



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE PLANEACIÓN URBANA Y REGIONAL**

**ESTIMACIÓN DE LOS ALMACENES DE CARBONO**

**EN SUELOS DEL VALLE DE MEXICALI,**

**BAJA CALIFORNIA, MÉXICO.**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**LICENCIADO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**PRESENTA:**

**GUSTAVO ALEJANDRO DÍAZ OSORIO**

**DIRECTORES DE TESIS:**

**DR. EN C. GUSTAVO ÁLVAREZ ARTEAGA**

**M. EN C. ABEL IBÁÑEZ HUERTA**



**TOLUCA DE LERDO, ESTADO DE MÉXICO; OCTUBRE 2018.**

La presente investigación se realizó con fondos y bajo el auspicio del proyecto: “Actualización del diagnóstico del riesgo de afectación del Complejo Geotermoeléctrico Cerro Prieto sobre los suelos del Valle de Mexicali Baja California, México” en colaboración de entre CFE, PUES (UNAM), Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación de la Facultad de Ciencias UNAM, Campus Juriquilla.

### **Instituciones participantes.**

Comisión Federal de Electricidad

Programa Universitario de Estrategias para la Sustentabilidad UNAM.

Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación Facultad de Ciencias-Campus Juriquilla, UNAM

Facultad de Planeación Urbana y Regional, UAEM.

Universidad de Berkeley, USA

## *Agradecimientos*

*A la vida por permitirme superar una etapa más y culminarla con éxito.*

*Al Dr. Gustavo por todo su apoyo en la elaboración de esta tesis, además de su confianza, amistad y paciencia. Sus consejos y su forma de trabajo me han permitido formarme profesionalmente.*

*Al Mtro. Abel por permitirme formar parte de su proyecto, además de su confianza, amistad y apoyo en la mejora de este trabajo con sus buenos consejos.*

*A mis compañeros y amigos Itzel, Arintzy y Brayan por su colaboración en el trabajo de laboratorio, además de su apoyo y amistad que permitieron sobrellevar este trabajo.*

*A Ivon por todo su apoyo incondicional.*

## *Dedicatoria*

*A mis padres por todo su apoyo, confianza y amor brindados*

*que me permitieron culminar mis estudios y superar una etapa más en mi vida.*

*Esto fue posible gracias a ustedes.*

## Índice

Resumen.....	1
Abstract.....	2
Introducción.....	3
Antecedentes: historia del Valle de Mexicali .....	5
Planteamiento del problema .....	7
Justificación .....	8
Hipótesis .....	9
Objetivos .....	9
Capítulo I.....	10
Ciclo del carbono .....	11
Sumideros de carbono.....	14
Carbono orgánico del suelo .....	16
Secuestro y almacenes de carbono en ecosistemas áridos .....	17
Degradación y cambio del uso de suelo .....	20
Capítulo II.....	21
Caracterización ambiental.....	22
Localización .....	22
Topografía .....	22
Geología.....	24
Edafología .....	24
Clima .....	27
Uso de suelo y vegetación.....	28
Metodología .....	29
Etapa I (Recopilación y análisis de la información).....	30
Etapa II (Trabajo en campo) .....	30
Etapa III (Trabajo de laboratorio) .....	33
Etapa IV (Análisis de resultados).....	33
Capítulo III.....	35
Resultados de perfiles edáficos .....	36
Resultados del COS superficial .....	44
Comparación de los contenidos de COS en los diferentes usos de suelo .....	50

Almacenes de carbono y su distribución espacial.....	53
Distribución del COS en profundidad.....	59
Capítulo IV .....	62
Discusión .....	63
Conclusiones .....	70
Bibliografía .....	72

## Índice de Figuras

<i>Figura 1: Ciclo global del carbono.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2: Balance del carbono en el suelo .....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3: Área de estudio.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 4: Climograma del área de estudio .....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 5: Metodología general de la investigación.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 6: Esquema de muestreo por punto.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 7: Sitio de muestreo número cuatro .....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 8: Sitio de muestreo número seis.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 9: Sitio de muestreo número 12 .....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 10: Sitio de muestreo número 21 .....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 11: Resultados del uso de suelo agrícola .....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 12: Resultados del uso de suelo agrícola abandonado.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 13: Resultados del uso de suelo industrial.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 14: Resultados del uso de suelo matorral halófito.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 15: Contenidos de COS en los diferentes usos de suelo .....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 16: Perfiles edáficos.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 17: Distribución vertical de los almacenes de COS en los perfiles edáficos de la zona de estudio.....</i>	<i>60</i>

## Índice de Cuadros

<i>Cuadro 1: Almacenes de carbono.....</i>	<i>15</i>
<i>Cuadro 2: Cantidad mundial de C presente en la vegetación y en los reservorios hasta una profundidad de un metro .....</i>	<i>18</i>
<i>Cuadro 3: Evaluación del porcentaje de COS.....</i>	<i>44</i>
<i>Cuadro 4: Resultados del uso de suelo agrícola.....</i>	<i>45</i>
<i>Cuadro 5: Resultados del uso de suelo agrícola abandonado.....</i>	<i>47</i>
<i>Cuadro 6: Resultados del uso de suelo industrial. ....</i>	<i>48</i>
<i>Cuadro 7: Resultados del uso de suelo matorral halófito.....</i>	<i>49</i>
<i>Cuadro 8: Porcentaje de superficie del COS en el área de estudio .....</i>	<i>53</i>
<i>Cuadro 9: Almacenes de COS del uso de suelo agrícola. ....</i>	<i>54</i>
<i>Cuadro 10: Almacenes de COS del uso de suelo agrícola abandonado.....</i>	<i>55</i>
<i>Cuadro 11: Almacenes de COS del uso de suelo industrial.....</i>	<i>55</i>
<i>Cuadro 12: Almacenes de COS del uso de suelo matorral halófito .....</i>	<i>56</i>
<i>Cuadro 13: Porcentaje de superficie de los almacenes de COS en el área de estudio</i>	<i>58</i>
<i>Cuadro 14: Suelos reportados para el área de estudio.....</i>	<i>63</i>

## Índice de Mapas

<i>Mapa 1: Mapa topográfico.....</i>	<i>23</i>
<i>Mapa 2: Mapa Edafológico.....</i>	<i>25</i>
<i>Mapa 3: Ubicación de transectos y puntos de muestreo dentro de la zona de estudio.</i>	<i>31</i>
<i>Mapa 4: Distribución espacial del COS en la zona de estudio. ....</i>	<i>52</i>
<i>Mapa 5: Distribución espacial de los almacenes de COS en la zona de estudio. ....</i>	<i>57</i>

## Resumen

En los últimos años, en los ecosistemas áridos y semiáridos de México se han intensificado las actividades antropogénicas propiciando la degradación del suelo en aproximadamente 28% de su superficie, por su parte, la actividad agrícola de riego en este tipo de ecosistemas representa poco menos de la mitad de la superficie agrícola del país y ocupa aproximadamente 26% de estos ecosistemas. Sin embargo, esta situación ha ocasionado la alteración de los ciclos biogeoquímicos, de los cuales el ciclo del carbono resulta particularmente importante por su connotación económica y ambiental.

Considerando que alrededor del 60% del territorio nacional alberga este tipo de ecosistemas y poco menos de la mitad de la superficie agrícola se lleva a cabo sobre sus suelos, resulta necesario conocer su capacidad para preservar sus almacenes de carbono bajo diferentes usos y manejos, por lo que la presente investigación se realizó dentro del Valle de Mexicali, Baja California y tuvo como objetivo estimar el contenido y la variabilidad espacial de los almacenes de carbono orgánico en los suelos bajo distintos usos, para identificar su potencial como reservorios de carbono. Para tal efecto se delimitaron seis transectos con 23 puntos de muestreo donde se identificaron cuatro condiciones de uso como son: a) Agrícola, b) Agrícola abandonado, c) Industrial y d) remanentes de matorral halófito.

Para cada sitio de muestreo se tomaron muestras de suelo superficial (30 cm), además se eligieron 4 sitios de verificación a 1.5 m de profundidad. Las muestras se analizaron en laboratorio para determinar el contenido (%) y almacenes de carbono orgánico (ton/ha). Los resultados indicaron reservas superficiales de carbono de 48.9 a 49.2 ton/ha para los suelos de uso industrial, 24.7-55.8 ton/ha para agricultura abandonada; en el caso de uso agrícola fue de 9.2-54.2 ton/ha y 23.4 y 29.3 ton/ha en remanentes de matorral halófito. Mediante los resultados obtenidos se identificó el potencial de estos suelos para incrementar sus reservas de carbono y contribuir a la mitigación de gases de efecto invernadero y/o bien, para aumentar la disponibilidad de nutrientes para las actividades agrícolas de la zona.

## **Abstract**

Soil degradation in arid and semiarid ecosystems of Mexico have been intensified by anthropogenic activities affecting approximately 28% of soils. In particular, agriculture irrigation in these ecosystems represents approximately 26% of these, just under half of the agricultural surface of the country. However, this situation has caused the alteration of the biogeochemical cycles, of which the carbon cycle is particularly important due to its economic and environmental connotation.

Considering that around 60% of the national territory harbors arid and semiarid ecosystem and nearly half of the agricultural surface is carried out on its soils, it is necessary to know its capacity to preserve its carbon stocks under different land uses and managements. This is why this research in the Valley of Mexicali, Baja California was conducted in order to estimate the content and spatial variability of organic carbon stocks in soils under different uses to identify its potential as carbon stocks. For this purpose, six transects with 23 sampling points were delimited, where four conditions of use were identified: a) Agricultural, b) Abandoned Agricultural, c) Industrial and d) remnants of halophyte shrub.

For each sampling site, samples of soil surface (at 30 cm depth) were taken, in addition, other 4 verification sites at 1.5 m depth were sampled. The samples were analyzed at the laboratory to determine the content (%) and organic carbon stocks (ton/ha). The results indicated surface carbon stocks of: 48.9 to 49.2 ton/ha for industrial use soils, 24.7-55.8 ton/ha for abandoned agriculture, 9.2-54.2 ton/ha for agricultural use and 23.4 and 29.3 ton/ha for remnants of halophyte shrub. With the results, the potential of these soils to increase their carbon stocks was identified to contribute to the mitigation of greenhouse gases and/or to increase the availability of nutrients for agricultural activities in the area.

## Introducción

Los ecosistemas áridos y semiáridos son reconocidos por su alta biodiversidad y endemismo, así como por la extensión que ocupan dentro del territorio nacional (60%), (Montaño, *et al.*, 2016); sin embargo, la presión a la que son sometidos por su cambio de uso de suelo principalmente para actividades agrícolas han ocasionado la degradación del suelo de una superficie aproximada del 28% (SEMARNAT, 2014).

En el contexto nacional según SEMARNAT (2017), en el territorio mexicano el 44.9% de los suelos se encuentran degradados con algún o varios tipos de degradación. De la superficie afectada, el 18% es por degradación química, 12% hídrica, 9% por degradación eólica y el 6% es física. Otro aspecto vinculado a la degradación del suelo es la pérdida de fertilidad y en consecuencia, la alteración de los ciclos biogeoquímicos naturales, de los cuales el ciclo del Carbono (C) resulta particularmente importante por su connotación económica y ambiental.

El Carbono Orgánico del Suelo (COS) es un componente importante del ciclo global del C, pues representa la mayor reserva de los ecosistemas terrestres, siendo los flujos entre él y la atmósfera determinantes para que actúe como sumidero (captura) o expulsor (emisión) de CO<sub>2</sub> (FAO, 2002). Las regiones áridas y semiáridas presentan bajos contenidos de COS en comparación con otros ecosistemas, pero su dinámica es esencial para regular la disponibilidad de otros nutrientes esenciales y determinantes para la fertilidad del suelo (Montaño, *et al.*, 2016).

El potencial de los ecosistemas áridos para secuestrar C es alto, no solo debido a su gran magnitud, sino también porque históricamente, los suelos de las tierras áridas han perdido cantidades significativas de C (FAO, 2007). Por lo anterior resulta necesario entender la capacidad de estos ecosistemas para secuestrar y preservar sus reservorios de C ante los cambios de uso de suelo, así mismo, es importante conocer las condiciones en las que se encuentran dichos reservorios y la forma en que se distribuyen actualmente. Para ello, se realizó la presente investigación y que tiene por objetivo:

Estimar el contenido y la variabilidad espacial de los almacenes de carbono orgánico en los suelos bajo distintos usos en el Valle de Mexicali, para identificar su potencial como reservorios de carbono.

Para tal efecto, el producto de esta investigación se desarrolló en cuatro capítulos.

- En el primer capítulo se realizó una recopilación documental para tener los fundamentos teóricos que sustentan la presente investigación.
- En el segundo capítulo se efectuó la caracterización ambiental regional para conocer las atributos biofísicos de la zona de estudio, además de elaborarse el esquema metodológico propuesto para el desarrollo técnico del trabajo.
- En el tercer capítulo se presentaron los resultados del procesamiento de muestras en laboratorio para la obtención de indicadores edáficos, así como la conformación de la base de datos para su procesamiento estadístico.
- En el cuarto capítulo se analizaron los resultados, se elaboró la discusión y las conclusiones de la investigación.

### **Antecedentes: historia del Valle de Mexicali**

El surgimiento económico del valle y la ciudad de Mexicali como lo indica Grijalva (2014), fue consecuencia de la canalización en el territorio mexicano de las aguas del Río Colorado, este hecho junto a la demanda de algodón en 1914-1918, propició que los propietarios de las tierras del delta mexicano del Colorado optaran por intensificar su cultivo. Posteriormente y debido en gran parte al aislamiento del valle con respecto del resto del macizo continental mexicano durante el “periodo revolucionario” (1910-1920), la región sufrió escasa perturbación y por el contrario, experimentó gran prosperidad agrícola. A partir de la segunda década del siglo XX, el algodón dominó la agricultura de riego en el norte de México, al punto que en esta parte se producía 95% del algodón del país.

Según Grijalva (2014), desde sus orígenes como espacio dedicado al cultivo del algodón, la región experimentó los adelantos tecnológicos de los países industrializados: la mecanización temprana de sus procesos agrícolas lo colocó en una situación de ventaja frente a otros espacios similares; sin embargo, esta bonanza llegó a su término por diversas causas, entre las que se pueden mencionar el surgimiento de las fibras sintéticas, los problemas derivados de la explotación indiscriminada de la tierra, la aparición de plagas depredadoras que minaron los índices de producción agrícola y el aumento de los niveles de salinidad en las aguas del Río Colorado, lo cual contribuyó a que el “oro blanco” dejara de ser un cultivo redituable en el valle.

En las últimas décadas, “encontramos un valle agrícola pobre, en crisis, con problemas de comercialización de los cultivos tradicionales, hasta con desempleo que repercute fundamentalmente en el sector ejidal y de la pequeña propiedad; pero por el otro, tenemos un valle agrícola rico, con especialización en algunos cultivos hortícolas que tienen una gran demanda en los mercados internacionales y que beneficia a unos cuantos productores” (Moreno & López, 2005, p. 139).

En los últimos años, los cultivos que más han sobresalido según el Gobierno del Estado de Baja California (2015), son: trigo, cebada, algodón, alfalfa, avena, ajonjolí, cártamo, sorgo forrajero, pasto “rye grass”, hortalizas para exportación y consumo regional; chile, cebolla, col, rabanito, cilantro, lechuga, brócoli, betabel, coliflor, jitomate, tomatillo, pepino, calabaza, quelite espárrago, sandía, melón, maíz, elote, vid, nopal y frijol.

Por otra parte, la actividad industria tuvo su comienzo en 1959, como consecuencia del descubrimiento de yacimientos geotérmicos en la zona conocida como Laguna de los Volcanes, dando origen a uno de los campos geotérmicos más grandes del mundo: el Complejo Geotérmico de Cerro Prieto (CGCP) (CICESE, 1998).

El CGCP según CICESE (1998), se encuentra ubicado en la porción centro occidental del Valle de Mexicali y cubre una extensión de 70 km<sup>2</sup> aproximadamente. La generación de energía eléctrica a partir de la extracción de vapor se inició en 1973, con la entrada en operación de la planta Cerro Prieto 1, con una capacidad instalada de 75 MW. Para 1981 se tenían 180 MW, sin embargo, el período más importante fue durante 1986 y 1987, cuando se integraron a la producción cuatro unidades de 110 MW.

En la última década, el CGCP cuenta con un aproximado de 163 pozos productores que generan aproximadamente 5000 GW/h que a su vez surten de electricidad a las poblaciones de Tijuana, Mexicali, Ensenada, Tecate y San Luis Rio Colorado, lo que representa toda la franja fronteriza de Baja California y una pequeña parte del Estado de Sonora (CFE, 2007).

## **Planteamiento del problema**

Por su condición natural, las zonas áridas y semiáridas poseen una baja productividad vegetal y por ende un menor contenido de carbono orgánico en sus suelos, en comparación con otros ecosistemas de vegetación abundante. Cabe señalar que el cambio del uso de suelo en particular por la actividad agrícola la cual abarca según SEMARNAT (2014) aproximadamente 26% de estos ecosistemas, ha provocado la degradación del suelo afectando su calidad y los ciclos biogeoquímicos como es el caso del C, el cual es importante para esta investigación.

Según SEMARNAT (2014), el porcentaje de zonas áridas y semiáridas degradadas por el cambio de uso de suelo en México es de aproximadamente 28%; así mismo, según FAO (2007), este provoca la pérdida de la cubierta vegetal y consecuentemente la calidad del suelo. La disminución en la calidad del suelo conduce a la reducción en la reserva de COS y a un incremento en la emisión de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) hacia la atmósfera, además, es responsable de la pérdida en la capacidad de retención del agua y la productividad de las plantas.

Por su parte, el Valle de Mexicali, Baja California ha tenido un gran auge económico con dos usos de suelo como son: el agrícola y el geotermoeléctrico que han adquirido a lo largo del siglo pasado y hasta la actualidad gran relevancia económica. La actividad agrícola de riego se ha desempeñado en el valle a lo largo de un siglo, lo que ha llevado al cambio de uso de suelo de matorral a agricultura de riego provocando la degradación física y química del suelo además de reducir los almacenes de C. Según Matus (1994, citado en Cotler *et al.*, 2016, p. 127), las prácticas agrícolas como la inversión del suelo y la destrucción de los agregados por la labranza convencional desprotege y expone a la intemperie a la materia orgánica que está ocluida en pequeños agregados, la cual puede oxidarse y convertirse en CO<sub>2</sub>, estas pérdidas reducen la calidad y fertilidad del suelo siendo importantes para esta actividad económica.

Por otra parte, el uso de suelo industrial geotermoeléctrico también ha afectado la calidad del suelo pues diferentes estudios como Ramírez & García (2004) y Ramírez (2006), denotan que el proceso industrial que extrae vapor del subsuelo para generar energía eléctrica ha provocado incrementos notables en la concentración de sales solubles por desechos como la salmuera en los suelos propiciando la degradación química de los suelos que se encuentran dentro y en la periferia de la zona industrial geotermoeléctrica, inhabilitándolos e impidiendo que la vegetación pueda desarrollarse adecuadamente para incorporar C al suelo.

Los usos de suelo de la zona de estudio han provocado la degradación del suelo y alterado sus condiciones naturales, disminuyendo su calidad y afectando los almacenes de C, por tales motivos es que se desarrolló la presente investigación para estimar los almacenes de COS en el Valle de Mexicali y determinar en qué medida contribuyen los distintos usos de suelo en la preservación o expulsión de este componente considerando la tridimensionalidad del suelo.

### **Justificación**

Las zonas áridas y semiáridas por su condición natural han sido poco estudiadas en cuanto a almacenes de C respecta, teniendo a nivel mundial mayor relevancia los ecosistemas tropicales y boscosos en este tipo de estudios. En México, este tipo de ecosistemas ocupa cerca del 60% de la superficie del país, sin embargo, aun siendo relevantes por su magnitud en el territorio mexicano han sido poco estudiados por lo que los estudios sobre la dinámica del C en este tipo de ecosistemas presentan información escasa y fragmentada ya que la mayoría de las investigaciones se limita a estudiar el COS en los primeros 30 cm de profundidad (Ayala, 2018; Montaña, *et al.*, 2016).

Por otra parte, los estudios sobre el cambio de uso de suelo en las diferentes regiones de México se han centrado en el trópico húmedo o en bosques templados, pero las zonas áridas año con año también se ven afectadas por dicho fenómeno que es el resultado de actividades humanas en las que destaca la actividad agrícola (Ayala, 2018).

La actividad agrícola predomina en el Valle de Mexicali, según SAGARPA (2017), ocupa alrededor de 80 mil hectáreas anualmente y la zona de estudio no es la excepción ya que abarca poco más de la mitad del área. Por lo tanto, es esencial el secuestro de C en los suelos de estos ecosistemas sobre todo cuando son ocupados para la agricultura, pues mejora su calidad y mantiene la fertilidad, mejorar su estructura, capacidad de retención de humedad y nutrimentos, entre otras funciones (FAO, 2007).

### **Hipótesis**

Los usos de suelo dentro del Valle de Mexicali, Baja California, determinan el contenido y la variabilidad espacial de los almacenes de carbono orgánico del suelo, estableciendo su función como reservorios o emisores de este componente.

### **Objetivos**

- General

Estimar el contenido y la variabilidad espacial de los almacenes de carbono orgánico en los suelos bajo distintos usos en el Valle de Mexicali, para identificar su potencial como reservorios de carbono.

- Específicos
  - Realizar la caracterización biofísica de la zona de estudio, así como el esquema metodológico para el trabajo de campo y laboratorio.
  - Determinar la variabilidad espacial del COS almacenado en los primeros 30 cm de profundidad.
  - Establecer mediante la elaboración de perfiles edáficos los patrones de distribución vertical de los almacenes de COS para los suelos representativos de los principales usos dentro de la zona de estudio.
  - Determinar si los suelos de la zona de estudio funcionan como almacenes de carbono orgánico y cuáles son los usos de suelo con mayor potencial para este fin.



## **Capítulo I**

### **Marco Teórico**

En el presente capítulo se abordarán los temas que serán el sustento teórico del presente trabajo, considerando al ciclo del C, así como la función e importancia de este componente para la viabilidad de los ecosistemas áridos. Con estos temas se pretende conocer los fundamentos teóricos que rigen la dinámica del ciclo del C en estos sistemas y como son alterados por las actividades humanas.

## Ciclo del carbono

El ciclo global del C se puede ver como una serie de flujos y almacenes de C dentro de los diferentes componentes del planeta (IPCC, 2013). “Como sucede con todos los elementos, la disponibilidad de C no es infinita en el planeta y, por lo tanto, circula entre la materia orgánica y el ambiente fisicoquímico de manera constante” (Jaramillo, 2004, p. 77).

El ciclo global del C ocurre a diferentes escalas de tiempo, para ello se divide en dos grandes grupos, uno de largo plazo (geoquímico) y otro relativamente más corto (biogeoquímico).

- ✓ Geoquímico: consiste en enormes depósitos de C en rocas y sedimentos que intercambian C con el dominio rápido a través de emisiones volcánicas de CO<sub>2</sub>, meteorización química, erosión y formación de sedimentos en el fondo del mar (Sundquist, 1986). Los tiempos de rotación de los reservorios de este dominio son de 10,000 años o más (IPCC, 2013).
- ✓ Biogeoquímico: consiste en grandes flujos de intercambio y pérdidas relativamente rápidas, se constituye de C en la atmósfera, el océano, la vegetación, los suelos y las aguas dulces, los tiempos de renovación de estos depósitos varían desde años hasta milenios para los principales reservorios como la vegetación y el suelo (IPCC, 2013). A su vez dentro de este ciclo dominan dos grandes transferencias de C anuales como son:
  1. El flujo de CO<sub>2</sub> de la atmósfera a las plantas como resultado de la fotosíntesis; “Las plantas superiores adquieren el CO<sub>2</sub> atmosférico por difusión a través de pequeñísimos poros de las hojas conocidos como estomas, y es transportado a los sitios donde se lleva a cabo la fotosíntesis, produciendo carbohidratos” (Jaramillo, 2004).
  2. “El regreso de CO<sub>2</sub> a la atmósfera como resultado de la descomposición y mineralización de la materia orgánica. En periodos donde la producción de

materia orgánica ha excedido a su descomposición, el C orgánico se ha acumulado en sedimentos geológicos preservados por millones de años” (Jaramillo, 2004).

En la Figura 1, se muestra el ciclo global del C según el esquema modificado de (Schlesinger, 1997) y actualizado con información del IPCC (2013).

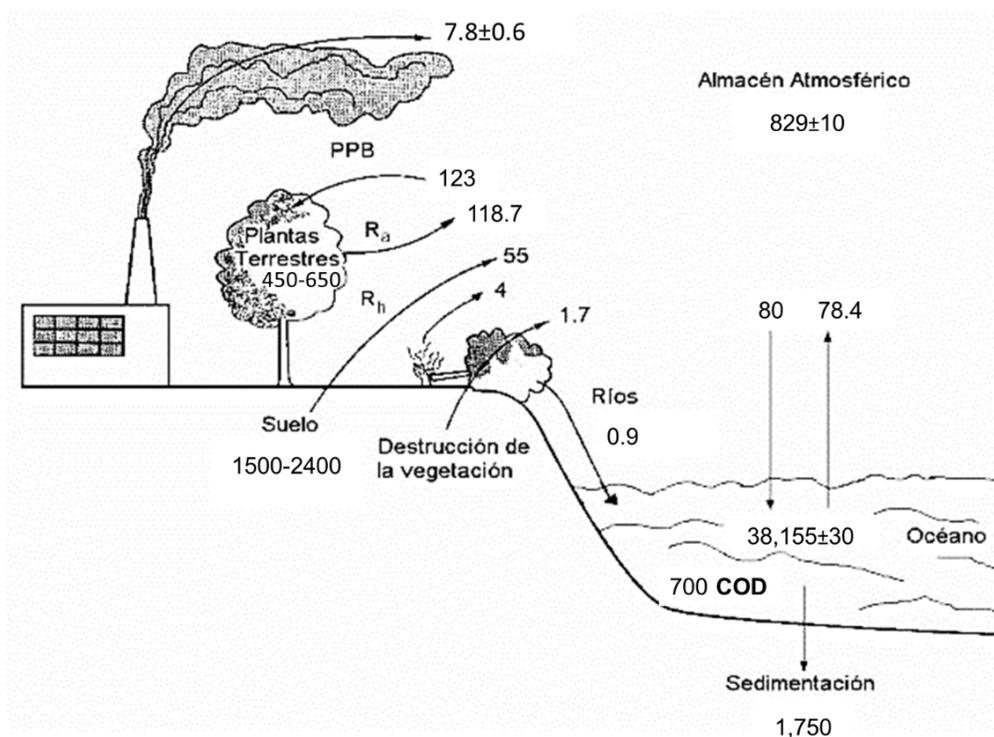


Figura 1: Ciclo global del carbono

Fuente: (Jaramillo, 2004). Los almacenes están expresados en Pg C (1 Pg [Petagramo] =  $10^{15}$  g), y los flujos en Pg C/año. PPB = producción primaria bruta;  $R_a$  = respiración autótrofa;  $R_h$  = respiración heterótrofa; COD = carbono orgánico disuelto.

“La productividad primaria bruta (PPB) de un ecosistema es la tasa con que la biomasa es producida por unidad de superficie por parte de los productores primarios (fundamentalmente por las plantas). Se define como la fijación total de energía a través de la fotosíntesis y puede ser expresada en unidades de materia orgánica seca ( $\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ ). Una parte de la PPB es eliminada del sistema a través de la respiración. La

diferencia entre la PPB y la respiración se conoce con el nombre de productividad primaria neta (PPN) y representa la tasa real de producción de nueva biomasa que queda a la disposición del consumo por parte del resto de organismos heterótrofos del sistema (bacterias, hongos, animales)” (Rodríguez, 2012).

En los ecosistemas, “el carbono fijado en la PPB puede abandonar el sistema en forma de carbono inorgánico (generalmente en forma de  $\text{CO}_2$ ) vía respiración autótrofa ( $R_a$ ), o después de ser consumido por otros organismos, vía respiración heterótrofa ( $R_h$ ). Cuando la PPB es mayor que la respiración total, el sistema está fijando carbono a mayor velocidad que su liberación, y el ecosistema actúa como sumidero de C. Sin embargo, cuando la respiración es mayor que la PPB, el sistema está liberando C a mayor velocidad que su fijación, y el ecosistema actúa como fuente de C” (Rodríguez, 2012).

Por otra parte, el almacenamiento de C en los suelos es el balance entre la incorporación de material vegetal muerto (desecho de hojas y raíces) y las pérdidas de los procesos de descomposición y mineralización ( $R_h$ ) (FAO, 2007). Como se puede observar en la figura 1, en los ecosistemas terrestres los suelos son el reservorio más grande de C, el cual contiene hasta tres veces más de este componente que la vegetación o la atmósfera (Schlesinger & Bernhardt, 2013), almacenando (1 500 Pg a 1 m de profundidad y 2 500 Pg a 2m) (FAO, 2007).

Según FAO (2007), bajo condiciones aeróbicas la mayor parte del C que se incorpora a los suelos es lábil y, por lo tanto, será devuelto a la atmósfera a través de la  $R_h$ , generalmente, solo el uno por ciento de lo que ingresa al suelo (55 Pg/año) se acumula en fracciones más estables (0,4 Pg/año) con un largo tiempo de residencia (ver Figura 2).

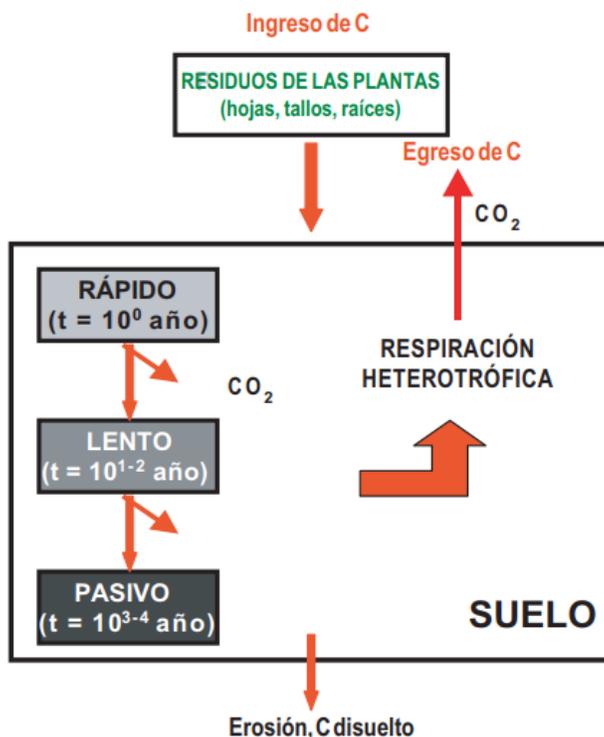


Figura 2: Balance del carbono en el suelo

Fuente: (FAO, 2007).

## Sumideros de carbono

El concepto de sumidero se adoptó como un aspecto clave en la Convención Marco sobre Cambio Climático de 1992, un sumidero de gases de invernadero, según la Convención, es un sistema o proceso por el que se extrae de la atmósfera un gas, o gases, y se almacena un tiempo variable (tiempo de residencia), que puede ser muy largo (Figueroa, 2007).

Según el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España (2015), los sumideros son sistemas capaces de acumular o liberar C; algunos ejemplos de estos almacenes son la biomasa forestal, los productos de la madera o los suelos; si la cantidad de C que entra en estos almacenes es mayor que la que sale de ellos, serán considerados sumideros (captadores de CO<sub>2</sub> de la atmósfera), en el caso contrario, serán una fuente de gases de efecto invernadero.

Los diferentes almacenes de C que existen en el suelo tienen distintos tiempos de residencia variando de pocos años a décadas o a más de 1 000 años (fracción estable), dependiendo de la composición física y química de los materiales (FAO, 2002).

En el siguiente cuadro se pueden observar los distintos almacenes de C de los cuales el más importante para el presente trabajo es el suelo.

*Cuadro 1: Almacenes de carbono*

Almacén		Descripción
<b>Biomasa Viva</b>	Biomasa sobre tierra	Toda la biomasa viva sobre el suelo, incluyendo tronco, ramas, semillas, hojas y tocones.
	Biomasa bajo tierra	Toda la biomasa de las raíces vivas. Las raíces finas de menos de 2mm de diámetro son, a menudo, excluidas por su proceso continuado de degradación-regeneración.
<b>Materia Orgánica Muerta</b>	Madera muerta	Toda biomasa no viva, aparte de la hojarasca. Incluye madera sobre la superficie, raíces muertas y tocones mayores o iguales a 10 cm, de diámetro.
	Hojarasca (litter)	Incluye toda la biomasa no viva de pequeño tamaño en varios estados de descomposición, sobre el suelo mineral u orgánico.
<b>Suelos</b>	Materia orgánica del suelo	Incluye carbono orgánico en suelos orgánicos y minerales.

Fuente: (IPCC, 2003).

## **Carbono orgánico del suelo**

Como se puede observar en el Cuadro 1, el carbono orgánico del suelo (COS) es el principal reservorio dentro de los ecosistemas terrestres. Este componente ha recibido particular atención debido a que puede ser emitido o capturado por el suelo en función del manejo de éste (Galicía, *et al.*, 2016), por lo que conocer su dinámica permite establecer las acciones conducentes a su preservación por más largo plazo (Rojas, *et al.*, 2017).

El COS es un componente importante del ciclo global del C, pues representa la mayor reserva en interacción con la atmósfera, los flujos entre él y la atmósfera son importantes y pueden ser positivos bajo la forma de captura o negativos como emisión de CO<sub>2</sub> (FAO, 2002).

El COS se encuentra en forma de residuos orgánicos de vegetales, animales y microorganismos, cuya composición va desde formas lábiles de escasa permanencia en el suelo, hasta moléculas altamente condensadas que contienen abundancia de grupos fenólicos y carboxílicos con distinto peso molecular, los grupos carboxilos modifican la calidad del suelo al proveer sitios de capacidad de intercambio y material cementante para constituir agregados, a diferencia de los grupos fenólicos que solo constituyen fuente de energía para los microorganismos (Jackson, 1964 y Cotler, *et al.*, 2016). En condiciones naturales, el contenido de COS resulta del balance entre la incorporación al suelo del material orgánico fresco y la salida de C del suelo en forma de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, erosión y lixiviación (Martínez, *et al.*, 2008).

Según Martínez *et al.* (2008), el COS se correlaciona con la mayoría de las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, tiene un efecto importante en la agregación de las partículas del suelo, existiendo una relación entre tamaño de los agregados y su contenido, mientras mayor es el contenido de COS lábil (carbono de la fracción del suelo más recientemente incorporado), mayor es el tamaño de los agregados y consecuentemente interviene en la distribución del espacio poroso, afectando diversas

propiedades físicas como: humedad aprovechable, capacidad de aire, movimiento de agua y gases, además interviene en las propiedades químicas del suelo, aumenta la capacidad de intercambio catiónico y la capacidad de buffer sobre la reacción del suelo.

El COS es uno de los principales indicadores para determinar la calidad del suelo (FAO, 2007; Martínez *et al.*, 2008). Como se explica en párrafos anteriores es un elemento fundamental para conservar los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo, es un reservorio de C que se encuentra en constante dinámica, por lo que al propiciar cambios en las condiciones naturales del suelo se puede perder su calidad.

Alrededor del 13% del COS total es lábil y se perderá cuando el suelo pierda la cobertura vegetal, el resto del C es relativamente estable, por lo que puede perderse a mediano plazo si se deja el suelo desnudo (Paz, *et al.*, 2016). Por lo que se puede concluir que al cambiar el uso de suelo de algún ecosistema y dejarlo desprovisto de su cubierta vegetal además de afectar la calidad del suelo, se perderá una parte del COS que se encontraba almacenado para integrarse a la atmosfera como emisiones de CO<sub>2</sub> contribuyendo al cambio climático con dichas emisiones.

### **Secuestro y almacenes de carbono en ecosistemas áridos**

Alrededor del 47% de la superficie de la tierra puede catalogarse como tierras áridas, aunque no existen límites claros, las tierras áridas se consideran como aquellas áreas donde el promedio de lluvias es menor que las pérdidas potenciales de humedad a través de la evaporación y la transpiración (FAO, 2007).

En el Cuadro 2 podemos observar la cantidad de C almacenada en suelos de distintos tipos de ecosistemas del Mundo de los cuales los más relevantes para el presente trabajo son los desiertos y semidesiertos.

Cuadro 2: Cantidad mundial de C presente en la vegetación y en los reservorios hasta una profundidad de un metro

Bioma	Área	Carbono mundial almacenado (Gt C)		
	(10 <sup>9</sup> ha)	Vegetación	Suelo	Total
Bosques tropicales	1.76	212	216	428
Bosques templados	1.04	59	100	159
Bosques boreales	1.37	88	471	559
Sabanas tropicales	2.25	66	264	330
Herbazales templados	1.25	9	295	304
Desiertos y semidesiertos	4.55	8	191	199
Tundra	0.95	6	121	127
Humedales	0.35	15	225	240
Tierras de cultivo	1.60	3	128	131
<b>Total mundial</b>	<b>15.12</b>	<b>466</b>	<b>2011</b>	<b>2477</b>

Nota: Aunque existe una incertidumbre considerable con respecto a las cifras indicadas, dada la ambigüedad de las definiciones de bioma, esta tabla proporciona sin embargo una panorámica general de la magnitud del carbono almacenado en los sistemas terrenos.

Fuente: (IPCC, 2000).

En el cuadro anterior se puede observar que los desiertos y semidesiertos abarcan la mayor área de terreno con respecto a los demás biomas, pero el contenido de C en sus suelos corresponde a los más bajos a nivel mundial, sin embargo, todo el bioma almacena más C con respecto a las tierras de cultivo, la tundra y los bosques templados.

Los desiertos y semidesiertos no poseen grandes cantidades de vegetación, sin embargo, si tienen importancia como sumideros de C debido a su gran extensión en el mundo.

“El potencial de las tierras áridas para secuestrar C es alto, no solo debido a su gran magnitud, sino también porque históricamente, los suelos de las tierras áridas han perdido cantidades significativas de C y falta una cantidad importante para su saturación” (FAO, 2007, p. 17). Además de que los suelos secos tienen menor probabilidad de perder C que los suelos húmedos (Glenn, *et al.*, 1992). Debido a que la falta de agua limita la mineralización del suelo y por tanto el flujo de C hacia la atmósfera, en consecuencia, el tiempo de residencia medio del C en las tierras áridas es largo, algunas veces más largo que en los suelos de los bosques (FAO, 2007).

En México estos ecosistemas ocupan aproximadamente 101.5 millones de hectáreas, poco más de la mitad del territorio, de esta superficie, las zonas áridas representan el 15.7%, las semiáridas el 58% y el 26.3% restante corresponde a las zonas subhúmedas secas (SEMARNAT, 2014). Por ello la Comisión Nacional de Zonas Áridas (CONAZA) define como zonas áridas a aquellas superficies del territorio nacional en donde las precipitaciones son menores de 250 mm anuales, y como semiáridas a aquellas en donde la precipitación oscila entre 250 y 500 mm.

Según Montaña, *et al.* (2016) este tipo de ecosistemas se pueden convertir en fuente o sumidero de C, dependiendo de la cantidad de lluvia, por lo que las emisiones de C asociadas a la respiración del suelo se presentan cuando existe un pulso de humedad, en estos ecosistemas la productividad neta del ecosistema, la respiración del suelo, la producción y la descomposición de la hojarasca están determinadas por la variabilidad de la precipitación, aunque la descomposición depende también de la radiación solar y temperatura.

Si bien el contenido de carbono y la capacidad de fijar CO<sub>2</sub> por unidad de superficie en las tierras áridas son bajos, pueden de cualquier manera hacer una contribución importante a la captura global de carbono (FAO, 2002). Además, el C en este tipo de ecosistemas es esencial para regular la disponibilidad de nutrientes, estructura, retención de humedad reducir la erosión, entre otras funciones (Brady y Weil, 2002, citado en Paz, *et al.*, 2016, p. 290).

## **Degradación y cambio del uso de suelo**

Los estudios de caso sobre el cambio de uso de suelo en las diferentes regiones de México se han concentrado en el trópico húmedo o en bosques templados, sin embargo, las zonas áridas año con año se ven afectadas por dicho fenómeno que es el resultado de actividades humanas, que incluyen el desarrollo de vías de comunicación, la expansión urbana, agrícola, ganadera, minera y turística (Ayala, 2018). Tales cambios afectan el ambiente físico y biológico, erosionando el suelo, modificando el hábitat, las interacciones biológicas y los procesos ecosistémicos (Arriaga, 2009).

Según SEMARNAT (2017), en el territorio mexicano el 44.9% de los suelos se encuentran degradados con algún o varios tipos de degradación, de esta superficie degradada el 18% es por degradación química, el 12% es por degradación hídrica, el 9% es por degradación eólica y el 6% es por degradación física.

“Los suelos de las regiones áridas y semiáridas se caracterizan principalmente por tener baja fertilidad para la producción agrícola, escaso desarrollo, textura arenosa y pedregosidad, además de ubicarse en regiones con una escasa precipitación que limita el desarrollo y crecimiento de las especies vegetales” (Camargo & Esperón, 2005).

Según Montaña *et al.* (2016), el cambio de uso de suelo de este tipo de ecosistemas a matorral perturbado, cultivos agrícolas de temporal o riego, pastizales sobrepastoreados y uso urbano, han reducido el almacén de COS entre 30 y 76%. Cuando estos ecosistemas se utilizan para la agricultura de riego se observan incrementos de hasta 481% en las emisiones de CO<sub>2</sub> poco tiempo después del riego, en comparación con el cultivo de temporal. La labranza acentúa las emisiones de CO<sub>2</sub> al reducir la estabilidad de los agregados del suelo, exponiendo COS encapsulado a la degradación microbiana y alterando el microclima del suelo e influenciando la actividad y la diversidad de la fauna del suelo (Six, *et al.*, 2002).



## **Capítulo II**

### **Materiales y Métodos**

En el presente capítulo se desarrolla la caracterización ambiental que sirvió de apoyo para conocer los elementos físicos y naturales de la zona de estudio, además se describe la metodología de trabajo que se utilizó para poder desarrollar la presente investigación.

## Caracterización ambiental

### Localización

El presente trabajo se realizó en el Valle de Mexicali, Baja California, la zona de estudio se encuentra al suroeste del municipio de Mexicali entre las coordenadas 32°23'9.34" N y 115° 9'30.25" O, con una extensión de 450 km<sup>2</sup>, está conformada por cuatro usos de suelo predominantes como son: agrícola, agrícola abandonado, industrial y natural con relictos de matorral halófito (ver Figura 3).

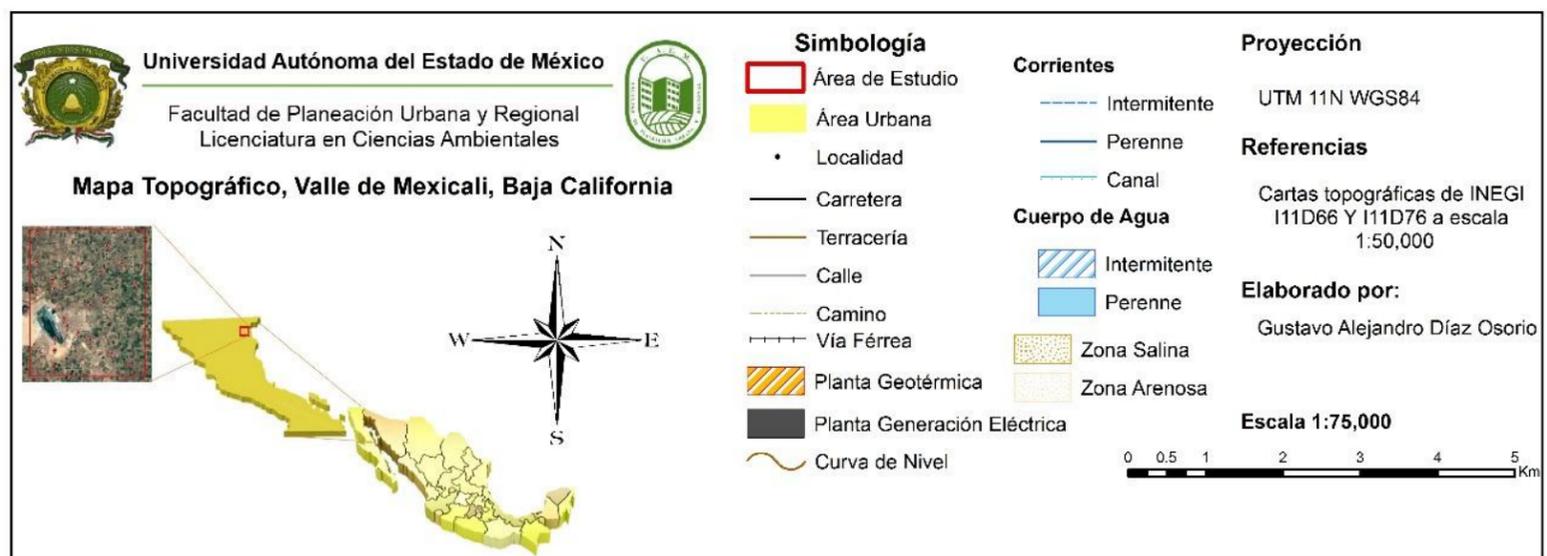
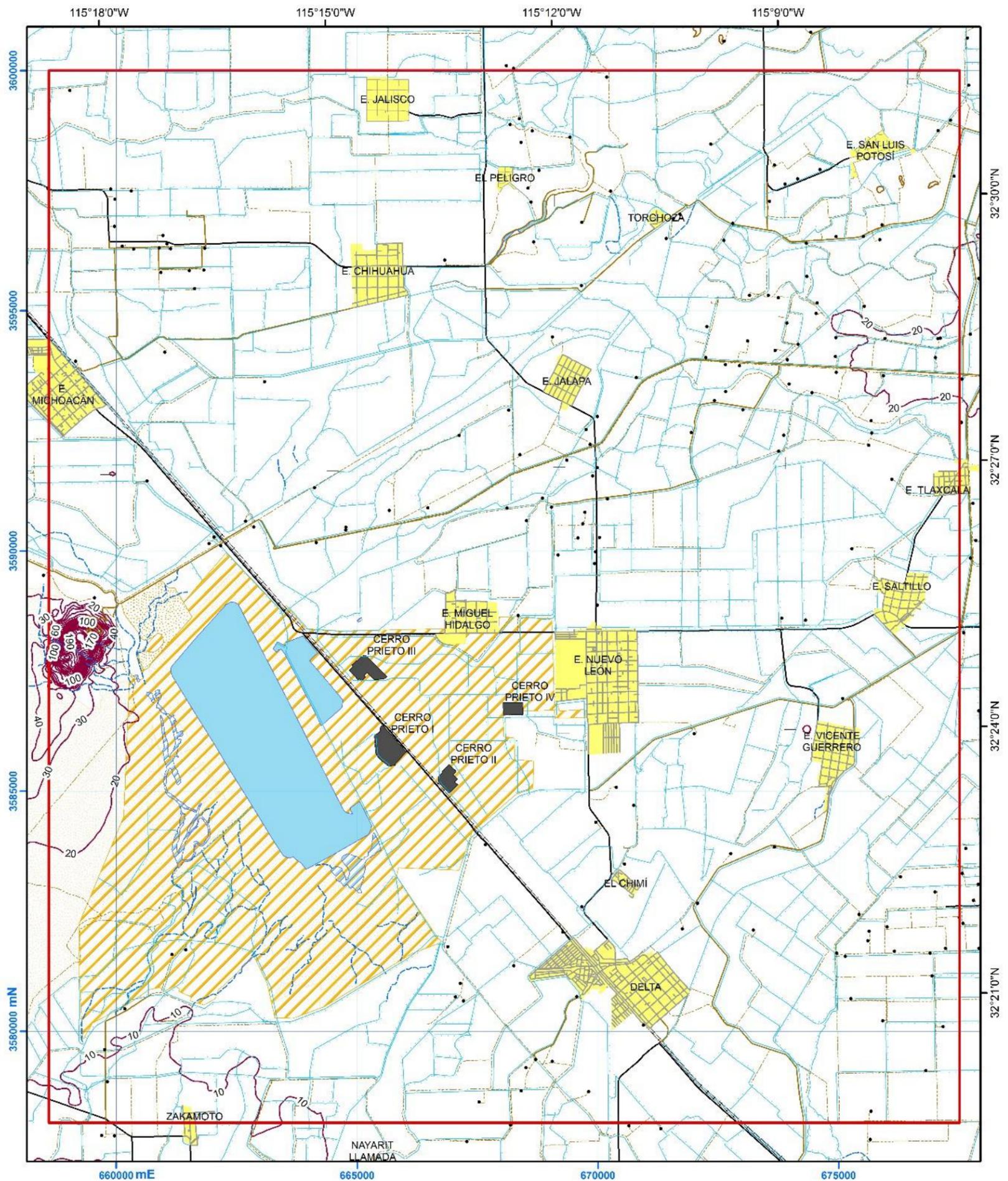


*Figura 3: Área de estudio*

Fuente: Imagen Satelital (Google Earth, 2016)

### Topografía

La zona de estudio se ubica en la provincia fisiográfica llanura Sonorense y en la subprovincia fisiográfica Desierto del Altar (INEGI, 2016), esta subprovincia es un desierto arenoso casi en su totalidad, en el que se han registrado las precipitaciones más bajas del país (CFE, 2007). Los sistemas de topofomas que se encuentran en la zona de estudio son: llanura y planicie deltaica con inundación, y sus elevaciones oscilan desde los 10 m hasta los 20 msnm (INEGI, 2016). A continuación, se muestra el mapa topográfico de la zona de estudio, donde se pueden observar los elementos topográficos del Valle de Mexicali que conforman la zona de estudio (ver Mapa 1).



Mapa 1: Mapa topográfico.

Fuente: Elaboración propia con base en cartas topográficas de INEGI I11D66 y I11D76 a escala 1:50,000.

## **Geología**

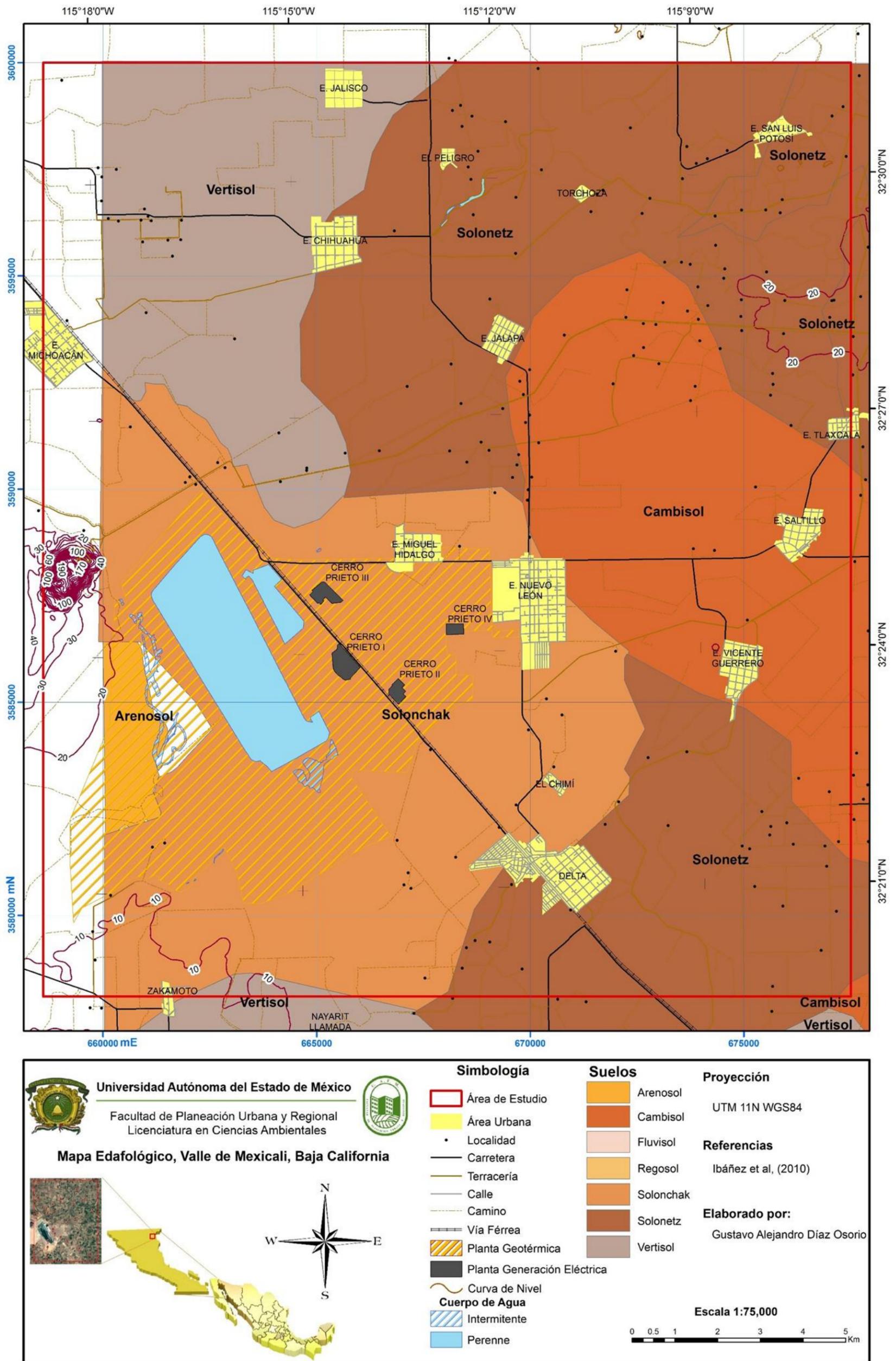
El área de estudio en su mayor parte es de origen aluvial, es una planicie con depósitos transportados por el Río Colorado, que son sedimentos finos de alta salinidad (CFE, 2007). Este valle se formó con las tierras del delta del Río Colorado ya que durante miles de años el río depositó en este lugar el material que acarrea en su travesía, la gran cantidad de sedimentos depositados a lo largo de milenios explica la fertilidad de dichas tierras (Grijalva, 2014).

Por otra parte, dentro del área de estudio se encuentran las siguientes fallas: Morelia, Imperial, Cerro Prieto, que son parte del sistema de fallas San Andrés (INEGI, 2016).

“Dentro de la planicie aluvial del valle de Mexicali, la única prominencia que existe es el volcán Cerro Prieto con una elevación de 260 msnm, data de 700,000 años y no es activo, junto a él se localiza una laguna llamada Los Volcanes, en donde se ha encontrado un alto contenido de ácido carbónico ( $H_2CO_3$ ) y ácido sulfhídrico ( $H_2S$ )” (Puente, 1978). Dentro de esta área se encuentra la zona geotérmica Cerro Prieto, la cual se formó debido a los acuíferos de agua caliente que almacenan las estructuras geológicas, los cuales se encuentran dispersos dentro del área del Municipio (CFE, 2007).

## **Edafología**

De acuerdo con estudios recientes (Ibáñez *et al*, 2010, 2017), la edafología regional está conformada por los siguientes suelos: Solonetz, Solonchaks, Cambisoles, Vertisoles y Arenosoles y se puede observar mejor su distribución en el siguiente mapa edafológico (Mapa 2).



Mapa 2: Mapa Edafológico.

Fuente: Elaboración propia con base a Ibáñez et al. (2010).

Como se puede observar en el mapa 2 en mayor proporción se encuentran los suelos Solonetz y Solonchak que a continuación se describen a detalle:

- Los Solonetz son suelos con altas concentraciones de sales. Se caracterizan por tener un subsuelo arcilloso con terrones duros en formas de columnas o prismas debido al alto contenido de sales de sodio. Estos suelos se localizan en zonas donde se acumulan sales, en particular, el álcali de sodio. Su vegetación natural es muy escasa y cuando existe es de pastizal o matorral (INEGI, 2004).
- Por su parte, los Solonchak son suelos salinos, se presentan en zonas donde se acumula el salitre, tales como lagunas costeras y lechos de lagos, o en las partes más bajas de los valles y llanos de las regiones secas del país, tienen alto contenido de sales en todo o alguna parte del suelo (INEGI, 2004).

Por otra parte, en menor proporción se encuentran los Cambisoles, Vertisoles y Arenosoles:

- Los Cambisoles se caracterizan por presentar en el subsuelo una capa con terrones que presentan vestigios del tipo de roca subyacente y que además puede tener pequeñas acumulaciones de arcilla, carbonato de calcio, fierro o manganeso (INEGI, 2004).
- Por su parte, los Vertisoles poseen una estructura masiva, con alto contenido de arcillas expandibles (esmectitas), formando superficies de deslizamiento llamadas facetas o slickensides y que por ser colapsables en seco pueden formar grietas en la superficie o a determinada profundidad. Son muy susceptibles a la salinización (INEGI, 2004).
- Los Arenosoles se caracterizan por ser de textura gruesa, con más del 65% de arena al menos en el primer metro de profundidad, Estos suelos tienen una alta permeabilidad, pero muy baja capacidad para retener agua y almacenar nutrientes (INEGI, 2004).

## Clima

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen, modificada por García (2004), en el Valle de Mexicali predomina el tipo de clima BW (h') h s(x') (e'), el cual corresponde a un clima seco muy árido, cálido (con temperatura media anual por encima de los 22°C, y del mes más frío por debajo de los 18°C), con régimen de lluvias de invierno, con una oscilación térmica muy extrema, por encima de los 14°C. La precipitación total anual para el área de estudio, de acuerdo con los registros de las estaciones meteorológicas ubicadas en la región del Valle de Mexicali va de 42.3 mm a 83.6 mm, siendo la mayor incidencia de las lluvias en los meses de agosto a octubre y en un segundo período en diciembre y enero (CFE, 2007).

A continuación, se muestra el climograma que representa la temperatura y la precipitación del área de estudio, para su elaboración se emplearon datos del Servicio Meteorológico Nacional (2018) de su estación meteorológica ubicada en el Ejido Nuevo León con clave 2163, dichos datos representan la temperatura media mensual y la lluvia total mensual del intervalo de años 1992-2012 (ver Figura 4).

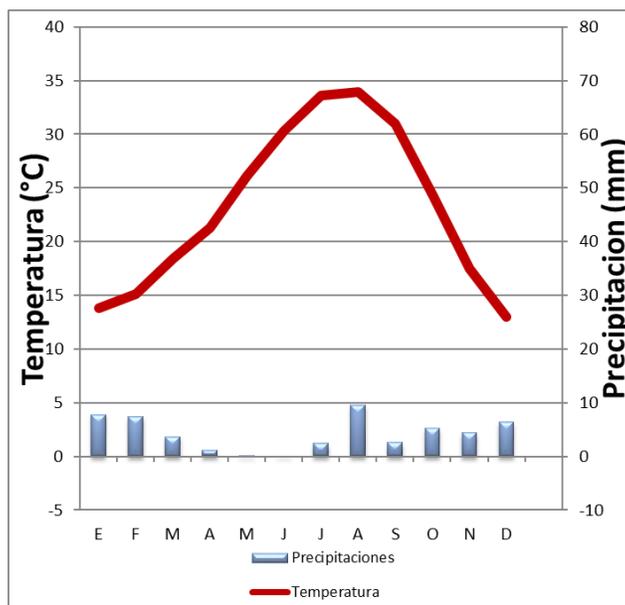


Figura 4: Climograma del área de estudio

Fuente: Elaboración propia con datos del Servicio Meteorológico Nacional (2018).

## **Uso de suelo y vegetación**

La vegetación sustentada por estos ecosistemas varía desde, desiertos yermos o con vegetación esparcida, hasta pastizales, tierras con arbustos y sabanas, tierras de cultivos y bosques secos, usualmente es pobre, tiene baja densidad, con especies adaptadas a los suelos áridos y con una alta eficiencia en el uso del agua (FAO, 2007).

En lo que respecta a la vegetación natural de la zona de estudio, “la condición de aridez de la zona ha tenido como consecuencia la presencia de especies vegetales silvestres típicamente xerófitas que caracterizan el panorama general de la vegetación natural, la vegetación es de raíces extensamente ramificadas, de escasa talla, algunas espinosas de hojas pequeñas y a veces pubescentes, otras bastantes cutinizadas y algunas más con el tallo protegido por una capa serosa impermeable, todas dispersas y ampliamente esparcidas, solo existen en pequeñas áreas, debido a que las actividades agrícolas han abarcado casi todas las zonas donde esta se encontraban” (Pérez & Sánchez, 1983).

Según el Gobierno del Estado de Baja California (2015) en el Valle de Mexicali sólo el 62 por ciento de la superficie del valle es susceptible de explotación agrícola, esto representa 200 mil hectáreas de tierras fértiles, que está clasificado en los de alta productividad, mediana, baja y muy baja. Según SAGARPA (2017) para el ciclo agrícola otoño-invierno 2017-2018 se programaron un total de 79 mil 178 hectáreas con diversos cultivos como trigo, cártamo, cebada, rye-grass, cebollín, avena forrajera, maíz grano y cultivos varios, principalmente hortalizas, destacando principalmente el trigo, rye-grass, cebollín y avena forrajera.

Por su parte, el uso de suelo industrial se encuentra concentrado en la zona urbana, algunas empresas están ubicadas a lo largo de la vía del ferrocarril y por lo regular son industrias de transformación (Gobierno de Baja California, 2015). La empresa con mayor relevancia por la superficie que ocupa en el área de estudio es el Campo Geotérmico Cerro Prieto que se encarga de producir energía eléctrica a toda la franja fronteriza de Baja California y una pequeña parte del estado de Sonora (CFE, 2007).

## Metodología

En el siguiente apartado se describe la metodología general del presente trabajo, la cual se sustenta de metodologías propuestas por Siebe *et al.* (2006), (WRB, 2014) y NOM-021-SEMARNAT-2000, que ayudaron a cumplir los objetivos planteados al comienzo de la investigación. Por consiguiente, dicha metodología es descrita a mayor detalle según las etapas que fueron de utilidad para el cumplimiento de la investigación.

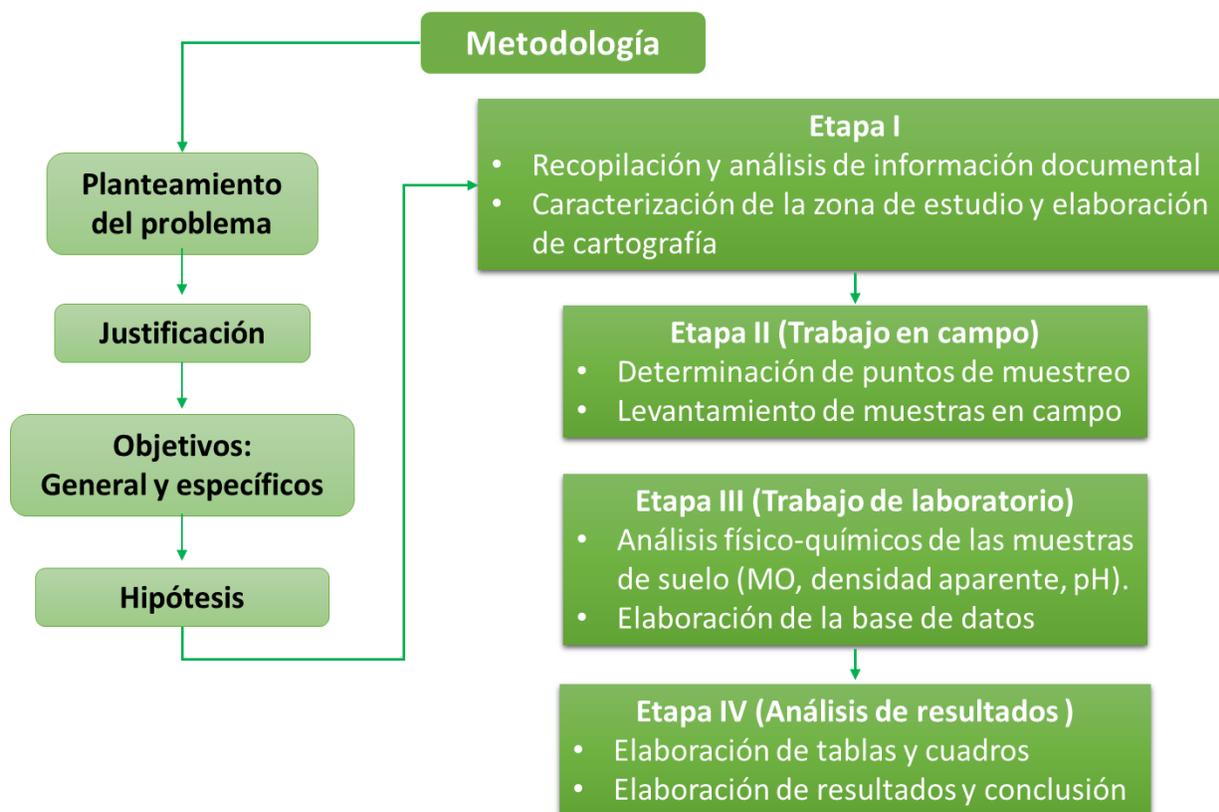


Figura 5: Metodología general de la investigación.

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describen las etapas en las que se desarrolla la presente investigación según el diseño metodológico antes presentado.

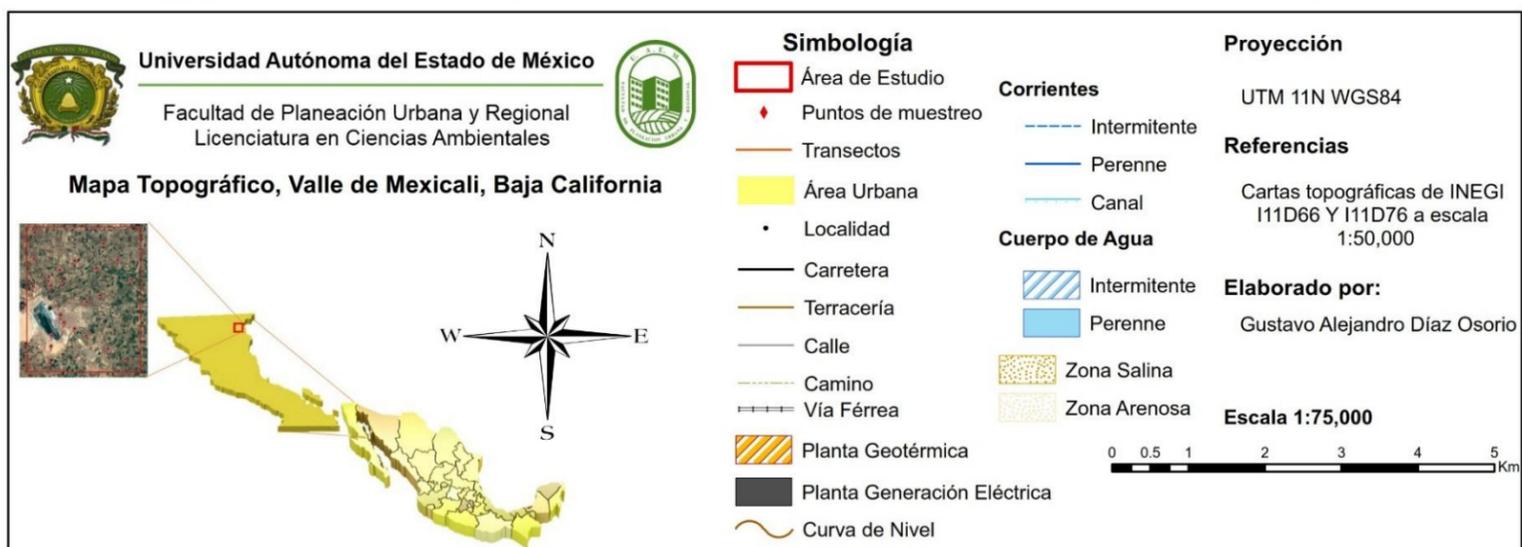
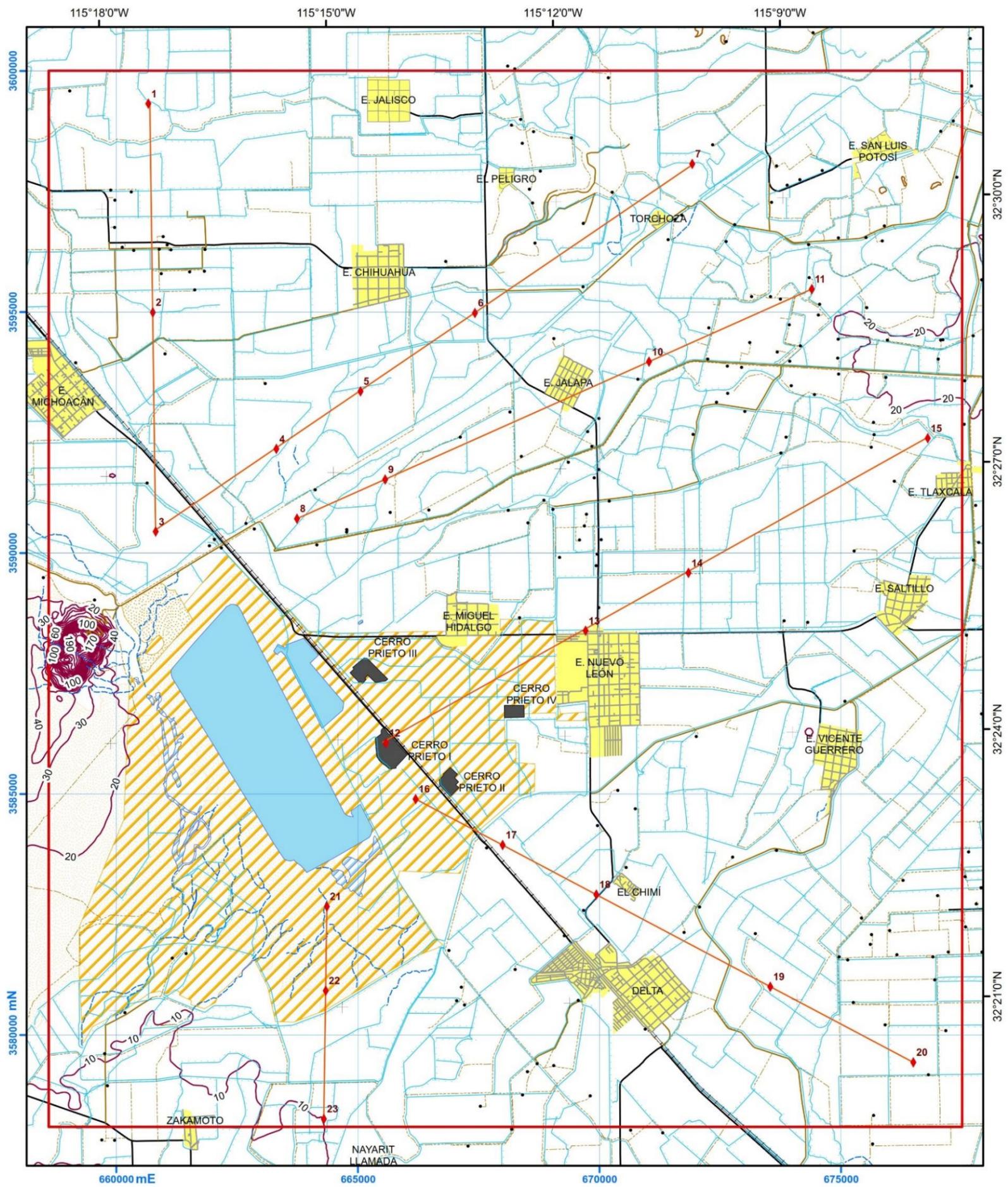
### **Etapas I (Recopilación y análisis de la información)**

En esta etapa se realizó una recopilación documental sobre la función del C en suelos de ecosistemas áridos y su importancia en la agricultura de riego como es el caso de la zona de estudio; así mismo se realizó la caracterización ambiental de la zona de estudio recopilando la información para conocer los elementos naturales que la conforman: Posteriormente se elaboró la cartografía que permitió analizar espacialmente las características ambientales de la zona para poder establecer los puntos de muestreo en la siguiente etapa.

### **Etapas II (Trabajo en campo)**

Para esta etapa, se establecieron los puntos de muestreo con ayuda de la información recabada en la etapa anterior, así mismo, dichos puntos de muestreo fueron considerandos según los objetivos del proyecto: “Actualización del diagnóstico del Riesgo de afectación del Complejo Geotermoeléctrico Cerro Prieto sobre los suelos del Valle de Mexicali Baja California, México (2017)”, en este proyecto se estableció un muestreo en forma de transectos que parten del CGCP hacia las zonas agrícolas del Valle de Mexicali a una distancia no mayor de 13 km, dichos puntos de muestreo se ajustaron según las unidades edáficas presentes en la zona de estudio para que las muestras recabadas en el trabajo de campo fueran representativas para el proyecto antes mencionado y para la presente investigación.

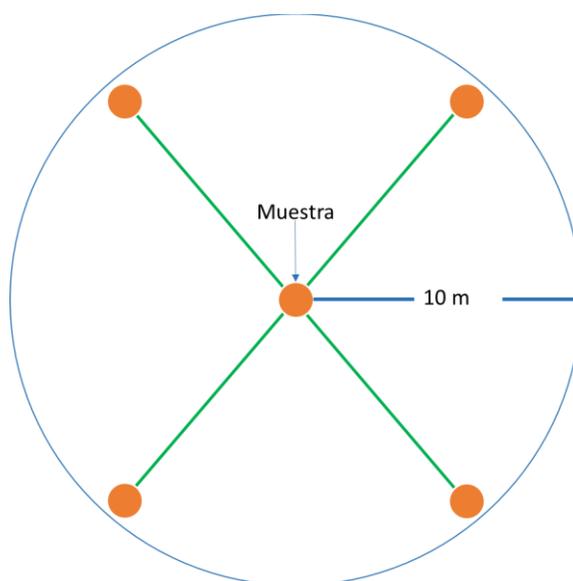
En el siguiente mapa se puede observar el esquema de muestreo en forma de transectos que se utilizó, así como un total de 23 puntos de muestreo que se establecieron para la recolección de muestras edáficas (ver Mapa 3).



Mapa 3: Ubicación de transectos y puntos de muestreo dentro de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia con base en cartas topográficas de INEGI I11D66 y I11D76 a escala 1:50,000.

En cuanto al levantamiento de muestras en campo, se establecieron los 23 puntos antes mencionados con ayuda de GPS y por medio de las coordenadas establecidas previamente, se trazaron rutas, se recabaron las características ambientales por sitio en fichas y se procedió a hacer el levantamiento bajo el esquema de la “X”, obteniendo cinco repeticiones, una muestra central y cuatro más en un radio de 10 metros (ver Figura 6), por cada muestra recolectada a una profundidad de 30 cm se obtuvo aproximadamente 1 kg de suelo el cual fue embolsado y etiquetado para su posterior análisis de laboratorio.



*Figura 6: Esquema de muestreo por punto*

Fuente: Elaboración propia.

Además de las muestras superficiales recolectadas, se realizaron perfiles edafológicos a 1.5 m de profundidad para obtener información más detallada sobre los almacenes de C en los suelos del Valle de Mexicali, para ello se establecieron 4 perfiles en los mismos puntos de muestreo superficial (puntos 4, 6, 12, y 21), considerando las unidades edáficas, el acceso a los puntos de muestreo, las condiciones de la zona y los tiempos para su elaboración. Dichos perfiles fueron elaborados y descritos conforme a Siebe *et al.*, (2006) y clasificados conforme a WRB (2006). Las muestras extraídas por cada horizonte edáfico fueron embolsadas y etiquetadas para su posterior análisis de laboratorio.

### **Etapas III (Trabajo de laboratorio)**

En esta etapa se realizó el análisis de laboratorio de las muestras obtenidas en el trabajo de campo, para llevarlo a cabo esta etapa se realizó en dos partes:

1. Secado a temperatura ambiente, triturado y tamizado con tamiz de 2 mm de abertura, posteriormente se extrajo una muestra de aproximadamente 50 gramos por medio de cuarteos sucesivos con la finalidad de obtener una muestra homogénea que representará las características edáficas de cada punto, se le extrajo a dicha muestra aproximadamente 5 gramos de suelo, el cual fue tamizado a 0.25 mm para la determinación de materia orgánica.
2. Análisis de las muestras de suelo para obtener los contenidos de materia orgánica bajo la NOM-021-SEMARNAT-2000 mediante el método Walkley y Black (1947). “Este método se basa en la oxidación del carbono orgánico del suelo por medio de una disolución de dicromato de potasio y el calor de reacción que se genera al mezclarla con ácido sulfúrico concentrado. Después de un cierto tiempo de espera la mezcla se diluye, se adiciona ácido fosfórico para evitar interferencias de  $Fe^{3+}$  y el dicromato de potasio residual es valorado con sulfato ferroso” (SEMARNAT, 2002).

Para finalizar esta etapa los resultados obtenidos de los análisis se concentraron en una base de datos donde se aplicaron los debidos cálculos para la obtención del C por sitio de muestreo y por almacén, considerando la densidad aparente y espesor.

### **Etapas IV (Análisis de resultados)**

En esta etapa se elaboraron los gráficos donde se representaron los resultados de C superficial y a profundidad para su interpretación, además con los resultados obtenidos y con la finalidad de entender la dinámica del C en el Valle de Mexicali se elaboró un mapa de distribución espacial del C superficial empleando la paquetería Arc Map (V. 10.5), con ayuda de los puntos georreferenciados donde se realizó el levantamiento de

muestras en campo se pudo emplear la técnica de interpolación con la media ponderada por el inverso de la distancia (IDW).

El método de Interpolación Distancia Inversa Ponderada (IDW), “asume que las cosas que están más cerca son más parecidas que las que están más lejos. Para predecir un valor de un lugar no muestral, utilizará los valores de los lugares muestrales que haya alrededor del lugar que se va a predecir. Los valores de los lugares más próximos al que se va a predecir tendrán más influencia y por lo tanto más peso que los que están más lejos.” (Moreno, 2008).

Para finalizar esta etapa se analizaron los resultados, gráficos y el mapa de distribución espacial de C para poder elaborar las conclusiones pertinentes de la presente investigación.



## **Capítulo III**

### **Resultados**

En este capítulo se muestran los resultados y son presentados en gráficas y tablas para su análisis, con ellos es posible comprender la dinámica de los almacenes de C en la zona de estudio y elaborar las respectivas conclusiones de la investigación.

## Resultados de perfiles edáficos

A continuación, se presenta la descripción morfológica de los perfiles edáficos elaborada en el trabajo de campo y que representa las diferentes condiciones de uso de suelo encontrados en el área de estudio. Con esta descripción morfológica es posible conocer las características de las unidades edáficas donde se desarrollan los usos de suelo.

### Perfil uso de suelo agrícola

La siguiente descripción morfológica pertenece al sitio de muestreo número cuatro y según WRB (2006) pertenece al tipo de suelo: Vertisol cálcico (calcárico, hiposálico), son suelos muy arcillosos, que se mezclan con alta proporción de arcillas expandibles, forman grietas anchas y profundas desde la superficie hacia abajo cuando se secan, tiene un horizonte cálcico o concentraciones de carbonatos secundarios que comienzan dentro de los 100 cm de la superficie del suelo, tiene material calcárico entre 20 y 50 cm de la superficie del suelo y presenta una  $CE_e$  de  $4 \text{ dS m}^{-1}$  o más a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  en alguna capa dentro de 100 cm de la superficie del suelo. Este perfil se realizó en un terreno agrícola, al momento del muestreo el terreno se encontró barbechado, se pudo observar su composición masiva en terrones de gran tamaño y fuerte desarrollo (ver Figura 7).



*Figura 7: Sitio de muestreo número cuatro*  
Fuente: Toma propia.

Perfil sitio 4. Vertisol cálcico (calcárico, hiposálico)		
	0-15/25	Textura arcillosa, consistencia en seco duro y en húmedo firme, muy adherente, muy plástico, con humedad actual seco, estructura en bloques subangulares-terrones de tamaño grueso (20-50 mm) con un desarrollo muy fuerte y sin pedregosidad, porosidad vesicular-canales de tamaño fino (0.5-2 mm) y abundancia comunes de (5-20), pocas raíces, límite claro (2-5 cm), contenido de carbonatos moderado.
	15/25-60	Textura arcillosa, consistencia en seco muy duro y en húmedo muy firme, muy adherente, muy plástico, con humedad actual muy seco, estructura en bloques columnares de tamaño muy grueso (>50 mm) con un desarrollo muy fuerte y sin pedregosidad, porosidad vesicular de tamaño fino (0.5-2 mm) y muy poca abundancia (1-2), sin raíces, límite difuso (> 15 cm), contenido de carbonatos fuerte.
	60-80	Textura arcillosa, consistencia en seco muy duro y en húmedo muy firme, muy adherente, muy plástico, con humedad actual levemente húmedo, estructura en bloques columnares de tamaño muy grueso (>50 mm) con un desarrollo muy fuerte y sin pedregosidad, porosidad vesicular de tamaño fino (0.5-2 mm) y poca abundancia (2-5), sin raíces, límite difuso, revestimientos con afloramiento de sales, contenido de carbonatos muy fuerte.
	80-95	Textura arcillosa, consistencia en seco muy duro y en húmedo muy firme, muy adherente, muy plástico, con humedad actual levemente húmedo, estructura masiva, sin pedregosidad, porosidad en canales de tamaño fino (0.5-2 mm) y muy poca abundancia (1-2), raíces finas (<2 mm) con poca abundancia (1-2), límite difuso (>15 cm), revestimientos, abundantes moteados color gris y venaciones blancas, contenido de carbonatos fuerte.
	95-120	Textura arcillosa, consistencia en seco muy duro y en húmedo muy firme, muy adherente, muy plástico, humedad actual levemente húmedo, estructura en bloques subangulares de tamaño grueso (20-50 mm) con desarrollo moderado y sin pedregosidad, porosidad de tipo vesicular de tamaño fino (0.5-2 mm) y poca abundancia (2-5), raíces finas (<2 mm) con poca abundancia (1-2), límite claro (2-5 cm), revestimientos de óxidos de Fe, pocos moteados verdes, contenido de carbonatos fuerte.
	120-135	Textura franco arcillo arenosa, consistencia en seco suave y en húmedo friable, adherente, plástico, humedad actual levemente húmedo, estructura en bloques subangulares de tamaño grueso (20-50 mm) con desarrollo moderado y sin pedregosidad, porosidad en canales de tamaño fino (0.5-2 mm) con poca abundancia (1-2), límite difuso (>15 cm), pocos revestimientos y venaciones blancas, pocos moteados color rojizos, contenido de carbonatos fuerte.
	>135	Textura franco-arenosa, consistencia en seco suave y en húmedo muy friable, no adherente, no plástico, humedad actual húmedo, estructura en bloques subangulares de tamaño grueso (20-50 mm) con desarrollo débil, sin pedregosidad, sin raíces, contenido de carbonatos fuerte.

Fuente: Ibáñez *et al.*, 2017.

### **Perfil uso de suelo agrícola abandonado**

La siguiente descripción morfológica pertenece al nodo de muestreo número seis y según WRB (2006) pertenece al tipo de suelo: Solonetz mólico (cálcico), son suelos con un horizonte subsuperficial arcilloso, denso, fuertemente estructurado, que tiene una proporción alta de iones Na y/o Mg adsorbidos, los que tienen  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  libre son fuertemente alcalinos (pH de campo > 8.5), es un horizonte superficial bien formado por material mineral, estructurado, rico en materia orgánica, de colores oscuros y rico en bases, tiene un horizonte cálcico o concentraciones de carbonatos secundarios que comienzan dentro de los 100 cm de la superficie del suelo.

Este perfil se realizó en una zona donde se practicaba la agricultura de riego, se pudo constatar por la presencia de surcos, el sitio de muestreo presentó abundantes contenidos de sales en forma de costras superficiales así como afloramientos en distintos estratos del perfil, además de tener un contenido de humedad significativo en comparación con los demás perfiles pues al metro y medio de profundidad se encontró el manto freático (ver Figura 8).



*Figura 8: Sitio de muestreo número seis*  
Fuente: Toma propia

Perfil sitio 6. Solonetz mólico (cálcico)		
	0-10	Textura arcillo limosa, consistencia en seco suave y en húmedo firme, muy adherente, muy plástico, con humedad actual levemente húmedo, estructura en bloques subangulares de tamaño fino (5-10 mm) con un desarrollo débil y sin pedregosidad, sin porosidad, sin raíces, límite claro (2-5 cm), afloramiento de sales, contenido de carbonatos muy fuerte.
	10-20	Textura franco arcillo-limoso, consistencia en seco suave y en húmedo firme, adherente, plástico, con humedad actual levemente húmedo, estructura en bloques subangulares de tamaño grueso (20-50 mm) con un desarrollo débil y sin pedregosidad, porosidad en canales de tamaño fino (0.5-2 mm) y mucha abundancia (>20), sin raíces, límite claro, revestimientos y moteados color blanco de tamaño medio (6-20 mm), contenido de carbonatos muy fuerte.
	20-30/35	Textura franco arcilloso, consistencia en seco ligeramente duro y en húmedo firme, muy adherente, muy plástico, con humedad actual húmedo, estructura en bloques subangulares de tamaño grueso (20-50 mm) con un desarrollo moderado y sin pedregosidad, porosidad vesicular/canales de tamaño fino (0.5-2 mm) y abundancia común (5-20), sin raíces, límite claro (2-5 cm), pocos moteados color blanco tamaño fino (2-6 mm), contenido de carbonatos muy fuerte.
	30/35-55	Textura franco arcillo-limoso, consistencia en seco suave y en húmedo firme, muy adherente, plástico, con humedad actual húmedo, estructura en bloques subangulares de tamaño fino (5-10 mm) y desarrollo moderado, sin pedregosidad, porosidad vesicular de tamaño fino (0.5-2 mm) y abundancia común (5-20), sin raíces, límite claro (2-5 cm), pocos óxidos de Fe y Mg, abundantes moteados color blanco tamaño fino (2-6 mm), contenido de carbonatos muy fuerte.
	55-65	Textura arcillosa, consistencia en seco ligeramente duro y en húmedo muy firme, muy adherente, muy plástico, humedad actual húmedo, estructura en bloques subangulares tamaño medio (10-20 mm) con desarrollo moderado y sin pedregosidad, porosidad de tipo vesicular tamaño fino (0.5-2 mm) y abundancia común (5-20), sin raíces, límite claro (2-5 cm), revestimientos, abundantes moteados blancos de tamaño fino (2-6 mm), contenido de carbonatos muy fuerte.
	65-100	Textura arcillosa, consistencia en húmedo muy firme, muy adherente, muy plástico, humedad actual húmedo, estructura en bloques subangulares de tamaño medio (10-20 mm) con desarrollo moderado y sin pedregosidad, porosidad en canales de tamaño medio (2-5 mm) con abundancia común (5-20), límite claro (2-5 cm), óxidos de Fe y Mg, abundantes moteados color blanco de tamaño grueso (>20 mm), contenido de carbonatos muy fuerte.
	>100	Textura franco-arenosa, consistencia en húmedo muy friable, ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, humedad actual húmedo, estructura en bloques subangulares de tamaño grueso (20-50 mm) con desarrollo débil, sin pedregosidad, sin raíces, límite difuso, afloramiento de sales y pocos óxidos de Fe, contenido de carbonatos fuerte.

Fuente: Ibáñez *et al.*, 2017.

### **Perfil uso de suelo industrial**

La siguiente descripción morfológica pertenece al nodo de muestreo número 12 y según WRB (2014) pertenece al tipo de suelo: Solonchak hipersálico cálcico, son suelos que tienen alta concentración de sales solubles en algún momento del año, están ampliamente confinados a zonas climáticas áridas y semiáridas, tiene una  $CE_e$  de 30  $dS\ m^{-1}$  o más a 25 °C en alguna capa dentro de 100 cm de la superficie del suelo, y tiene un horizonte cálcico o concentraciones de carbonatos secundarios que comienzan dentro de los 100 cm de la superficie del suelo.

Este perfil se realizó dentro de la zona industrial, el sitio de muestreo presento abundantes contenidos de sales en forma de manchas superficiales, además de constituirse por materiales de relleno claramente identificados en el perfil (ver Figura 9).



*Figura 9: Sitio de muestreo numero 12*  
Fuente: Toma propia

Perfil sitio 2. Solonchak hipersálico cálcico		
	0-5	Textura arcillo arenoso, consistencia en seco suave y en húmedo muy firme, muy adherente, plástico, con humedad actual levemente húmedo, estructura laminar de tamaño fino (5-10 mm) y pedregosidad común (5-15%), porosidad vesicular de tamaño fino (0.5-2 mm) y poca abundancia de (2-5), sin raíces, límite claro (2-5 cm), afloramiento de sales, contenido de carbonatos moderado.
	5-15	Textura arcillosa, consistencia en seco suelto y en húmedo firme, muy adherente, plástico, con humedad actual seco, estructura granular de tamaño fino (5-10 mm) con un desarrollo moderado y pedregosidad común (5-15%), porosidad vesicular de tamaño fino (0.5-2 mm) y poca abundancia (2-5), sin raíces, límite claro (2-5 cm), con afloramiento de sales y contenido de carbonatos moderado.
	15-35	Textura areno francoso, consistencia en seco suave y en húmedo friable, no adherente, no plástico, con humedad actual levemente húmedo, estructura prismática de tamaño medio (10-20 mm) /grueso (20-50 mm) con un desarrollo débil y poca pedregosidad (0-2%), porosidad vesicular de tamaño fino (0.5-2 mm) y poca abundancia (2-5), sin raíces, límite claro (2-5 cm), oxido reducción y contenido de carbonatos moderada.
	35-85	Textura arcillosa, consistencia en seco duro y en húmedo muy firme, adherente, muy plástico, con humedad actual húmedo, estructura masiva de tamaño muy grueso (<50 mm), pedregosidad común (5-15%), porosidad vesicular de tamaño fino (0.5-2 mm) y abundancia común (5-20), sin raíces, límite difuso (>15 cm), afloramiento de sales, pocos moteados color blanco, contenido de carbonatos fuerte.
	85-120	Textura arcillosa, consistencia en seco duro y en húmedo muy firme, muy adherente, muy plástico, humedad actual húmedo, estructura masiva de tamaño muy grueso (>50 mm) con desarrollo fuerte y sin pedregosidad, porosidad de tipo vesicular de tamaño fino (0.5-2 mm) y poca abundancia (2-5), sin raíces, nódulos de Mg, pocos moteados verdes, contenido de carbonatos fuerte.

Fuente: Ibáñez *et al.*, 2017.

### **Perfil uso de suelo matorral halófito**

La siguiente descripción morfológica pertenece al nodo de muestreo número 21 y según WRB (2006), pertenece al tipo de suelo: Solonchak hipersálico cálcico, son suelos que tienen alta concentración de sales solubles en algún momento del año, están ampliamente confinados a zonas climáticas áridas y semiáridas, tiene una  $CE_e$  de 30 dS  $m^{-1}$  o más a 25 °C en alguna capa dentro de 100 cm de la superficie del suelo, y tiene un horizonte cálcico o concentraciones de carbonatos secundarios que comienzan dentro de los 100 cm de la superficie del suelo.

Este perfil se realizó en la zona donde se albergan matorrales halófitos en manchón, el sitio de muestreo se encontró inalterado, no presentó compactación en superficie, pero si costras, además presento suelos enterrados a partir de los 75 cm de profundidad con abundantes contenidos de materia orgánica (ver Figura 10).



*Figura 10: Sitio de muestreo numero 21*  
Fuente: Toma propia

Perfil sitio 21. Solonchak hipersálico cálcico		
	0-5	Textura franco limoso, consistencia en seco suave y en húmedo firme, adherente, ligeramente plástico, con humedad actual muy seco, estructura en costra de tamaño medio (10-20 mm) con un desarrollo débil y sin pedregosidad, porosidad vesicular-canales de tamaño fino (0.5-2 mm) y abundancia comunes de (5-20), sin raíces, límite gradual (5-15 cm), afloramiento de sales y contenido de carbonatos fuerte.
	5-25	Textura franco arcillo limoso, consistencia en seco suave y en húmedo friable, adherente, plástico, con humedad actual muy seco, estructura granular de tamaño fino (5-10 mm) con un desarrollo débil y sin pedregosidad, porosidad intersticial de tamaño fino (0.5-2 mm) / medio (2-5 mm) y mucha abundancia (>20), sin raíces, límite claro (2-5 cm), afloramiento de sales y contenido de carbonatos fuerte.
	25-35	Textura franco limoso, consistencia en seco ligeramente duro y en húmedo friable, ligeramente adherente, ligeramente plástico, con humedad actual muy seco, estructura laminar de tamaño grueso (20-50 mm) con un desarrollo débil y sin pedregosidad, porosidad en canales de tamaño grueso (5-20 mm) y abundancia común (5-20), sin raíces, límite claro (2-5 cm), revestimientos y contenido de carbonatos fuerte.
	35-80	Textura franco limoso, consistencia en seco suave y en húmedo muy friable, ligeramente adherente, ligeramente plástico, con humedad actual muy seco, estructura en bloques subangulares de tamaño fino (5-10 mm) con desarrollo débil, sin pedregosidad, porosidad vesicular-canales de tamaño fino (0.5-2 mm) y abundancia común (5-20), sin raíces, límite abrupto (0-2 cm), oxido-reducción, abundantes moteados color rojo, restos de materia orgánica y contenido de carbonatos fuerte.
	80-120	Textura franco limoso arcilloso, consistencia en seco duro y en húmedo firme, adherente, plástico, humedad actual levemente húmedo, estructura laminar de tamaño grueso (20-50 mm) con desarrollo fuerte y sin pedregosidad, sin porosidad, sin raíces, límite abrupto (0-2 cm), abundantes moteados negros, restos de materia orgánica y contenido de carbonatos fuerte.
	120-145	Textura franco arenoso, consistencia en seco suelto y en húmedo muy friable, ligeramente adherente, no plástico, humedad actual levemente húmedo, estructura en bloques subangulares de tamaño grueso (20-50 mm) con desarrollo débil y sin pedregosidad, porosidad en canales de tamaño medio (2-5 mm) con abundancia común (5-20), sin raíces, límite claro (2-5 cm), comunes moteados rojos, con restos de materia orgánica y contenido de carbonatos fuerte.
	>145	Textura franco arenoso, consistencia en seco suave y en húmedo friable, ligeramente adherente, ligeramente plástico, humedad actual levemente húmedo, estructura en bloques subangulares de tamaño grueso (20-50 mm) con desarrollo débil y sin pedregosidad, porosidad en canales de tamaño medio (2-5 mm) con abundancia común (5-20), sin raíces, con restos de materia orgánica y contenido de carbonatos fuerte.

Fuente: Ibáñez *et al.*, 2017.

### Resultados del COS superficial

En el cuadro 3 se muestra la condición con que se evalúa a los suelos según su porcentaje de carbono orgánico, la escala de evaluación es retomada de Siebe, *et al.*, (2006) con la cual evalúa el porcentaje de materia orgánica y modificada para esta investigación conforme la NOM 021 que indica que para conocer el porcentaje de COS a partir del porcentaje de materia orgánica obtenido mediante el método Walkley y Black, es necesario aplicar un factor de corrección de 0.58 en el supuesto de que la materia orgánica contiene 58% de carbono orgánico.

Cuadro 3: Evaluación del porcentaje de COS

Contenidos de Carbono Orgánico del suelo							
COS (%)	<0.58	0.58 - 1.16	1.16 - 2.32	2.32 - 4.64	4.64 - 8.7	8.7 - 17.4	>17.4
Evaluación	Muy baja	Baja	Media	Media alta	Alta	Muy alta	Extremadamente alta

Fuente: Siebe, *et al.*, 2006.

A continuación, se presentan los resultados de COS superficial obtenidos de los puntos de muestreo, los cuales fueron agrupados por usos de suelo como son: agrícola, agrícola abandonado, industrial y matorral halófito.

#### Uso de suelo agrícola

Este uso de suelo incluye predios donde se desempeña la actividad agrícola, algunos puntos muestreados se encontraron bajo diferentes condiciones debido a las prácticas agrícolas empleadas en la zona como: cultivado, labrado y quemado. Cabe destacar que no fue posible identificar particularmente el tipo de cultivo y las prácticas agrícolas empleadas en todos los puntos de muestreo debido a la extensión muestreada y a la limitante de los objetivos del trabajo de campo. Los resultados del porcentaje de C de este uso de suelo se muestran a continuación:

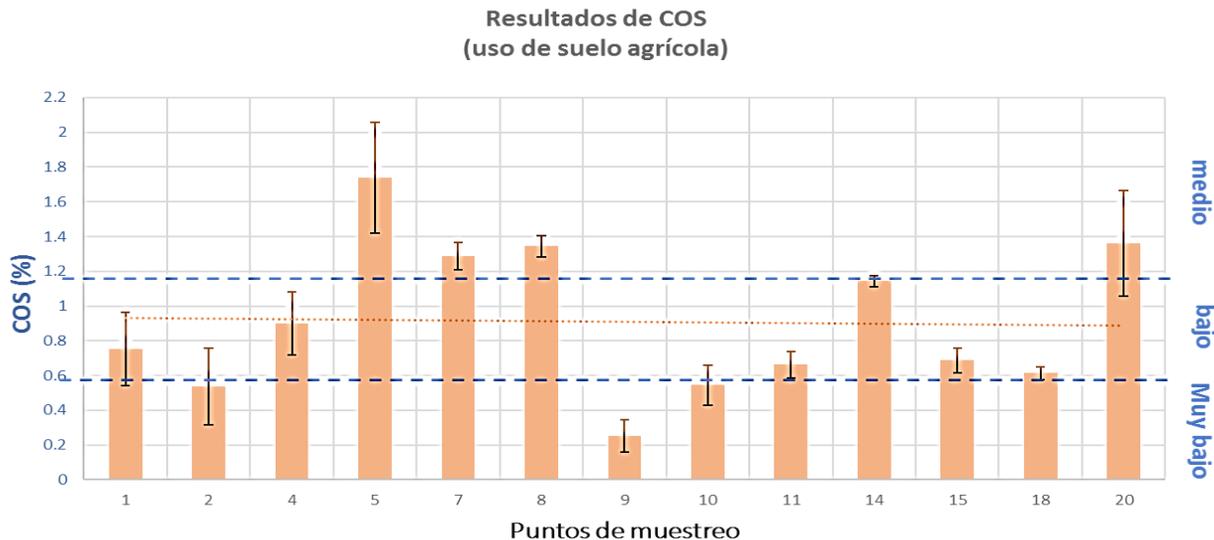
Cuadro 4: Resultados del uso de suelo agrícola.

Punto de muestreo	Uso de suelo	Porcentaje de COS <sup>1</sup>	Condición del COS <sup>2</sup>
1	Agrícola	0.754	Baja
2	Agrícola	0.536	Muy baja
4	Agrícola	0.900	Baja
5	Agrícola	1.736	Media
7	Agrícola	1.285	Media
8	Agrícola	1.344	Media
9	Agrícola	0.252	Muy baja
10	Agrícola	0.544	Muy baja
11	Agrícola	0.662	Baja
14	Agrícola	1.144	Baja
15	Agrícola	0.686	Baja
18	Agrícola	0.613	Baja
20	Agrícola	1.362	Media

<sup>1</sup> COS= Carbono Orgánico del Suelo; <sup>2</sup> Condición de disponibilidad de carbono en suelo a partir de Siebe *et al.*, (2006).  
Fuente: Elaboración propia.

En el cuadro anterior se pueden observar que, de los resultados obtenidos del uso de suelo agrícola, seis puntos de muestreo presentaron porcentajes de COS bajos (0.58-1.16), en segundo lugar, cuatro puntos presentaron porcentajes medios (1.16- 2.32) y, por último, tres puntos presentaron porcentajes muy bajos (<0.58). Estos resultados nos indican que la mayoría de los suelos donde se desempeña la actividad agrícola no poseen altos contenidos de COS superficial y la tendencia para este uso de suelo se mantiene en el rango de porcentaje bajo (0.58-1.16).

Con el fin de apreciar mejor los datos obtenidos y por ser el uso de suelo con mayor cantidad de puntos muestreados (13 puntos), los resultados obtenidos se muestran a continuación en la siguiente figura:



(Medio, bajo, muy bajo) = Condición de disponibilidad de carbono en suelo a partir de Siebe et al., (2006).

Figura 11: Resultados del uso de suelo agrícola

Fuente: elaboración propia.

En la figura anterior se presentan los resultados del porcentaje de COS obtenidos del uso de suelo agrícola, como se aprecia los resultados son bastante heterogéneos, sin embargo, la línea de tendencia en color naranja muestra que los suelos de uso agrícola rondan en su mayoría en porcentajes bajos (0.58-1.16) de COS.

### Uso de suelo agrícola abandonado

Este uso de suelo incluye predios que fueron ocupados para desempeñar actividades agrícolas, sin embargo, en la actualidad no desempeñan ninguna de estas actividades por lo que se encontraron suelos desnudos y con presencia de matorrales dispersos de incipiente formación y poco desarrollo. Además, se pudo constatar que fueron terrenos agrícolas por la evidencia de surcos, sin embargo, no se pudo saber el tiempo de abandono de estos predios, ni el tipo de cultivo realizado en esos terrenos debido a que no fue posible entrevistarse con los agricultores ya que los objetivos del trabajo de campo y los tiempos de muestreo no lo permitieron.

Los resultados obtenidos de este uso de suelo se muestran a continuación:

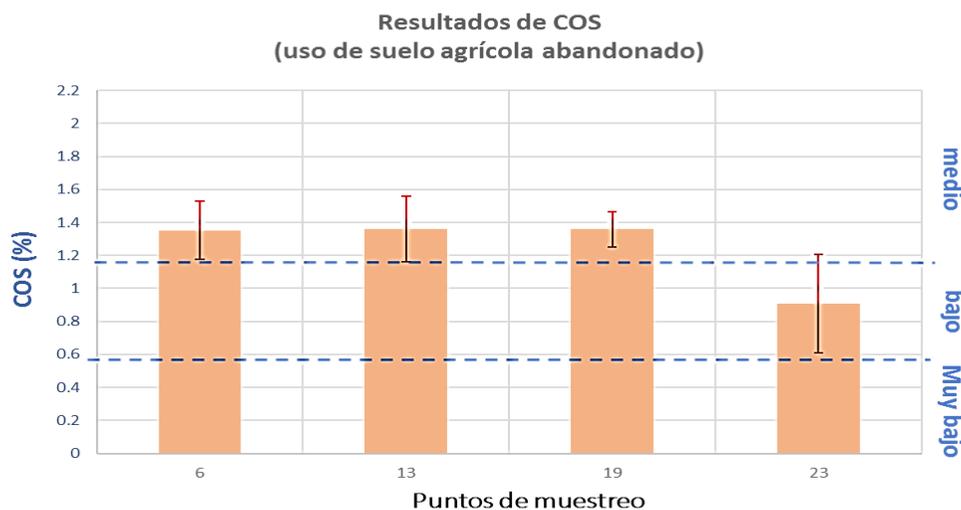
Cuadro 5: Resultados del uso de suelo agrícola abandonado

Punto de muestreo	Uso de suelo	Porcentaje de COS <sup>1</sup>	Condición del COS <sup>2</sup>
6	Agrícola Abandonado	1.352	Media
13	Agrícola Abandonado	1.360	Media
19	Agrícola Abandonado	1.358	Media
23	Agrícola Abandonado	0.906	Baja

<sup>1</sup> COS= Carbono Orgánico del Suelo; <sup>2</sup> Condición de disponibilidad de carbono en suelo a partir de Siebe *et al.*, (2006).

Fuente: Elaboración propia.

En el Cuadro 5 se aprecian los resultados obtenidos del uso de suelo agrícola abandonado los cuales en su mayoría poseen porcentajes medios (1.16-2.32) de COS, en contraste con los resultados del uso de suelo agrícola con porcentajes bajos (0.58-1.16) en este uso de suelo se concentra un mayor porcentaje de COS.



(Medio, bajo, muy bajo) = Condición de disponibilidad de carbono en suelo a partir de Siebe *et al.*, (2006).

Figura 12: Resultados del uso de suelo agrícola abandonado

Fuente: elaboración propia.

Como ya se había mencionado, este uso de suelo en su mayoría de puntos presento porcentajes medios de COS y se puede observar en la Figura 12, solo un punto presento contenidos inferiores, sin embargo, su desviación estándar indica alcanzar el rango de porcentajes medios (1.16-2.32).

## Uso de suelo industrial

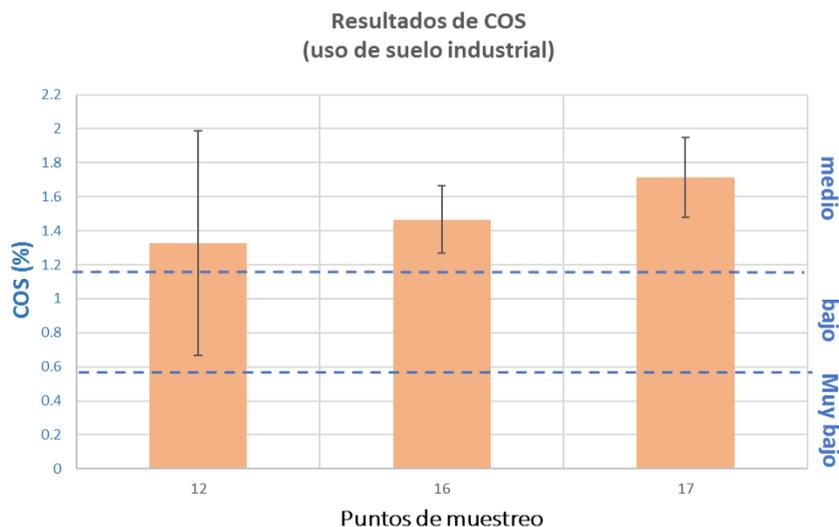
El uso de suelo industrial incluye predios donde el CGCP desempeña sus actividades para la generación de energía eléctrica, las zonas donde se llevaron a cabo los muestreos fueron sitios sin cobertura vegetal y con una gran perturbación debido a las actividades industriales, los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Cuadro 6: Resultados del uso de suelo industrial.

Punto de muestreo	Uso de suelo	Porcentaje de COS <sup>1</sup>	Condición del COS <sup>2</sup>
12	Industrial	1.328	Media
16	Industrial	1.466	Media
17	Industrial	1.714	Media

<sup>1</sup> COS= Carbono Orgánico del Suelo; <sup>2</sup> Condición de disponibilidad de carbono en suelo a partir de Siebe *et al.*, (2006).  
Fuente: Elaboración propia.

En este cuadro se pueden observar los resultados obtenidos del uso de suelo industrial, como se puede apreciar los resultados son bastante homogéneos, pues todos los puntos de muestreo contienen porcentajes medios de COS.



(Medio, bajo, muy bajo) = Condición de disponibilidad de carbono en suelo a partir de Siebe *et al.*, (2006).

Figura 13: Resultados del uso de suelo industrial

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la figura anterior los tres puntos con uso de suelo industrial presentaron porcentajes de COS medios (1.16-2.32), sin embargo, en el punto 12 la desviación estándar indica abarcar el rango de porcentajes bajos (0.58-1.16).

### Uso de suelo matorral halófito

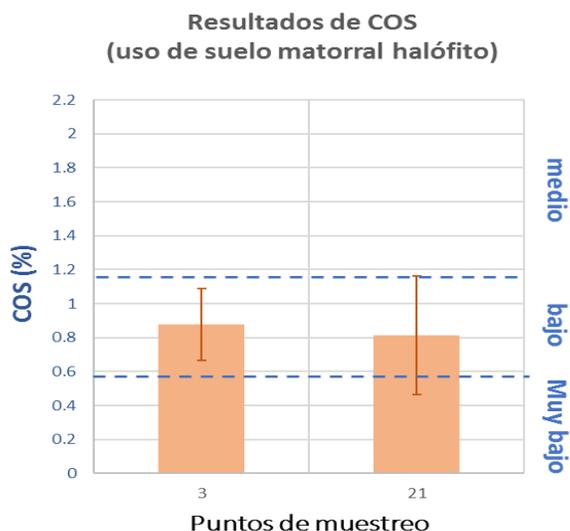
Este uso de suelo incluye sitios donde se encontraron relictos de matorral halófito, dichos sitios fueron catalogados como testigos para la presente investigación ya que tienen una mínima perturbación por actividades antropogénicas en comparación con los demás usos de suelo, los resultados obtenidos se muestran a continuación:

*Cuadro 7: Resultados del uso de suelo matorral halófito.*

Punto de muestreo	Uso de suelo	Porcentaje de COS <sup>1</sup>	Condición del COS <sup>2</sup>
3	Matorral Halófito	0.877	Baja
21	Matorral Halófito	0.815	Baja

<sup>1</sup> COS= Carbono Orgánico del Suelo; <sup>2</sup> Condición de disponibilidad de carbono en suelo a partir de Siebe *et al.*, (2006).  
Fuente: Elaboración propia.

En este cuadro se muestran los resultados del uso de suelo con relictos de Matorral halófito, los puntos de muestreo presentaron valores muy semejantes con porcentajes de COS bajo.



(Medio, bajo, muy bajo) = Condición de disponibilidad de carbono en suelo a partir de Siebe et al., (2006).

Figura 14: Resultados del uso de suelo matorral halófito

Fuente: elaboración propia.

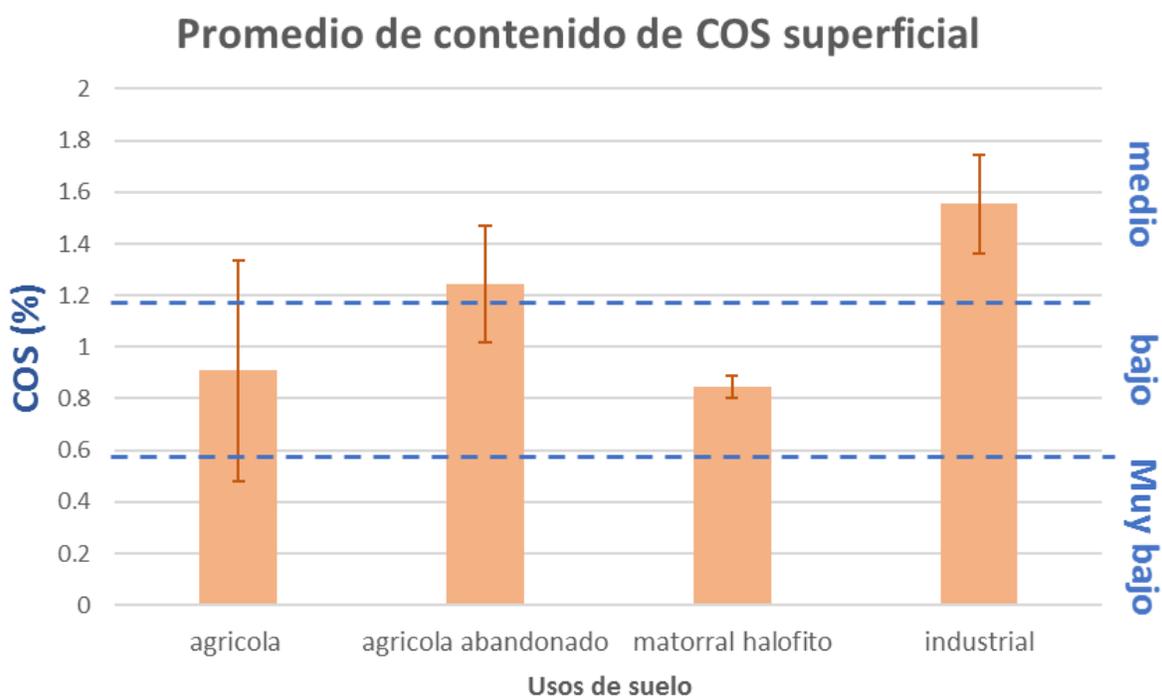
En la figura anterior se puede observar que este uso de suelo presento porcentajes bajos de COS (0.58- 1.16), sin embargo, en comparación con algunos puntos de muestreo del uso de suelo agrícola este uso de suelo contiene mayor porcentaje de COS lo cual es un resultado relevante porque en estos sitios existe vegetación limitada.

### Comparación de los contenidos de COS en los diferentes usos de suelo

En la Figura 15 se puede observar una comparación entre los cuatro diferentes usos de suelo muestreados, como se puede observar el uso de suelo industrial es el que presenta mayor contenido de COS con respecto a los demás usos de suelo, en segundo lugar, se encuentra el uso de suelo agrícola abandonado y con contenidos bajos se encuentran los usos de suelo agrícola y matorral halófito.

Los resultados obtenidos en el caso del uso de suelo agrícola denotan porcentajes con una alta desviación estándar ya que en estos suelos los contenidos de COS pueden variar de una temporada a otra, debido a que se encuentran en constante uso para el desarrollo de las plantas cultivadas, es así como dependiendo de su manejo agrícola y tipos de cultivos empleados que determinarán el porcentaje de COS.

Por otra parte, los usos de suelo agrícola abandonado e industrial presentan porcentajes medios de COS y estos contenidos superiores a los demás usos de suelo se atribuyen a la escasa vegetación que hay en la zona que evita mineralizar dichos contenidos. Por último, el uso de suelo con relictos de matorral halófito es el que presenta bajos porcentajes de COS y al no haber una perturbación en sus suelos siendo los más conservados se atribuye que estos son los contenidos reales de este tipo de ecosistemas.



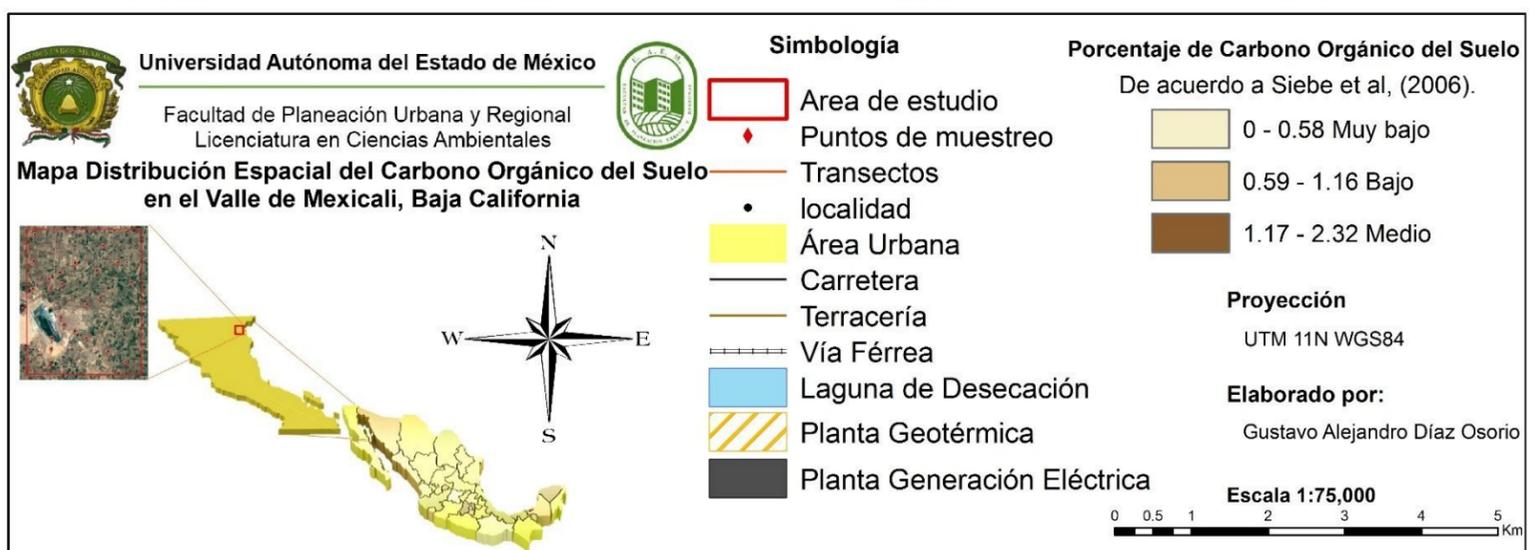
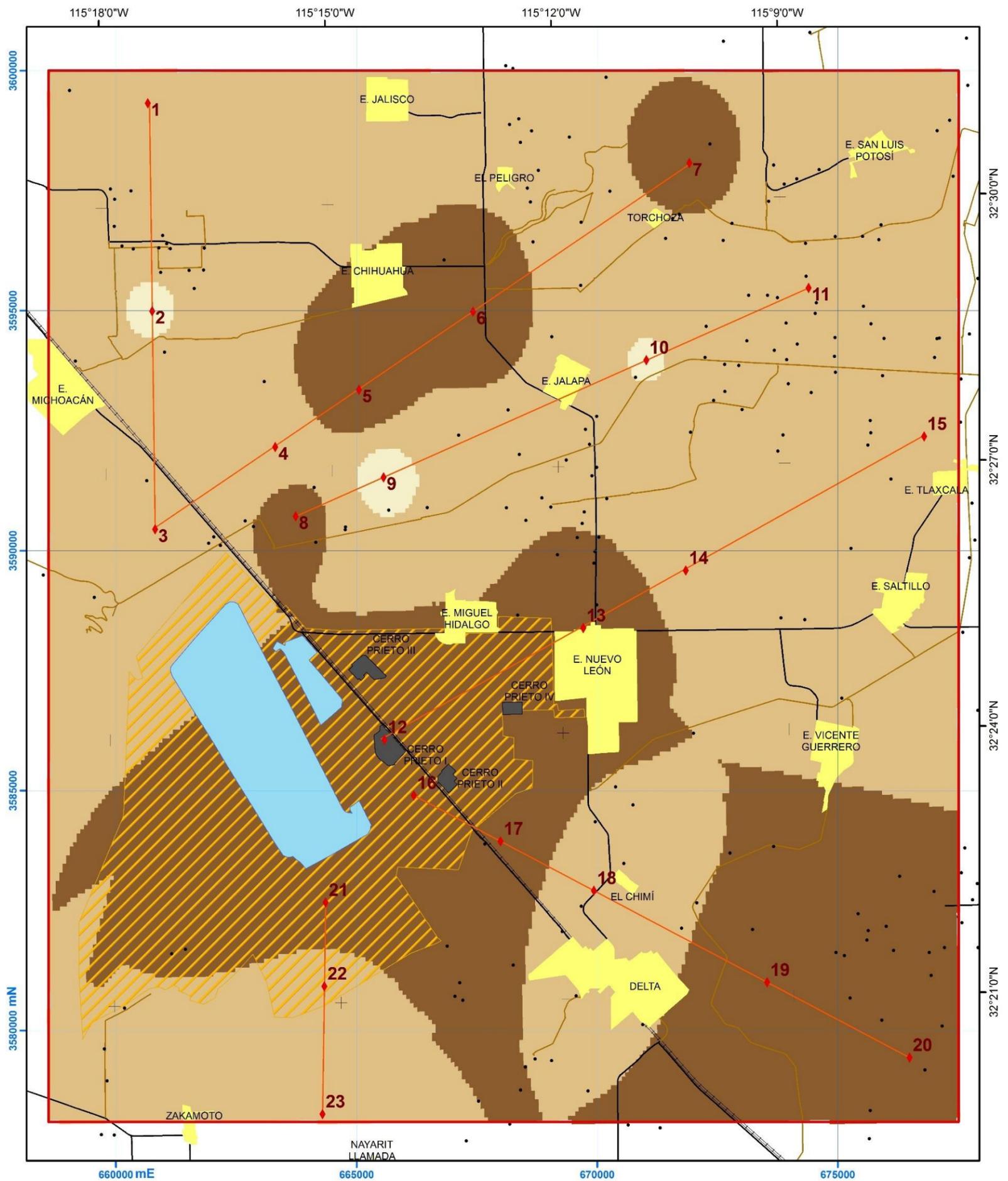
(Medio, bajo, muy bajo) = Condición de disponibilidad de carbono en suelo a partir de Siebe et al., (2006)

Figura 15: Contenidos de COS en los diferentes usos de suelo

Fuente: Elaboración propia.

### Mapa de la distribución espacial del porcentaje de COS

Para apreciar mejor la distribución espacial de los porcentajes de COS obtenidos en el área de estudio, se realizó el siguiente mapa mediante la técnica IDW empleando el porcentaje de COS de los 23 puntos muestreados (ver Mapa 4).



Mapa 4: Distribución espacial del COS en la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

En el mapa anterior, los porcentajes de C ocuparon la siguiente distribución espacial en el área de estudio, la cual se muestra en el cuadro siguiente:

*Cuadro 8: Porcentaje de superficie del COS en el área de estudio*

Condición del COS	Superficie (%)
<b>Muy bajo</b>	1
<b>Bajo</b>	64
<b>medio</b>	35
<b>Total</b>	<b>100</b>

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en el mapa de distribución espacial (ver Mapa 4), 64% del área de estudio presenta un porcentaje bajo de COS, 35% del área presenta porcentajes medios y solo el 1% presenta porcentajes muy bajos. En lo que respecta a la distribución espacial, los contenidos medios de COS en el área de estudio se sitúan en el área industrial en su mayoría, por otra parte, los contenidos bajos de COS son los que abarcan mayor superficie en el área de estudio donde se desarrollan las actividades agrícolas.

### **Almacenes de carbono y su distribución espacial**

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los almacenes de COS por uso de suelo, para su obtención se hizo uso del porcentaje de COS y de la densidad aparente (masa por unidad de volumen de un suelo). Los almacenes representan el contenido de COS (ton/ha) en los primeros 30 cm de profundidad siendo la fracción más dinámica según lo indica la NOM-021-SEMARNAT-2000 y el IPCC (2006).

#### **Uso de suelo agrícola**

A continuación, se presentan los resultados de los almacenes de COS del uso de suelo agrícola, así como la densidad aparente que presentaron los diferentes puntos muestreados indicando el grado de compactación que presentan esos suelos en los primeros 30 cm de profundidad siendo la capa arable.

Los almacenes de COS del uso de suelo agrícola se pueden observar en el Cuadro 9 y se encuentran en un rango que va desde las 9.3 hasta las 54.2 ton/ha, esto valores están en función del porcentaje de COS y de la densidad aparente lo cual indica que los reservorios de carbono en este tipo de suelos son muy variables, en algunos casos como es el del sitio 9 con 9.3 ton/ha, los contenidos que presenta el almacén son limitantes para el desempeño agrícola por no contar con los beneficios que provee el COS.

*Cuadro 9: Almacenes de COS del uso de suelo agrícola.*

Punto de muestreo	Uso de suelo	Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Almacén de C (ton/ha)
1	Agrícola	1.058	23.9
2	Agrícola	1.000	16.1
4	Agrícola	0.869	23.5
5	Agrícola	1.040	54.2
7	Agrícola	1.051	40.5
8	Agrícola	1.232	49.7
9	Agrícola	1.225	9.3
10	Agrícola	1.546	25.3
11	Agrícola	1.310	26
14	Agrícola	1.298	44.5
15	Agrícola	1.256	25.9
18	Agrícola	1.231	22.6
20	Agrícola	0.951	38.8

Fuente: Elaboración propia.

### **Uso de suelo agrícola abandonado**

Por su parte, los almacenes del uso de suelo agrícola abandonado se puede observar en el Cuadro 10 y presentan contenidos que van desde las 24.7 hasta 55.8 ton/ha, en comparación con el uso de suelo agrícola estos almacenes presentan contenidos superiores lo cual indica que estos después de un periodo de abandono se han

recuperado o forman parte de fracciones más estables de C que se preservan en esos suelos.

*Cuadro 10: Almacenes de COS del uso de suelo agrícola abandonado.*

Punto de muestreo	Uso de suelo	Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Almacén de C (ton/ha)
6	Agrícola abandonado	1.360	55.2
13	Agrícola abandonado	1.369	55.8
19	Agrícola abandonado	1.117	45.5
23	Agrícola abandonado	0.907	24.7

Fuente: Elaboración Propia.

### Uso de suelo industrial

Los almacenes del uso de suelo industrial se pueden observar en el Cuadro 11 y presentan contenidos que van desde las 48.9 hasta 49.2 ton/ha, en comparación con el uso de suelo agrícola y de matorral halófito presentan contenidos superiores y se atribuyen a la escasa vegetación que existe por las altas tasas de salinidad evitando que se mineralice la materia orgánica contenida en esos suelos, además de que este almacén puede estar constituido de formas más estables de COS y por lo tanto se preservan a largo plazo siendo más resistentes ante los cambios de uso de suelo.

*Cuadro 11: Almacenes de COS del uso de suelo industrial*

Punto de muestreo	Uso de suelo	Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Almacén de C (ton/ha)
12	Industrial	1.230	49
16	Industrial	1.118	49.2
17	Industrial	0.951	48.9

Fuente: Elaboración propia.

### Uso de suelo matorral halófito

Por último, los almacenes del uso de suelo matorral halófito se pueden observar en el Cuadro 12 y presentan contenidos que rondan entre las 23.4 y 29.3 ton/ha, este y el uso de suelo agrícola presentaron los más bajos contenidos de COS en la zona de estudio. Con respecto a la baja perturbación de la zona con matorral halófito, se atribuye que estos contenidos son los que representan a este tipo de ecosistemas.

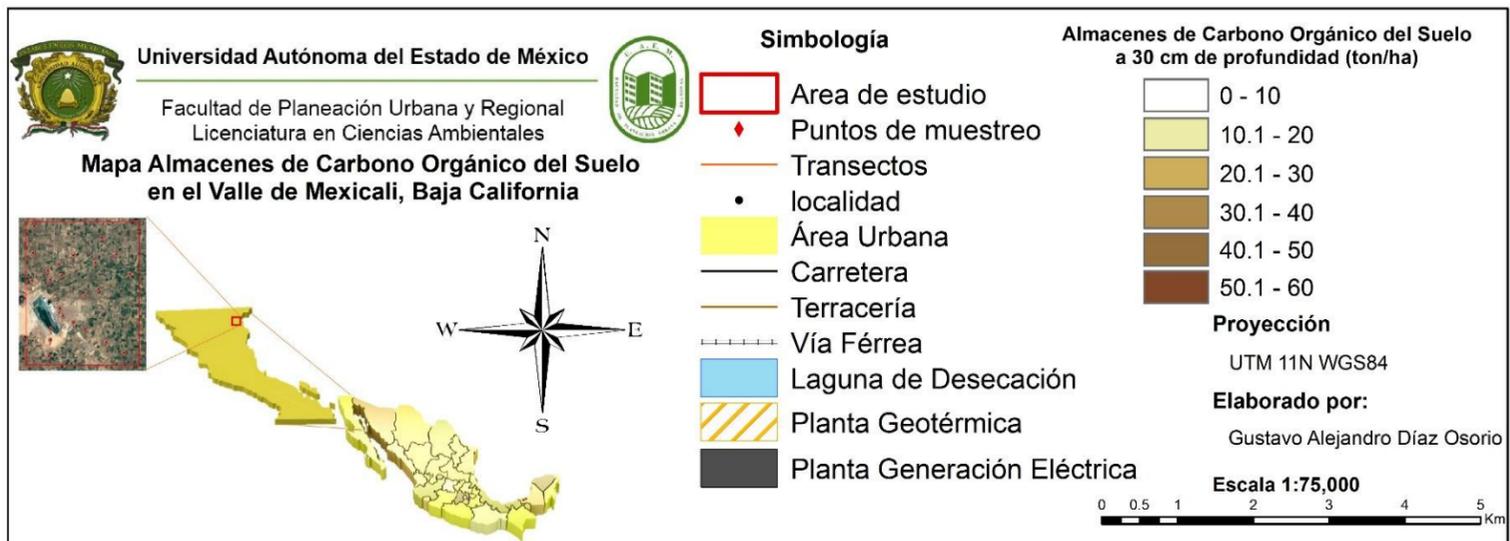
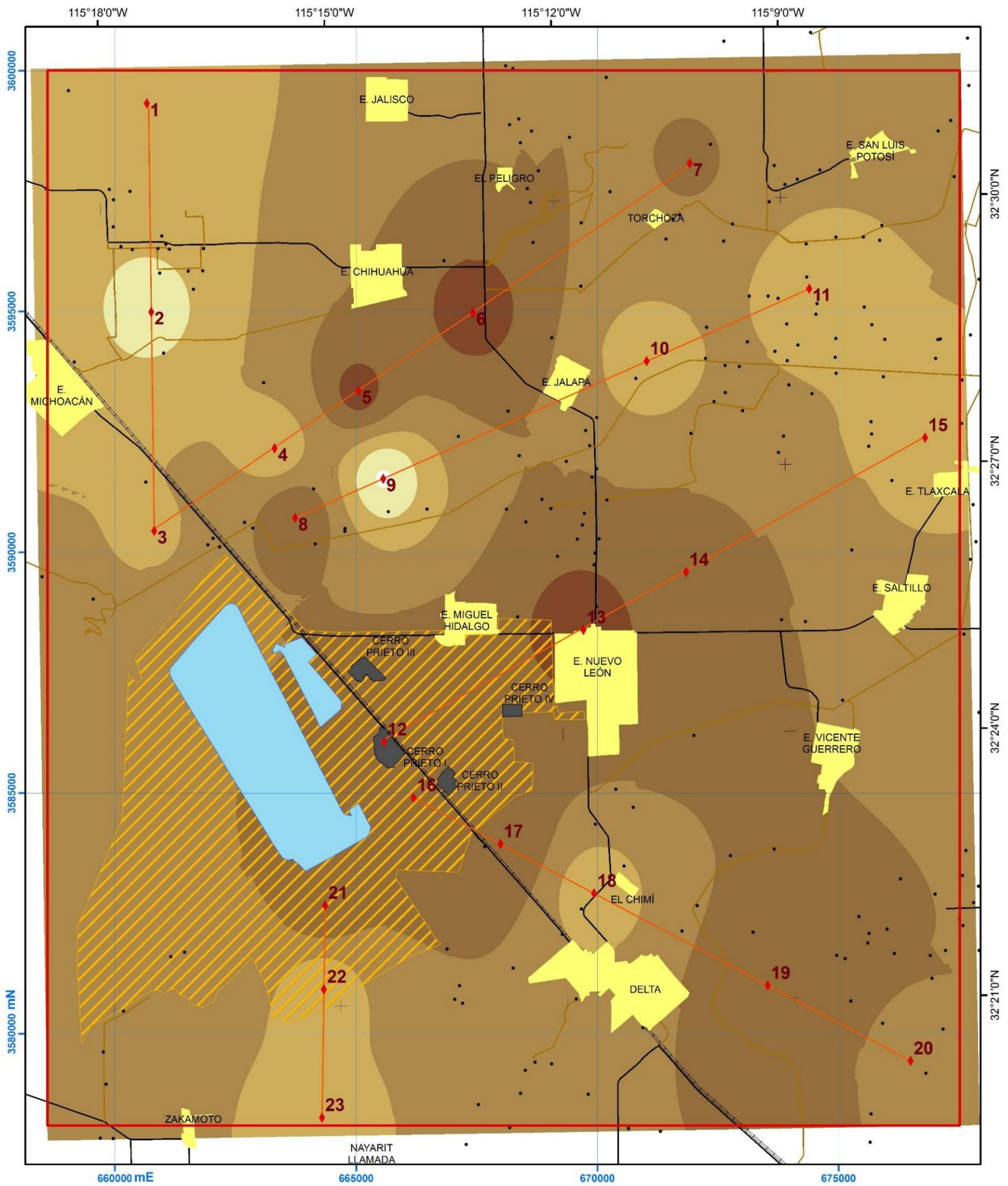
*Cuadro 12: Almacenes de COS del uso de suelo matorral halófito*

Punto de muestreo	Uso de suelo	Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Almacén de C (ton/ha)
3	Matorral halófito	1.112	29.3
21	Matorral halófito	0.920	23.4

Fuente: Elaboración propia.

### Mapa de la distribución espacial de los almacenes de COS

A continuación, se presenta el mapa de distribución espacial de los almacenes de COS en el área de estudio, se realizó mediante la técnica IDW empleando las toneladas por hectárea de COS obtenidas de los 23 puntos muestreados a 30 cm de profundidad (ver Mapa 5).



Mapa 5: Distribución espacial de los almacenes de COS en la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

En el mapa anterior, la distribución espacial según las toneladas por hectárea de COS obtenidas de los puntos de muestreo ocupó las siguientes superficies:

*Cuadro 13: Porcentaje de superficie de los almacenes de COS en el área de estudio*

<b>Almacenes de COS (ton/ha)</b>	<b>Superficie (%)</b>
<b>0-10</b>	0.2
<b>10-20</b>	1
<b>20-30</b>	18
<b>30-40</b>	49
<b>40-50</b>	30
<b>50-60</b>	1.8
<b>Total</b>	<b>100</b>

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en el mapa de distribución espacial de los almacenes de COS (ver Mapa 5), el almacén más representativo del área de estudio abarca 49% con un rango de 30 a 40 ton/ha, en segundo lugar le sigue el almacén con un rango de 40 a 50 ton/ha ocupando una superficie del 30%, en tercer lugar se encuentra el almacén con un rango de 20 a 30 ton/ha y ocupa una superficie del 18%. Estos son los almacenes más representativos por su extensión en el área de estudio pues los demás ocupan una superficie menor al 2%.

### Distribución del COS en profundidad

Para complementar la estimación de los almacenes de C se elaboraron cuatro perfiles edáficos (ver Figura 16) en los distintos usos de suelo del área de estudio, con los resultados obtenidos de estos perfiles se pretende conocer los contenidos de COS a profundidad, así como su comportamiento en horizontes subsuperficiales para determinar si el uso de suelo afecta la distribución vertical de los almacenes de C (ver Figura 17), aunado a esto, la inclusión de un estudio a profundidad del COS en la investigación brinda una perspectiva más amplia del comportamiento de los almacenes de C en el área de estudio siendo que en este tipo de ecosistemas la información es escasa y se limita a los 30 cm de profundidad principalmente en México.

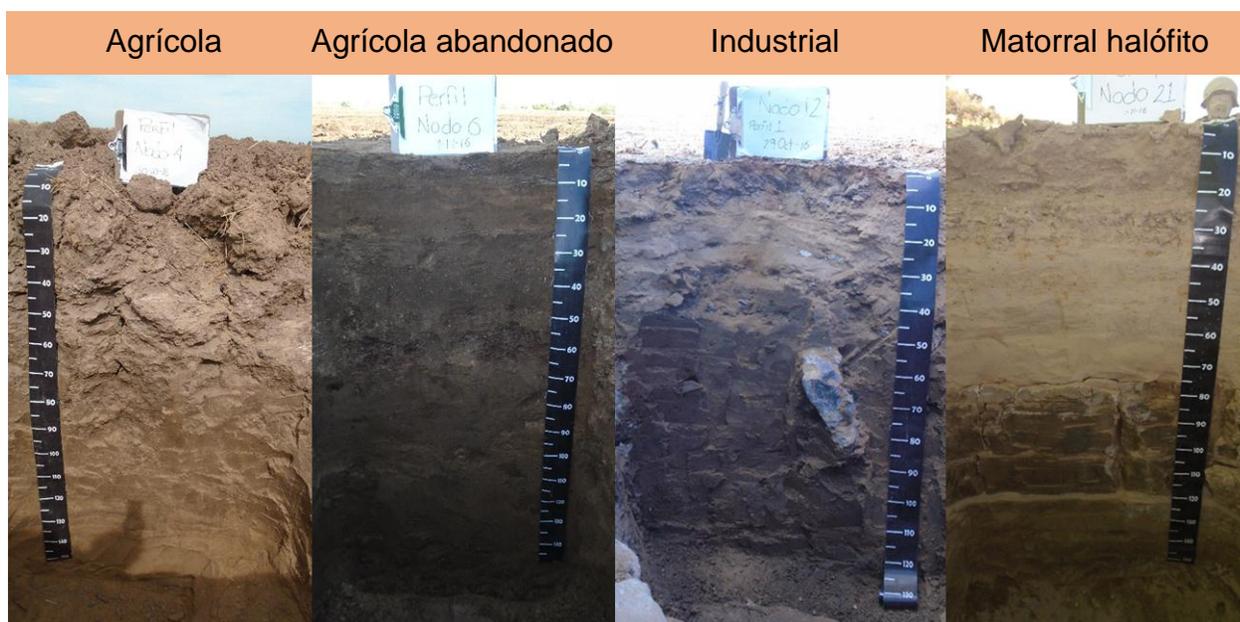


Figura 16: Perfiles edáficos

Fuente:Elaboración propia

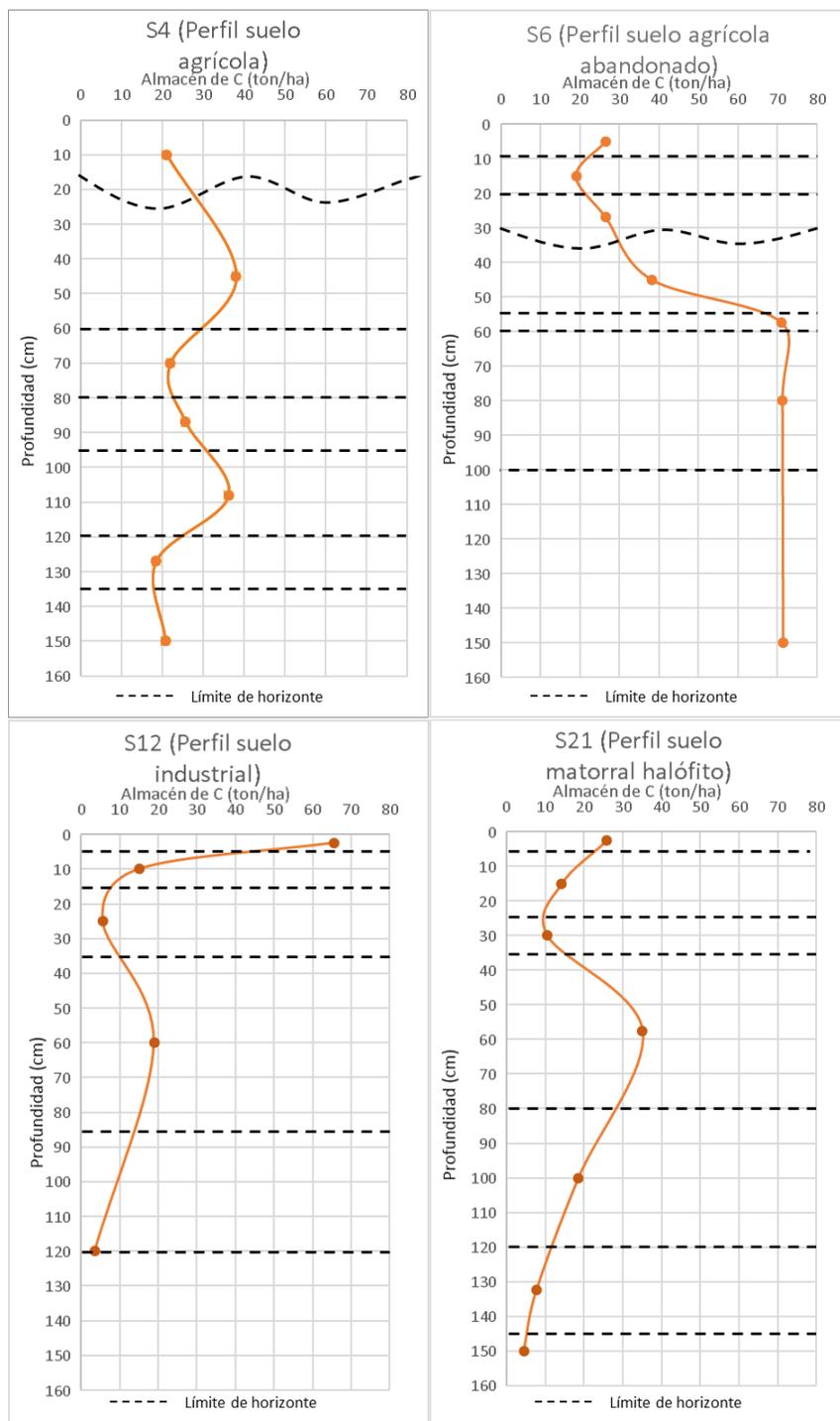


Figura 17: Distribución vertical de los almacenes de COS en los perfiles edáficos de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 17 los almacenes de COS en los horizontes de los perfiles no tienen un comportamiento homogéneo y a continuación se describen a detalle:

1.-El perfil realizado en el **área agrícola** (sitio 4), presentó un comportamiento oscilatorio en sus horizontes con almacenes que varían de las 18 a las 38 ton/ha, el almacén con contenidos más altos se presentó en el segundo horizonte que va de los 15/25 a los 60 cm de profundidad con 38 ton/ha.

2.-Por su parte, el perfil realizado en el **área agrícola abandonada** (sitio 6), presentó almacenes que van desde 19 hasta 38 ton/ha en los horizontes de los primeros 55 cm de profundidad, pero a partir de los 55 cm y hasta los 150 cm presentó un comportamiento homogéneo en sus almacenes de 71 ton/ha en tres horizontes siendo el perfil con los mayores contenidos de COS en profundidad.

3.-En el perfil realizado en la **zona industrial** (sitio 12), se presentó un almacén de 66 ton/ha en los primeros 10 cm de profundidad siendo el almacén superficial con más contenidos en comparación con los demás perfiles edáficos, así mismo, de los 10 hasta 120 cm de profundidad este perfil mostró un comportamiento oscilatorio con almacenes que varían de 4 a 19 ton/ha siendo de los contenidos más bajos en profundidad.

4.-Por último, el perfil del sitio con **matorral halófito** (sitio 21), presentó un comportamiento oscilatorio en los almacenes de sus horizontes variando de 4 a 35 ton/ha, sin embargo, de los 35-80 cm tiene un incremento notable de 35 ton/ha siendo el horizonte del perfil con más alto contenido, esto se debe a que este perfil presento horizontes enterrados producto de diferentes eventos depositación y que conforman un almacén representativo bajo suelos con escasa vegetación.



## **Capítulo IV**

### **Conclusiones**

En este capítulo se desarrolla la discusión y las conclusiones del presente trabajo en las cuales se pretende validar la hipótesis planteada al inicio de la investigación apoyándose de los resultados obtenidos en el capítulo anterior.

## Discusión

Los tipos de suelos encontrados en el área de estudio fueron clasificados según la WRB (2006) y conforme las características halladas en los perfiles edáficos realizados en el trabajo de campo, además estos tipos de suelos concuerdan con la descripción edáfica realizada en la zona de estudio por Ibáñez *et al.* (2010) y se puede visualizar su distribución en el (mapa 2).

Los suelos reportados por esta investigación tienen la característica de tener altos contenidos de sales y generalmente también concuerdan con lo mencionado por Fernández (2010) pues explica que en estas zonas es frecuente la presencia de suelos con perfiles poco desarrollados y con acumulación de sales solubles en el perfil, aunque la profundidad, distribución, cantidad y tipo de sales están condicionadas por el tipo de agua que alcanza el perfil, así como su flujo sobre él.

De esta forma se puede corroborar que la descripción realizada en el trabajo de campo fue elaborada correctamente pues cumple con las características reportadas para los suelos de ecosistemas áridos, a continuación se muestra el Cuadro 14 donde se pueden visualizar los suelos reportados para el área de estudio.

*Cuadro 14: Suelos reportados para el área de estudio*

Punto de Muestreo con perfil	Tipo de suelo encontrado	Clasificación
4 (Uso de suelo Agrícola)	Vertisol	Vertisol cálcico (calcárico, hiposálico)
6 (Uso de suelo Agrícola Abandonado)	Solonetz	Solonetz mólico (cálcico)
12 (Uso de suelo Industrial)	Solonchak	Solonchak hipersálico cálcico
21 (Uso de suelo Matorral Halófito)	Solonchak	Solonchak hipersálico cálcico

Fuente: Elaboración propia con base en Ibáñez & García (2010) y WRB (2006).

En el cuadro anterior se muestran los suelos reportados para el área de estudio, los tres tipos de suelos descritos en esta investigación presentan altos contenidos de sales, esta acumulación de sales en los suelos según Fernández (2010), es un proceso natural en los suelos de estos ecosistemas y dependiendo del tipo de suelo, textura, estabilidad de agregados y las características del agua que fluye sobre el perfil será la cantidad de sales acumuladas en su estructura.

La zona de estudio por su condición natural contiene sales en sus suelos, aunado a esto, las actividades antrópicas llevadas a cabo sobre estos suelos como lo es la actividad agrícola de riego han incrementado los niveles de salinidad; según Pulido (2016), las causas potenciales para la salinización del suelo incluyen el agua de riego salina, inadecuado drenaje, sales del suelo nativas y procesos continuos de inundación y evaporación.

Al realizar el trabajo de campo se pudo constatar que a pesar de los problemas de salinidad que presentan los suelos del Valle de Mexicali con un buen manejo del suelo como es el caso de lavados, un buen drenaje y adición de materia orgánica, permite a los agricultores mantener la productividad agrícola de la zona. La productividad de estos suelos depende de la capacidad de retención de agua, textura, profundidad y contenido de materia orgánica (Mazuela, 2013), por su parte, la materia orgánica pasa a formar parte del COS y es por ello que conocer el contenido de los almacenes de C en estos suelos es importante para esta investigación.

En cuanto a los almacenes de COS en los perfiles edáficos realizados se observó que no todos tienen un mismo patrón de comportamiento, aunque los perfiles con uso de suelo industrial y matorral halófito pertenecían a la misma unidad edáfica (ver Figura 17). En varios casos se presentaron almacenes con contenidos superiores de hasta 71 ton/ha de COS en algunos horizontes subsuperficiales del perfil, llegando a tener los valores más altos para este tipo de ecosistemas pues según Montaña *et al.* (2016) el almacén de COS en los matorrales áridos y semiáridos fluctúa de 2.1 a 72 ton/ha.

Para el caso del perfil realizado en el área agrícola (sitio 4) se hallaron almacenes de mayor concentración en dos de sus siete horizontes, uno en el segundo a una profundidad de 15/25-60 cm con 38 ton/ha y el otro en su quinto horizonte a una profundidad de 95-120 cm con 36 ton/ha, en cuanto a su primer horizonte que abarca una profundidad de 0-15/25 el almacén presenta 21 ton/ha siendo uno de los valores más bajos de todo el perfil y esto se atribuye a que este almacén se encuentra en constante dinámica por el uso agrícola pues “la labranza convencional desprotege y expone a la intemperie a la materia orgánica que está ocluida en pequeños agregados, la cual puede oxidarse y convertirse en CO<sub>2</sub>” (Matus, 1994, citado en Cotler *et al.*, 2016, p. 127), además, cuando este tipo de ecosistemas son utilizados para la agricultura de riego se observan incrementos de hasta 481% en las emisiones de CO<sub>2</sub> poco tiempo después del riego (Montaño, *et al.*, 2016), lo que provoca pérdidas en el almacén de COS.

En el perfil realizado en el área agrícola abandonada (sitio 6) se encontraron tres horizontes a una profundidad de 55-150 cm con almacenes de COS de 71 ton/ha por horizonte, estos almacenes son los que presentan el mayor contenido de COS acumulado con respecto a los demás perfiles, siendo los más importantes para la zona de estudio pues como indica Montaño (2016), los almacenes en los matorrales áridos y semiáridos fluctúan de 2.1 a 72 ton/ha y estos tienen contenidos similares a los reportados por dicho autor, además, a la profundidad en la que se encuentran no tienen una alta dinámica con las plantas y microorganismos del suelo para ser mineralizados por lo que estos almacenes forman parte de una fracción estable del COS conservándose en el largo plazo que va desde décadas o a más de 1 000 años (FAO, 2002).

En el perfil elaborado en el área industrial (sitio 12), se encontró solo una reserva de COS importante en los primeros 5 cm de profundidad con 66 ton/ha, sin embargo, por ubicarse en la capa superficial se encuentra susceptible de perderse en un corto plazo (años) ante algún cambio de uso de suelo pues según Rodríguez (2012), este almacén queda a merced de los organismos y plantas para estos incorporarlo a la atmosfera como emisiones de CO<sub>2</sub> a través de la **Ra** y **Rh**.

En el último perfil realizado en el área con relictos de matorral halófito (sitio 21), se encontró solo un almacén de COS importante a una profundidad de 35-80 cm con 35 ton/ha, los demás horizontes presentaron contenidos inferiores a 28 ton/ha y este almacén con contenidos más elevados se atribuye a eventos de depositación de materiales organominerales, pues fue muy notorio al momento del muestreo los restos orgánicos, por otra parte, este almacén se encuentra sepultado y se conserva en una profundidad con menos dinámica para las plantas y microorganismos por lo que se puede considerar como un almacén importante para la zona de estudio ya que se conserva en el largo plazo décadas o a más de 1 000 años (fracción estable) (FAO, 2002).

A continuación, se describen los resultados obtenidos del porcentaje de COS de las muestras superficiales por uso de suelo.

#### Uso de suelo agrícola

En este uso de suelo fue notable una tendencia de porcentajes bajos y solo en algunos casos medios, en cuanto a sus almacenes superficiales de COS sus valores fluctuaron en un rango que va desde las 9.3 hasta las 54.2 ton/ha. Los contenidos de COS bajos se pueden justificar porque el COS se encuentra en constante dinámica con las plantas y microorganismos mineralizándose rápidamente, pues según FAO (2018), el desarrollo de la agricultura durante los últimos siglos y especialmente en los últimos decenios ha implicado el agotamiento substantivo de las reservas de C, además, según Matus (1994, citado en Cotler *et al.*, 2016, p. 127) la inversión del suelo y la destrucción de los agregados por la labranza convencional desprotege y expone a la intemperie a la materia orgánica que está ocluida en pequeños agregados, la cual puede oxidarse y convertirse en CO<sub>2</sub>, reduciendo los porcentajes de COS.

Por otra parte, los contenidos medios de COS se atribuyen a prácticas agrícolas mejoradas como aplicación de abonos orgánicos y estiércoles, rotaciones de cultivo, barbecho con rastros, quema, etc., ya que “estas pueden ayudar a mitigar el cambio

climático mediante la reducción de emisiones por la agricultura y por medio del almacenamiento de C en la biomasa de las plantas y el suelo” (FAO, 2018).

#### Uso de suelo agrícola abandonado

En cuanto a los resultados obtenidos de este uso de suelo se pudo observar que los porcentajes de COS en su mayoría son medios y sus almacenes superficiales van desde las 24.7 hasta las 55.8 ton/ha. Dichos contenidos se atribuyen a prácticas de manejo agrícola que fueron empleadas en esos predios para elevar la productividad pues según FAO (2018) los suelos agrícolas con un buen manejo pueden ser una de las mayores reservas de almacenamiento de C y por lo tanto proporcionan una manera prospectiva de mitigar la concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmosfera, sin embargo, al ser abandonados y quedar el suelo desprovisto de vegetación estos contenidos permanecen en la estructura del suelo sin ser mineralizados por la vegetación o microorganismos del suelo al presentarse altos contenidos de salinidad, aunado a esto Bueno, *et al.* (2015) indica que el abandono de tierras agrícolas provoca en mayor medida la captura de CO<sub>2</sub> por la recuperación de matorral xerófilo, en el caso de este uso de suelo favorecería la captura de C el establecimiento del matorrales halófitos.

#### Uso de suelo industrial

Para este uso de suelo los resultados obtenidos en su totalidad fueron porcentajes medios de COS y sus almacenes superficiales fluctuaron en un rango de 48.8 hasta 49.2 ton/ha. Estos contenidos fueron de los más elevados en la zona de estudio y se atribuyen a las altas tasas de salinidad que “limitan la presencia de organismos descomponedores de la materia orgánica” (Pérez, *et al.*, 2018) he inhiben el desarrollo de la vegetación evitando que estos transformen y mineralicen dichos contenidos. Al momento del muestreo en campo se notaron grandes cantidades de sales en forma de costras superficiales que limitaban el establecimiento de vegetación, para este punto de muestreo se reportan 227.82 dS m<sup>-1</sup> teniendo una condición muy fuertemente salina (Padilla, 2017), por otra parte, estos elevados porcentajes de COS pueden ser atribuidos a las sales que se

encuentran depositadas en esa área pues según Dendooven *et al.* (2010) y Xiao, *et al.* (2006), el sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) aumenta la emisión de  $\text{CO}_2$  del suelo, mientras que el cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ) la disminuye.

#### Uso de suelo matorral halófito

En este uso de suelo se encontraron porcentajes bajos de COS y almacenes superficiales que van desde las 23.4 hasta las 29.3 ton/ha. Estos resultados se atribuyen a la escasa vegetación que se encontró en estas áreas de muestreo, además se puede considerar que estas áreas no han tenido alteraciones significativas por actividades antropogénicas que afecten sus contenidos, sin embargo, este uso de suelo presenta más contenidos de COS que algunos predios agrícolas y se atribuye a las biocostras del suelo que ejercen un papel clave en el ciclo del C en los ecosistemas áridos y semiáridos, ya que fijan  $\text{CO}_2$  atmosférico y liberan cerca de 50% al suelo por lixiviación y descomposición, aumentando hasta tres veces el COS respecto al suelo sin biocostras (Castillo & Maestre, 2011). Las biocostras del suelo son comunidades bióticas formadas por la íntima asociación entre partículas de suelo, cianobacterias, algas, hongos, líquenes, hepáticas y briófitas. Están ampliamente distribuidas en las zonas áridas y semiáridas, conformando un manto que cubre hasta 70% de la superficie del suelo, tanto en áreas sin vegetación como en islas de vegetación (Belnap & Lange, 2001), de esta forma las biocostras contribuyen a incorporar C en los suelos de estos ecosistemas, aunque estos se encuentren desprovistos de vegetación.

Como se puede ver existen distintas dinámicas en cuanto a los contenidos de COS en la zona de estudio y estos dependen en gran parte del uso de suelo que se lleve a cabo, si bien las zonas áridas tienen una baja capacidad para acumular y fijar  $\text{CO}_2$ , pueden de cualquier manera hacer una contribución importante a la captura global de C y al mismo tiempo prevenir o disminuir la degradación de suelos (FAO, 2002).

Para la presente investigación los usos de suelo con mayor relevancia por sus contenidos de COS son el industrial y el agrícola abandonado ambos presentaron porcentajes medios

y almacenes que van desde las 24.7 hasta 55.8 ton/ha, convirtiéndose en sitios de importancia pues al cambiar su uso de suelo sin un buen manejo se estarían perdiendo dichos almacenes superficiales, según FAO (2018), históricamente el cambio de uso de suelo y el cultivo de tierras han provocado la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera siendo responsables de alrededor de un tercio de las emisiones globales.

Por otra parte, los usos de suelo agrícola y matorral halófito tienen bajos porcentajes de COS y almacenes superficiales que van desde las 9.2 hasta las 54.2 ton/ha. En este caso el uso de suelo agrícola requiere identificar prácticas alternativas de manejo agrícola que conlleven a un mayor secuestro y estabilización del C en el suelo (García, *et al.*, 2015), para incrementar sus almacenes, mejorar las condiciones del suelo y tener asegurada una buena producción agrícola que beneficie a los campesinos.

En la zona de estudio los almacenes superficiales de COS fluctúan de las 9.2 hasta las 55.8 ton/ha y estos contenidos están en función del uso de suelo que desempeñen. Diversos estudios indican valores semejantes en áreas similares a la zona de estudio, por ejemplo, Montaña *et al.* (2016), reporta que el almacén de COS en los matorrales áridos y semiáridos fluctúa de 2.1 a 72 ton/ha, reportando los almacenes más bajos en las regiones áridas (Sonorense y Chihuahuense) con almacenes promedio de 8.8 ton/ha, por su parte, Ayala (2018), en su estudio realizado en la Paz, Baja California Sur, reporta para este tipo de ecosistemas almacenes que fluctúan de 0.15 a 45.55 ton/ha. Los almacenes de COS encontrados en la zona de estudio fluctúan en los rangos que las investigaciones antes mencionadas reportan para este tipo de ecosistemas y en algunos casos son superiores los contenidos encontrados, lo cual denota la importancia de la zona de estudio para captar y almacenar C en sus suelos en comparación con otras áreas similares.

## Conclusiones

Los suelos que dominan la zona de estudio son jóvenes (Cambisoles, Fluvisoles), suelos arcillosos (vertisoles) y con problemas de salinidad y sodicidad (solonchack y solonetz), esto de acuerdo con las características particulares reportadas en las descripciones de los perfiles elaborados en el trabajo de campo y conforme Ibáñez *et al.* (2010), e Ibáñez *et al.* (2017).

En el estudio vertical del C mediante la elaboración de perfiles edáficos, se encontraron almacenes con elevados contenidos en el perfil del sitio 6 con 71 ton/ha en tres horizontes con una profundidad de 95-150 cm, estos resultados son más altos que los encontrados en superficie los cuales fluctúan en un rango de 9.2-55.8 ton/ha. Lo que indica que los suelos de la zona de estudio son capaces de almacenar más COS en profundidad preservándose en formas más estables ya que son menos susceptibles ante los cambios de uso de suelo.

En cuanto al estudio superficial, se encontró que las zonas agrícolas presentan en algunos casos almacenes con contenidos inferiores en comparación a otros usos de suelo, los cuales fluctúan de 9.2-54.2 ton/ha, y esto es producto de la acción de plantas y microorganismos en el suelo que contribuyen a su transformación y mineralización, además de la labranza que acelera la oxidación de la materia orgánica al destruir los agregados. Por su parte, las prácticas agrícolas determinan la magnitud de los almacenes de C en estos suelos, lo que requiere de la identificación de prácticas de manejo para este tipo de suelos que conlleven al secuestro y a la estabilización del C en el suelo

En los suelos agrícolas abandonados se encontraron almacenes de COS que fluctuaron de 24.7-55.8 ton/ha y altos contenidos de salinidad, por lo que estos almacenes se atribuyen a las prácticas de manejo que se efectuaron e incrementaron los porcentajes de C, aunado a esto, los altos contenidos de sales han favoreciendo la preservación del COS, ya que ralentizan su mineralización, debido a condiciones extremas que limitan la presencia de organismos descomponedores de la materia orgánica.

En cuanto a los suelos de uso industrial, se encontraron almacenes de COS que fluctúan de 48.9 a 49.2 ton/ha, los cuales son atribuidos a las altas tasas de salinidad que al igual que en el uso de suelo agrícola abandonado impiden que la vegetación se desarrolle y mineralice el C favoreciendo su preservación, esta condición en estos usos de suelo ha determinado la preservación del COS siendo los almacenes más importantes del área de estudio, sin embargo, la condición salina en la que se encuentran impide que estos almacenes incrementen sus contenidos pues inhibe la actividad biológica, además inhabilita los suelos impidiendo que la vegetación se desarrolle e incorpore más C.

En los suelos con matorral halófito se encontraron almacenes superficiales de COS que van desde 23.4 hasta 29.3 ton/ha y se atribuyen a la escasa vegetación que hay en esas áreas, pues los matorrales halófitos no aportan suficiente materia orgánica, sin embargo, estos suelos presentan más contenidos de COS que algunos sitios agrícolas por lo que estos contenidos se atribuyen a biocostras que se encuentran en suelos áridos y semiáridos, ya que fijan CO<sub>2</sub> y liberan 50% del mismo al suelo por lixiviación y descomposición contribuyendo de esta forma al incremento de los contenidos de COS en estos sitios. Las biocostras son una forma natural de secuestrar C en este tipo de ecosistemas y son muy frágiles ante los cambios de uso de suelo por lo que al destruirlas por el cambio en el uso de suelo se perdería la capacidad de estos sitios para captar CO<sub>2</sub>.

Las zonas áridas por su condición natural tienen un bajo potencial para captar y almacenar C, sin embargo, en el área de estudio se pudo constatar que, si existen almacenes importantes de COS tanto en superficie como en profundidad y en algunos casos presentan contenidos superiores a los reportados para este tipo de ecosistemas, dichos almacenes están en función del uso de suelo que se lleve a cabo y sus prácticas de manejo que determinan su dinámica como reservorios o emisores de C, de esta forma se cumple con el objetivo general de la investigación y se puede validar la hipótesis planteada concluyendo que el área de estudio contribuye a mitigar los gases de efecto invernadero con dichos almacenes encontrados en algunos usos de suelo, pero también contribuye a su emisión principalmente con la actividad agrícola.

## Bibliografía

Arriaga, L., 2009. Implicaciones del cambio de uso de suelo en la biodiversidad de los matorrales xerófilos: un enfoque multiescalar. *Investigación Ambiental* , 1(1), pp. 6-16.

Ayala, F., 2018. Flujos y almacenes de Carbono edáfico en un ecosistema árido del noroeste de México. La paz: Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C..

Belnap, J. & Lange, O., 2001. Biological soil crusts: structure, function, and management.. Berlin: Springer-Verlag.

Bueno, P. y otros, 2015. Cambios de uso de suelo y sus efectos sobre la dinámica de GEI en el estado de Durango, México. *SciELO*, 6(4).

Camargo, L. & Esperón, M., 2005. Efecto de la heterogeneidad espacial y estacional del suelo sobre la abundancia de esporas de hongos micorrizógenos arbusculares en el valle semiárido de Tehuacán-Cuicatlán, México. *Biología Tropical* , 53(3), pp. 339-352.

Castillo, A. & Maestre, F., 2011. La costra Biologica del suelo. *Chilena de Historia Natural*, Volumen 84, pp. 1-21.

CFE, 2007. Manifestación de impacto ambiental particular, Mexicali: Comisión Federal de Electricidad.

CICESE, 1998. Estudio geohidrológico del campo geotérmico de Cerro Prieto, Ensenada: s.n.

Cotler, H., Martínez, M. & Etchevers, J., 2016. Carbono orgánico en suelos agrícolas de México: Investigación y políticas públicas. *Terra Latinoamericana*, 34(1), pp. 125-138.

Dendooven, L. y otros, 2010. Dynamics of carbon and nitrogen in an extreme alkaline saline soil. *Soil Biology & Biochemistry* , Volumen 42, pp. 865-877.

FAO, 2002. Captura de Carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra, Roma: FAO.

FAO, 2007. Secuestro de Carbono en tierras áridas, Roma: FAO.

FAO, 2018. Portal de Suelos de la FAO. [En línea] Available at: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-management/secuestro-de-carbono-en-el-suelo/es/> [Último acceso: 8 09 2018].

Fernández, J., 2010. El recurso suelo-agua en medios áridos y semiáridos. Granada, España: Departamento Geoquímica Ambiental.

Figueroa, M. E., 2007. Los sumideros naturales de CO<sub>2</sub>: una estrategia sostenible entre el cambio climático y el protocolo de Kioto desde las perspectivas urbana y territorial. Sevilla: Universidad de Sevilla.

Galicia, L. y otros, 2016. Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1), pp. 1-29.

García, F., Albaladejo, J., Almagro, M. & Martínez, M., 2015. Beneficial effects of reduced tillage and green manure on soil aggregation and stabilization of organic carbon in a Mediterranean agroecosystem.. *Soil Tillage*, Volumen 153, pp. 66-75.

Glenn, E., Pitelka, L. & Olsen, M., 1992. The use of halophytes to sequester carbon. *Water, Air, & Soil Pollution*, 64(1), pp. 251-263.

Gobierno de Baja California, M., 2015. Página Oficial. [En línea] Available at: [http://www.bajacalifornia.gob.mx/portal/nuestro\\_estado/municipios/mexicali/suelo.jsp](http://www.bajacalifornia.gob.mx/portal/nuestro_estado/municipios/mexicali/suelo.jsp) [Último acceso: 12 07 2018].

Grijalva, A., 2014. Agroindustria y algodón en el valle de Mexicali. La compañía industrial jabonera del pacífico. *Estudios Fronterizos*, 15(30), pp. 11-42.

Ibáñez, A., Álvarez, G., Castaño, G. & Mercado, I., 2017. Informe final. "Actualización del diagnóstico del riesgo de afectación del Campo Geotérmico sobre los suelos del Valle de Mexicali, Baja California" , Querétaro: Facultad de Ciencias- Programa Universitario de Estrategias para la Sustentabilidad (PUES).

Ibáñez, A. & García, N., 2010. Evaluación de las emisiones de la Planta Geotérmica Cerro Prieto sobre el recurso suelo, México: s.n.

INEGI, 2004. Guía para la interpretación cartográfica edafología. primera ed. Aguascalientes: s.n.

INEGI, 2016. Mapa digital de México. [En línea] Available at: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/mapadigital> [Último acceso: 20 Marzo 2017].

IPCC, 2000. Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura, s.l.: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático .

IPCC, 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. , Kanagawa: Institute for Global Environment Strategies.

IPCC, 2006. Agriculture, forestry and other land use. Hayama, Japan: Institute for Global Environmental Strategies.

IPCC, 2013. Carbon and Other Biogeochemical Cycles. En: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. New York: Cambridge University Press, pp. 465-544.

Jackson, M. L., 1964. Análisis químico de suelos. España: Ediciones Omega, S. A. Barcelona.

Jaramillo, V., 2004. El ciclo global del carbono. En: Cambio climático: una visión desde México. México: *Instituto Nacional de Ecología* , pp. 77-85.

Martínez, E., Fuentes, J. P. & Acevedo, E., 2008. Carbono Orgánico y propiedades del Suelo. *Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 1(8), pp. 68-96.

Mazuela, P. C., 2013. Agricultura en zonas áridas y semiáridas. *Idesia* , 31(2), pp. 3-4.

Ministerio de Agricultura, P. y. A., 2015. Sumideros de Carbono. [En línea] Available at: <https://www.mapama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mecanismos-de-flexibilidad-y-sumideros/sumideros-de-carbono/> [Último acceso: 7 noviembre 2017].

Montaño, N. y otros, 2016. Almacenes y flujos de Carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México; Síntesis y perspectivas. *Terra Latinoamericana*, 34(1), pp. 39-59.

Moreno, A., 2008. Sistemas y análisis de la información geográfica, manual de autoaprendizaje con Arc gis. Segunda ed. México: Alfa Omega.

Moreno, J. & López, M., 2005. Desarrollo agrícola y uso de agroquímicos en el Valle de Mexicali. *Estudios Fronterizos*, 6(12), pp. 119-153.

Padilla, L. S., 2017. VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA SALINIDAD EN SUELOS DEL DISTRITO DE RIEGO 014, MEXICALI BAJA CALIFORNIA. Toluca: s.n.

Paz, F. y otros, 2016. Distribución espacial y temporal del carbono orgánico del suelo en los ecosistemas terrestres de México. *Terra Latinoamericana*, 34(3), pp. 289-310.

Paz, F. y otros, 2016. Modelación simple y operativa de la distribución del carbono orgánico por fracciones físicas en los suelos. *Terra Latinoamericana* , 34(3), pp. 321-337.

Pérez, D. & Sánchez, J. A., 1983. Ordenamiento ecológico del valle de Mexicali. *Estudios Fronterizos*, 1(1), pp. 113-152.

Pérez, M., Castaño, G., Cruz, J. & A., I., 2018. Artrópodo-fauna edáfica de tres tipos de uso de suelo del Valle de Mexicali, Baja California, México.. CDMX: Instituto de Biología, UNAM.

Puente, C., 1978. Geología del Campo Geotérmico Cerro Prieto, Baja California, México, s.l.: Lawrence Berkeley Laboratory.

Ramírez, J., 2006. Capítulo III: La contaminación del suelo. En: Una visión de la problemática ambiental de Mexicali y su valle. Mexicali, Baja California: Universidad Autónoma de Baja California , pp. 93-136.

Ramírez, J. & García, S. G., 2004. Chemical evolution of disposal brine of the Cerro Prieto geothermal field during its transport toward surrounding soils, México. *Environmental Geology*, 1(46), pp. 721-726.

Rodríguez, E., 2012. Sostenibilidad. En: Biomasa, Biocombustibles y sostenibilidad. Palencia: *Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario*, pp. 155-200.

Rojas, F. y otros, 2017. La ciencia del suelo en el ciclo del carbono de México. *Elementos para políticas públicas*, 1(2), pp. 69-96.

SAGARPA, 2017. Ciclo agrícola otoño-invierno 2017-2018. [En línea] Available at: <https://www.gob.mx/sagarpa/bajacalifornia/articulos/presenta-ciclo-agricola-otono-invierno-2017-2018-un-avance-del-4-85-sagarpa?idiom=es> [Último acceso: 30 Septiembre 2018].

Schlesinger, W. & Bernhardt, E., 2013. Biogeochemistry: an analysis of global change. Tercera ed. Elsevier: Oxford.

Schlesinger, W. H., 1997. Biogeochemistry. primera ed. New York: National Academic Press.

SEMARNAT, 2002. NORMA Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Segunda ed. México: SEMARNAT.

SEMARNAT, 2014. El medio ambiente en México. [En línea] Available at:

[http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_resumen14/03\\_suelos/3\\_3.html#](http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen14/03_suelos/3_3.html#)

[Último acceso: 10 03 2018].

SEMARNAT, 2017. Indicadores básicos del desempeño ambiental de México. [En línea] Available at:

[http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/indicadores14/conjuntob/03\\_suelos/03\\_suelos\\_intro.html](http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/indicadores14/conjuntob/03_suelos/03_suelos_intro.html) [Último acceso: 6 Diciembre 2017].

Servicio Meteorológico, N., 2018. Información Climatológica. [En línea]

Available at: <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica>

[Último acceso: 06 Mayo 2018].

Siebe, C., Jahn, R. & Stahr, K., 2006. Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en campo. Segunda ed. México: UNAM.

Six, J., Conant, R., Paul, E. & Paustian, K., 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241(2), pp. 155-176.

Sundquist, E. T., 1986. Geologic analogs: Their value and limitations in carbon dioxide research. En: J. R. T. y. D. E. Reichle, ed. *The Changing Carbon Cycle*. New York: Springer-Verlay, pp. 371-402.

WRB, 2006. Un marco conceptual para clasificación, correlación y comunicación internacional, Roma: FAO.

WRB, 2014. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos, Roma: FAO.

Xiao, L., Feng, L., Qi, M. & Zhi, C., 2006. Interactions of NaCl and Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> on soil organic C mineralization after addition of maize straws. *Soil Biology and Biochemistry*, Issue 38, pp. 2328-2335.