágenes a partir de la combinación de bandas 431, 412, 123, 431, 321 y 243. Siendo así posible la discriminación de las composiciones que permitieran un adecuado análisis visual de las coberturas y encontrar la correlación de los valores de la mejor composición con las variables descritas anteriormente.

Utilizando el módulo “Composite” de IDRISI se realizaron las diferentes composiciones de bandas, permitiéndonos este software optimizar el tiempo de generación de compuestos.

3.2.6 Correlación de variables

Con la finalidad de identificar las variables que tuvieran una mayor incidencia en los valores espectrales obtenidos con la imagen satelital, se realizó un análisis estadístico basado en la correlación de las variables: humedad, pendiente, orientación del terreno, altura, tipo de cultivo y % de COS, con los valores digitales de la imagen y radiancia.

Como ya se mencionó en la reseña metodológica, se realizaron correlaciones por método de Pearson y Spearman, con apoyo del software estadístico SPSS, además del paquete Excel de Office. Las correlaciones se hicieron tanto en la plataforma de SPSS como en Excel para poder comparar los resultados. El uso de estos métodos estadísticos facilita la obtención de los porcentajes de relación entre las variables descritas y la construcción de modelos, en el caso de que los resultados sean positivos.

Resultados y Discusión



En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos en las dos etapas anteriores, los resultados de los contenidos de COS en la zona agrícola, y las variables identificadas con asociación a los contenidos de carbono a partir de un análisis estadísticos, además de los valores digitales asociados con el carbono orgánico a partir de percepción remota para sentar las bases de un posible modelo de estimación. Además de los resultados se hace una discusión sobre ellos, acerca de la distribución del COS y las variables que influyen en él, y su relación con las prácticas de manejo que se realizan en las parcelas agrícolas.

Carbono orgánico del suelo

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los contenidos de carbono orgánico y los almacenes de carbono de las muestras realizadas en campo, derivados de los análisis en laboratorio mencionados anteriormente. En la Tabla 9 se observan los valores mínimos, máximos y los promedios del porcentaje de carbono por las unidades de muestreo. En la Tabla 10 se muestran los promedios, valores máximos y mínimos de los porcentajes de carbono por rango de pendiente

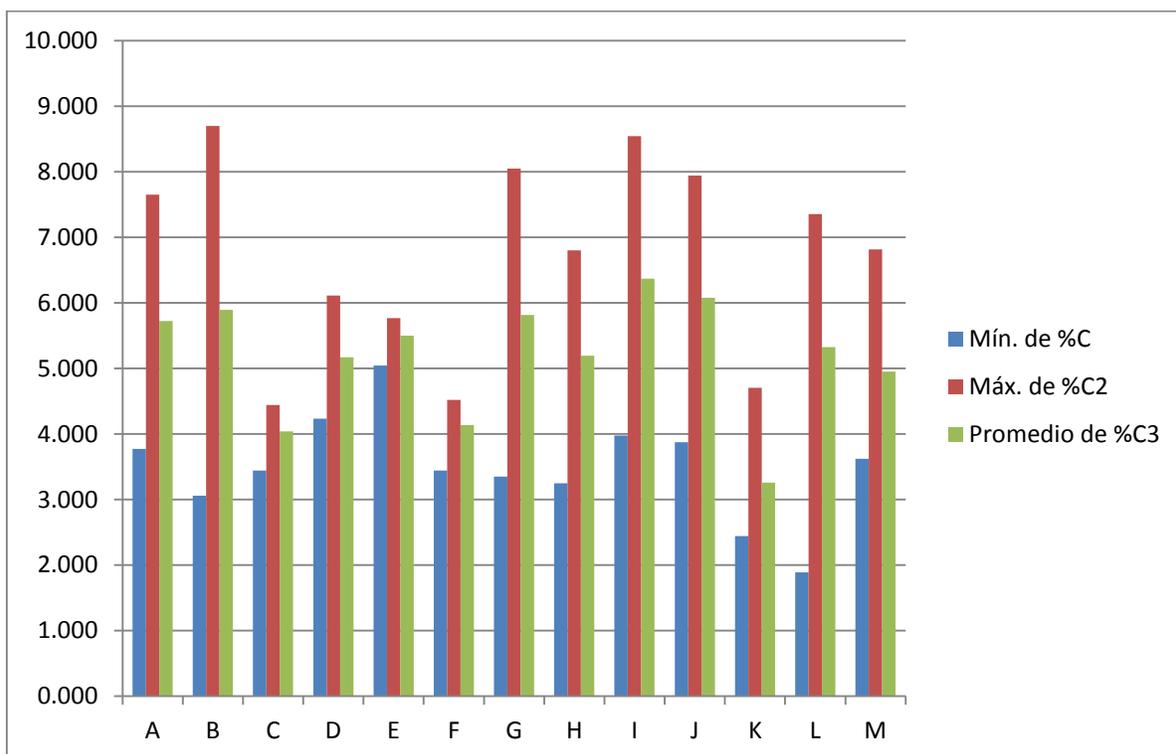
Tabla 9. Porcentaje de COS de las unidades muestreadas

Unidades	Mín. de %C	Máx. de %C2	Promedio de %C3
A	3.772	7.651	5.723
B	3.058	8.701	5.895
C	3.440	4.441	4.037
D	4.232	6.110	5.171
E	5.043	5.765	5.502
F	3.444	4.521	4.135
G	3.349	8.050	5.816
H	3.246	6.803	5.193
I	3.976	8.542	6.369
J	3.876	7.940	6.076
K	2.444	4.703	3.258
L	1.888	7.353	5.324
M	3.620	6.818	4.953
Total general	1.888	8.701	5.369

Elaboración propia

Los valores de % de COS de la zona de estudio se encuentran en el rango de 1.888 y 8.701. Mientras que el promedio general es de 5.369 % aproximadamente, del área total agrícola.

Gráfica 1. Contenidos de COS de las unidades muestreadas



Elaboración propia.

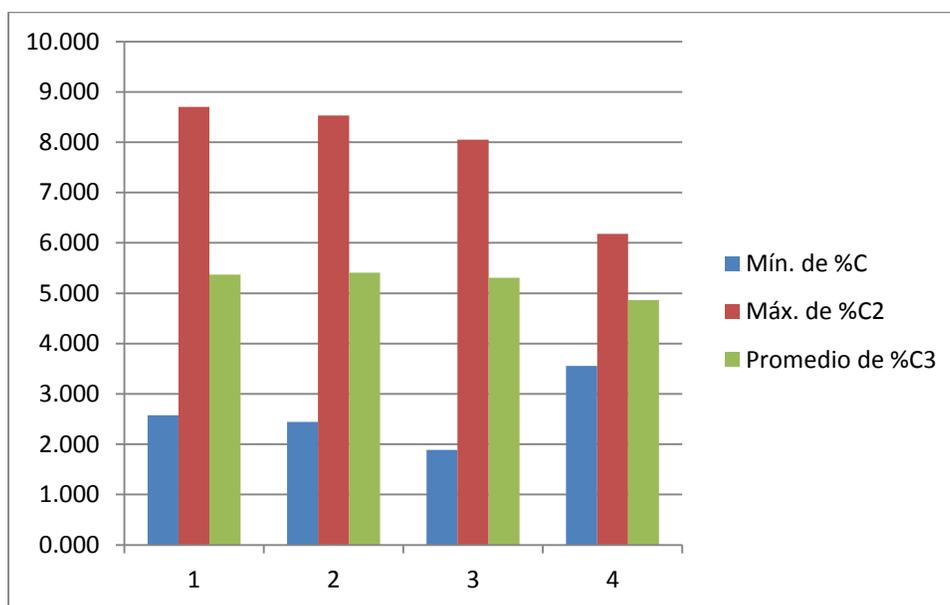
Tabla 10. Contenidos de COS por rango de pendiente

Rango de p	Mín. de %C	Máx. de %C2	Promedio de %C3
1	2.580	8.701	5.372
2	2.444	8.532	5.412
3	1.888	8.050	5.309
4	3.556	6.179	4.868
Total general	1.888	8.701	5.369

Elaboración propia.

Los contenidos de % de COS en el tipo de pendiente 1, que va de 0-5°, se encuentran en el rango de 2.580 a 8.701, mientras que el promedio general de la misma pendiente es de 5.372% de COS. Para el caso de la pendiente 2, el rango es 2.444 – 8.532 % de COS y su promedio de 5.412. El tipo de pendiente 3, contiene 1.888 % de COS como mínimo y un máximo de 8.050, con un promedio de 5.309. Los resultados en su promedio tomando en cuenta la pendiente no tienen una diferencia significativa.

Gráfica 2. Porcentaje de COS por unidad de pendiente



Elaboración propia.

La Tabla 11 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra las cantidades obtenidas de almacén de carbono (mínimos, máximos, y el promedio) de cada una de las unidades en las que se muestreó. Mientras que la Gráfica 4, muestra los contenidos de almacén de carbono mínimos, máximos, y los promedios por rango de pendientes.

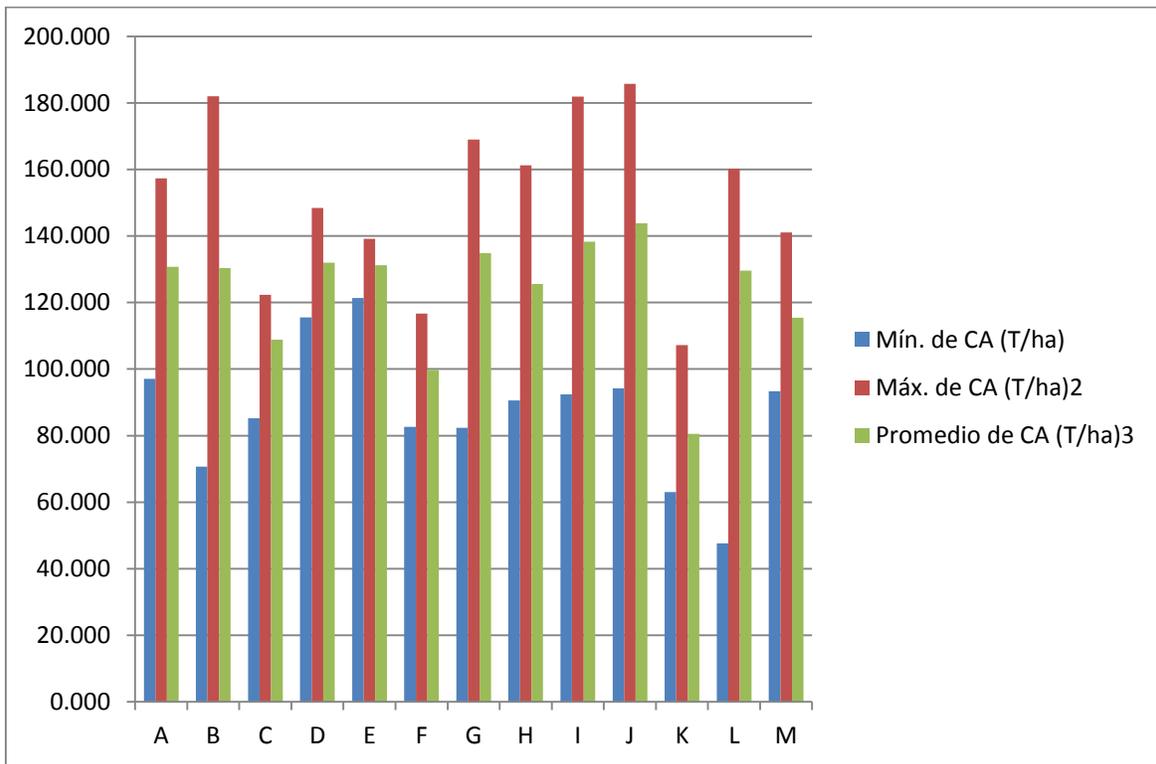
Tabla 11. Carbono almacenado en las unidades de muestreo

Unidades	Mín. de CA (T/ha)	Máx. de CA (t/ha) ²	Promedio de CA (t/ha) ³
A	97.061	157.347	130.742
B	70.642	181.984	130.326
C	85.242	122.360	108.806
D	115.547	148.468	132.007
E	121.378	139.193	131.247
F	82.656	116.646	99.756
G	82.382	169.049	134.864
H	90.560	161.231	125.543
I	92.406	181.947	138.312
J	94.197	185.792	143.838
K	63.049	107.231	80.570
L	47.584	160.173	129.579
M	93.399	141.127	115.422
Total general	47.584	185.792	125.462

Elaboración propia.

Los valores de CA de la zona de estudio se encuentran en el rango de 47.584 a 185.792 T/Ha, siendo un rango muy amplio, mientras que el promedio general de CA de la zona agrícola de El Telar, corresponde a las 125.462 T/Ha.

Gráfica 3. CA contenido en El Telar, por unidades de muestreo



Elaboración propia.

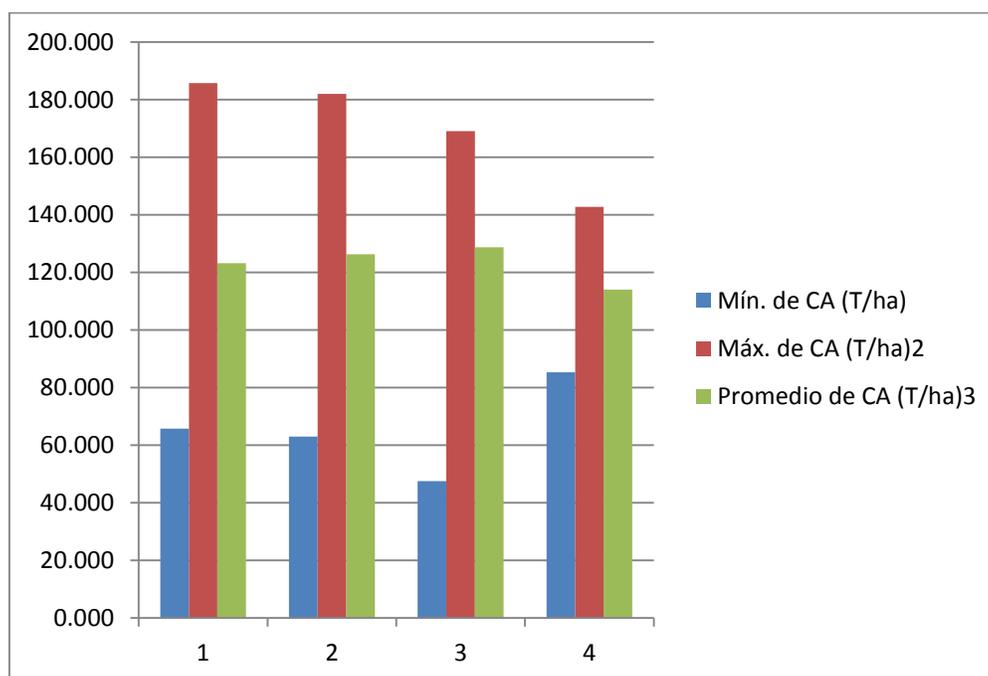
Tabla 12. Contenido de CA en T/Ha por rango de pendientes

Rango de p	Mín. de CA (T/ha)	Máx. de CA (T/ha) ²	Promedio de CA (T/ha) ³
1	65.781	185.792	123.265
2	63.049	181.984	126.355
3	47.584	169.049	128.748
4	85.350	142.736	114.043
Total general	47.584	185.792	125.462

Elaboración propia.

Los contenidos de carbono almacenado en el rango de pendiente 1, va de los 65.781 a los 185.792 T/Ha. Para el rango de pendiente 2, los contenidos van de los 63.049 a las 181.984. En el rango 3 de pendiente, el CA se encuentra entre 47.584 y 169.049. El promedio general de CA de la pendiente 1 es de 123.265, mientras que en el rango 2 de pendiente es de 126.355 y el del rango 3 de 128.748, siendo en este rango en su conjunto el que tiene mayor CA.

Gráfica 4. CA contenido por rango de pendiente

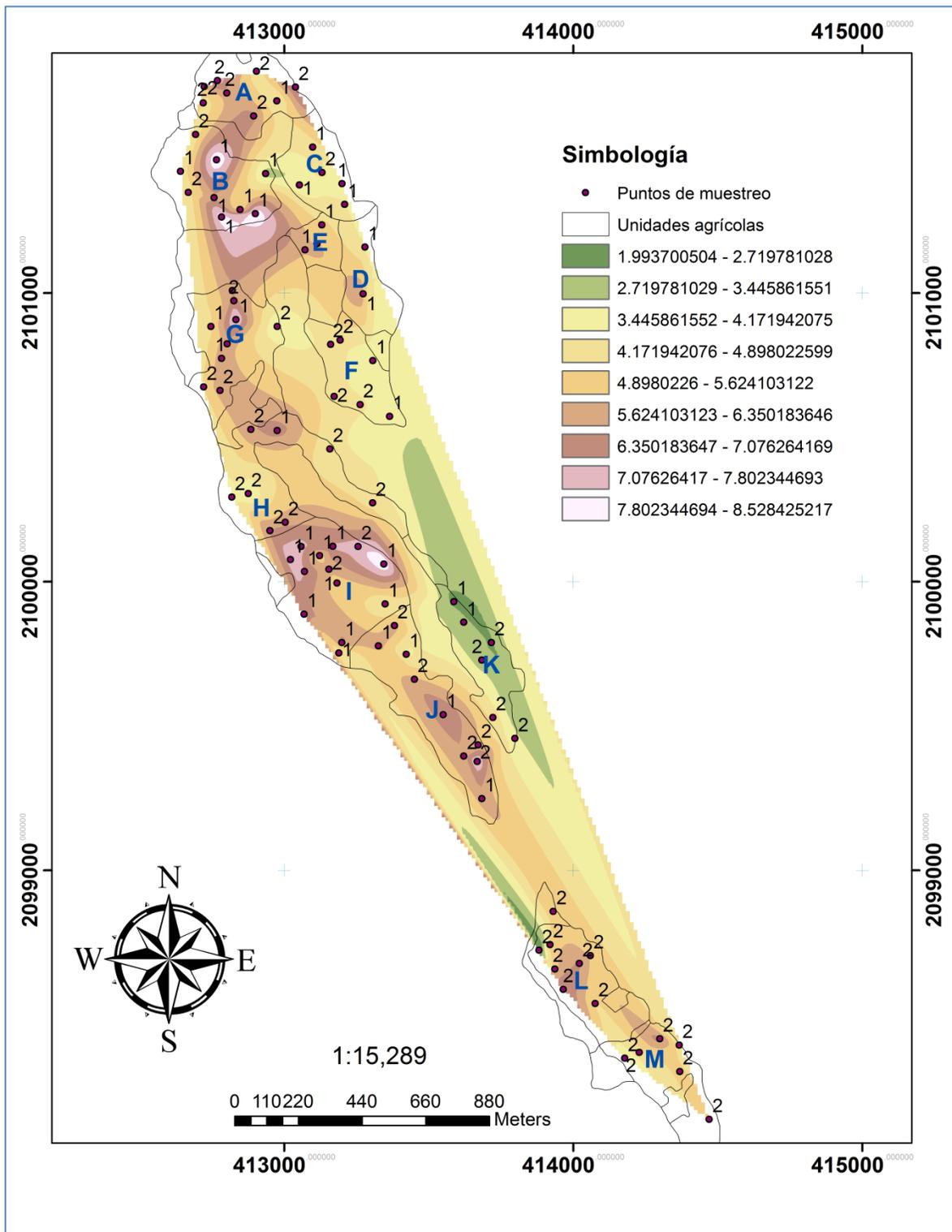


Elaboración propia.

Distribución del COS en El Telar

Para conocer el comportamiento espacial del COS en la zona de estudio y tener una representación de la distribución del carbono, se realizó una interpolación en la plataforma de ArcGIS 9.3 de los valores de porcentaje de COS de los puntos muestreados. Con la interpolación se produjo un mapa de isolíneas que representa la distribución del carbono en la zona, donde se agruparon los puntos de porcentaje de COS similar. A continuación se presenta el mapa obtenido:

Ilustración 22. Mapa de distribución de COS en "EL Telar"



En el mapa anterior se puede apreciar que se generan polígonos homogéneos a los largo de la zona agrícola, por lo que hay cierta homogeneidad en la distribución

del COS en la superficie agrícola de la zona, también es notorio que los casos de valores muy bajos (de 0 a 1) y los más altos (7-9) de los puntos muestreados, representan casos aislados, donde uno, dos o hasta 3 puntos máximo coinciden en la misma zona con esos valores. Estos puntos extremos se encuentran en las unidades B, G y en la I.

Con la intención de interpretar de mejor forma las concentraciones de COS en un mapa, se clasificaron los valores obtenidos en la Ilustración 22 para obtener las clases Alto, Muy Alto, Medio y Bajo. Los rangos utilizados por clase se basaron en la clasificación de concentración de materia orgánica presente en la NOM-021-RECNAT-2000 en su Interpretación de resultados de Materia Orgánica, la clasificación es la siguiente:

Tabla 13. Clasificación de las concentraciones de M.O (NOM-021-RECNAT-2000)

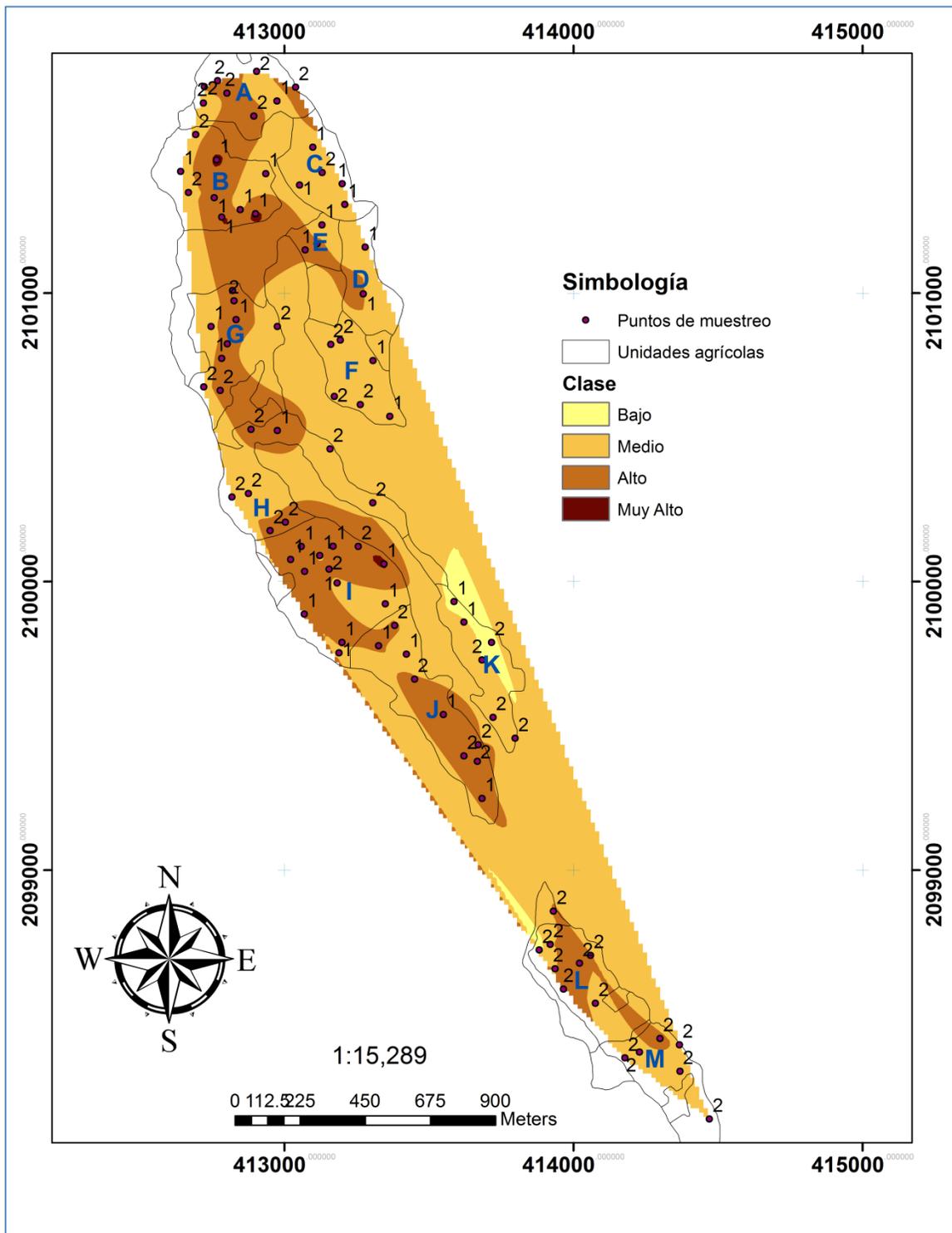
Clase	Materia Orgánica (%)
Muy Bajo	< 4.0
Bajo	4.1 – 6.0
Medio	6.1 – 10.9
Alto	11.0 – 16.0
Muy Alto	> 16.1

Elaboración propia con base en la (NOM-021-RECNAT-2000).

La tabla anterior muestra los valores de referencia de la norma, para clasificar la concentración de la materia orgánica en suelos volcánicos. Se retomó esta clasificación tomando en cuenta que el porcentaje de carbono se basó en el dato de porcentaje de materia orgánica que fue multiplicado por el factor 2, además de que el suelo presente en la zona de estudio es suelo volcánico, por lo que la clasificación fue la más adecuada para clasificar los contenidos de COS de El Telar.

La clasificación permitió generar un mapa que facilita la interpretación de los resultados, el mapa se muestra a continuación:

Ilustración 23. Clasificación del contenido de M.O



En el mapa anterior se observa que la categoría “Medio” es la predominante en la zona agrícola de El Telar, correspondiente a las unidades C, D, F, G, H y M. Por otro lado las concentraciones “Altas” se presentan en la parte norte del área agrícola, principalmente en la unidad A, B, E y G, también en unidades del centro como la I y J, además de la L en la zona sur. Mientras que no se presentan concentraciones por arriba de 9% de COS o arriba del 16% de M.O, por lo cual la clase “Muy Alta” no es representada en el mapa.

Análisis Cuantitativo

✓ Correlaciones

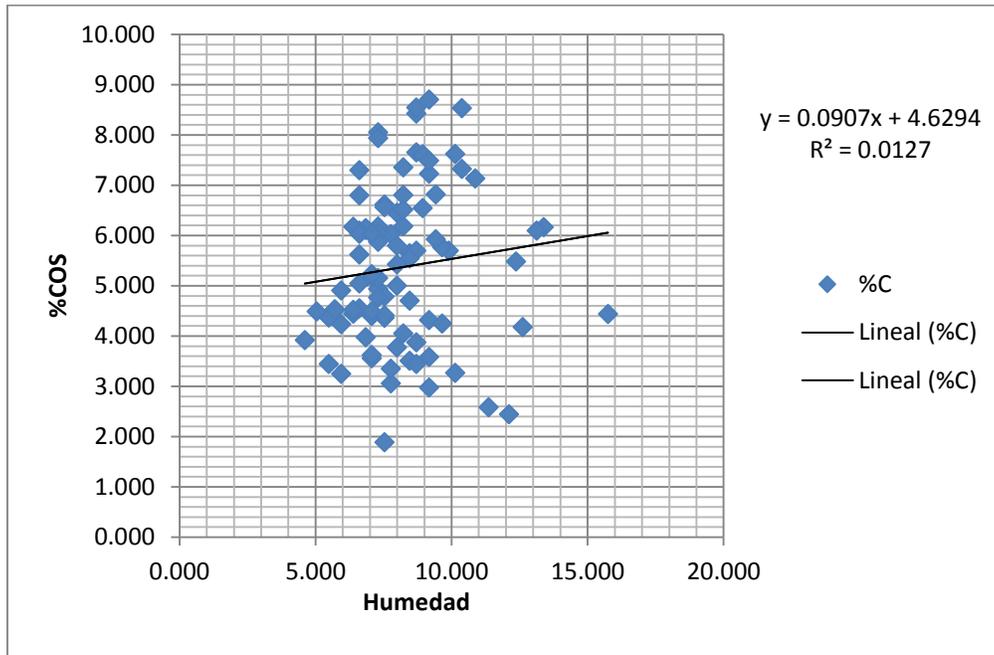
Como se planteó al inicio, la presente investigación es de carácter mixta, tanto cuantitativa como cualitativa. En ese sentido, para la parte cuantitativa se realizaron correlaciones de Pearson con la finalidad de identificar las variables que estadísticamente representaran y explicaran el comportamiento espacial de los porcentajes de COS, para ellos se retomaron las variables descritas en el capítulo *3.2.3 Variables elegidas y generación de raster* de la presente tesis.

Con apoyo del software estadístico Software IBM™ SPSS Statistics 22 se realizaron las correlaciones de Pearson entre la variable Porcentaje de Carbono y Altura, Pendiente, Humedad y Tipo de cultivo. Se realizó una correlación para cada una de las variables.

Antes de realizar las correlaciones primero se realizaron las gráficas de dispersión en Excel para ver si los datos se ajustan a la recta de una regresión lineal simple, de esa forma se puede apreciar gráficamente que tan asociadas se encuentran las variables.

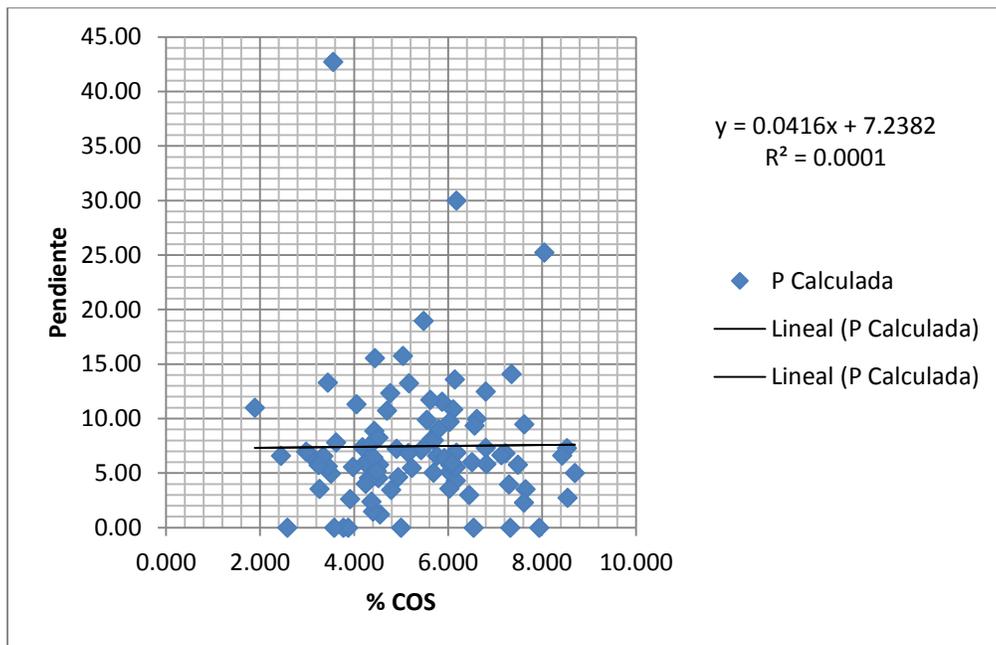
Las siguientes graficas muestran la regresión lineal simple de los datos respecto a las variables. Se aprecian las gráficas de dispersión, además del coeficiente de correlación realizado en Excel, entre las variables y el porcentaje de carbono.

Gráfica 5. Diagrama de dispersión entre %C y humedad



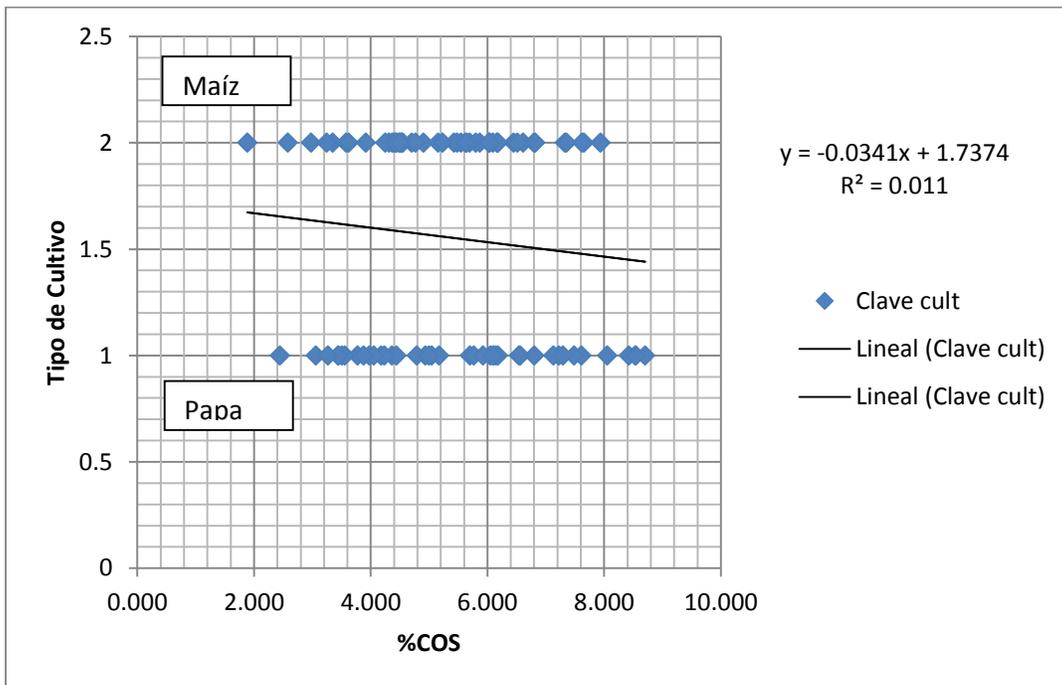
Elaboración propia.

Gráfica 6. Diagrama de dispersión entre %C y pendiente



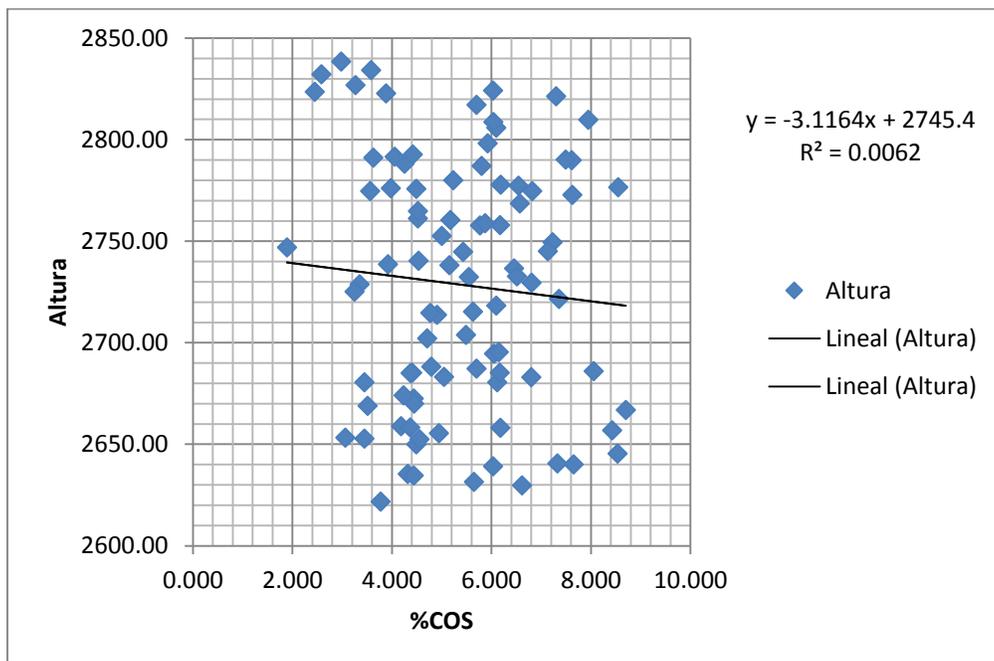
Elaboración propia.

Gráfica 7. Diagrama de dispersión entre %C y tipo de cultivo



Elaboración propia.

Gráfica 8. Diagrama de dispersión entre %C y altura



Elaboración propia.

Las gráficas muestran que los valores son muy dispersos por lo que nos encontramos ante una correlación débil entre el porcentaje de carbono y cada una de las variables, ya que los puntos no están muy próximos a la recta de regresión. No existe una tendencia del COS en función de alguna de las variables mencionadas anteriormente, sin embargo mediante un análisis cualitativo es posible explicar el comportamiento del carbono al asociar sus contenidos con variables de carácter social, es decir, con las prácticas de manejo que se tienen en las parcelas agrícolas de la zona.

A pesar de que gráficamente no existe correlación entre las variables y el carbono orgánico, se realizaron las pruebas de Pearson en SPSS y a continuación se presenta una tabla resumen con el coeficiente de correlación entre el COS y cada una de las variables mencionadas:

Tabla 14. Coeficiente de correlación con el COS

		%C
%C	Correlación de Pearson	1
	Sig. (bilateral)	
	N	92
%Humedad	Correlación de Pearson	.113
	Sig. (bilateral)	.285
	N	92
Orientacion	Correlación de Pearson	-.066
	Sig. (bilateral)	.532
	N	92
Altura	Correlación de Pearson	-.079
	Sig. (bilateral)	.456
	N	92
P Calculada	Correlación de Pearson	.010
	Sig. (bilateral)	.922
	N	92
Tipo	Correlación de Pearson	-.067
	Sig. (bilateral)	.525
	N	92

Elaboración propia.

Los resultados obtenidos de las correlaciones demuestran que no tienen una incidencia significativa en el dato de carbono, de hecho la relación con la Pendiente, Cultivo y Altura es negativa, en el caso de Humedad es positiva pero tan sólo con un coeficiente de correlación del 11.30%.

Siendo así, con un análisis estadístico no se encuentra relación significativa con las variables, por lo que la distribución del carbono no está en función de la Humedad, ni Pendiente, tampoco en función del tipo de cultivo y mucho menos en función de la Altura.

✓ **Análisis de conglomerados (clúster)**

Los resultados obtenidos con los análisis de correlación entre las variables del medio físico y el COS no fueron favorables, es por eso que se realizaron otro tipo de pruebas para asociar y agrupar las muestras en función de las mismas variables estudiadas en las pruebas de correlación. En este caso, se realizó un análisis de conglomerados, el cual, es una técnica estadística multivariante que busca agrupar elementos (o variables) tratando de lograr la máxima homogeneidad en cada grupo y la mayor diferencia entre los grupos (De la Fuente, 2011).

Se aplicó un método jerárquico en el software SPSS, con el objetivo de generar clusters y maximizar la medida de similaridad entre ellos, además de que un método jerárquico se utiliza tanto para variables cuantitativas como cualitativas y principalmente cuando no se conoce el número de conglomerados a priori. Se realizaron pruebas dos medidas de asociación: distancia euclídea y correlación de Pearson, ambas por método Ward el cual busca minimizar la varianza dentro de cada grupo (De la Fuente, 2011).

Para la clasificación de los datos se utilizaron en primera instancia las variables: humedad, altura, carbono orgánico y pendiente, se realizaron los análisis por ambas medidas de asociación y como resultado se observó que la agrupación arrojada por distancia euclídea fue más clara que por correlación de Pearson, siendo así, se trabajó con los clústeres generados con dicho método.

A continuación se presenta un mapa con la distribución de los clústeres resultantes del análisis con las variables altura, humedad, pendiente y carbono.

Ilustración 24. Distribución de clústeres, 4 variables

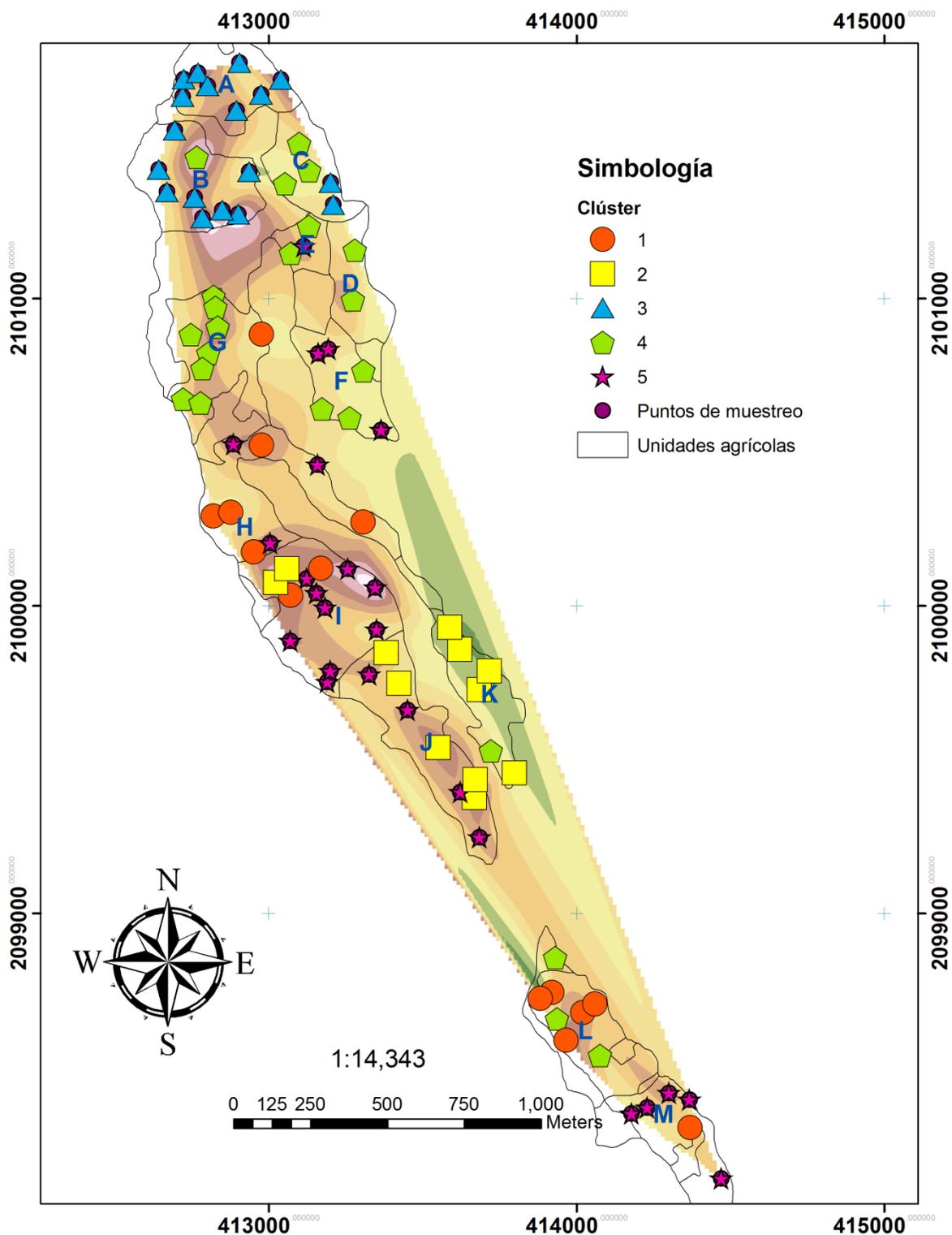


Tabla 15. Valores por clúster

Clúster	Promedio de Altura	Promedio de P Calculada	Promedio de %Humedad	Promedio de %C	Desv est del %C
1	2736.40	7.46	7.71	5.32	1.72
2	2819.18	3.14	9.03	5.07	2.16
3	2645.19	7.16	8.58	5.44	1.69
4	2689.28	9.21	7.73	5.39	1.29
5	2777.24	8.14	8.04	5.47	1.25

Elaboración propia.

Al observar el mapa se puede identificar que el comportamiento de los clústeres es homogéneo, excepto en las unidades L y M, donde se presenta una mayor heterogeneidad con la presencia de diferentes clústeres en las mismas unidades. Esta distribución homogénea se debe a la similitud en los datos que presenta la Tabla 15, sin embargo la agrupación arrojada permite poder interpretar mejor el comportamiento del COS en la zona de estudio.

En este primer análisis el clúster 1 presenta una pendiente media de 7.46, con un promedio de humedad de 7.71% y 5.32% de COS, un porcentaje cercano al de los demás clústeres pero sí con diferencias en las demás variables. En el clúster 2, la altura es mayor que en los demás clústeres, mientras que la pendiente es la menor, su promedio de humedad es mayor que el del clúster 1 y el promedio de carbono reduce un poco en comparación con el 1, pero su variabilidad del COS es mayor. El clúster 3 presenta la menor altura, pendiente cercana al clúster 1, promedio de humedad similar al clúster 2 y un promedio mayor con muy poco, de COS (5.44). El clúster 4, presenta el mayor grado de pendiente con 9.21, aunque sigue siendo una pendiente media, humedad parecida al clúster 1 y promedio de COS más cercano el clúster 3. El clúster 5 presenta una pendiente de 8.14, promedio de humedad de 8 y COS muy cercano al clúster 5.

A partir de lo anterior, se aprecia que la variable carbono es la más homogénea entre los clústeres, y sólo en la pendiente y humedad se presenta mayor diferencia entre ellos, por lo que en este primer análisis, son las variables más determinantes en la agrupación de los datos.

A continuación se presenta el mapa de distribución de clústeres de un segundo análisis, incluyendo a las cuatro variables anteriores y dos variables más: tipo de cultivo y años de manejo, ambas de carácter cualitativo.

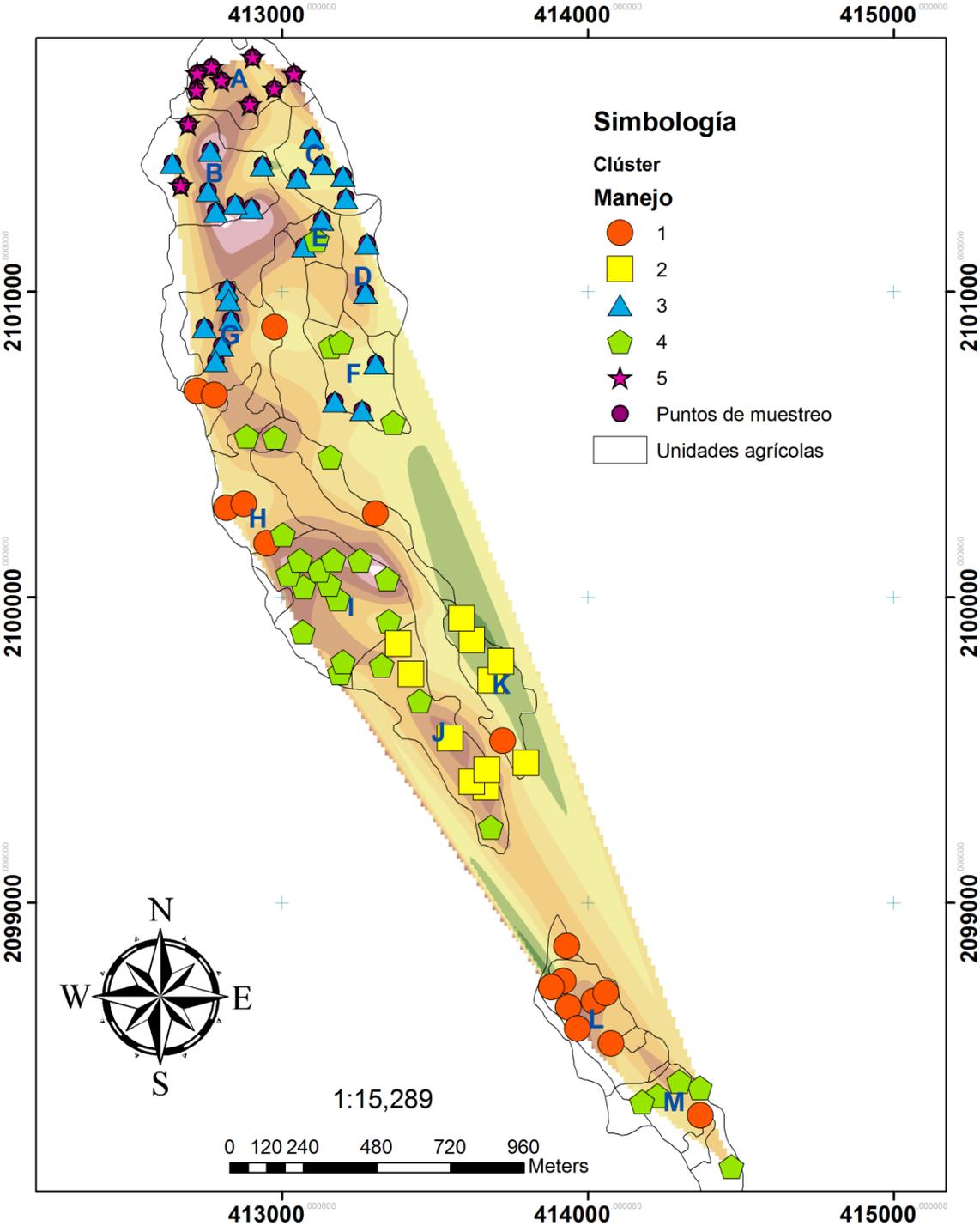


Ilustración 25. Distribución de clústeres, 6 variables

Tabla 16. Valores por clúster

Clúster	Promedio de Altura	Promedio de P Calculada	Promedio de %Humedad	Promedio de %C	Desv est %C	Promedio Cultivo	Promedio Años
1	2726.68	8.60	7.47	5.00	1.35	2	40
2	2823.53	3.58	8.81	4.70	1.96	2	28
3	2672.97	9.11	7.90	5.42	1.67	1	14
4	2773.32	7.86	8.30	5.76	1.35	1	20
5	2637.48	4.53	8.74	5.48	1.37	2	37

Elaboración propia.

En el mapa del segundo análisis la distribución cambió notablemente al incluir dos variables cualitativas asociadas al manejo agrícola que se realiza en la zona, en específico al tipo de cultivo y a los años que tienen de ser trabajados, algunos 3 pasaron a ser 5, algunos 5 pasaron a ser 4 y algunos 4 pasaron al clúster 3, además de que las unidades L y M son más homogéneas que en el mapa anterior. También hubo cambios en las diferencias de pendiente entre clústeres y se homogeneizó la diferencia correspondiente a la variable humedad, el carbono tuvo un cambio, pero en general sigue sin haber grandes diferencias, las variables que marcan la pauta para el agrupamiento de los datos siguen siendo la pendiente y la humedad.

Este segundo análisis que incluye variables cualitativas sobre el manejo agrícola, distingue mejor los puntos con mayor manejo e incorporación de estiércol en la zona, que el mapa anterior, puesto que los clústeres 3, 4 y 5, que tienen un promedio de COS similar y mayor al de los clústeres 1 y 2, coinciden con las zonas donde el manejo agrícola es más intensivo que en otras zonas, y en ellos se encuentran los puntos con valores más altos de COS, además su humedad es cercana. Por otro lado en los clústeres 1 y 2, el manejo es menos intensivo, por lo que en promedio, su contenido de COS es ligeramente menor, a pesar de tener humedad similar y pendientes similares a algunos clústeres mencionados anteriormente.

Los análisis realizados desde luego no permiten una explicación clara a nivel estadístico paramétrico sobre el comportamiento del carbono, pero si permite dentro de la homogeneidad de la zona, tener una clasificación que permita saber cuáles son los datos con asociación entre si y poder interpretar mejor los resultados desde un punto de estadística no paramétrica con la cual se integren datos cualitativos y cuantitativo.

Análisis Cualitativo

Si bien, en esta tesis los resultados del análisis estadístico con las correlaciones de Pearson no explican las asociaciones del carbono con variables físicas en la zona de estudio, un análisis cualitativo (como así lo sugiere la interpretación del análisis de conglomerados) permite explicar su comportamiento y la asociación que tienen ciertas variables con los datos de carbono, principalmente a partir de los datos obtenidos con el levantamiento de encuestas que se enfocó a las prácticas agrícolas que se desarrollan en El Telar, aunque desde luego la homogeneidad en la zona, no permite grandes diferencias.

Los tipos de cultivo están asociados a los contenidos de carbono y los tipos de fertilizantes que se aplican en las parcelas, pues también están en función del tipo de cultivo presente en alguna parcela.

En la Ilustración 23 que muestra la concentración de COS por clase en la zona de estudio, se observa que los puntos muestreados presentan una etiqueta: los números 1 y 2, el 1 corresponde a los puntos donde el tipo de cultivo es el de papa, mientras que el 2 corresponde a los cultivos de maíz.

Al observar de nuevo el mapa, es posible apreciar que la mayoría de los cultivos de papa con mayor manejo se encuentran en las zonas de Alto contenido de M.O y carbono en las unidades A, B, C, E, G, I, J y L principalmente, aunque las unidades D y H, presentan también algunas zonas de concentración Alta de COS, a pesar de ser cultivos de maíz, la explicación de este fenómeno se realiza más adelante. Se observa también que en las zonas Medias y Bajas, predominan los

cultivos de maíz, correspondiente a las unidades F, H, K y M, aunque al igual que en el caso de los cultivos de papa, algunas unidades como la C y E presentan zonas de Media concentración de COS a pesar de ser cultivos de papa. Hasta aquí, se puede afirmar que las zonas donde hay presencia de papa, en su mayoría son zonas de contenido Alto de Carbono y que en las zonas de Media y Baja concentración están asociadas a los cultivos de maíz.

Sin embargo, como ya se mencionó, algunas zonas bajas presentan cultivos de papa y zonas medias, cultivos de maíz. En este caso, influye también la pendiente en la que se encuentra la parcela donde se levantó la muestra y las prácticas agrícolas, es decir, el tipo de fertilizante y las cantidades que se aplican en las parcelas.

A pesar de que estadísticamente hablando, no hubo correlación positiva ni significativa entre la pendiente y el porcentaje de COS, al observar la distribución del carbono en la zona de estudio, se encuentra que las zonas de Muy baja concentración de carbono (en realidad polígonos pequeños), coinciden con zonas donde la pendiente es mayor de 10° y la erosión y arrastre de sedimentos es mayor en la capa superficial, limitan con meandros que separan la zona agrícola de la forestal. Los polígonos con concentración Media y Alta coinciden con zonas de menor pendiente, aunque al no haber una tendencia marcada, hay sus excepciones.

Como ya se mencionó otra de las variables asociadas a los contenidos de COS es el tipo y las cantidades utilizadas de fertilizantes en las parcelas. Las parcelas en las que las cantidades aplicadas de fertilizante son mayores o menores, varían en cuanto a los contenidos de COS a pesar de presentar un cierto tipo de cultivo. Por ejemplo hay zonas como la unidad J en donde los contenidos de COS son similares tanto en los cultivos de papa como en los de maíz, no hay una diferencia significativa y por eso entran en la misma clase: concentración Media a pesar de tener mayor pendiente si lo comparamos con la unidad G, donde también se encuentran cultivos de papa y maíz similares a los de la unidad J. No obstante la concentración de COS en la unidad G es menor que en la unidad J, aun teniendo

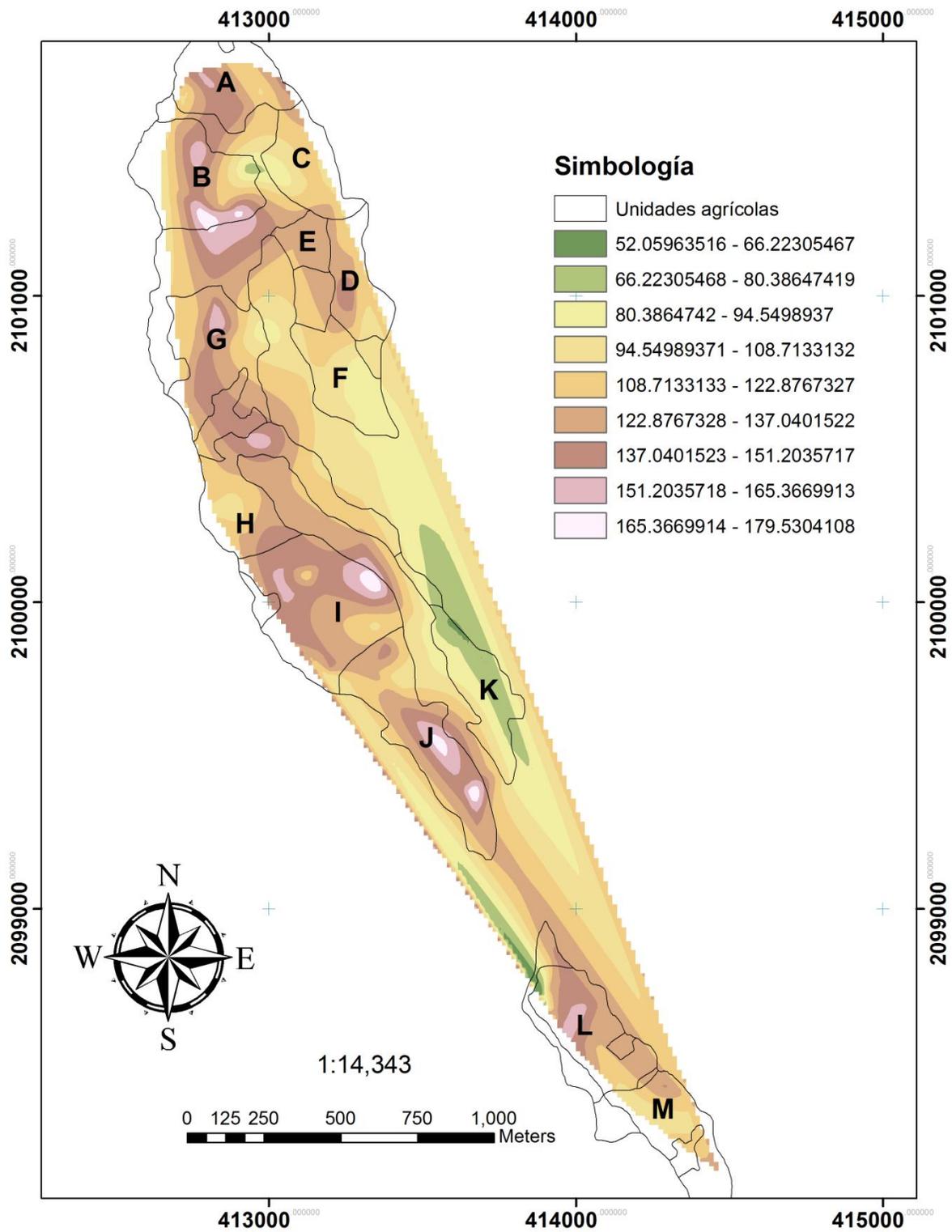
una pendiente más favorable. Lo anterior se debe a que las cantidades de fertilizante y estiércol que se incorpora en la capa superficial de las parcelas de la unidad J son mayores a las incorporadas en la unidad G y si a eso le sumamos que las parcelas de la J presentan mayor humedad, entonces la formación de materia orgánica es mayor que en la unidad G, y por ende hay un mayor contenido de COS.

Con base en los resultados obtenidos en las encuestas y descritos en el Marco Teórico en las Prácticas de manejo agrícola, se puede observar que en las zonas de mayor concentración de COS es justo donde la aplicación de fertilizantes inorgánicos y la incorporación de estiércol y gallinaza es mayor, tal es el caso de la unidad B, donde se concentran los valores Altos de COS. Caso contrario es el de la unidad L donde los cultivos son de maíz, y la aplicación de fertilizantes es menos intensiva, por lo que las concentraciones son de Bajas a Muy bajas.

La cantidad de carbono almacenada en el estrato superficial de El Telar se puede apreciar en el mapa de “Almacenes de Carbono”, que se realizó a partir de la interpolación de los valores de almacén de carbono por punto de muestreo. Los valores de almacén de carbono varían en la zona de estudio entre 47.584 t/ha (toneladas por hectárea) y 185.792 t/ha, mientras que el área agrícola de El Telar en promedio tiene 125.462 t/ha.

La cifra anterior representa que, la zona agrícola cuenta con una buena cantidad de carbono almacenado **COMPARACIÓN**. Desde la perspectiva del cambio climático, es favorable la cantidad de carbono que se almacena en el estrato superficial de El Telar, pues una buena cantidad de carbono no está siendo emitida a la atmósfera. Sin embargo, se puede apreciar que las zonas con mayor cantidad de carbono almacenado se encuentran en las parcelas donde la incorporación de materia orgánica es mayor, por lo que no necesariamente el carbono almacenado responde a los procesos de captura de carbono, sino más bien a la acumulación de materia orgánica en las parcelas durante el manejo agrícola. A continuación se presenta el mapa de distribución de almacenes de carbono.

Ilustración 26. Mapa de Almacenes de Carbono



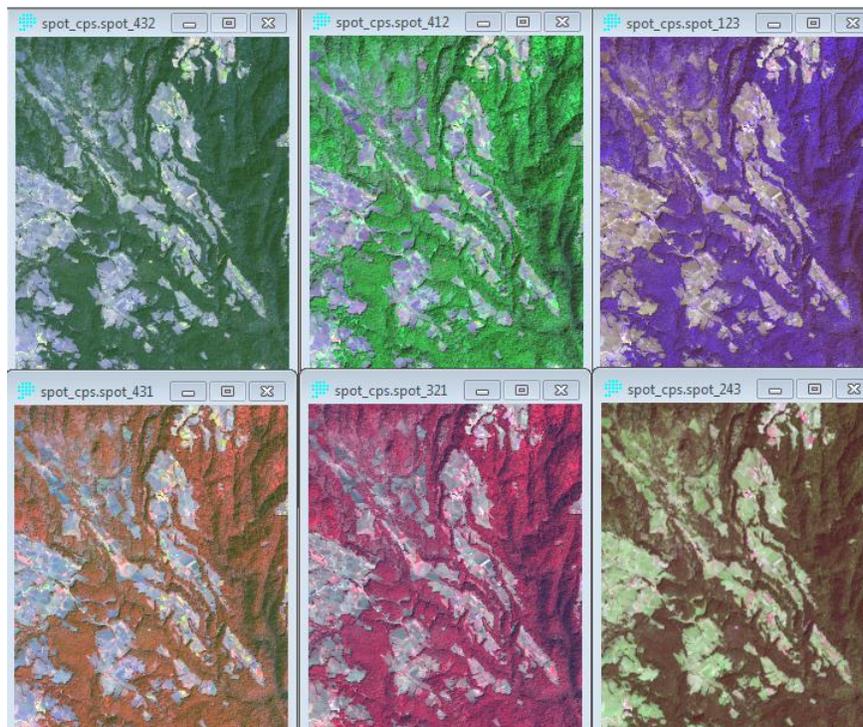
Resultados de la metodología de percepción remota y SIG

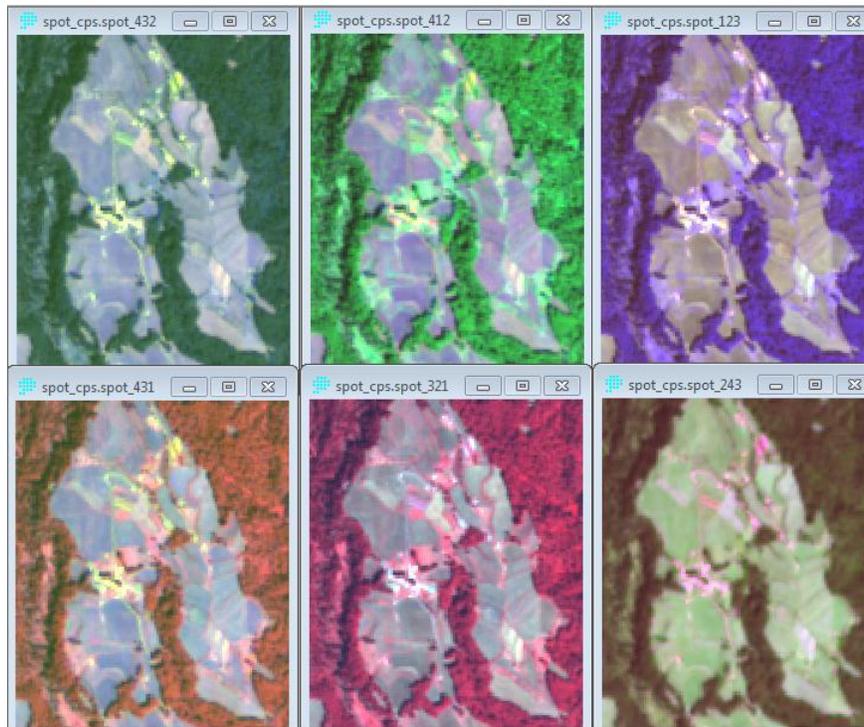
Selección del compuesto

De los compuestos realizados, el pseudocolor con el orden de bandas **321**, dota de una visualización clara y única a los predios en la zona de estudio, logrando la mayor reflectividad y resalte visual de entre las diferentes coberturas en su entorno.

En las ilustraciones a continuación mostradas, se aprecia un mosaico, en los cuales se compara una serie de fragmentos, de la misma porción de la imagen pero con distinto compuesto de bandas para su análisis visual y, con un acercamiento óptico, para hacer más notorios los detalles.

Ilustración 27. Mosaico de imágenes compuestas





Elaboración propia.

La imagen con predominancia de tonos magenta, realiza las diferencias entre vegetación y suelos descubiertos, entre otras cubiertas. En la parte inferior central de los mosaicos, se encuentra el compuesto 321.

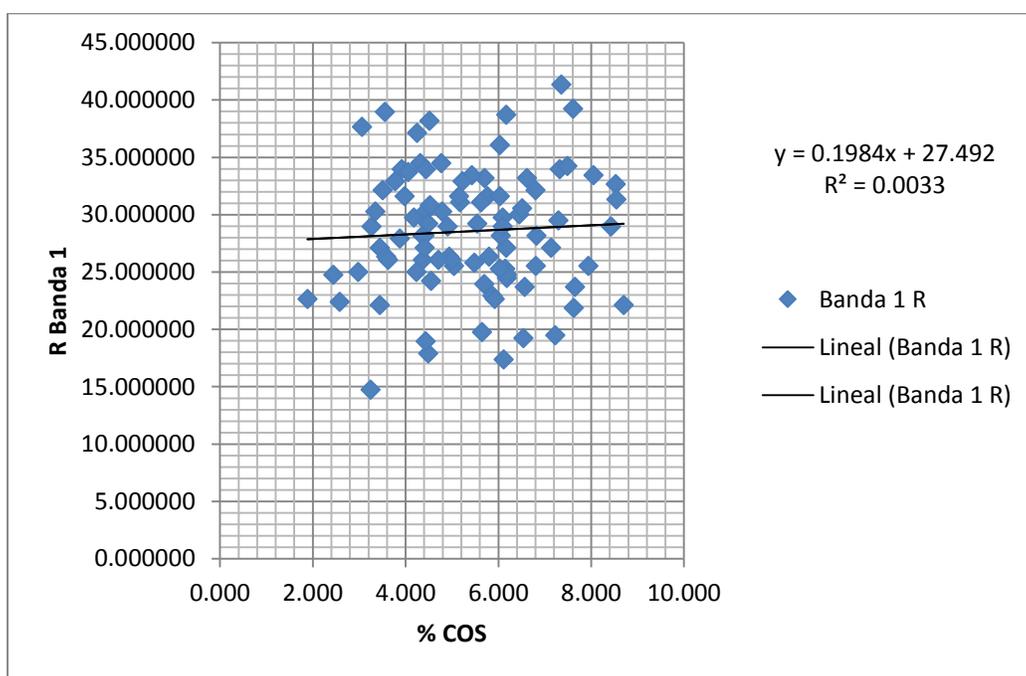
Identificación de valores de radiancia asociados a los contenidos de COS en una imagen de satélite

En cuanto al análisis estadístico realizado, se correlacionaron los valores de radiancia (previamente convertidos de valores digitales a valores de radiancia) de sus bandas 1, 2 y 3 con los valores de porcentaje de carbono orgánico, con la finalidad de identificar la relación entre ambas variables. Sin embargo, este análisis estadístico se ve limitado por los resultados obtenidos en las correlaciones que pretendían explicar la distribución del carbono, de manera que, a pesar de la sugerencia de (Achkar, 2005) sobre utilizar las variables Altura, Pendiente, Orientación del terreno y Materia orgánica, para correlacionarse con los valores de radiancia de la imagen satelital y de esta manera obtener los coeficientes para

conocer que variable podría servir para la posterior generación de un modelo de identificación o estimación de COS en su zona de estudio. No será posible utilizarlos para correlacionarlos con los valores de radiancia del presente trabajo, puesto que no tuvieron una correlación significativa con los contenidos de COS.

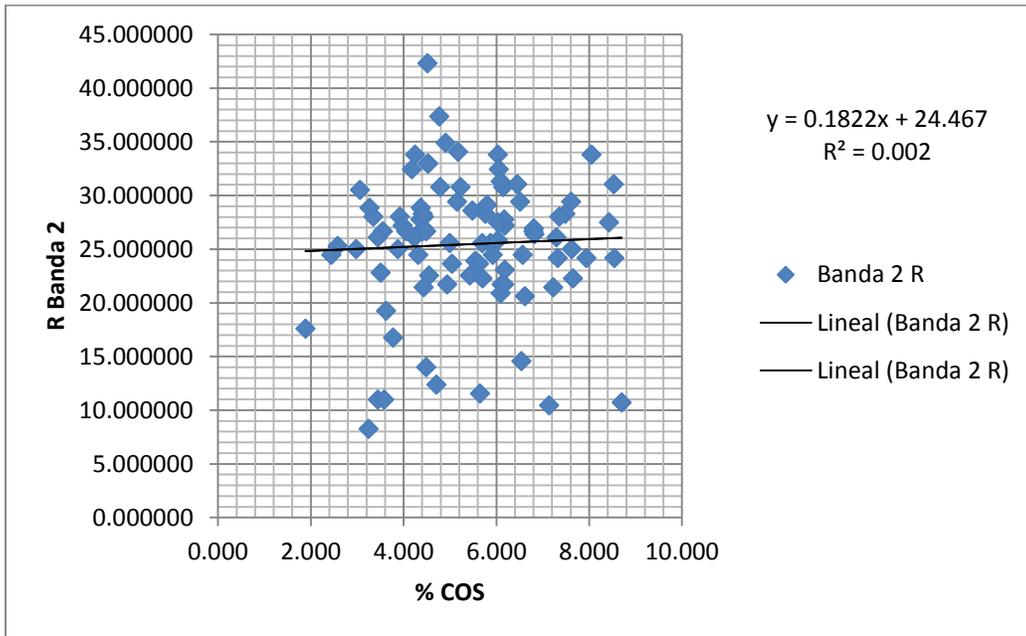
A pesar de ello, se realizaron las correlaciones del porcentaje de COS con los valores de radiancia de la Banda 1, Banda 2 y la Banda 3. Las gráficas se presentan a continuación.

Gráfica 9. Dispersión del %C y los valores de radiancia Banda 1



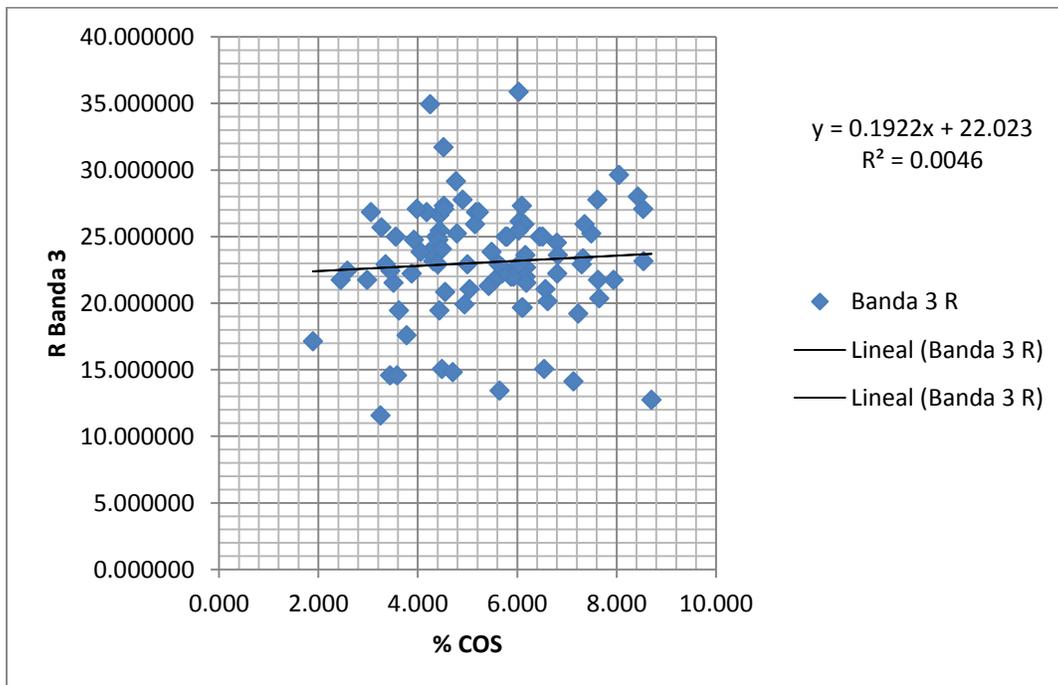
Elaboración propia.

Gráfica 10. Dispersión del %C y los valores de radiancia de la Banda 2



Elaboración propia.

Gráfica 11. Dispersión del %C y los valores de radiancia de la Banda 3



Elaboración propia.

Las gráficas muestran la débil correlación que presentan los valores de radiancia de las 3 bandas con el porcentaje de COS, donde los valores no se aproximan a la recta de regresión. A continuación se presentan los resultados de la correlación de Pearson entre el COS y los valores de radiancia de las Bandas 1, 2 y 3 de la imagen SPOT.

Tabla 17. Correlación de Pearson entre COS y Radiancia

		%C	%Humedad	Orientacion	Altura	P Calculada
Banda 1 R	Correlación de Pearson	.057	-.022	-.097	-.013	.100
	Sig. (bilateral)	.587	.833	.355	.900	.344
	N	92	92	92	92	92
Banda 2 R	Correlación de Pearson	.045	.002	.043	.115	.098
	Sig. (bilateral)	.671	.985	.685	.274	.353
	N	92	92	92	92	92
Banda 3 R	Correlación de Pearson	.068	.048	.020	.083	.071
	Sig. (bilateral)	.521	.651	.847	.432	.501
	N	92	92	92	92	92

Discusión

Los resultados no muestran una tendencia, con respecto a las variables de estudio, sin embargo la distribución del carbono se explica a partir de las prácticas de manejo y los tipos de cultivo de manera cualitativa. Los análisis estadísticos por lo regular son exitosos en muestras donde las variables pertenecen a categorías parecidas, pero en estudios mixtos donde las variables son de naturaleza numérica y otras de carácter social, es muy difícil que las pruebas de Pearson arrojen los resultados esperados, tal es el caso del presente proyecto. Sin embargo también influyen las prácticas agrícolas para que los contenidos de COS no muestren una tendencia estadística, pues modifican la distribución natural del COS.

La distribución del carbono se puede decir que es homogénea, no presenta un gran número de unidades, sin embargo se puede observar que hay casos aislados con valores extremos, muy bajos y altos, donde los valores de 0 a 1 y de 8 a 9, son la mínima parte de la población total de la muestra. Los valores extremos no necesariamente están sujetos a un comportamiento lógico en el terreno, no se explica en función de la pendiente o tipo de cultivo necesariamente. Estos valores extremos se encuentran en parcelas donde la aportación de materia orgánica por parte de los productores, es mayor, en grandes cantidades.

Por otra parte, la interpolación de los datos de carbono para la realización de los mapas de distribución, permite observar la distribución del COS y asociar cualitativamente estos resultados con variables como las prácticas agrícolas y el tipo de cultivo, con la intención de explicar el comportamiento del COS en la zona. A pesar de ello, la interpolación tiene sus limitaciones, pues se basa tan sólo en los datos obtenidos en cada una de las muestras, por lo que no se puede conocer las concentraciones de COS en toda la superficie de la zona agrícola delimitada, y sólo muestra una aproximación a como se distribuye el carbono. Para poder mejorar el mapa de distribución es necesario ampliar la población, es decir, aumentar el número de puntos de muestreo a las afueras de la zona y dentro de los polígonos en espacios vacíos, sin embargo, ello repercutiría directamente en la

generación de mayores cantidades de residuos químicos al analizar las muestras y la extensión del tiempo entre el muestreo y la obtención de resultados.

El tipo de cultivo, las cantidades de fertilizante inorgánico, el abono orgánico a base de estiércol, gallinaza y lama de champiñón, son las variables que en términos cualitativos influyen en los contenidos de COS. La aplicación de grandes cantidades de fertilizantes orgánicos e inorgánicos permite que la cantidad de materia orgánica en la capa superficial del suelo (30 cm) sea mayor a la cantidad que presenta un sistema con manejo menos intensivo.

Puede decirse de manera relativa que el hecho de que predomine las concentraciones Medias y Altas de COS es positivo en el contexto del cambio climático, pues supondrían que la zona agrícola de El Telar funciona como un buen sumidero de carbono, sin embargo los datos de carbono no responden necesariamente al carbono orgánico del suelo fijado por captura de carbono (lo que sería lo ideal), más bien responde a la incorporación de materia orgánica durante las prácticas de manejo de las parcelas, principalmente a las grandes cantidades de estiércol y fertilizantes artificiales.

Lo anterior presenta un problema para el suelo, puesto que las parcelas de El Telar no tienen rotación, en el caso de los cultivos de maíz, desde hace más de 40 años y para el caso de los cultivos de papá desde hace 6 años. La presión que ejercen en las parcelas para aumentar la producción principalmente, conlleva la aplicación de todo tipo de fertilizantes y estiércol en cantidades no reguladas, y con base en la experiencia de los productores, además del poder adquisitivo para conseguir los insumos. No es la misma cantidad aplicada por un productor que no cuenta con animales, como lo es en la parte baja de la zona de estudio, que la cantidad aplicada por un productor que cuente con animales y tenga mayores recursos económicos, como en la parte norte de la zona agrícola de El Telar. La pérdida de la fertilidad del suelo, erosión y la contaminación de los cuerpos de agua de la zona agrícola de El Telar aún no se ven, pero al ritmo intensivo con el que se maneja la actividad agrícola, se pueden convertir en la problemática principal de la zona.

Aunque no se pudo obtener correlaciones significativas entre el porcentaje de COS y los valores de radiancia en las bandas de la imagen SPOT, y sentar las bases para la generación de un modelo de estimación por percepción remota y el uso de SIG's. Si fue de gran importancia la utilización de SIG para la reducción de tiempos en los procesos de obtención de resultados y en la generación de los mapas de distribución de COS que pueden servir para estudios posteriores en la zona y facilitan la interpretación de los resultados.

Es posible que con la utilización de diferentes insumos, como una imagen de alta resolución y el uso de aparatos para medir la reflectancia del suelo, además de aumentar la intensidad de muestreo, los resultados sean diferentes y favorables para los fines de la presente investigación.

En la presente investigación las variables utilizadas por (Achkar, 2005), no tuvieron correlación con los datos de COS, ninguna variables pudo ser asociada a la distribución del carbono y tampoco relacionada con los valores de la imagen satelital, a pesar de ser variables recurrentes en los casos de estudio citados. A pesar de ello, las variables cualitativas referentes a las prácticas de manejo agrícola explicaron en parte la distribución del COS y sus almacenes, por lo que las prácticas de manejo juegan un papel importante en El Telar, tal como lo sugirió (Segura, 2005).

Conclusiones

Los sistemas agrícolas de El Telar, presentan contenidos de carbono que fluctúan entre 1.88 % y 8.70% de COS, mientras que el carbono almacenado es en promedio de 125.46 t/ha, variando entre 47.58 t/ha y 185.79 t/ha. El contenido de COS en la zona es considerable, los resultados de almacenes de carbono nos indican que el suelo agrícola funciona como un sumidero de carbono, sin embargo se reconoce que en algunas etapas del ciclo agrícola es un emisor. Se observa que la variabilidad es similar entre las unidades y entre rangos de pendiente, lo cual responde a que el manejo de las tierras agrícolas es similar tanto en cultivos de papa como de maíz, así como en los años de manejo de las parcelas, por lo que no se genera una tendencia en su comportamiento.

La distribución de los contenidos de carbono en las unidades de producción, se plantearon inicialmente en función de las variables del medio físico, sin embargo, como se evidenció en los resultados, estas variables no explican el comportamiento de distribución del COS. Al integrar las variables cualitativas referentes al manejo, en específico el tipo de cultivo y los años que han sido cultivados, se observa que los contenidos de COS y su variabilidad espacial pueden estar influenciados por las prácticas de manejo agrícola que se realizan en la zona, en particular aquellas relacionadas con la incorporación de materia orgánica al suelo, fertilizantes como el estiércol o abono a base de champiñón. Es notorio en los resultados que las parcelas donde se adoptan estas prácticas, presentan altos almacenes y porcentaje de COS. Por ello, la hipótesis planteada puede ser aceptada al reconocer que la integración de variables físicas y de manejo, ayudan a generar un mejor entendimiento de los comportamientos del carbono en suelos agrícolas, sin embargo, las variables no pudieron ser identificadas con elementos de percepción remota a un nivel parcelario, como se esperaba en el estudio, específicamente tomando las variables físicas.

Las herramientas de percepción remota utilizadas y la metodología planteada no permitieron asociar los valores de contenidos de carbono con los datos de la

imagen, que permitiera la posterior estimación indirecta del COS. Una de las razones por las cuales no se logró dicha asociación fue por la variabilidad y que los contenidos de COS presentan un comportamiento anormal en su distribución, respondiendo más a las variables cualitativas.

Las herramientas de los sistemas de información geográfica y percepción remota, facilitaron el tratamiento de la información obtenida en campo y los resultados de los análisis de laboratorio, así como la visualización de los datos y la generación de cartografía sin embargo no permitieron la identificación de las variables con correlación a los datos de la imagen.

El carácter mixto de la investigación (cuantitativa y cualitativa) permitió integrar y reconocer como la parte social influye en lo ambiental (almacenes de COS), especialmente si se consideran los procesos en un agrosistema donde interactúa el medio físico con el medio socioeconómico y cultural.

La cantidad de carbono en una zona como El Telar que cuenta con un manejo intensivo de la agricultura, sería menor, sin las prácticas de incorporación de estiércol y fertilizantes, por lo que en lugares donde no hay un manejo intensivo y donde el suelo no sea rico en materia orgánica, las cantidades de COS pueden estar en la categoría de Baja a Muy baja concentración de carbono en el suelo superficial.

El estudio permite evidencia el papel importante de los suelos agrícolas en el almacenamiento del COS, y su relevancia para incluir estos espacios en programas para la mitigación de gases de efecto invernadero y oportunidades de adaptación en el sector agrícola en zonas templadas y en contextos similares.

Sugerencias a la investigación

- En sistemas agrícolas como el Telar, las prácticas de manejo para la fertilización, representan problemas ambientales potenciales especialmente en el cultivo de papa, en el cual utilizan diferentes tipos de fertilizantes y pesticidas en grandes cantidades que pueden estar convirtiendo los sumideros en emisores de GEI, además de la posible afectación a la fertilidad del suelo y a los cuerpos de agua. Por ello nuevas líneas de investigación asociadas a las condiciones actuales de manejo de fertilizantes, deberían abordarse más adelante. La problemática ambiental o impacto que tiene la cantidad de fertilizantes utilizados y la gestión en general del suelo agrícola, es una de las principales líneas de investigación que permitirían tener un panorama completo de la zona.
- Aumentar los puntos de muestreo mejoraría la interpolación para el mapeo del carbono y abarcarían las zonas que no contienen datos de carbono en el mapa.
- Utilizar imágenes de alta resolución para el análisis de percepción remota y medir la reflectancia del suelo directamente en campo, con ello, buscar profundizar en un análisis del comportamiento espectral del suelo que mejoraría el análisis del terreno, la precisión de los datos y la posible asociación con las variables del COS.
- Medir la humedad directamente en campo y no obtenerla del suelo tamizado, esto haría posible un mejor análisis entre la humedad, el carbono y su influencia en los valores de radiancia en la imagen satelital.
- Integrar en el estudio del suelo variables como: la variabilidad mineral, rugosidad del suelo, entre otras que permitan un análisis completo del comportamiento del suelo.

Referencias

- Achkar, M., 2005. "Evaluación de la Distribución de la Materia Orgánica del Horizonte Superficial del Suelo mediante el uso de Imágenes Satelitales. Aplicación de metodología SIG". Caso: Cuenca del Arroyo Sánchez - Uruguay. Toulouse, France: INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE.
- Atkinson Nicholas (editores)., P. y T., 2000. Advances in Remote Sensing and GIS Analysis. , p.268.
- Bartholomeus, H.M. et al., 2008. Spectral reflectance based indices for soil organic carbon quantification. *ScienceDirect*, 145, pp.28–36.
- Brady R.R., N.C. and W., 2004. *Elements of the Nature and Properties of Soils* 2/E, ed., N.J.: Pearson Prentice Hall.
- Bremner and D. S. Jenkinson, J.M., 1960. Determination of organic carbon in soil. Oxidation by dichromate of organic matter in soil and plant material . *Journal of Soil Science*, 11(2), pp.394–402.
- Carvajal, M., 2011. *Investigación sobre la absorción de CO2 por los cultivos más representativos*, Murcia, España.
- Chatterjee and Lal, R., A., 2009. On Farm Assessment of Tillage. Impact on Soil Carbon and Associated Soil Quality Parameters. *Soil Tillage Research*, p. 270–277.
- Chuvieco, E., 2006. *Teledetección Ambiental*, Barcelona, España: Ariel.
- Colegio de Postgraduados (Chapingo, M., 1991. *Manual de conservación del suelo y del agua*, Colegio de Postgraduados. Available at: http://books.google.com.mx/books?id=SN_kygAACAAJ.
- D.A Lashof, D.R.A., 1990. Relative Contributions of Greenhouse Gas Emissions to Global Warming. *Nature*, 344:5, pp.529–531.
- DMPB Milori WTL da Silva, A. Posadas, V Mares, A.S., 2011. Emerging techniques for soil carbon measurements D. M. B. P. Milori, ed. , CCAFS Work. Available at: www.ccafs.cgiar.org.
- Donovan, P., 2013. Measuring soil carbon change. , (October).
- FAO, 2007. Base Rereferencial Mundial del recurso suelo. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos.

- FAO, 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra.
- Federación Española de Municipios y Provincias, 2011. Los sumideros de carbono a nivel local.
- Gehl, R.J. & Rice, C.W., 2007. Emerging technologies for in situ measurement of soil carbon. *Springer Science*, (December 2006), pp.43–54.
- INEGI, 2014. Elementos de percepción remota. Available at: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/elementos.aspx> [Accessed June 10, 2014].
- INEGI, 2010. ITER. Principales resultados por localidad.
- INIFAP Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, 1995. Edafología. Formato vectorial.
- IPCC, 1995. *Climate Change 1995*, Cambridge: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change*.
- IPCC, 2000. *Summary for policy makers, Special report on Land Use, Land use change, Forestry*, Cambridge, UK.
- Jarmer, T., Rosso, P. & Ehlers, M., 2010. Mapping topsoil organic carbon of agricultural soils from hyperspectral remote sensing data. , pp.17–19.
- De la Fuente Fernández, S., 2011. Análisis de conglomerados.
- Lal, R., 1997. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂-enrichment. , pp.81–107.
- LaSalle, J.T., 2008. *Regenerative Organic Farming: A solution to Global Warming* , Rodale Institut.
- Mas, J.F., 2011. *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*, México D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; Instituto Nacional de Ecología y Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental.
- Miguel A. Segura-Castruita, Patricio Sánchez-Guzmán, Carlos A. Ortiz-Solorio y Gutiérrez-Castorena, M. del C., 2005. Carbono Orgánico en suelos de México. *Terra Latinoamericana*, 23(1), pp.21–28.
- Ministerio del Ambiente Perú, 2009. Identificación de Metodologías existentes para determinar stock de carbono en ecosistemas forestales. , pp.1–99.

- Mintzer, I., 1992. *Confronting Climate Change. Risk Implications and Responses.*
- Morón A. García, J. Sawchik, y D. Cozzolino, A., 2007. Preliminary study on the use of near-infrared reflectance spectroscopy to assess nitrogen content of undried wheat plants. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87(1), pp.147–152.
- Munsell, 1975. Standard soil color charts.
- Olaya, V., 2012. *Sistemas de Información Geográfica*, OSGeo.
- Orozco H., M.E., 2013. *Comunidades y recursos naturales. Gestión del desarrollo rural* 1st ed., Toluca, México: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Padilla, J.E.B.J.D.. G.B.R.C.. H.M.C.I.C.F.M.S.S.V., 2011. *Relación entre los métodos TOC, LOI, Walkley-Black y NIR para determinar carbono en suelos* Fernando P., Programa Mexicano del Carbono.
- Van Reeuwijk, L.P., 2002. Procedures for soil analysis I. In. S. R. and I. Centre, ed.
- Ronald J. Gehl, C.W.R., 2006. Emerging technologies for in situ measurement of soil carbon. *Springer, Climatic C.*
- Segnini, A., 2011. *Emerging techniques for soil carbon measurements*, Copenhagen, Denmark. Available at: <http://hdl.handle.net/10568/10279>.
- SIATL. INEGI, 2014. SIATL. Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas. Available at: http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/# [Accessed July 25, 2014].
- Society, T.R., 2001. *The role of land carbon sinks in mitigating global climate change*, United Kingdom.
- Stephens, S.C. et al., Remote Sensing Organic Carbon in Soil. *Remote Sensing Organic Carbon in Soil*. Available at: http://extension.usu.edu/NASA/files/uploads/ResearchFiles/remote_sensing_carbon.pdf [Accessed January 26, 2014].
- Sundermeier, A., Reeder, R. & Lal, R., 2010. *Soil Carbon Sequestration - Fundamentals*, Columbus, Ohio.
- The World Bank, 2012. *Carbon sequestration in agricultural soils*, Washington DC: The World Bank.

Vergara-Sánchez, Miguel Ángel; Etchevers-Barra, Jorge D.; Vargas-Hernández, M., 2004. Variabilidad del carbono orgánico en suelos de ladera del sureste de México. *Terra Latinoamericana*, 22(3), pp.359–367.

Wilfred M. Post, R. Cesar Izaurralde, Linda K. Mann, N.B., 1999. Monitoring and verifying soil organic carbon sequestration. , pp.41–66. Available at: <http://cdiac.ornl.gov/newsletr/summer00/monitor.htm> [Accessed June 28, 2014].

Anexos

Anexo 1: Base de datos completa

No.	Unidad	Pendiente preli	Muestra	Folio	Cultivo actual	Clave cult	Cultivo anterior
1	A	1	A1-M1	S22/14	papa	1	maíz
2	A	2	A2-M1	S23/14	maíz	2	maíz
3	A	2	A2-M2	S24/14	maíz	2	maíz
4	A	2	A2-M3	S103/14	maíz	2	maíz
5	A	2	A2-M4	S25/14	maíz	2	maíz
6	A	2	A2-M5	S26/14	maíz	2	maíz
7	A	2	A2-M6	S79/14	maíz	2	maíz
8	A	2	A2-M7	S86/14	maíz	2	maíz
9	B	1	B1-M1	S81/14	papa	1	maíz
10	B	1	B1-M2	S52/14	papa	1	maíz
11	B	1	B1-M3	S53/14	papa	1	maíz
12	B	1	B1-M4	S54/14	papa	1	maíz
13	B	1	B1-M5	S99/14	papa	1	maíz
14	B	1	B1-M6	S55/14	papa	1	maíz
15	B	1	B1-M7	S56/14	maíz	2	maíz
16	B	2	B1-M8	S51/14	maíz	2	maíz
17	B	2	B2-M1	S113/14	papa	1	maíz
18	C	1	C1-M1	S29/14	papa	1	maíz
19	C	1	C1-M2	S71/14	papa	1	maíz
20	C	2	C2-M1	S28/14	papa	1	maíz
21	C	2	C2-M2	S30/14	maíz	2	maíz
22	C	1	C2-M3	S27/14	papa	1	maíz
23	D	1	D1-M1	S21/14	papa	1	maíz
24	D	2	D2-M1	S101/14	papa	1	maíz
25	E	1	E1-M1	S41/14	papa	1	maíz
26	E	3	E3-M1	S98/14	papa	1	maíz
27	E	3	E3-M2	S93/14	papa	1	maíz
28	F	1	F1-M1	S63/14	maíz	2	maíz
29	F	1	F1-M2	S65/14	maíz	2	maíz
30	F	1	F1-M3	S66/14	papa	1	maíz
31	F	2	F2-M1	S97/14	papa	1	maíz

32	F	3	F3-M1	S62/14	maíz	2	maíz
33	F	3	F3-M2	S64/14	maíz	2	maíz
34	G	1	G1-M1	S46/14	maíz	2	maíz
35	G	1	G1-M2	S47/14	maíz	2	maíz
36	G	1	G1-M3	S48/14	papa	1	maíz
37	G	1	G1-M4	S49/14	papa	1	maíz
38	G	1	G1-M5	S50/14	papa	1	maíz
39	G	2	G2-M1	S44/14	papa	1	papa
40	G	2	G2-M2	S77/14	maíz	2	maíz
41	G	2	G2-M3	S45/14	maíz	2	maíz
42	G	3	G3-M1	S90/14	maíz	2	maíz
43	H	1	H1-M1	S61/14	maíz	2	maíz
44	H	1	H1-M2	S60/14	maíz	2	maíz
45	H	1	H1-M3	S83/14	papa	1	maíz
46	H	1	H1-M4	S58/14	maíz	2	maíz
47	H	2	H2-M1	S111/1 4	maíz	2	maíz
48	H	2	H2-M2	S59/14	maíz	2	maíz
49	H	2	H2-M3	S80/14	maíz	2	maíz
50	H	3	H3-M1	S57/14	maíz	2	maíz
51	I	1	I1-M1	S89/14	papa	1	maíz
52	I	2	I1-M10	S35/14	maíz	2	maíz
53	I	1	I1-M2	S106/1 4	papa	1	papa
54	I	1	I1-M3	S94/14	papa	1	papa
55	I	1	I1-M4	S31/14	maíz	2	maíz
56	I	1	I1-M5	S96/14	papa	1	maíz
57	I	1	I1-M6	S105/1 4	papa	1	maíz
58	I	1	I1-M7	S85/14	papa	1	maíz
59	I	1	I1-M8	S32/14	papa	1	maíz
60	I	1	I1-M9	S33/14	papa	1	maíz
61	I	2	I2-M1	S108/1 4	papa	1	papa
62	I	2	I2-M2	S34/14	papa	1	papa
63	I	3	I2-M3	S36/14	papa	1	papa
64	J	1	J1-M1	S72/14	maíz	2	maíz
65	J	1	J1-M2	S88/14	papa	1	maíz
66	J	2	J2-M1	S110/1 4	papa	1	maíz
67	J	1	J2-M2	S74/14	maíz	2	maíz
68	J	2	J2-M3	S78/14	maíz	2	maíz
69	J	2	J2-M4	S76/14	maíz	2	maíz

70	J	3	J2-M5	S87/14	papa	1	maíz
71	J	2	J2-M6	S114/14	papa	1	maíz
72	J	2	J2-M7	S75/14	maíz	2	maíz
73	K	1	K1-M1	S107/14	papa	1	maíz
74	K	1	K1-M2	S112/14	papa	1	maíz
75	K	2	K2-M1	S73/14	maíz	2	maíz
76	K	2	K2-M2	S95/14	maíz	2	maíz
77	K	3	K3-M1	S100/14	maíz	2	maíz
78	K	3	K3-M2	S104/14	maíz	2	maíz
79	L	1	L1-M1	S43/14	maíz	2	maíz
80	L	1	L1-M2	S42/14	maíz	2	maíz
81	L	1	L1-M3	S39/14	maíz	2	maíz
82	L	1	L1-M4	S92/14	maíz	2	maíz
83	L	1	L1-M5	S102/14	maíz	2	maíz
84	L	1	L1-M6	S37/14	maíz	2	maíz
85	L	3	L3-M1	S38/14	maíz	2	maíz
86	L	3	L3-M2	S84/14	maíz	2	maíz
88	M	1	M1-M1	S82/14	maíz	2	maíz
89	M	1	M1-M2	S91/14	maíz	2	maíz
90	M	1	M2-M1	S68/14	maíz	2	maíz
91	M	2	M2-M2	S70/14	maíz	2	maíz
92	M	1	M2-M3	S67/14	maíz	2	maíz
93	M	3	M3-M1	S69/14	maíz	2	maíz

Años CP	Años CM	Fertilizante or	Tipo	Fertilizante in	y	x	Altura
10	40	si	1	si	2101664.862	412975.2307	2621.70
40	40	si	1	si	2101657.762	412720.3692	2635.30
40	40	si	1	si	2101714.403	412723.8992	2631.50
40	40	si	1	si	2101735.102	412769.6783	2640.10
40	40	si	1	si	2101692.015	412801.7893	2639.10
40	40	si	1	si	2101612.674	412895.3054	2629.70

40	40	si	1	si	2101767. 443	412904.5 593	2634.60
40	40	si	1	si	2101712. 585	413039.6 618	2640.50
10	40	si	1	si	2101274. 251	412900.8 712	2645.40
10	40	si	1	si	2101413. 405	412936.2 611	2653.20
10	40	si	1	si	2101288. 553	412848.2 035	2655.40
10	40	si	1	si	2101262. 740	412783.8 736	2656.80
10	40	si	1	si	2101329. 588	412758.2 946	2658.00
10	40	si	1	si	2101460. 903	412766.4 919	2666.90
40	40	si	1	si	2101548. 555	412693.9 610	2649.90
40	40	si	1	si	2101348. 047	412669.0 166	2652.40
10	40	si	1	si	2101420. 988	412642.0 985	2658.80
10	40	si	1	si	2101378. 081	413200.7 159	2652.80
10	40	si	1	si	2101306. 332	413209.5 372	2658.20
10	40	si	1	si	2101373. 905	413053.0 181	2668.90
40	40	si	1	si	2101416. 914	413131.7 430	2672.50
10	40	si	1	si	2101505. 041	413099.1 053	2669.90
10	40	si	1	si	2101158. 384	413279.6 839	2674.10
10	40	si	1	si	2100996. 629	413273.5 582	2680.50
3	40	si	1	si	2101235. 659	413130.5 770	2683.10
3	40	si	1	si	2101148. 733	413072.3 814	2687.20
3	40	si	1	si	2101170. 116	413113.9 542	2757.70
40	40	si	1	si	2100821. 761	413160.9 512	2761.10
40	40	si	1	si	2100836. 435	413193.8 617	2764.80
5	40	si	1	si	2100572.	413364.9	2774.70

					376	406	
5	40	si	1	si	2100765. 303	413307.4 222	2680.40
40	40	si	1	si	2100641. 440	413173.2 638	2685.10
40	40	si	1	si	2100612. 802	413262.9 191	2685.00
40	40	si	1	si	2101007. 938	412821.0 940	2685.10
40	40	si	1	si	2100972. 500	412826.8 219	2683.00
5	40	si	1	si	2100907. 400	412833.5 680	2686.00
5	40	si	1	si	2100883. 463	412746.9 302	2688.10
5	40	si	1	si	2100823. 110	412803.2 769	2694.50
5	40	si	1	si	2100773. 183	412783.7 789	2695.30
40	40	si	1	si	2100673. 882	412721.7 325	2713.70
40	40	si	1	si	2100661. 885	412778.5 180	2718.30
40	40	si	1	si	2100883. 489	412976.7 168	2728.70
40	40	si	1	si	2100292. 202	412819.1 995	2738.60
40	40	si	2	si	2100304. 549	412876.1 007	2725.20
4	40	si	1	si	2100522. 962	412976.3 915	2729.50
40	40	si	2	si	2100272. 322	413306.1 680	2740.30
40	40	si	2	si	2100176. 163	412951.2 884	2736.50
40	40	si	2	si	2100205. 018	413004.1 620	2757.90
40	40	si	2	si	2100526. 931	412885.3 570	2777.80
40	40	si	2	si	2100459. 364	413158.5 156	2788.20
4	40	si	1	si	2099922. 546	413349.7 965	2776.10
40	40	si	2	si	2100121. 285	413256.1 969	2772.80
4	40	si	1	si	2099887. 010	413069.1 981	2768.60

4	40	si	1	si	2099994. 479	413183.2 851	2760.40
40	40	si	2	si	2100042. 526	413155.1 935	2758.80
4	40	si	1	si	2100089. 375	413122.8 858	2752.60
4	40	si	1	si	2100122. 136	413168.9 354	2749.40
4	40	si	1	si	2100034. 512	413070.6 269	2745.00
4	40	si	1	si	2100075. 904	413022.2 933	2789.90
4	40	si	1	si	2100121. 212	413059.1 385	2790.10
4	40	si	1	si	2099752. 769	413189.7 321	2791.60
4	40	si	1	si	2099788. 685	413200.0 060	2777.30
4	40	si	1	si	2100060. 671	413344.9 685	2776.50
40	40	si	2	si	2099661. 690	413451.4 243	2787.10
6	40	si	1	si	2099777. 360	413326.3 798	2798.20
6	40	si	1	si	2099248. 289	413684.1 429	2805.90
40	40	si	2	si	2099376. 507	413668.0 019	2809.70
40	40	si	2	si	2099395. 202	413621.9 807	2808.60
40	40	si	2	si	2099434. 367	413671.2 189	2817.10
6	40	si	1	si	2099538. 838	413550.6 459	2821.30
6	40	si	1	si	2099748. 139	413422.5 634	2822.70
40	40	si	2	si	2099847. 479	413381.8 679	2824.20
6	40	si	1	si	2099859. 086	413621.6 161	2826.90
6	40	si	1	si	2099930. 287	413587.7 362	2823.50
40	40	si	2	si	2099727. 775	413684.1 650	2838.50
40	40	si	2	si	2099788. 705	413717.1 870	2832.10
40	40	si	2	si	2099456.	413798.8	2834.20

					569	039	
40	40	si	2	si	2099529.185	413722.2950	2702.10
40	40	si	2	si	2098657.745	413936.8941	2703.80
40	40	si	2	si	2098676.940	414021.2024	2732.70
40	40	si	2	si	2098704.316	414059.6490	2732.30
40	40	si	2	si	2098742.256	413919.9161	2744.80
40	40	si	2	si	2098722.735	413881.9270	2746.90
40	40	si	2	si	2098857.289	413931.1880	2715.30
40	40	si	2	si	2098538.360	414076.5660	2714.60
40	40	si	2	si	2098587.562	413966.1505	2721.60
40	40	si	2	si	2098302.633	414368.8783	2738.10
40	40	si	2	si	2098394.487	414367.3022	2792.70
40	40	si	2	si	2098368.900	414229.0624	2775.80
40	40	si	2	si	2098348.772	414178.5422	2791.10
40	40	si	2	si	2098416.155	414299.9207	2774.60
40	40	si	2	si	2098137.172	414470.5490	2780.00

P Calculada	Cate P	Orientacion	Banda 1 R	Banda 2 R	Banda 3 R	Banda 1 DN	Banda 2 DN
0.00	1	0.000000	32.913250	16.760580	17.590155	125	61
4.53	1	126.952377	34.493084	24.453962	23.144939	131	89
8.06	2	180.000000	19.747950	11.540072	13.424065	75	42
3.53	1	81.424881	23.697538	22.255854	20.367546	90	81
5.08	1	208.725296	36.072922	33.795925	35.874657	137	123
9.96	2	225.000000	33.176556	20.607271	20.136097	126	75

4.76	1	198.6945 04	30.28019 0	26.92683 4	26.61668 0	115	98
0.00	1	0.000000	33.96647 3	24.17919 7	23.37638 9	129	88
7.28	2	109.7914 96	32.64994 4	31.04828 8	27.07957 8	124	113
6.72	2	192.2709 20	37.65275 6	30.49876 0	26.84812 9	143	111
4.64	1	172.5630 49	26.33059 9	21.70632 6	19.90464 8	100	79
6.60	2	166.9728 85	28.96365 9	27.47636 2	28.00537 7	110	100
29.99	4	233.1318 05	24.48745 7	27.20159 7	22.68204 1	93	99
5.02	1	212.2793 27	22.11770 3	10.71578 1	12.72971 6	84	39
8.19	2	233.7700 65	17.90480 8	14.01294 4	15.04421 0	68	51
1.20	1	104.5249 25	24.22415 2	22.53061 7	20.83044 6	92	82
7.39	2	79.58215 3	29.75357 6	32.42210 8	26.84812 9	113	118
13.31	3	212.3422 85	27.12051 8	10.99054 4	14.58131 2	103	40
7.67	2	210.4738 01	28.17374 0	27.75112 5	23.83928 7	107	101
4.96	1	64.99020 4	32.12332 9	22.80538 0	21.52479 4	122	83
8.86	2	243.7716 37	18.95803 1	21.43156 2	19.44175 0	72	78
15.53	3	49.94839 1	33.96647 3	28.02588 8	25.45943 3	129	102
5.94	2	240.0960 54	25.01406 9	26.10254 3	23.83928 7	95	95
10.84	3	247.5031 89	17.37819 5	21.70632 6	19.67319 9	66	79
15.75	3	235.8620 61	25.54068 2	23.62967 1	21.06189 5	97	86
8.02	2	195.4522 40	33.17655 6	22.25585 4	22.68204 1	126	81
6.59	2	223.1658 17	31.59672 0	28.30065 2	24.99653 4	120	103
4.55	1	194.9357 00	38.17936 7	42.31359 5	31.70856 7	145	154
8.24	2	247.7904 97	30.80680 1	32.97163 4	27.31102 9	117	120
42.71	4	63.98881	38.96928	26.65207	24.99653	148	97

		9	8	1	4		
5.62	2	42.23586 7	22.11770 3	26.10254 3	22.45059 2	84	95
1.47	1	184.3731 38	28.17374 0	26.65207 1	22.91349 0	107	97
2.39	1	156.8320 16	26.06729 3	28.85018 0	24.99653 4	99	105
4.32	1	194.4074 71	27.12051 8	27.75112 5	23.60783 8	103	101
7.32	2	50.61587 5	32.12332 9	26.65207 1	24.53363 6	122	97
25.22	3	60.52790 8	33.43986 1	33.79592 5	29.62552 3	127	123
3.47	1	155.7991 33	30.28019 0	30.77352 5	25.22798 4	115	112
5.75	2	191.2348 48	28.17374 0	32.42210 8	26.15378 2	107	118
13.59	3	67.59304 1	25.27737 4	30.77352 5	25.92233 3	96	112
7.24	2	225.0000 00	28.96365 9	34.89497 8	27.77392 8	110	127
6.71	2	182.3225 56	29.75357 6	20.88203 4	19.67319 9	113	76
6.55	2	204.3555 45	30.28019 0	28.02588 8	22.91349 0	115	102
2.61	1	180.0920 41	33.96647 3	28.02588 8	24.76508 5	129	102
5.74	2	169.9691 16	14.74513 5	8.242909	11.57247 0	56	30
12.47	3	213.9321 75	25.54068 2	26.92683 4	22.21914 3	97	98
5.77	2	216.0262 60	30.80680 1	32.97163 4	27.07957 8	117	120
2.99	1	175.6838 23	30.01688 4	31.04828 8	24.99653 4	114	113
5.53	2	142.3054 35	38.70598 2	21.70632 6	21.98769 2	147	79
6.89	2	176.7750 09	24.75076 3	23.08014 3	21.52479 4	94	84
4.03	1	164.9642 18	37.12614 4	33.79592 5	34.94886 0	141	123
5.56	2	121.6741 18	31.59672 0	27.20159 7	27.07957 8	120	99
9.48	2	112.6913 76	21.85439 7	25.00348 9	21.75624 3	83	91
9.37	2	115.5136 03	23.69753 8	24.45396 2	21.06189 5	90	89

13.24	3	126.1811 98	31.07010 7	34.07068 6	26.84812 9	118	124
11.55	3	136.0120 24	22.90762 1	25.55301 7	21.98769 2	87	93
0.00	1	0.000000	26.06729 3	25.55301 7	22.91349 0	99	93
6.82	2	175.0163 88	19.48464 4	21.43156 2	19.21030 0	74	78
6.63	2	148.6262 67	27.12051 8	10.44101 7	14.11841 3	103	38
2.28	1	180.7018 59	39.23259 4	29.39970 6	27.77392 8	149	107
5.77	2	123.1565 02	34.22977 8	28.30065 2	25.22798 4	130	103
11.32	3	210.6806 49	33.70316 7	26.65207 1	23.83928 7	128	97
0.00	1	0.000000	19.22133 8	14.56247 1	15.04421 0	73	53
2.72	1	82.85910 8	31.33341 2	24.17919 7	23.14493 9	119	88
9.05	2	135.2054 90	26.33059 9	29.12494 3	24.99653 4	100	106
6.38	2	118.1191 56	22.64431 6	24.45396 2	21.98769 2	86	89
5.94	2	145.9105 23	28.96365 9	31.32305 2	27.31102 9	110	114
0.00	1	0.000000	25.54068 2	24.17919 7	21.75624 3	97	88
9.70	2	234.7854 31	25.27737 4	25.82778 0	22.91349 0	96	94
5.03	1	260.5874 02	23.96084 6	25.55301 7	22.21914 3	91	93
3.97	1	244.9531 25	29.49027 1	26.10254 3	22.91349 0	112	95
0.00	1	0.000000	27.91043 5	25.00348 9	22.21914 3	106	91
3.57	1	270.0000 00	31.59672 0	27.47636 2	25.45943 3	120	100
3.54	1	207.9798 28	28.96365 9	28.85018 0	25.69088 4	110	105
6.58	2	208.8761 75	24.75076 3	24.45396 2	21.75624 3	94	89
6.96	2	156.2206 73	25.01406 9	25.00348 9	21.75624 3	95	91
0.00	1	0.000000	22.38101 0	25.27825 2	22.45059 2	85	92
0.00	1	0.000000	26.33059	10.99054	14.58131	100	40

			9	4	2		
10.74	3	240.8701 78	26.06729 3	12.36436 3	14.81276 1	99	45
18.95	3	216.8094 48	25.80398 8	28.57541 7	23.83928 7	98	104
6.00	2	138.3011 93	30.54349 5	29.39970 6	24.99653 4	116	107
9.87	2	94.49793 2	29.22696 5	23.90443 4	21.75624 3	111	87
7.11	2	220.9928 89	33.43986 1	22.53061 7	21.29334 5	127	82
10.98	3	225.4071 35	22.64431 6	17.58487 1	17.12725 5	86	64
11.73	3	91.89382 2	31.07010 7	23.62967 1	22.91349 0	118	86
12.34	3	76.78836 1	34.49308 4	37.36785 1	29.16262 4	131	136
14.07	3	45.00000 0	41.33903 9	28.02588 8	25.92233 3	157	102
6.85	2	249.1260 83	31.59672 0	29.39970 6	25.92233 3	120	107
6.45	2	113.7318 80	27.12051 8	28.30065 2	24.76508 5	103	103
5.18	1	148.7258 30	29.22696 5	26.65207 1	24.07073 8	111	97
7.81	2	161.3566 44	26.06729 3	19.23345 4	19.44175 0	99	70
5.82	2	189.5832 52	28.17374 0	26.37730 8	23.60783 8	107	96
5.48	2	214.9397 13	32.91325 0	30.77352 5	26.84812 9	125	112

Banda 3 DN	Banda 4 DN	Densid ad A.	Clave color s	Color SS	Clave color h	Color SH	%Hume dad
76	67	0.92	10YR 5/4	yellowish brown	10YR 3/2	very dark grayish brown	7.99
100	116	0.75	10YR 4/2	dark grayish brown	10YR 3/2	very dark grayish brown	9.17
58	46	0.78	10YR 3/3	dark brown	10YR 2/2	very dark brown	8.46
88	96	0.67	10YR 3/2	very dark grayish brown	10YR 2/1	black	8.70
155	93	0.87	10YR 3/2	very dark grayish brown	10YR 2/2	very dark brown	7.76
87	101	0.75	10YR 3/2	very dark grayish brown	10YR 2/2	very dark brown	7.53

115	88	0.81	10YR 3/2	very dark grayish brown	10YR 2/2	very dark brown	15.74
101	104	0.66	7.5YR 4/2	brown	7.5YR 3/1	very dark gray	10.38
117	116	0.67	10YR 3/1	very dark gray	10YR 2/1	black	10.38
116	115	0.77	10YR 3/2	very dark grayish brown	10YR 2/1	black	7.76
86	79	0.80	7.5YR 4/2	brown	7.5YR 3/1	very dark gray	7.30
121	89	0.72	10YR 3/2	very dark grayish brown	10YR 2/2	very dark brown	8.70
98	120	0.77	10YR 3/2	very dark grayish brown	10YR 2/2	very dark brown	7.30
55	55	0.63	7.5YR 4/2	brown	10YR 2/1	black	9.17
65	73	0.92	10YR 4/3	brown	7.5YR 3/1	very dark gray	5.04
90	85	0.78	7.5YR 4/3	brown	7.5YR 2.5/2	black	6.61
116	105	0.74	10YR 3/2	very dark grayish brown	10YR 2/2	very dark brown	12.61
63	48	0.97	7.5YR 4/3	brown	7.5YR 2.5/2	very dark brown	5.49
103	91	0.93	10YR 3/2	very dark grayish brown	7.5YR 2.5/1	black	7.53
93	93	0.81	10YR 3/2	very dark grayish brown	10YR 2/2	very dark brown	8.46
84	87	0.92	7.5YR 4/4	brown	7.5YR 3/1	very dark gray	7.07
110	99	0.86	10YR 3/2	very dark grayish brown	10YR 2/2	very dark brown	6.38
103	105	0.91	10YR 4/3	brown	10YR 2/2	very dark brown	5.93
85	97	0.81	10YR 3/2	very dark grayish brown	10YR 2/2	very dark brown	6.84
91	86	0.92	10YR 3/2	very dark grayish brown	10YR 2/2	very dark brown	6.61
98	96	0.71	10YR 3/2	very dark grayish brown	10YR 2/2	very dark brown	9.89
108	126	0.77	10YR 3/2	very dark grayish brown	10YR 2/2	very dark brown	9.65
137	127	0.86	10YR 4/3	brown	10YR 2/2	very dark brown	5.71
118	126	0.86	10YR 3/2	very dark grayish brown	10YR 2/2	very dark brown	6.38
108	104	0.80	10YR	brown	7.5YR	very dark	7.07

			4/3		2.5/2	brown	
97	112	0.80	10YR 3/3	dark brown	10YR 2/2	very dark brown	8.70
99	111	0.76	7.5YR 4/3	brown	10YR 2/2	very dark brown	7.07
108	118	0.74	7.5YR 4/3	brown	7.5YR 2.5/2	very dark brown	5.49
102	116	0.70	10YR 3/2	very dark grayish brown	10YR 2/1	black	13.38
106	117	0.78	10YR 3/2	very dark grayish brown	10YR 2/2	very dark brown	6.61
128	124	0.70	10YR 3/2	very dark grayish brown	10YR 2/1	black	7.30
109	125	0.81	10YR 3/2	very dark grayish brown	10YR 2/2	very dark brown	7.53
113	122	0.77	10YR 4/2	dark grayish brown	10YR 2/1	black	7.30
112	122	0.81	10YR 3/2	very dark grayish brown	10YR 2/2	very dark brown	6.84
120	121	0.83	10YR 4/3	brown	10YR 2/2	very dark brown	5.93
85	99	0.80	10YR 3/2	very dark grayish brown	10YR 2/2	very dark brown	6.61
99	99	0.82	10YR 4/4	dark yellowish brown	10YR 3/4	dark yellowish brown	7.76
107	113	0.91	10YR 4/3	brown	10YR 3/2	very dark grayish brown	4.60
50	44	0.93	7.5YR 5/3	brown	7.5YR 3/2	dark brown	5.93
96	108	0.79	10YR 4/3	brown	10YR 2/2	very dark brown	8.23
117	110	0.84	10YR 4/3	brown	10YR 2/2	very dark brown	5.71
108	114	0.70	10YR 3/2	very dark grayish brown	10YR 2/2	very dark brown	7.99
95	91	0.81	10YR 4/3	brown	10YR 2/2	very dark brown	6.38
93	104	0.77	10YR 3/2	very dark grayish brown	10YR 2/2	very dark brown	8.23
151	109	0.81	10YR 4/3	brown	10YR 2/2	very dark brown	9.65
117	106	0.85	10YR 4/3	brown	10YR 3/2	very dark grayish brown	6.84
94	109	0.67	7.5YR 4/2	brown	10YR 2/1	black	10.13
91	113	0.74	10YR 3/2	very dark grayish brown	10YR 2/2	very dark brown	7.53

116	118	0.82	10YR 3/2	very dark grayish brown	10YR 2/2	very dark brown	7.07
95	115	0.83	10YR 4/2	dark grayish brown	10YR 2/2	very dark brown	7.30
99	113	0.72	10YR 3/1	very dark gray	10YR 2/1	black	7.99
83	101	0.65	10YR 3/2	very dark grayish brown	7.5YR 2.5/1	black	9.17
61	41	0.72	7.5YR 4/1	dark gray	10YR 2/1	black	10.86
120	97	0.68	7.5YR 4/2	brown	10YR 2/1	black	8.93
109	113	0.67	10YR 4/2	dark grayish brown	10YR 2/2	very dark brown	9.17
103	111	0.76	10YR 3/2	very dark grayish brown	7.5YR 2.5/2	very dark brown	8.23
65	60	0.72	10YR 5/3	brown	10YR 2/2	very dark brown	8.93
100	90	0.71	10YR 3/2	very dark grayish brown	10YR 2/2	very dark brown	8.70
108	114	0.78	10YR 3/1	very dark gray	10YR 2/1	black	7.99
95	110	0.74	10YR 5/2	grayish brown	10YR 2/2	very dark brown	9.41
118	105	0.73	10YR 3/2	very dark grayish brown	10YR 2/2	very dark brown	13.12
94	108	0.78	10YR 3/2	very dark grayish brown	10YR 2/1	black	7.30
99	112	0.79	10YR 3/3	dark brown	10YR 2/2	very dark brown	6.61
96	114	0.84	10YR 4/2	dark grayish brown	10YR 2/1	black	8.70
99	107	0.81	10YR 4/2	dark grayish brown	10YR 2/1	black	6.61
96	109	0.81	10YR 3/2	very dark grayish brown	10YR 2/2	very dark brown	8.70
110	112	0.83	10YR 4/2	dark grayish brown	10YR 2/1	black	7.07
111	113	0.82	10YR 3/3	dark brown	7.5YR 2.5/2	very dark brown	10.13
94	98	0.86	10YR 4/4	dark yellowish brown	10YR 3/3	dark brown	12.11
94	98	0.92	10YR 4/3	brown	7.5YR 2.5/2	very dark brown	9.17
97	105	0.85	10YR 4/4	dark yellowish brown	7.5YR 2.5/3	very dark brown	11.36
63	42	0.79	10YR	dark brown	7.5YR	very dark	9.17

			3/3		2.5/3	brown	
64	46	0.76	10YR 3/3	dark brown	7.5YR 2.5/3	very dark brown	8.46
103	110	0.85	10YR 3/3	dark brown	10YR 2/2	very dark brown	12.36
108	120	0.82	10YR 3/3	dark brown	10YR 2/2	very dark brown	8.23
94	91	0.83	10YR 3/3	dark brown	7.5YR 2.5/2	very dark brown	8.46
92	98	0.82	10YR 4/3	brown	10YR 2/2	very dark brown	7.99
74	84	0.84	10YR 3/6	dark yellowish brown	10YR 2/2	very dark brown	7.53
99	98	0.83	10YR 4/3	brown	10YR 2/2	very dark brown	6.61
126	114	0.83	7.5YR 4/3	brown	5YR 2.5/1	black	7.30
112	116	0.72	7.5YR 4/3	brown	7.5YR 2.5/2	very dark brown	8.23
112	114	0.66	10YR 3/3	dark brown	10YR 2/2	very dark brown	7.30
107	105	0.88	10YR 4/2	dark grayish brown	10YR 2/2	very dark brown	7.53
104	108	0.80	10YR 3/4	dark yellowish brown	10YR 2/2	very dark brown	7.07
84	75	0.86	10YR 4/3	brown	7.5YR 2.5/2	very dark brown	7.07
102	106	0.69	10YR 3/3	dark brown	10YR 2/2	very dark brown	9.41
116	120	0.84	10YR 3/3	dark brown	10YR 2/2	very dark brown	7.07

M.O	%C	Categoría	CA (T/ha)
7.54	3.77	3	104.10
8.63	4.31	3	97.06
11.29	5.64	4	132.06
15.30	7.65	5	153.79
12.06	6.03	4	157.35
13.23	6.61	4	148.80
8.87	4.43	1	107.75
14.65	7.32	4	145.02
17.06	8.53	5	171.49
6.12	3.06	3	70.64
9.88	4.94	3	118.52

16.85	8.43	5	181.98
12.36	6.18	4	142.74
17.40	8.70	5	164.44
8.97	4.49	3	123.82
9.10	4.55	3	106.50
8.36	4.18	3	92.79
6.88	3.44	3	100.12
8.73	4.36	3	121.74
7.02	3.51	3	85.24
8.87	4.43	3	122.36
8.88	4.44	3	114.57
8.46	4.23	3	115.55
12.22	6.11	4	148.47
10.09	5.04	1	139.19
11.40	5.70	4	121.38
11.53	5.76	4	133.17
9.03	4.52	3	116.51
9.04	4.52	3	116.65
7.11	3.56	3	85.35
6.89	3.44	3	82.66
8.80	4.40	3	100.36
8.74	4.37	3	97.01
12.33	6.17	2	129.47
13.60	6.80	2	159.10
16.10	8.05	3	169.05
9.57	4.79	3	116.31
12.10	6.05	4	139.75
12.29	6.15	1	149.37
9.81	4.90	1	122.08
12.19	6.09	1	146.27
6.70	3.35	3	82.38
7.84	3.92	3	106.97
6.49	3.25	3	90.56
13.61	6.80	4	161.23
9.06	4.53	3	114.17
12.90	6.45	4	135.47
12.34	6.17	4	149.89
12.36	6.18	4	142.80
8.50	4.25	3	103.26
7.95	3.98	3	101.38
15.24	7.62	3	153.20

13.13	6.57	4	145.74
10.34	5.17	3	127.19
11.74	5.87	4	146.22
9.99	5.00	3	107.94
14.45	7.23	4	140.89
14.27	7.13	4	154.06
15.22	7.61	3	155.29
14.97	7.49	3	150.49
8.11	4.05	3	92.41
13.08	6.54	2	141.30
17.08	8.54	3	181.95
11.60	5.80	4	135.69
11.85	5.92	4	131.51
12.18	6.09	4	133.42
15.88	7.94	5	185.79
12.07	6.03	1	142.98
11.39	5.69	1	143.49
14.59	7.29	4	177.27
7.75	3.88	3	94.20
12.06	6.03	4	150.19
6.53	3.27	3	80.34
4.89	2.44	2	63.05
5.96	2.98	3	82.18
5.16	2.58	2	65.78
7.16	3.58	3	84.83
9.41	4.70	3	107.23
10.97	5.48	1	139.82
13.02	6.51	2	160.17
11.09	5.55	1	138.08
10.85	5.43	4	133.47
3.78	1.89	1	47.58
11.25	5.62	1	140.02
9.53	4.77	1	118.67
14.71	7.35	4	158.82
10.31	5.15	3	102.02
8.83	4.41	3	116.51
8.97	4.49	3	107.69
7.24	3.62	3	93.40
13.64	6.82	4	141.13
10.46	5.23	3	131.78

Anexo 2: Cuestionario de campo: "Tipos de Cultivo de El Telar, Coatepec Harinas"

No.	Muestra	%C	Cultivo actual	Años	Cultivo anterior	Años	Estiércol	Aplicación	Fertilizantes
1	A1-M1	3.99	maíz						
2	A2-M1	4.63							
3	A2-M2	6.01							
4	A2-M3	8.17							
5	A2-M4	6.37							
6	A2-M5	6.97							
7	A2-M6	0.28	papa						
8	A2-M7	7.96							
9	B1-M1	9.37	papa						
10	B1-M2	3.23	papa						
11	B1-M3	5.19	papa						
12	B1-M4	8.99	maíz						
13	B1-M5	6.49	maíz						
14	B1-M6	9.33	papa						
15	B1-M7	4.60							
16	B1-M8	4.82	maíz						
17	B2-M1	4.66	maíz						
18	C1-M1	3.55	papa						

19	C1-M2	4.53	papa						
20	C2-M1	3.73	papa						
21	C2-M2	4.65	papa						
22	C2-M3	4.62	papa						
23	D1-M1	4.38	papa						
24	D2-M1	6.32	maíz						
25	E1-M1	0.28	papa						
26	E3-M1	6.16	maíz						
27	E3-M2	6.22	maíz						
28	F1-M1	4.67	papa						
29	F1-M2	4.71	maíz						
30	F1-M3	3.73	maíz						
31	F2-M1	3.68	maíz						
32	F3-M1	4.62	maíz						
33	F3-M2	4.51	maíz						
34	G1-M1	2.11	maíz						
35	G1-M2	2.22	maíz						
36	G1-M3	3.59	maíz						
37	G1-M4	5.04	papa						
38	G1-M5	6.36	papa						

39	G2-M1	1.60	papa						
40	G2-M2	0.24	maíz						
41	G2-M3	1.54	maíz						
42	G3-M1	3.54	maíz						
43	H1-M1	3.77	maíz						
44	H1-M2	3.36	maíz						
45	H1-M3	7.22	papa						
46	H1-M4	4.68	maíz						
47	H2-M1	6.95	maíz						
48	H2-M2	6.42	maíz						
49	H2-M3	6.56	maíz						
50	H3-M1	4.58	maíz						
51	I1-M1	4.16	papa						
52	I1-M10	3.40	papa						
53	I1-M2	6.92	papa						
54	I1-M3	5.42	papa						
55	I1-M4	6.01							
56	I1-M5	5.29	papa						
57	I1-M6	7.75	papa						
58	I1-M7	7.80	papa						

59	I1-M8	3.30	papa						
60	I1-M9	3.17	papa						
61	I2-M1	4.30	papa						
62	I2-M2	2.13	papa						
63	I2-M3	4.25	papa						
64	J1-M1	6.14	maíz						
65	J1-M2	6.37	maíz						
66	J2-M1	6.83	maíz						
67	J2-M2	8.35	maíz						
68	J2-M2	1.42							
69	J2-M4	1.22							
70	J2-M5	7.61	papa						
71	J2-M6	4.14							
72	J2-M7	6.32							
73	K1-M1	3.54	papa						
74	K1-M2	2.71	papa						
75	K2-M1	3.19	maíz						
76	K2-M2	2.84	maíz						
77	K3-M1	3.84	maíz						
78	K3-M2	5.01	maíz						

79	L1-M1	1.27	maíz						
80	L1-M2	2.10							
81	L1-M3	1.04	maíz						
82	L1-M4	5.75	maíz						
83	L1-M5	1.99	maíz						
84	L1-M6	0.99							
85	L3-M1	0.14	maíz						
86	L3-M2	7.81	maíz						
87	M1-M1	5.42	maíz						
88	M1-M2	4.49	maíz						
89	M2-M1	4.70	maíz						
90	M2-M2	3.80	maíz						
91	M2-M3	7.33	maíz						
92	M3-M1	5.48	maíz						