



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA  
CARRERA DE BIOLOGÍA

---

**EFFECTO DE LADERA EN EL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO  
EN SUELOS Y PALEOSUELOS DE UNA CUENCA TIPO DEL PARQUE  
NACIONAL IZTACCÍHUATL-POPOCATÉPETL**

que para obtener el título de:

**BIÓLOGO**

Presenta:

**César Olmo Enciso Jiménez**

Área de conocimiento: **Ecología terrestre**

Director:

**M. en C. Juan Manuel Valderrábano Gómez**

Asesor:

**Dr. Gerardo Cruz Flores**

Ciudad de México, 2021





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **Dedicatoria:**

### **A la Humanidad:**

Por las grandes hazañas que ha logrado y sobrellevado. Nuestra especie ha sufrido mucho pero también ha logrado lo imposible. Desde el descubrimiento del fuego, las grandes pirámides, hasta el primer hombre en la Luna y los primeros robots en Marte. Pero ese camino de lo imposible también nos ha traído pérdidas a mano de nuestras dudas, miedo, ideales y ambiciones que se separan de la realidad de la que nace nuestra ciencia. Desde el enjuiciamiento a Galileo Galilei, el decapitamiento de Antoine Lavoisier, la muerte de Marie Curie a causa de radiación, la vida llena de trabas e injusticias de Nikola Tesla, el suicidio dudoso de Alan Turing luego de ser enjuiciado por homosexualidad, el asesinato de Dian Fossey y el enjuiciamiento de Clair Cameron Patterson entre muchos otros quienes han dado todo por las maravillas de nuestra realidad y naturaleza y que han sufrido por ello. Me gustaría mencionar a todas esas personas que han dado sus vidas por el estudio y descubrimiento de teorías, leyes, métodos, aplicaciones e invenciones, que ahora, inherentemente nos permiten tener lo que llamamos un “Día a Día”, junto con la esperanza para un futuro próspero de nuestra especie y el mundo entero. Por último, solamente puedo decir gracias, ya que, con su legado, me hacen poder ver al mundo y al ingenio humano sintiéndome maravillado de su hermosura y armonía con el todo.

### **A mis padres:**

Ya que a pesar de que el camino que he elegido ha sido mío, ellos han estado ahí para guiarme, aconsejarme y apoyarme. Enriqueciendo de igual forma mi conocimiento y ayudándome a ver el mundo con otra perspectiva cada día.

### **A todos mis profesores:**

Estoy seguro de que, si tan solo uno de ellos hubiera sido distinto, hubiera hecho que hoy fuera una persona diferente. Desde el kínder hasta la universidad. Pero especialmente a mis tres últimos pilares, Juan Manuel Valderrábano Gómez, Alma Bella López López, y Gerardo Cruz Flores. Quienes sin duda me han ayudado a llegar hasta donde me encuentro ahora. Simplemente gracias.

### **Al Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl:**

Su existencia ha dado vida, cultura e historia a nuestro país. Al igual que recursos para el desarrollo de los pueblos que han crecido en sus alrededores. Este parque resguarda tesoros a simple vista, espero este trabajo ayude a protegerlo y cuidarlo.

## **AGRADECIMIENTOS:**

### **A la Universidad Nacional Autónoma de México:**

Por darme la oportunidad de formar parte de su comunidad, llenándome de experiencias y enseñanzas únicas que construyeron mi formación y mi vida.

### **A mis papás:**

Por siempre darme el apoyo, paciencia y amor que necesitaba. Gracias por sacarme a descubrir el mundo y por mostrarme las maravillas de la naturaleza

### **A mi familia:**

Por recibirme con los brazos abiertos y apoyándome en mi trayectoria académica. Cada uno me ha dado ánimos, aliento, risas y ayuda cuando lo necesitaba. En especial la familia Espinosa Jiménez, quienes me recibieron en su casa y me adoptaron. Los quiero mucho a todos.

### **A mis profesores:**

Juan Manuel Valderrábano Gómez: Que desde un inicio me acogió en sus enseñanzas, siendo además de un excelente maestro un guía. Siempre con gran carisma y dedicación. Demostrándome que los caminos de la vida no siempre son lo que esperamos, y que no importan las adversidades, siempre hay algo que aprender, recapacitar y mejorar. Gracias por ser mi maestro y espero poder seguir siendo su padawan.

Alma Bella López López: Que siempre estuvo ahí para apoyarme, dándome ánimos y haciéndome retomar mi camino. Admiro su pasión por el suelo, gracias por compartirme parte de ese conocimiento. También ha sido un honor poder ser su sobrino y haber disfrutado de muchos momentos juntos.

Gerardo Cruz Flores: Gracias por recibirme en su laboratorio. Ha sido un gran mentor para mí, siempre recordando lo rigurosa que es la palabra y la ciencia, su sabiduría me ha enseñado mucho, tanto académicamente como en la vida diaria.

## Índice

1.-Introducción.....	3
2. Marco teórico.....	5
2.1 Historia y Dinámica del Carbono.....	5
2.2.1 El carbono y las eras geológicas.....	7
2.3. El suelo.....	8
2.4 Paleosuelos.....	10
2.5 Propiedades del suelo.....	10
2.5.1 Propiedades físicas, químicas y biológicas.....	10
2.6 Índice melánico.....	11
2.7 Ácidos húmicos y fúlvicos.....	11
2.8 Efecto de ladera.....	12
3. Justificación y Planteamiento del Problema:.....	12
4. Hipótesis.....	14
5. Objetivos.....	14
5.1 General.....	14
5.2 Particulares.....	14
6. Zona de estudio.....	14
6.1 Vegetación.....	16
7. Metodología.....	17
7.1 Gabinete.....	17
7.2 Campo.....	18
7.3 Laboratorio:.....	21
8.-Resultados y Discusión:.....	22
8.1.- Contenidos de carbono en suelos recientes.....	24
8.2.-Propiedades en suelos de mil años de desarrollo aproximado.....	30
8.3.-Carbono en Suelos de 5000 años de edad aproximada.....	39
8.4- Comparación del Carbono del suelo e Índice melánico por edades.....	45
9.-Conclusiones:.....	53
10. Bibliografía:.....	54
11.- Anexo.....	59

## Abstract

Soil is the second largest store of carbon on the planet after the oceans and the importance of maintaining it as a carbon sink is necessary to mitigate global climate change. In the region of the Iztaccíhuatl and Popocatepetl volcanoes there are chronosequences that show the presence of paleosols derived from 1,100 and 5,000 year old materials, these ones are exposed almost on the surface by the erosive and degradation processes that recent soils have suffered. An important effect exerted by the orography on the development of soils is the solar radiation, differentiated by the exposure of the slope, which causes that in the northern hemisphere, the canyons oriented from E to W have shady (more humid) or sunny slopes (drier) that generate microclimates that influence the spatial and temporal dynamics of soil nutrients. The study of the distribution of C and its relationship with other essential nutrients serves to know the behavior of biogeochemical cycles, which have varied in each system of the planet during various geological eras. The objective of this research was to know and compare the soil organic carbon (SOC) contents of recent soils and paleosols developed on opposite slopes to know their spatio-temporal dynamics within the Alcalica River Basin, in the Iztaccíhuatl-Popocatepetl National Park (PN- IP); under the hypothesis that there are higher SOC contents in paleosols than in recently developed ones given a lower ambient temperature than at present. To achieve the purpose of this work, a bibliographic and cartographic investigation (printed and digital) was carried out and the ecological study unit was delimited, within which the sampling sites on contrasting slopes were chosen. In the field phase, ecological and physiographic attributes of the site were recorded in each locality, an edaphic profile was made, and samples were taken from each horizon for physical (bulk density, color and humidity) and chemical (organic matter, SOC by Van Bemmelen factor, electrical conductivity, aluminum, iron, potential and active pH and melanic index) study. The SOC of recent soils was found to be from 33.7 to 224.16 Mg ha<sup>-1</sup>, for 1,000-year-old paleosols it was from 24.5 to 190.7 Mg ha<sup>-1</sup> and for those of 5,000 years it was from 44.9 to 127.6 Mg ha<sup>-1</sup>. Regarding the slope, for recent and 1,000-year-old soils, it was observed that at higher altitudes the SOC content tends to decrease in the shady slope opposite to the sunny one that tends to increase. In general, in the soils of the three ages studied, the average SOC was higher on shady slopes. With the results obtained, it is concluded that there is more carbon in recent soils than in paleosols and

that the thickness of the soil, its acidity and the aluminum content are the variables that determine the pedogenetic development throughout the profile.

**Keywords:** Sierra Nevada, buried soils, chronosequences, toposequences.

## Resumen

El suelo es el segundo almacén de carbono en el planeta después de los océanos y, la importancia de mantenerlo como sumidero de carbono es necesaria para mitigar el cambio climático global. En la región de los Volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl existen cronosecuencias que evidencian la presencia de paleosuelos derivados de materiales de 1,100 y 5,000 años, expuestos casi en la superficie por los procesos erosivos y de degradación que han sufrido los suelos recientes. Un efecto importante que ejerce la orografía en el desarrollo de los suelos es la radiación solar diferenciada por la exposición de la ladera, lo que provoca que, en el hemisferio norte, las cañadas orientadas de E a W tengan laderas umbría (más húmedas) o solana (más secas) que generan microclimas que a su vez influyen en la dinámica espacial y temporal de los nutrientes del suelo. El estudio de la distribución del C y de su relación con otros nutrientes esenciales sirve para conocer el comportamiento de los ciclos biogeoquímicos, mismos que han variado en cada sistema del planeta durante las diversas eras geológicas. Esta investigación tuvo por objetivo conocer y comparar los contenidos de carbono orgánico (COS) de suelos recientes y paleosuelos desarrollados en laderas opuestas para conocer su dinámica espacio-temporal dentro de la Cuenca del río Alcala, en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl (PN-IP); bajo la hipótesis de que existen mayores contenidos de COS en paleosuelos que en los desarrollados recientemente dada una temperatura ambiente menor que en la actualidad. Para alcanzar el propósito de este trabajo, se realizó una investigación bibliográfica y cartográfica (impresa y digital) y se delimitó la unidad ecológica de estudio, dentro de la cual se eligieron los sitios de muestreo en laderas contrastantes. En la fase de campo, en cada localidad se registraron atributos ecológicos y fisiográficos del sitio, se realizó un perfil edáfico y de cada horizonte se tomaron muestras para análisis físicos (densidad aparente, color y humedad) y químicos (Materia orgánica, COS por el factor de Van Bemmelen, conductividad eléctrica, aluminio, hierro, pH potencial y activo e índice melánico). Se encontró que el COS de suelos recientes fue de 33.7 a 224.16 Mg ha<sup>-1</sup>, para los paleosuelos de 1,000 años fue de 24.5 a 190.7 Mg ha<sup>-1</sup>

<sup>1</sup> y para los de 5,000 años fue de 44.9 a 127.6 Mg ha<sup>-1</sup>. Respecto de la ladera, para suelos recientes y de 1,000 años, se observó que a mayor altitud el contenido de COS tiende a disminuir en ladera umbría contrario a solana que tiende a aumentar. En general, en los suelos de las tres edades estudiadas, el COS promedio fue mayor en laderas umbría. Con los resultados obtenidos se concluye que existe más carbono en suelos recientes que en paleosuelos y que el espesor del suelo, su acidez y el contenido de aluminio son las variables que determinan el desarrollo pedogenético a lo largo del perfil.

**Palabras Clave:**

Sierra Nevada, suelos enterrados, cronosecuencias, toposecuencias

## 1.-Introducción

El carbono es un elemento químico que ha estado presente en la Tierra desde su formación. Actualmente, constituye el 0.027% de la corteza terrestre que equivale a 0.09% en masa (Cabrera, 2004), siendo el suelo uno de sus principales reservorios en los ecosistemas debido a que contiene entre 1500 y 2000 Pg, razón por la que es el elemento más abundante (45-55%) en la materia orgánica edáfica (Galicia *et al.*, 2016).

La materia orgánica del suelo (MOS) que contiene al carbono orgánico del suelo (COS), ha recibido particular atención debido a que puede actuar como fuente de CO<sub>2</sub> o sumidero de carbono. De igual forma en algunos suelos han ocurrido eventos volcánicos, eólicos, aluviales, coluviales, glaciales y antropogénicos dando lugar a horizontes enterrados o paleosuelos, los cuales son de suma importancia por sus altos contenidos en COS (O'Rourke *et al.*, 2015). El almacenamiento del COS depende de la interacción entre diversos factores (bióticos, abióticos y antrópicos), entre los que se tienen al tipo de vegetación, radiación solar, temperatura y humedad (que definen los tipos de clima) por lo cual, los efectos combinados de todos estos factores interactúan sobre las rocas y sobre la dinámica de la MOS como agentes en la génesis de suelos. Se ha sugerido que, en escalas de décadas a siglos, las actividades humanas relacionadas al uso de la tierra y su cambio de uso de la tierra y silvicultura (UTCUTS), son el principal factor que determina los niveles del almacenamiento del COS (Scott *et al.*, 2002). Estos impactos antropogénicos en el suelo convierten a éste en fuente de gases de efecto invernadero (GEI), siendo los principales CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> los que son emitidos (IPCC, 2014). Actualmente se plantea que el UTCUTS es la segunda causa del incremento de CO<sub>2</sub> atmosférico luego

de la quema de los combustibles fósiles, siendo responsable de alrededor de 20% de sus emisiones a la atmósfera (Lal, 2004), lo cual significa que los suelos agrícolas han pasado de actuar como sumideros de C a convertirse en fuente de CO<sub>2</sub> para la atmósfera, debido al mal uso que se está realizando de los recursos edáficos y bióticos (Macías, 2004). Los suelos de las zonas boscosas sujetas a tala inmoderada, incendios forestales y algunos otros procesos de degradación, pueden ser considerados también como emisores de carbono (CONANP y SEMARNAT, 2013).

A lo largo del tiempo la dinámica del carbono como elemento se ha regido por su interacción química y sus formas presentes en los distintos estados de la materia (sólido, líquido y gaseoso), por lo que a lo largo de las eras geológicas las distintas variaciones a través de sus flujos por el manto terrestre, la atmósfera y los cuerpos de agua han sido numerosas, y se ha visto que los cambios de temperatura y especialmente los debidos a grandes glaciaciones, han dirigido la dinámica del carbono y sus almacenes en todo el planeta (Macías, 2004).

El vulcanismo como fenómeno natural ha sido y es precursor de la formación de nuevos suelos, o del desarrollo de nuevos horizontes que a lo largo del tiempo han dejado "suelos enterrados" o "paleosuelos". El grado de desarrollo del suelo enterrado varía, gracias a la estabilidad volcánica en ciertos periodos de tiempo (Sedov, 2002), ayudando a identificar el paleoclima de la región y la dinámica de sus ciclos biogeoquímicos. El estudio de núcleos de depósitos glaciares y de núcleos de depósitos de sedimentos lacustres ubicados a lo largo de la Cuenca del Valle de México, han servido para reconstruir el paleoclima de la región; en ambos métodos el estudio de los paleosuelos aportaría una reconstrucción más exacta para diferenciar un clima regional a escala local (Sedov *et al.*, 2009).

Los paleosuelos presentan diversas propiedades y fases de desarrollo, que representan diferentes momentos de la historia geológico-ambiental. Éstos han demostrado las evidencias de cambios drásticos en los ambientes, como consecuencia de modificaciones en los factores climáticos y bióticos, entre los que se incluye la acción del hombre mostrando evidencias de cómo el clima y condiciones abióticas los fueron moldeando en su desarrollo. Así mismo, se han llegado a identificar prácticas agrícolas de civilizaciones antiguas por medio de restos de polen y fitolitos de maíz, así como ciertas condiciones reducto-mórficas relacionados con el riego de estas mismas actividades (Rebolledo *et al.*, 2015).

Durante el Oligoceno superior surgieron los volcanes en el área de la Cuenca de México, donde se empezaron a formar las bases de la Sierra Nevada, por medio de la acumulación de productos volcánicos durante 20 millones de años. Según CONANP y SEMARNAT (2013), durante el Cuaternario se produjeron diferentes movimientos tectónicos en esta región, lo cual produjo la formación de los volcanes Popocatepetl (Activo) e Iztaccíhuatl (sin actividad desde la última gran glaciación hace 10,000 años), formaciones ubicadas en la zona de estudio del presente proyecto, por lo que ésta ha sufrido cambios geológicos y climáticos que le dan una dinámica particular al carbono contenido en los suelos, el cual también está influido por la vegetación, la altitud, el clima y la temperatura. Los antecedentes climáticos de la región demuestran que al igual que en todo el mundo, en esta zona se tenían temperaturas menores comparadas con las que hoy se presentan e incluso, se tiene registro de que la última glaciación sufrida en esta zona fue hace tan solo 10,000 años, dado que en tiempos geológicos este intervalo de tiempo se cataloga como muy reciente (Chivelet, 2010).

Por lo anterior, el presente estudio buscó conocer los contenidos de carbono orgánico en suelos recientes distribuidos en laderas contrastantes a una misma altitud, asociados a bosques templados y pastizal montano, comparando sus contenidos con los de los paleosuelos que los subyacen en la Cuenca del río Alcalica del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl (PN- IP) y su zona de influencia con la finalidad de conocer sus cambios a través del espacio y del tiempo.

## 2. Marco teórico.

### 2.1 Historia y Dinámica del Carbono.

El carbono es el elemento básico para la vida. Se piensa que este elemento fue depositado en la superficie terrestre por el bombardeo de asteroides y meteoritos ricos en carbono, en forma de hidrocarburos, ácidos orgánicos y compuestos amino, a los cuales se les atribuye el ser los iniciadores de la evolución de la vida. Así, el carbono comenzó a transportarse por el manto terrestre, atmósfera, océanos, tierra y biosfera, dando lugar a su ciclo global. Dentro del ciclo (Figura 1), este elemento se encuentra en una fase inorgánica como producto del intemperismo de las rocas y los minerales; además de procesos de subducción de la corteza terrestre, fumarolas hidrotermales y erupciones volcánicas que liberan CO<sub>2</sub> a la atmósfera, desde incluso antes de la aparición de los primeros organismos vivos (Horwath, 2015). Desde el establecimiento de la vida en el

planeta, el carbono fue esencial para que ésta evolucionara, dando paso a una siguiente etapa en su ciclo (Fase biológica). Los productores primarios lo obtienen de la atmósfera por medio de la fotosíntesis, cuando éstos mueren, sus tejidos ricos en carbono vuelven al suelo quedando contenidos en la materia orgánica que lo cubre y que queda expuesta al intemperismo, dispuesta a ser mineralizada y reincorporada a los tejidos de los organismos vivos. Una de las propiedades de la materia orgánica del suelo (MOS), es que integra los residuos orgánicos en diferentes grados de descomposición y que ayuda a prevenir la escorrentía, incrementa la humedad y contribuye a moderar las fluctuaciones diarias de temperatura en las capas edáficas superiores. La MOS también funciona como un enorme almacén de nutrimentos, entre ellos el carbono. Se ha estimado que los organismos vivos abarcan aproximadamente un cuarto de todo el carbono de los ecosistemas terrestres, mientras que el restante está almacenado en la MOS (Lessard *et al.*, 2008).

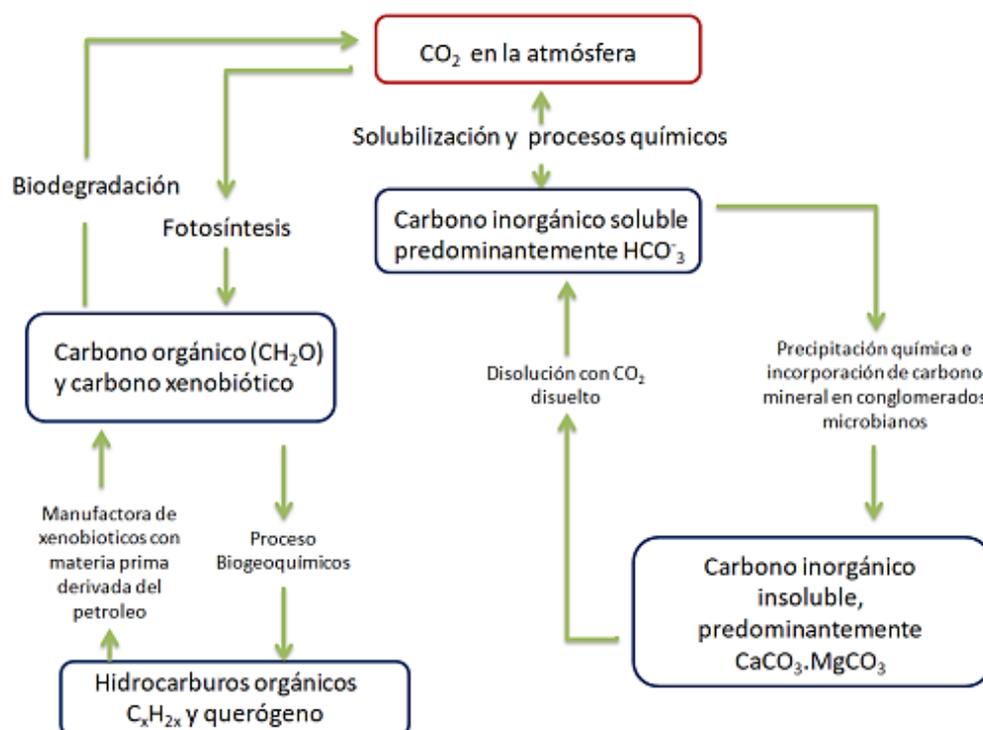


Figura 1.- Ciclo del Carbono en la tierra (Manahan, 2007).

De acuerdo con su dinámica, la mayor parte de los organismos descomponedores de la materia orgánica, son aeróbicos por lo que desprenden CO<sub>2</sub> como resultado de la ruptura de las moléculas orgánicas, debido a la actividad de millones de organismos contenidos en un volumen tan pequeño como una cucharada de suelo. Así, la respiración del edafón

es una importante fuente de CO<sub>2</sub> atmosférico que contribuye anualmente con 100 billones de toneladas al ciclo global del carbono. Dentro del sistema Tierra, el CO<sub>2</sub> ha sido exhalado naturalmente a través de las emisiones volcánicas que han estado presentes desde la formación de la misma y a lo largo de las eras geológicas (Figura 2), por lo que se ha podido observar una relación entre el carbono que se encuentra en la atmósfera con la temperatura del planeta (Lessard *et al.*, 2008).

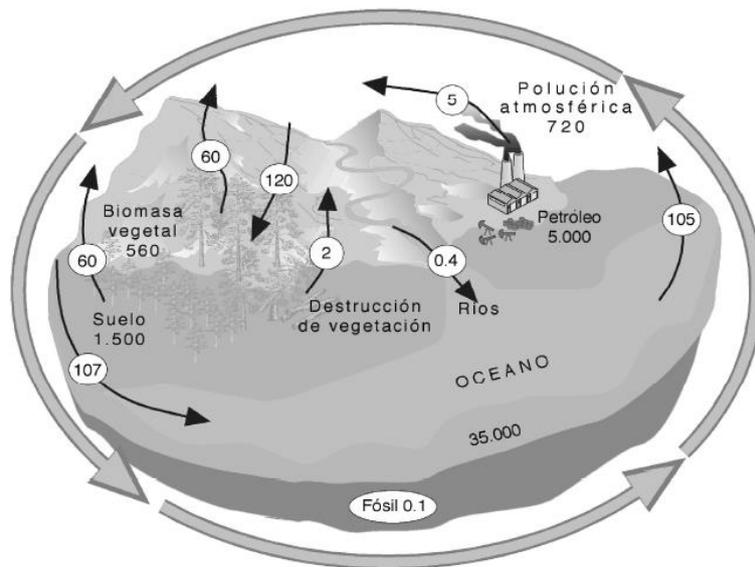


Figura 2.- Ciclo global del Carbono (Flujos y sumideros en Gt C = 10<sup>9</sup> t C) (Lal, 2001, tomado de Macías, 2004).

### 2.2.1 El carbono y las eras geológicas.

A través de la historia de la Tierra los balances de C en los suelos han sido muy variables. Houghton (1995), estima que entre los años de 1850 y 1990 las emisiones correspondientes al cambio de uso de la tierra (deforestación e incremento del pastoreo y de las tierras cultivadas) pasaron de 0,4 Pg año<sup>-1</sup> a 1,7 Pg año<sup>-1</sup> con una liberación neta hacia la atmósfera de 25 Pg de carbono. De acuerdo con el Panel Intergubernamental del Cambio Climático IPCC (2000), la pérdida histórica de C en los suelos agrícolas fue de 50 Pg en el último medio siglo, lo cual representa un tercio de la pérdida total del suelo y la vegetación. En el pasado, el desarrollo de la agricultura fue la principal causa del incremento de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Actualmente, los mayores contribuyentes en las emisiones de CO<sub>2</sub>, son la combustión de combustibles fósiles por parte de la industria y el transporte (6,5 Pg año<sup>-1</sup>).

Está comprobado que los episodios glaciares se han seguido produciendo en períodos generalmente cortos, pero repetidos a lo largo del tiempo y que, desde el punto de vista del tiempo geológico, actualmente se presentó una de las últimas etapas de las glaciaciones Pleistocenas (Allègre, 1990, tomado de Macías, 2004), al tiempo que se ha podido observar una relación entre el carbono de la atmósfera en la liberación de CO<sub>2</sub> con la temperatura, en donde el suelo es otra fuente muy importante de este compuesto (Figura 3).

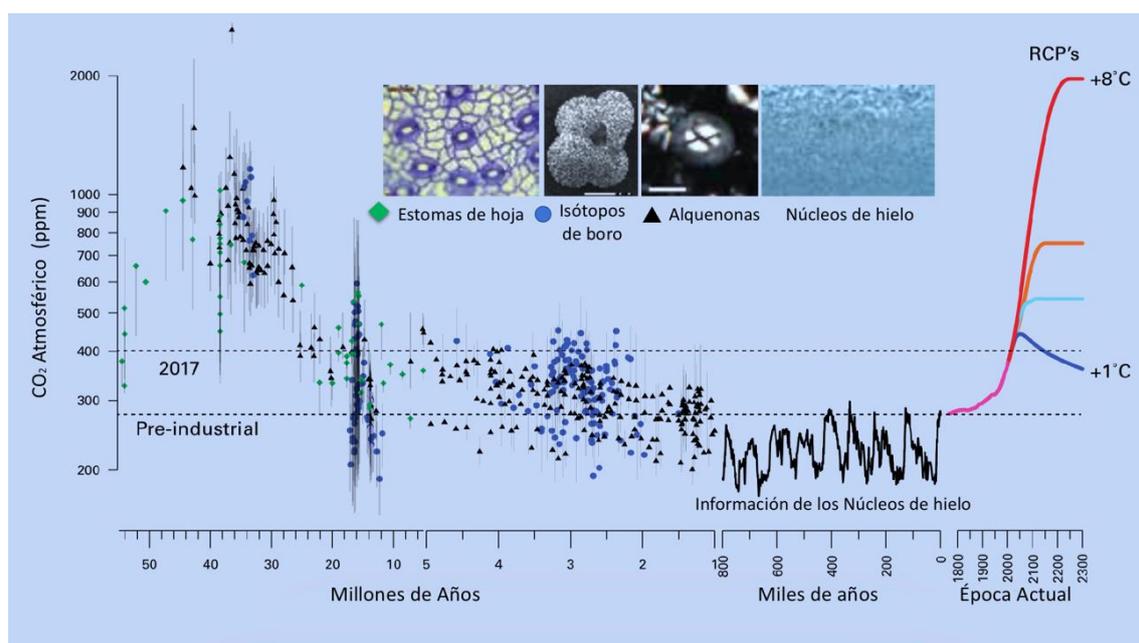


Figura 3.- Reconstrucción del CO<sub>2</sub> atmosférico en los últimos 55 millones de años a partir de datos proxy que incluyen isótopos de boro (círculos azules), alquenonas (triángulos negros) y estomas de hojas (rombos verdes). Las mediciones de los últimos 800,000 años se obtuvieron de núcleos de hielo antárticos e instrumentos modernos (rosa). Las estimaciones futuras incluyen vías de concentración representativas (RCP por sus siglas en inglés) 8.5 (rojo), 6 (naranja), 4.5 (azul claro) y 2.6 (azul) (WMO, 2017).

### 2.3. El suelo

El suelo es un cuerpo natural, tridimensional, no consolidado, producto de la interacción de los factores formadores en la edafogénesis (clima, material parental, organismos, relieve y tiempo), que se forma a una tasa de un cm por cada 100 a 400 años (Doran y Parkin, 1994) y está compuesto por sólidos (material mineral y orgánico), líquidos y gases, que se mezclan para formar horizontes o capas diferenciales, que resultan de las adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia a través del

tiempo, y cuyo espesor puede ir desde la superficie terrestre hasta varios metros de profundidad dependiendo de las condiciones ambientales de la época que definen el desarrollo pedogenético (Sposito, 1989 citado en Volke *et al*, 2005).

En la pedogénesis se estudia el origen, clasificación y descripción del suelo, de acuerdo con su ambiente natural, pero sin tomar en cuenta su uso. Es así que se propuso la fórmula general de la formación del suelo con todos sus factores formadores, la cual, da la impresión de que cualquier propiedad del suelo puede ser estimada a partir de estas variables, ya que éstos actúan de forma individual y conjunta, dando como resultado a las propiedades del suelo a partir de estas interacciones. Algunos de estos factores no pueden ser cuantificados, por lo que esta fórmula es descriptiva y no determinativa; aun así, las características de un suelo dan evidencia de que en su formación influyeron factores muy específicos (Osman, 2013).

En la génesis de Andosols, la química del complejo Al-humus del suelo es fundamental por su importante papel en la estabilización de la MO y secuestro de C en estos suelos. Por esta razón, la formación de complejos coordinados de Al-humus se presenta principalmente en presencia de altos contenidos de carbono orgánico y ante valores de pH igual o menor a 5 (Shoji & Fujiwara, 1984). Una reserva de C orgánico muy estable es el que se aloja en complejos organometálicos, por encontrarse protegido de la mineralización microbiana dado el efecto tóxico del aluminio, estimulándose la acumulación de carbono en la medida que el intemperismo libera más aluminio para formar complejos organominerales resistentes (Percival *et al.*, 2000; Basile-Doelsch *et al.*, 2007). A diferencia de los complejos de Fe que se presentan en escasa cantidad en los Andosols, los complejos Al-humus son la forma dominante del llamado Al activo en los horizontes A de este grupo de suelos (Broquen *et al.*, 2013). En ciertos casos el suelo puede llegar a ser sepultado por materiales geológicos, tales como ceniza volcánica, polvo arrastrado por el viento, depósitos glaciares, otros sedimentos o incluso lava, interrumpiendo su ciclo pedogenético e iniciando uno nuevo sobre el material que lo cubrió. Estos suelos suelen ser distintivos y rastreables en grandes regiones y pueden contener restos orgánicos enterrados, haciéndolos útiles para datar rocas y sedimentos, y de igual forma interpretar climas del pasado y topografía. A este suelo sepultado se le puede llamar suelo enterrado, sepultado o paleosuelo.

## 2.4 Paleosuelos.

A los paleosuelos se les puede nombrar “Suelos del pasado” (Retallack, 1990), y se pueden definir como suelo formado bajo condiciones climáticas diferentes a las actuales que son registradas en su fase sólida (Ruhe y Scholtes 1971; Yaalon, 1975; Retallack 1990 y, Bronger y Att, 1998).

En los grandes estratovolcanes se tienen secuencias de paleosuelos, producidas por una serie de eventos volcánicos consecutivos. Dado que cada paleosuelo sepultado representa un periodo de estabilidad del paisaje, en donde hay condiciones de calma relativa del volcán, el estudio de las secuencias completas constituye una fuente de información paleoambiental a diferentes escalas cronológicas (Solís-Castillo *et al.*, 2012; Jasso-Castañeda *et al.*, 2006, Siebe *et al.*, 1996).

En el caso de zonas volcánicas, para encontrar los paleosuelos se debe identificar cierto tipo de suelo que esté ligado a los constantes recubrimientos de las cenizas y pómez arrojadas por el volcán durante el tiempo que éste se encuentre activo.

Los suelos y los paleosuelos desempeñan y desempeñaron funciones de gran importancia para el sustento de la vida en este planeta, dado que representan un almacén y una fuente de alimentos para la producción de biomasa, actúan como medio filtrante, amortiguador y transformador, además de ser hábitat de miles de organismos (Volke *et al.*, 2005).

## 2.5 Propiedades del suelo.

El suelo es un sistema compuesto de tres fases; sólida, líquida y gaseosa que lo hacen trifásico, particulado, disperso y poroso, todo lo cual, le otorgan características de importancia agronómica. Las diversas propiedades del suelo inmersas en cada una de sus fases pueden agruparse en tres amplios conjuntos, mismo que se describen a continuación:

### 2.5.1 Propiedades físicas, químicas y biológicas.

La condición física de un suelo determina la rigidez y fuerza de sostenimiento, la facilidad para la penetración de las raíces, aireación, capacidad de drenaje y de almacenamiento de agua, la plasticidad y la retención de nutrientes.

Las propiedades físicas de mayor importancia son la textura, estructura, densidad aparente, porosidad, profundidad y pedregosidad, esto debido a que expresan la distribución y organización de las partículas sólidas, que determinan a su vez la capacidad

para dejar fluir o transmitir el agua o aire del suelo, además de servir para saber el tipo de desarrollo y la influencia del material parental al que está sujeto el desarrollo pedológico.

Con referencia a las propiedades químicas de los suelos, éstas son determinadas principalmente por el contenido y tipos de materia orgánica y de arcillas, que al mismo tiempo son fuentes principales de nutrientes. Para poder interpretar la calidad de la materia orgánica respecto a su fertilidad, se utiliza la relación carbono/nitrógeno.

Una propiedad que es importante para el estudio de los suelos es el pH, éste indica el grado de acidez o alcalinidad y es importante porque influye en la disponibilidad de los nutrimentos. A esta propiedad fisicoquímica, está unido el intercambio catiónico, mismo que es determinante para saber el incremento o decremento del pH.

Dentro de las propiedades biológicas la presencia de organismos dentro del suelo es una señal inequívoca del estado de salud que posee dicho ecosistema. Basta con observar la presencia de organismos vivos para saber cómo se encuentra el suelo y para qué se puede usar, cómo ha sido explotado o sencillamente saber que problemas se podrían enfrentar al establecer un cultivo determinado. En los suelos es necesario determinar dos parámetros que indican su calidad biológica: la diversidad y la abundancia de organismos.

## 2.6 Índice melánico

El índice melánico es un índice utilizado para poder diferenciar entre un horizonte melánico de uno fúlvico (Honna, *et al*, 1988). Para esto se deben medir las absorbancias a 450 y 520 nm, para luego obtener el índice melánico con la proporción:  $K_{450}/K_{520}$ . Si de esta proporción se obtienen valores  $\leq 1.70$  se consideran a estos horizontes como melánicos y donde predominan los ácidos húmicos (valores  $> 1.70$ ) se consideran horizontes fúlvicos (donde predominan ácidos fúlvicos).

## 2.7 Ácidos húmicos y fúlvicos.

Conforme pasa el tiempo, gracias a la actividad enzimática de los microorganismos, la degradación de la parte orgánica de las plantas y organismos del suelo, se van formando sustancias húmicas (SH) entre las cuales se tienen a los ácidos húmicos (AH) y ácidos fúlvicos (AF), ambas definidas como macromoléculas orgánicas con estructura química compleja, distinta y estable (López-Salazar, 2014). La diferencia entre uno y otro radica en la complejidad de su estructura ya que contienen distintos tipos de grupos funcionales, variando sus capacidades de agrupamiento con otros compuestos, formando así una

estructura a base de moléculas aromáticas alquilo con grupos funcionales como ácidos carboxílicos, hidroxilos fenólico y grupos quinona, que también forman complejos metálicos (Flores-Cespedes *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2009). Estas macromoléculas estables de carbono son las formas de almacenamiento con las que el carbono queda temporalmente inmovilizado por largos periodos de tiempo, pasando a ser una de las fracciones mayoritarias de la reserva de carbono recalcitrante en el suelo (Valera *et al.*, 2015). La acumulación de carbono orgánico es una propiedad de muchos Andosols. La estabilidad de la materia orgánica parece que ocurre por la formación de acomplejaciones del aluminio con el humus y por la adsorción de las sustancias húmicas al alófono o a la imogolita (Parfitt, 1980).

### 2.8 Efecto de ladera.

El relieve del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl genera condiciones microclimáticas que afectan el desarrollo de los suelos en cada una de sus cuencas. Tal es el caso del efecto que genera la ladera en la cuenca Alcalica cuya orientación ascendente dominante está dirigida de oeste a este lo que propicia exposiciones de ladera contrastantes hacia el norte y hacia el sur. Este efecto genera una mayor exposición a la radiación solar en una de sus laderas, siendo ésta considerada como ladera solana, dejando a su contraparte con el nombre de umbría, con una incidencia de radiación solar menor. Reyes *et al.*, 2011, mencionan que la exposición de las laderas y las condiciones microclimáticas a lo largo de la toposecuencia afectan las propiedades fisicoquímicas del suelo, tales como el contenido de materia orgánica, el pH y la humedad. Es por esto que en el presente estudio se describieron perfiles de suelo en distintos pisos altitudinales en un diseño de pares de sitios homólogos en altitud, pero de exposición contrastante.

## 3. Justificación y Planteamiento del Problema:

Después de los océanos, el suelo es el segundo almacén de carbono más importante con aproximadamente 1,206 Pg de carbono orgánico (CO) en los cien primeros centímetros de suelo en el mundo (Hiederer y Köchy, 2011), por lo que es considerado como uno de los macronutrientes más importante para el desarrollo de los organismos, dado que aproximadamente 50 % de su materia seca es carbono. El estudio de su distribución y de su relación con otros nutrientes esenciales, así como la proporción C:N, sirve para conocer el comportamiento de los ciclos biogeoquímicos, quienes han variado en cada compartimento terrestre durante las diversas eras geológicas, influyendo directamente en la dinámica de la vida en el Planeta. Una evidencia importante del registro del carbono

en ambientes antiguos es el que se encuentra en los paleosuelos, compartimentos que han servido para reconstruir paleoambientes y su relación con la biota de esa época, por lo que su estudio y comparación con datos actuales ayuda a entender los cambios espacio-temporales. En la actualidad, conocer el comportamiento del carbono, ha tomado relevancia por los problemas ambientales ocasionados por la deforestación, el cambio de uso de suelo y aumento de la temperatura global, alterando la productividad de los ecosistemas, su biodiversidad, banco de germoplasma y servicios ambientales inherentes a ellos, como los ciclos hidrológicos y biogeoquímicos íntimamente relacionados al del carbono (Cruz *et al.*, 2020).

Hoy existen evidencias como las que presentaron White (2003), Macías (2004) y Chivelet (2010), que muestran que la temperatura de hace unos 1000 a 5000 años fue más fría que la actual.

Ante lo expuesto, el presente trabajo pretende contribuir al conocimiento de los contenidos del carbono orgánico en los suelos recientes y en los paleosuelos del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl para conocer cómo han variado sus contenidos en los bosques de coníferas de 5,000 años al presente. Con base en ello, se plantearon las siguientes preguntas de investigación:

1. Debido a los cambios ambientales naturales y los ocasionados por las actividades antrópicas en la región del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl ¿Habrá diferencias en los contenidos de carbono de los suelos recientes comparados con los de hace 1,000 y 5,000 años?
2. Al conocer los cambios del contenido de carbono en los suelos y en paleosuelos ¿Será posible proponer un manejo para mejorar la captura de carbono en los suelos recientes, considerando los actuales aumentos de temperatura del ambiente, que se reflejan en la disminución de los glaciares y la gradual migración de la vegetación hacia sitios más altos?
3. De existir diferencias entre los contenidos de carbono de los suelos y paleosuelos ¿Qué propiedades edáficas están influyendo en la estabilidad del carbono?

## 4. Hipótesis

Las evidencias científicas han encontrado que los promedios de temperatura ambiente de hace más de 4,000 años eran menores, por lo cual, los contenidos del carbono orgánico de los suelos con edades entre 1,000 y 5,000 años serán mayores que los encontrados en suelos con desarrollo reciente por tener menor degradación y mayor estabilidad de la MOS.

## 5. Objetivos.

### 5.1 General

Estimar los contenidos de carbono en suelos recientes y enterrados bajo depósitos de 1,000 y 5,000 años, a lo largo de una gradiente altitudinal y con exposición geográfica contrastante, para comparar sus contenidos y establecer diferencias que indiquen cambios temporales en la dinámica del carbono de los suelos desarrollados en la Cuenca del río Alcalica.

### 5.2 Particulares

- Identificar sitios con suelos recientes y paleosuelos bajo depósitos de 1,000 y 5,000 años en laderas de exposiciones contrastantes (solana y umbría), para describir perfiles de suelo y tomar de cada horizonte muestras edáficas que sirvan para evaluar propiedades físicas y químicas.
- Conocer la relación del porcentaje de carbono de cada suelo con los parámetros físicos y químicos evaluados.
- Conocer las diferencias entre el contenido de carbono de los suelos recientes con respecto al de los paleosuelos en ladera solana y umbría.
- Determinar y comparar el valor del índice melánico como indicador de estabilidad de la materia orgánica en cada suelo.
- Conocer las diferencias entre el contenido de carbono de los suelos recientes con respecto a la exposición de la pendiente.

## 6. Zona de estudio.

El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl se localiza en la parte centro-oriental del Eje Volcánico Transversal, localizándose entre las coordenadas extremas: 18°59'00.43" y 19°28'09.44" de Latitud Norte y 98°34'55.88" y 98°46'40.95" de Longitud Oeste. El

Parque Nacional ocupa un área de 39 mil 819 hectáreas dividida entre el Estado de México, Puebla y Morelos (CONANP, 2013).

La Sierra Nevada, como también se le conoce, separa los valles de México y Puebla con cuatro volcanes conectados por montañas de anchura variable; de los cuales, destaca al sur el Popocatepetl con 5,450 m sobre el nivel del mar. En la región de las cumbres, los piroclastos más recientes de este volcán forman una pendiente uniforme del 70 % que sólo se ve interrumpida en el noroeste por los restos de un antiguo cráter. La pendiente intermedia tiene una inclinación de 20 a 30%, cubierta por capas de piroclastos jóvenes de varios decímetros de espesor, de los que la roca base sobresale sólo esporádicamente. En el Paso de Cortés, las laderas norte del Popocatepetl se fusionan gradualmente con las meridionales del Iztaccíhuatl a 3,600 m. La morfología de esta extensa región de cumbres (5,280 m a 4,000 m snm) fue afectada considerablemente por períodos de glaciación, durante el cual la mayor parte del manto sedimentario fue erosionado. Bancos de lava moldeados, circos glaciares y morrenas de fases glaciares más recientes dan testimonio de estos procesos (Miehlich, 1991).

Durante los últimos 20,000 años, la actividad explosiva del Popocatepetl ha sido caracterizada por cuatro eventos mayores, con producción de pómez de caída y flujos de ceniza (14,000, 5,000, 2,150 y 1,100 años AP) y cuatro menos expuestos, ocurridos hace 11,000, 9,000, 7,000 y 1,800 años AP (Siebe *et al.*, 1997; Siebe y Macías, 2004, 2006).

La estructura morfológica básica del Iztaccíhuatl son pendientes intermedias (4,000 m - 3,000 m) originadas por arroyos de lava que descendían de varios centros eruptivos y se endurecían en crestas extendidas. La base sólida está cubierta por capas de ceniza y piedra pómez de los piroclastos más recientes. Esta morfología básica fue remodelada por los glaciares, que cubrieron completamente las laderas hasta los 3,400 m. Debajo de las morrenas a 3,400 m las laderas están diseccionadas por numerosos valles de origen glaciar (Miehlich, 1991).

Actualmente, la precipitación anual oscila entre 800 y 1,200 mm, misma que se presenta en diversas formas (nieve, lluvia, agua nieve y granizo). Generalmente las tormentas se producen hacia el este y son dirigidas por los vientos al oeste.

En la estación húmeda, los volcanes son afectados por los vientos alisios del noreste y los ciclones tropicales, y en la seca por los vientos altos del oeste. Las lluvias ocasionales de invierno son generadas por los nortes del Golfo de México (López, 2014).

Respecto de los suelos en la región del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, se sabe del desarrollo de Leptosols, Regosols, Andosols, Cambisols y Fluvisols (CONANP, 2013), de los cuales resaltan los Andosols, ya que la múltiple superposición de capas de tefras (pómez) y cenizas, además de los efectos del intemperismo hídrico, eólico y del clima dominante, conllevan a los procesos de su formación (Galicía, 2016).

Los Andosols (del japonés *an*, oscuro y *do*, suelo), se derivan de cenizas volcánicas recientes, por lo que son suelos ligeros con alta retención de humedad y buen contenido de nutrientes, así como con un alto contenido de materia orgánica; según la proporción de vidrios volcánicos presentes, pueden formar Andosols húmicos (presentes en áreas forestales poco alteradas) y Andosols vítricos (en zonas con vegetación de coníferas) cuando presentan más del 60 por ciento de vidrios, ceniza volcánica y texturas gruesas (CONANP, 2013).

Una parte importante que influye en la pedogénesis de los suelos es la naturaleza y cantidad de la materia orgánica que cubre las capas superficiales del mismo. Bajo condiciones de temperaturas como las que prevalecen en zonas templadas con bosques de coníferas, la tasa de desintegración es lenta, lo que lleva a la formación de humus.

### 6.1 Vegetación.

La región montañosa de la Sierra Nevada arriba del límite forestal (*timberline*) aproximadamente a los 4,000 m snm regularmente está cubierta por manchones de hierba (asociaciones de *Festuca tolucensis* H.B.K. y *Calamagrostis tolucensis* H.B.K.). Entre los 4,000 y 3,300 m snm se establece principalmente el *Pinus hartwegii*.

En las laderas sur y oeste del Popocatepetl, laderas occidentales del Iztaccíhuatl y en las laderas orientales de la zona de Tláloc-Telapón hay una asociación forestal de coníferas de *Abies religiosa* y de pinos (*Pinus pseudostrobus* y *Pinus ayacahuite*). Las laderas orientales de Popocatepetl e Iztaccíhuatl están cubiertas por *Pinus montezumae*, *Pinus teocote* y *Alnus firmifolia*. Por debajo de 2,700 m la vegetación natural es un bosque mixto de *Pinus leiophylla*, *Pinus teocote*, *Pinus rudis* y varios encinos caducifolios y perennes (Miehlich, 1991).

## 7. Metodología

Para alcanzar los objetivos establecidos en la presente investigación, la estrategia incluyó tres etapas generales que se describen a continuación:

### 7.1 Gabinete

En primera instancia, se realizó una investigación cartográfica y bibliográfica para tener información de la zona de estudio y sustentar el tema de investigación. Se obtuvo cartografía en formato digital e impresa a través de la página electrónica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) de las cartas E14B41 y E14B42, escala 1:50,000. La información digital en formato *shape* se desplegó en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Además, en la misma página electrónica se obtuvo, de la región, el modelo de elevación digital del terreno, con resolución de 15 metros, con lo que se localizó al río Alcalica en el occidente del Iztaccíhuatl, delimitando a las dos laderas que conforman su cuenca y su red de drenaje utilizados como unidad ecológica de estudio (UEE), próxima al municipio de Amecameca.

Con esta información generada en el SIG, se obtuvieron mapas de uso de suelo y vegetación, grado de inclinación y exposición de la pendiente de la región, que junto con imágenes de Google-Earth, sirvieron para ubicar los sitios de estudio. Así mismo, otra etapa dentro de la de gabinete se refiere al análisis de los resultados y conformación del informe final.

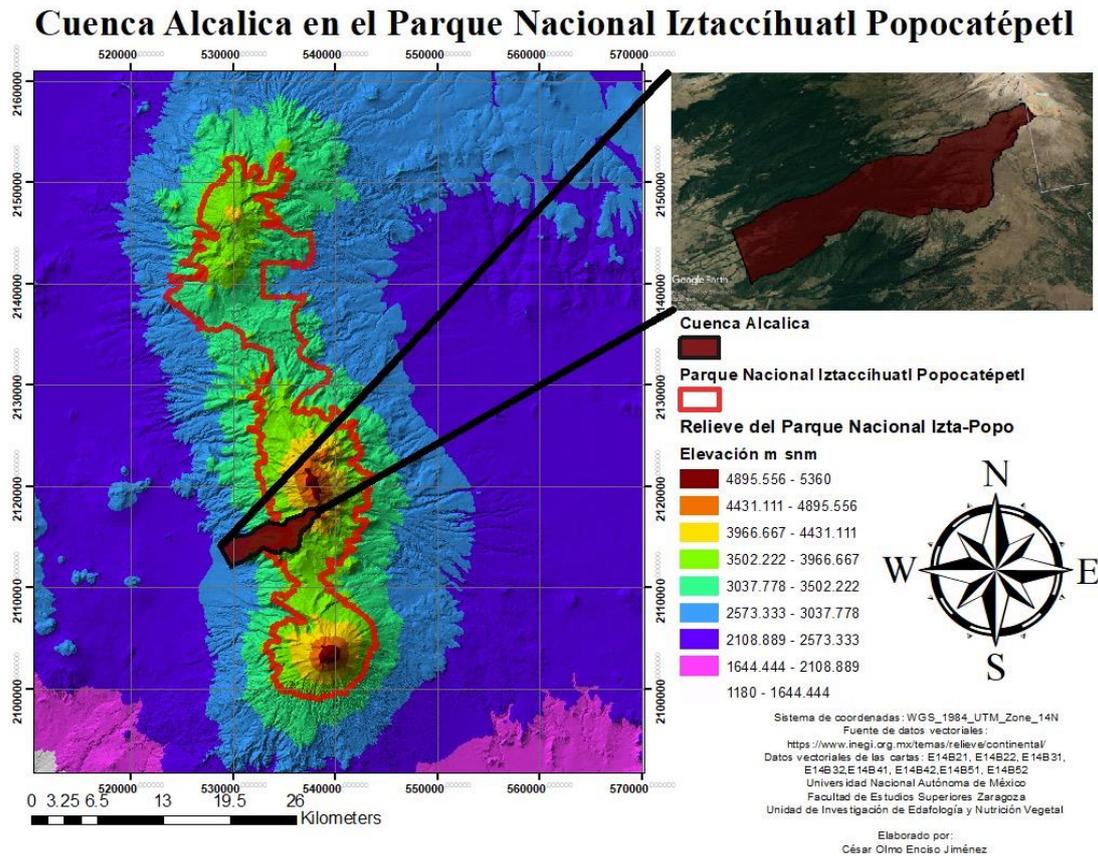


Figura 4.- Mapa del modelo de elevación digital del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, con la delimitación de la cuenca Alcalica.

## 7.2 Campo

Como parte del trabajo de campo, se seleccionaron 13 sitios a lo largo de toda la subcuenca del río Alcalica; de los cuales, se tomaron muestras comparativas de ladera solana y ladera umbría en 10 de ellos. En cada sitio se registraron coordenadas geográficas en sistema UTM WGS84 y se hizo una descripción que incluyó atributos del relieve y estructura de la vegetación, anotando en un formato, como ficha de campo, la geoforma del terreno, altitud y estructura vertical de la vegetación. Posteriormente se abrieron calicatas y realizaron las descripciones de perfiles del suelo utilizando palas planas, pico y barrenas. El uso de éstas últimas fue con el propósito de alcanzar los depósitos de ceniza volcánica y tomar las muestras del paleosuelo cuando los perfiles no los mostraban. Hecha la calicata para mostrar el perfil, se tomaron fotos del mismo (Imágenes 1 a 4), se describieron los horizontes y de cada horizonte se tomaron las muestras edáficas, las cuales se colocaron en bolsas de plástico previamente etiquetadas con los datos del perfil y del horizonte. Para la toma de las muestras para evaluar densidad aparente, las muestras

fueron colectadas con tubos de cobre y envueltas en papel aluminio. Tanto la descripción edáfica como la ecológica fueron realizadas con base en Siebe *et al.*, (2006).



Imagen 1.- Muestra de Excavación para exponer el perfil.



Imagen 2.- Ejemplo de la actividad de diferenciación de los horizontes.



Imagen 3.- Ejemplo de determinación de variables Físicas (Color).



Imagen 4.- Ejemplo de determinación de presencia alófano.

### 7.3 Laboratorio:

En laboratorio, las muestras de suelo se secaron a temperatura ambiente, posteriormente se tamizaron con tamiz de 2 mm, luego se almacenaron en frascos de polietileno previamente etiquetados con los datos de ubicación geográfica y altitud hasta el momento de la evaluación de sus propiedades físicas y químicas.

Entre las propiedades químicas, la materia orgánica se cuantificó con el método de Walkley y Black (Jackson, 1964) para obtener con base en ella el porcentaje de carbono orgánico del suelo (C-orgánico) por el factor de Van Benmelen (Eyherabide, 2014). El índice melánico se determinó por medio del método de Honna (1987) según Vázquez (2004) en el que la muestra se agita con una solución de NaOH 0.5 M y se mide la absorbancia del extracto a 450 y 520 nm, respectivamente. El índice melánico se obtiene dividiendo la absorbancia a 450 nm por la absorbancia a 520 nm.

El pH del suelo se determinó en una suspensión suelo agua en una relación 1:2, con agua destilada (Jackson, 1964) y la conductividad eléctrica se midió según Richards (1990). El pH en  $\text{CaCl}_2$  se midió con una solución de  $\text{CaCl}_2$  0.01M, con una relación suelo-solución 1:2.5 (Siebe, *et al*, 2006). El pH en NaF se midió con una solución de NaF 1N con una relación suelo-solución 1:50 (Fields y Perrot, 1996).

La textura, pedregosidad, color, estructura, estabilidad de agregados y humedad se evaluaron en campo mediante el uso del manual de Siebe, *et al* (2006). Este mismo señala la determinación de la densidad aparente por medio del método del cilindro que fue realizada en el laboratorio.

## 8.-Resultados y Discusión:

Para llevar a cabo la presentación y el análisis de los resultados, se consideró conveniente agrupar los datos por piso altitudinal y pares homólogos de ladera. Esto fue realizado con base en el promedio de estos pares homólogos y establecerlos (Cuadro1) en función de la altitud.

De los resultados obtenidos en los recorridos de campo, se pudo observar que la distribución de la vegetación de los sitios estudiados está marcadamente determinada por la altitud, lo cual se corresponde con lo que describe Jasso (2002) y Cornejo (2019), quienes también encontraron que a más de 4,300 m snm se observa la presencia de pastizales amacollados como grupo dominante, a los 4,100 m snm aún hay presencia del bosque de *Pinus hartwegii* y a 3,300 m de altitud se diferencia el bosque de *Abies religiosa*, que, en ciertos lugares, presenta signos de perturbación por caminos y tala.

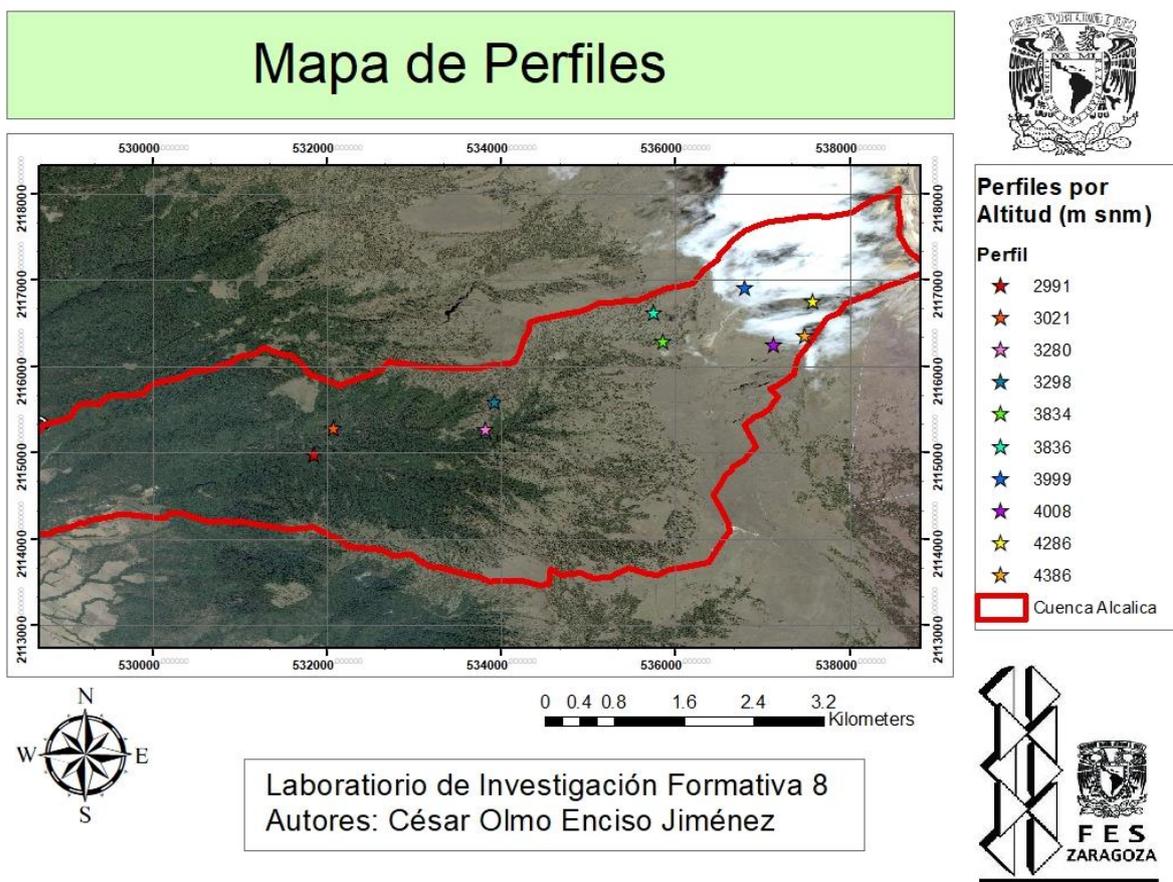


Figura 5.- Mapa de sitios a lo largo de la gradiente altitudinal de la cuenca Alcalica.

Cuadro 1.- Parámetros del terreno obtenidos en los sitios en campo.

Sitio	UTM WGS 84		Altitud _m snm_	Exposición	Vegetación Dominante/Condición	Pendiente del perfil _Grados_
	_X_	_Y_				
Tomacoco 1	531856	2114979	3006	Umbría	<i>Abies religiosa</i> perturbado	23
Tomacoco 2	532087	2115283	3006	Solana	<i>Abies religiosa</i> perturbado	24
Ameca 1	533828	2115278	3289	Umbría	<i>Abies religiosa</i> perturbado	32
Ameca 2	533939	2115585	3289	Solana	<i>Abies religiosa</i> perturbado	35
La Joya 1	535866	2116294	3835	Umbría	<i>Pinus hartwegii</i> -Zacatonal	21
La Joya 2	535758	2116618	3835	Solana	<i>Pinus hartwegii</i> -Zacatonal	31
La Joya 3	536807	2116907	4004	Solana	<i>Pinus hartwegii</i> -Zacatonal	18
La Joya 4	537138	2116256	4004	Umbría	<i>Pinus hartwegii</i> -Zacatonal	33
La Reina 1	537079	2116759	4336	Umbría	Zacatonal	40
La Reina 2	537495	2116352	4336	Solana	Zacatonal	22

### 8.1.- Contenidos de carbono en suelos recientes.

Con la observación de algunos cortes del terreno expuestos por el trazado de caminos, junto con la descripción de los perfiles realizados, se pudo constatar que los suelos de los 10 sitios visitados se han formado a partir de los depósitos de ceniza y pómez exhalados por el volcán Popocatepetl hace 1,000 y 5,000 años aproximadamente, tal y como lo reportó Arana, *et al.*, (2010). La descripción morfológica de los perfiles y de las características de los horizontes se detalla en información que se presentada en el Anexo 1.

En la Figura 6 y en el Cuadro 2, se observa que el comportamiento del contenido de carbono es contrastante entre laderas, siendo mayor en los suelos de sitios ubicados en umbría con excepción del par homólogo ubicado a 4300 m donde el efecto de ladera es mínimo o casi inexistente. El mayor contenido de este nutriente en ambas exposiciones se encontró a 3835 m snm, con un porcentaje de MOS de 11.06 en umbría y 8.12% en solana en bosques de *Pinus hartwegii* en ecotono con Zacatonal montano. Miguel-Jiménez en 2013, reportó que en el intervalo de 3796 a 4100 m snm, se encontraban contenidos de MOS altos, con unos porcentajes de 11.27, en el mismo tipo de vegetación. De igual forma Valderrabano (2013), reportó a una altitud de 3723 m, contenidos de 137.21 Mg ha<sup>-1</sup>, similar a los contenidos que se obtuvieron en solana a 3835 m snm, con 134.1 Mg ha<sup>-1</sup>.

Cuadro 2.-Promedio de los parámetros químicos y físicos obtenidos en laboratorio del suelo reciente.

Sitio	Altitud _m snm_	n	Espesor _m_	Hum _%_	DA g cm <sup>-3</sup>	MO _%_	CO	pH			CE _dS m <sup>-1</sup> _	IM	Al <sub>o</sub> + ½ Fe <sub>o</sub>	Al <sub>p</sub> /Al <sub>o</sub>	Al <sub>o</sub> /Si <sub>o</sub>	C _Mg ha <sup>-1</sup> _
								_H <sub>2</sub> O 1:2.5_	CaCl <sub>2</sub> 0.01M_1:2.5_	_NaF 1N_						
Tomacoco 1	3006	3	0.29	16.53	0.84	5.79	3.36	4.98	.	9.58	1.40	1.93	0.92	0.46	1.88	81.40
Tomacoco 2	3006	3	0.24	.	0.61	4.08	2.37	.	.	.	0.32	2.25	0.80	0.30	1.23	33.72
Ameca 1	3289	6	0.47	18.57	6.51	5.16	2.99	5.43	.	.	0.73	2.18	0.55	0.62	1.78	223.36
Ameca 2	3289	3	0.18	15.09	0.97	8.67	5.03	5.12	4.33	.	0.68	1.72	1.06	0.33	1.78	87.13
La Joya 1	3835	6	0.50	69.15	0.71	11.06	6.41	5.43	4.37	8.72	0.56	1.58	1.42	0.83	1.02	224.16
La Joya 2	3835	6	0.28	57.9	0.95	8.12	4.71	5.85	4.81	10.28	0.55	1.77	1.86	0.25	2.05	134.10
La Joya 4	4004	6	0.51	28.25	0.95	4.30	2.50	6.30	5.32	10.03	0.51	2.03	0.86	0.34	2.03	129.64
La Joya 3	4004	6	0.24	27.46	0.97	4.59	2.66	6.30	4.74	9.96	0.50	2.00	1.01	0.30	2.46	61.07
La Reyna 1	4336	6	0.18	25.30	0.83	5.33	3.09	4.91	4.64	9.83	0.99	2.13	0.34	0.86	0.36	36.12
La Reyna 2	4336	9	0.38	25.00	0.79	2.34	1.36	5.07	6.07	.	0.90	1.95	0.42	0.47	2.01	54.00

N = número de repeticiones de la muestra. Hum = Porcentaje de humedad gravimétrica del suelo; MO = Porcentaje de materia orgánica del suelo; % CO = porcentaje de carbono orgánico del suelo; CE = Conductividad Eléctrica; IM = Índice Melánico; DA = Densidad Aparente. (Al<sub>o</sub> = Aluminio activo total; Fe<sub>o</sub> = Hierro activo total; Al<sub>p</sub> = Aluminio-humus puro; Si<sub>o</sub> = Sílice en alófono e imogolita. Tomados de Comejo-Cruz, C. A., (2019).)

(Los renglones sombreados corresponden a los suelos ubicados en umbría)

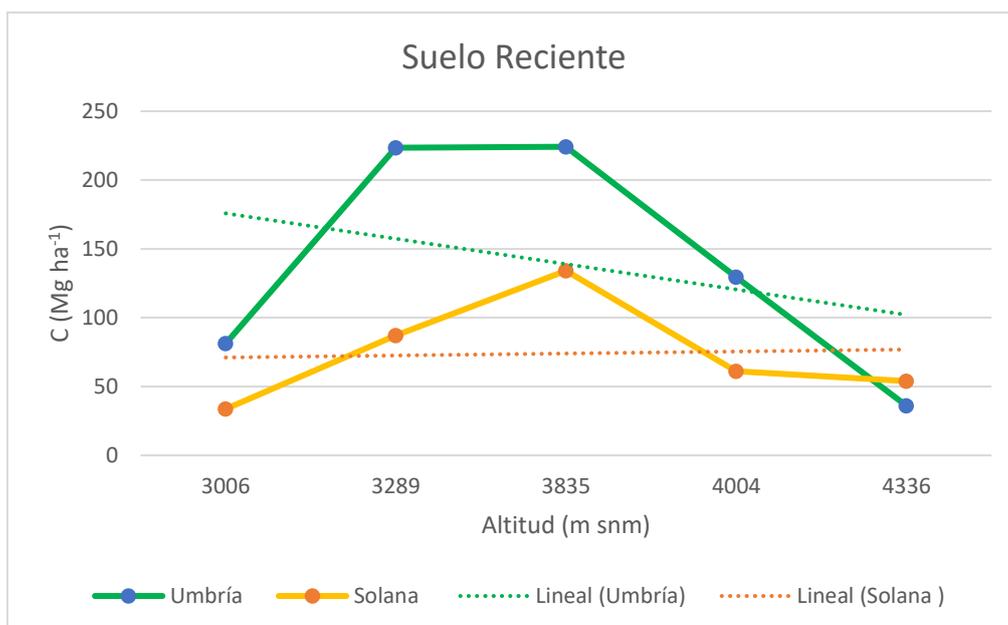


Figura 6.- Mg C  $\text{ha}^{-1}$  con respecto a la altitud y la exposición de ladera.

Las Figuras 7 y 8 muestran que el porcentaje de C promedio por tipo de exposición presenta diferencias estadísticas significativas siendo mayores en laderas umbría (ANOVA simple,  $p < 0.05$ ). Este comportamiento se atribuye a que en ladera umbría existe menor incidencia (radiación) solar que, en solana, lo que provoca que la humedad ambiental y edáfica en ella se mantenga por periodos más largos de tiempo, con lo que disminuye la temperatura y, probablemente la mayor humedad presente en el espacio poroso del suelo desplaza aire y se provoca menor disponibilidad de oxígeno en el suelo. Cuando los residuos vegetales y animales caen, éstos se van acumulando a través del tiempo, degradándose y aumentando sus contenidos en esta ladera.

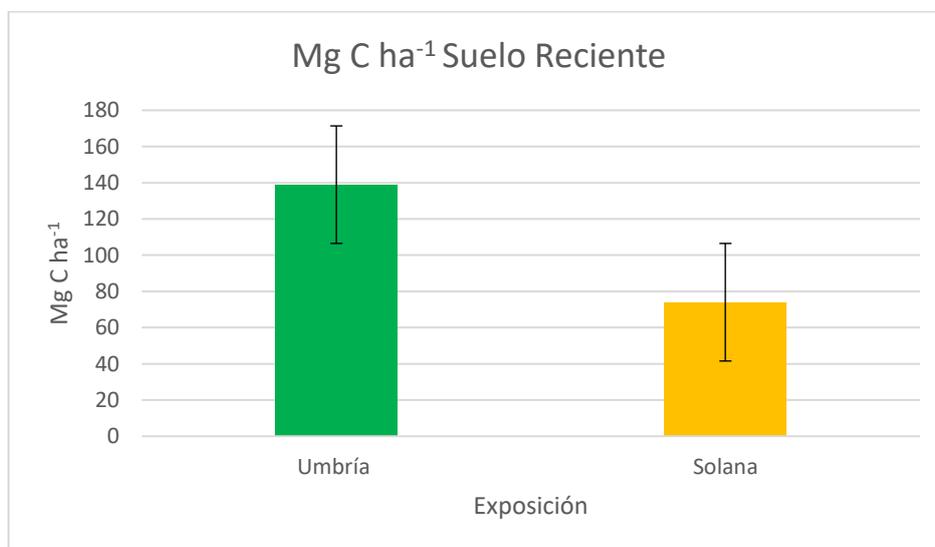
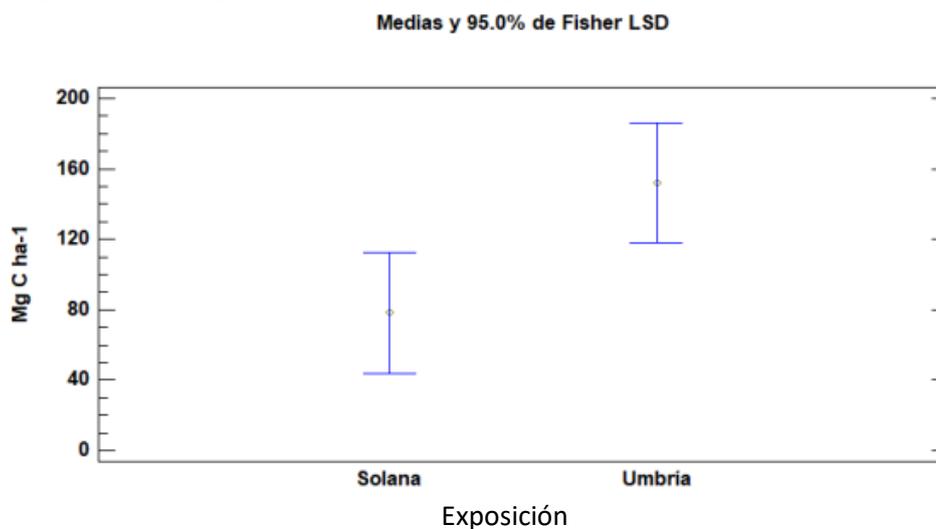


Figura 7.- Porcentaje promedio de carbono orgánico del suelo por exposición de ladera.

Figura 8.- Análisis de ANOVA de los Mg C ha<sup>-1</sup> con respecto a la exposición.

De manera similar a lo realizado con el contenido de carbono, se analizó el índice melánico, cuyos valores suelen ser utilizados como un indicador de la estabilidad del carbono en los suelos. El análisis de este índice mostró una tendencia positiva en relación con la altitud en ladera umbría, de lo que se infiere en ella la presencia de suelos con mayor concentración de ácidos fúlvicos a mayor altitud, lo que resulta opuesto a la ladera solana donde al incrementar la altitud, los suelos tienden a mayor contenido de ácidos húmicos. También se pudo ver que el índice melánico con el valor más bajo estuvo a 3,835 m de altitud en exposición umbría (Figura 9 y Cuadro 2) y en suelos que sustentan a una vegetación de *Pinus hartwegii* con zacatonal, lo que puede interpretarse como un sitio donde la MOS está más humificada y en consecuencia presenta mayor estabilidad del carbono contenido en su materia orgánica.

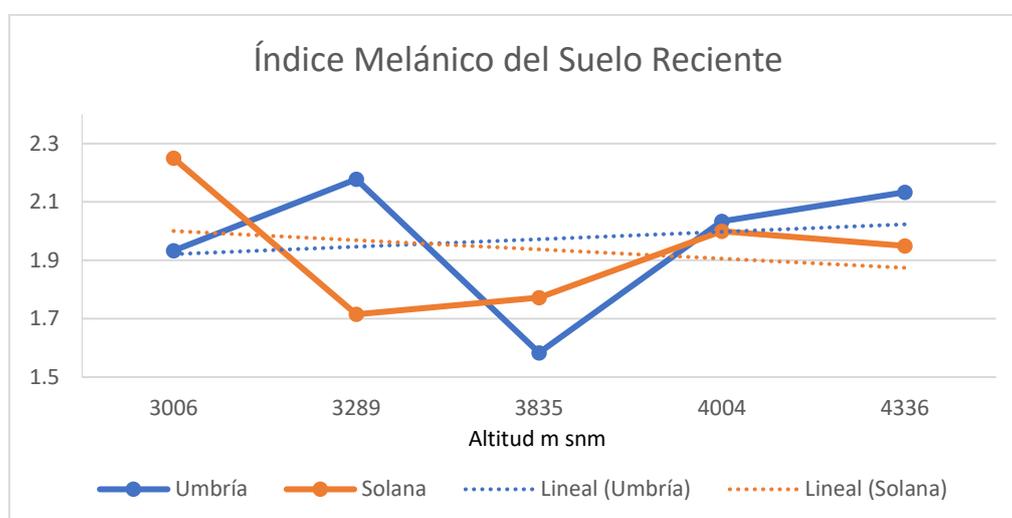


Figura 9.- Índice melánico de suelo reciente, relacionado con la altitud.

Las gráficas de las Figuras 6 y 9, muestran concordancia entre los datos, ya que se puede ver que, a mayor altitud sobre la ladera umbría, el contenido de carbono tiende a disminuir con predominio de ácidos fúlvicos, en tanto que en ladera solana, a mayor altitud se retiene más carbono y en consecuencia se encontrarán mayores contenidos de ácidos húmicos.

Del análisis del índice melánico, ahora agrupado en promedios por ladera, se encontró que en ladera umbría los valores son mayores que los de exposición solana. Las dos gráficas de las Figuras 9 y 10 muestran, en ambas exposiciones, valores promedio mayores a 1.7 de índice melánico, por lo que en general se tiene que en los suelos recientes los compuestos dominantes son los ácidos fúlvicos, sin embargo, también se pudo apreciar que los dos sitios a 3,835 m snm (sitio 4 y 5, solana y umbría) con menores diferencias entre exposiciones de ladera tuvieron valores promedio menores a 1.7 (suelos mayormente humificados).

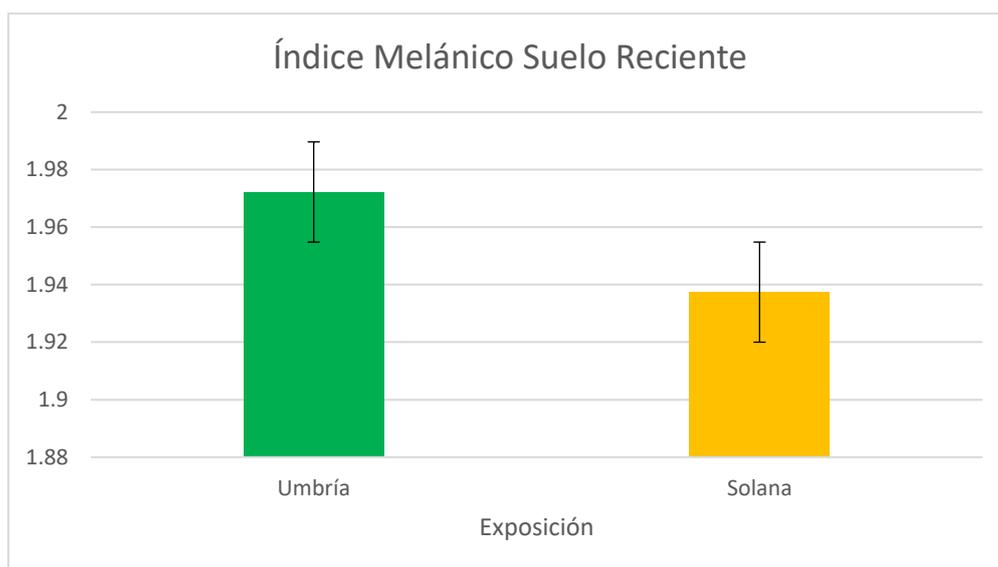


Figura 10.- Índice melánico por exposición.

Con la finalidad de visualizar mejor el comportamiento de las variables e identificar a las que tienen mayor peso específico en la dinámica de los contenidos de carbono en suelos recientes, se realizó un análisis de componentes principales (ACP). Los resultados de este análisis demostraron que entre las propiedades del suelo, los tres parámetros que poseen la mayor variabilidad estadística con 87.3% de porcentaje de variación acumulado (Variables robustas –VR-) fueron (Cuadro 3 y Cuadro 4): el pH activo en agua (1:2), la altitud del sitio (m) y el espesor del suelo (dm).

Cuadro 3.- Variables robustas obtenidas del ACP del suelo reciente.

<i>Componente Número</i>	<i>Eigenvalor</i>	<i>Porcentaje de Varianza</i>	<i>Porcentaje Acumulado</i>
1	6.13894	40.926	40.926
2	4.54757	30.317	71.243
3	2.41156	16.077	87.320
4	0.92932	6.195	93.516

Cuadro 4.- Pesos de los componentes principales del suelo reciente.

<i>Variabes</i>	<i>Componente 1</i>	<i>Componente 2</i>	<i>Componente 3</i>
<b>Altitud</b> <sub>msnm</sub>	0.00645318	<b>0.458255</b>	-0.0636223
Pendiente	0.0603561	0.287859	-0.293892
<b>Espesor</b>	0.152921	-0.121593	<b>0.427507</b>
% Humedad	-0.251898	-0.307872	-0.148641
DA $\text{gcm}^{-3}$	0.0646682	-0.317638	0.105698
% MO	-0.314839	-0.232646	-0.214206
% CO	-0.314839	-0.232646	-0.214206
<b>pH en Agua</b>	<b>0.382628</b>	-0.123197	0.0620611
pH en $\text{CaCl}_2$	0.380892	-0.0804587	0.0682435
pH en NaF	0.28714	0.089189	-0.425153
CE	-0.204148	0.341046	-0.286128
IM	0.2868	0.157585	-0.236755
$\text{Al}_o/\text{Fe}_o$	-0.0170724	-0.361477	-0.394324
$\text{Al}_p/\text{Al}_o$	-0.312012	0.19877	0.297329
$\text{Al}_o/\text{Si}_o$	0.333981	-0.217947	-0.175217

Da  $\text{gcm}^{-3}$  = Densidad aparente; % MO = Porcentaje de materia orgánica; % C<sub>o</sub> = Porcentaje de Carbono orgánico; CE = Conductividad eléctrica; IM = Índice melánico; Al<sub>o</sub> = Aluminio activo total; Fe<sub>o</sub> = Hierro activo total; Al<sub>p</sub> = Aluminio-humus puro; Si<sub>o</sub> = Sílice en alófono e imogolita. Los valores en negritas representan el valor absoluto más alto, que es el que identifica a la variable robusta (VR) de cada componente.

Para evaluar la relación entre las variables originales con las VR obtenidas del ACP, se efectuó un análisis de correlación simple el cual se muestra en el cuadro 5. Se observa en este cuadro, que el único componente principal que tuvo correlación significativa con el contenido de carbono fue el espesor del horizonte, como consecuencia natural de que la fórmula empleada para obtener los  $\text{Mg C ha}^{-1}$ , utiliza el espesor del suelo.

Cuadro 5.- Análisis de Correlación simple de Pearson entre las Variables robustas del ACP y los parámetros físicos y químicos de los suelos recientes.

Variables con correlación significativa con los componentes principales		
Componente Principal	Variables	Coefficiente r ( $p \leq 0.05$ )
pH Agua	Al <sub>o</sub> /Si <sub>o</sub>	0.4558
	Al <sub>o</sub> +1/2 Fe <sub>o</sub>	0.4262
	pH NaF	0.3864
	Al <sub>p</sub> /Al <sub>o</sub>	-0.4307
	CE	-0.7285
Altitud	pH CaCl <sub>2</sub>	0.5799
Espesor	C (Mg ha <sup>-1</sup> )	0.4739
	pH NaF	-0.5695

En el mismo sentido, el Cuadro 6 muestra que los parámetros físicos y químicos que tuvieron correlación significativa ( $p \leq 0.05$ ) con las variables robustas del ACP mostradas en el Cuadro 5, también se correlacionaron significativamente con el contenido de carbono y con los porcentajes de materia orgánica del suelo, lo cual demuestra cómo el pH del suelo, la altitud y el espesor del suelo son determinantes en el comportamiento del contenido de carbono de los suelos recientes.

La MOS y el carbono del suelo mostraron una relación positiva y significativa ( $p \leq 0.05$ ) con el Al<sub>o</sub> + 1/2Fe<sub>o</sub> y el porcentaje de humedad, mientras que fue negativa y significativa con el pH en CaCl<sub>2</sub> y en NaF (Cuadro 6). Siguiendo la tendencia de estas variables, se observó que el porcentaje de MOS aumenta conforme la humedad del suelo se incrementa. Se sabe que la MOS tiene múltiples funciones benéficas en la dinámica del suelo, por ejemplo, es un almacén de nutrientes como producto de sus diferentes estados de degradación. Conforme la MOS se degrada, se empiezan a formar compuestos de alto orden molecular que sirven para agregar a las partículas de la fase mineral de la capa edáfica, lo cual beneficia a su estructura y a su espacio poroso, y se generan condiciones adecuadas de aireación para la biota. Cuando existe un mal drenaje, el espacio poroso disminuye y se ven afectados negativamente la actividad microbiana, ya que el agua queda atrapada en el espacio poroso del suelo y el aire con sus gases son desplazados de la fase orgánica y mineral, gestándose condiciones anaerobias, de acidez por una lenta

tasa de mineralización de la MO (Romero *et al*, 2015; Anaya., *et al*, 2015). Así mismo, como el agua actúa como amortiguador de la temperatura, al aumentar la humedad del suelo, disminuye la proporción de ésta en el suelo y en consecuencia disminuye también la velocidad de reacción de los procesos químicos y biológicos. Por otro lado, de la relación entre los contenidos de carbono y de MOS con el  $Al_o + \frac{1}{2} Fe_o$ , se encontró una tendencia positiva y significativa ( $p \leq 0.05$ ). La WRB (2015) menciona que valores  $\geq$  a 2 % de  $Al_o + \frac{1}{2} Fe_o$ , son propios de características ándicas. A pesar de que en el Cuadro 6, se muestra la tendencia del  $Al_o + \frac{1}{2} Fe_o$  de aumentar junto con el carbono y la materia orgánica, los datos presentados anteriormente en el Cuadro 2 muestran valores  $<$  a 2%, con un pH en NaF generalmente  $\geq$  a 9.5, valores de SiO  $\geq$  a 0.6% y valores de  $Al_p/Al_o <$  a 0.5, lo que indica que los suelos presentan características ándicas-silándicas, donde predominan el alófano y los minerales amorfos.

Cuadro 6.- Variables correlacionadas estadísticamente con el carbono y la materia orgánica del suelo.

Variables correlacionadas significativamente con el C y la MO	
Variables	Coefficiente r con Valor de $p < 0.05$
% de Humedad	0.6534
$Al_o + 1/2 Fe_o$	0.6311
pH NaF	-0.4597
pH $CaCl_2$	-0.7313

Respecto del índice melánico (IM), aunque fue el único parámetro sin una tendencia significativa ( $p \leq 0.05$ ) en su relación con otros parámetros del suelo reciente, del Cuadro 7, se observa que, a mayor altitud, el IM disminuye y determina sitios con suelos más humificados en terrenos más planos, y en suelos sobre mayores pendientes, el valor del índice aumenta, lo que hace suponer que los suelos son más ricos en ácidos fúlvicos.

Lo anterior puede ser atribuido a que, en sitios con pendiente más pronunciada, la materia orgánica tiende a ser menos estable, ya que por acción de la gravedad, escorrentía o viento se acumula en menor cantidad que en los sitios más planos. De esta forma, en sitios con menor pendiente, a mayor altitud donde la temperatura es menor, sus suelos tienden a degradar su MO a menor velocidad, lo que la hace más estable y deriva en un aumento del contenido de ácidos húmicos. Así mismo, el Cuadro 7 muestra que, al aumentar el espesor del horizonte, el IM y los porcentajes de humedad y de carbono disminuyen, lo cual tiene congruencia con lo ya mencionado, dado que un mayor espesor indica un mayor desarrollo del suelo, y conforme el tiempo aumenta la estabilidad de la MO favorece su acumulación en los horizontes superiores por lo que retiene la humedad por más tiempo en ese lugar.

Respecto de la acidez del suelo, el pH medido con agua (1:2),  $\text{CaCl}_2$  y en NaF demostraron correlaciones positivas con el IM. Este comportamiento se corresponde con la correlación positiva entre el IM y la conductividad eléctrica y con la relación  $\text{Al}_o/\text{Si}_o$ . Los valores altos del IM son propios de suelos con alta cantidad de ácidos fúlvicos, razón por la cual aumenta el valor del Al activo en el suelo al no estar acompañado con las sustancias húmicas, y ello explica que el valor de la CE aumente dada una mayor actividad de cationes libres en la solución del suelo.

El Cuadro 7 muestra también que entre el IM y los valores de  $\text{Al}_o + \frac{1}{2} \text{Fe}_o$  y los de  $\text{Al}_p/\text{Al}_o$  existe una relación inversamente proporcional, la cual es atribuida a que el IM es un indicador de estabilidad de la MOS y ésta, en su proceso de degradación, forma complejos órgano-minerales en los que intervienen los ácidos húmicos que compiten por el aluminio que proviene del intemperismo del vidrio volcánico. De esta forma, según (Honna, 1998) y (WRB, 2015), los horizontes melánicos tienen propiedades ándicas cuando el valor de IM es menor o igual a 1.7, y esto junto con valores más altos del  $\text{Al}_o + \frac{1}{2} \text{Fe}_o$  que son cercanos al valor 2 y porcentajes de carbono orgánico del suelo  $\geq$  a 6%.

Cuadro 7.- Análisis de correlación simple de Pearson entre el Índice melánico y otros parámetros del suelo.

Correlación entre algunas variables del suelo y el IM	
Variabes	Coefficiente r
pH NaF	0.4266
DA $\text{g cm}^{-3}$	0.2114
pH $\text{CaCl}_2$	0.1627
Pendiente	0.1134
pH Agua	0.0759
CE	0.0665
$\text{Al}_o/\text{Si}_o$	0.0326
$\text{Al}_p/\text{Al}_o$	-0.0245
Altitud	-0.0728
Espesor	-0.1382
$\text{Al}_o + \frac{1}{2} \text{Fe}_o$	-0.1991
% MO	-0.2546
% C	-0.2546
% de Humedad	-0.3474

Da  $\text{g cm}^{-3}$  = Densidad aparente; % MO = Porcentaje de materia orgánica; % C = Porcentaje de Carbono orgánico; CE = Conductividad eléctrica; IM = Índice melánico;  $\text{Al}_o$  = Aluminio activo total;  $\text{Fe}_o$  = Hierro activo total;  $\text{Al}_p$  = Aluminio-humus puro;  $\text{Si}_o$  = Sílice en alófono e imogolita.

Para el análisis de la contribución del tipo de vegetación sobre los contenidos de C en los suelos de desarrollo reciente de la Cuenca del río Alcalica, éstos se dividieron en 3 grupos de tipos de vegetación dominantes. La Figura 11 muestra que la asociación *Pinus*

*hartwegii* con zacatonal y el bosque de *Abies religiosa* tienen mayores contenidos de carbono, lo que indica que, en estos tipos de vegetación, los suelos son los de mayor retención y estabilización de carbono en la Cuenca, comportándose como sumideros de carbono si se mantiene un esquema de manejo adecuado.

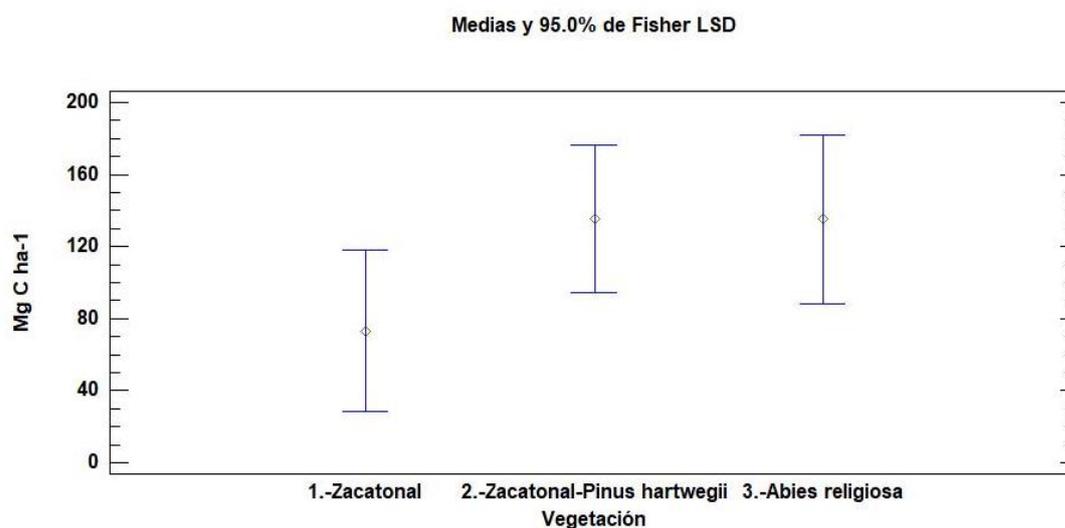


Figura 11.- Acumulación de carbono con respecto al tipo de vegetación dominante: 1.- Zacatonal, 2.- Zacatonal con *Pinus hartwegii* y 3.- Bosque de *Abies religiosa*.

### 8.2.-Propiedades en suelos de mil años de desarrollo aproximado.

Según Arana *et al.*, (2010), los suelos de aproximadamente mil años en esta región están sepultados debajo de una capa de ceniza pómez denominada “Pómez Rosa o P1” de ~1,100 años A. P.

Similar al análisis realizado en los suelos recientes, con el Cuadro 8 y la Figura 12, se pudo identificar que el contenido de carbono en ladera umbría tiende a disminuir con la altitud, contrario a lo que ocurre en solana. De igual forma se observa que a 3,835 m de altitud, se tienen los valores más altos de contenidos de C en ambas laderas. Estos resultados muestran la misma tendencia observada en los suelos recientes, pero de manera más acentuada.

Al agrupar los contenidos de C (Mg ha<sup>-1</sup>) por ladera (Figura 13) se observa que a pesar del comportamiento mostrado en la Figura 12, las laderas umbrías, tienen en promedio

mayores contenidos de carbono que las laderas solana. En razón de lo anterior, se realizó un análisis de ANOVA para poder estudiar si las diferencias existentes son significativas (Figura 14), sin embargo, este análisis mostró que entre ambas laderas no existen diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) de los contenidos de C en los suelos de aproximadamente mil años de edad.

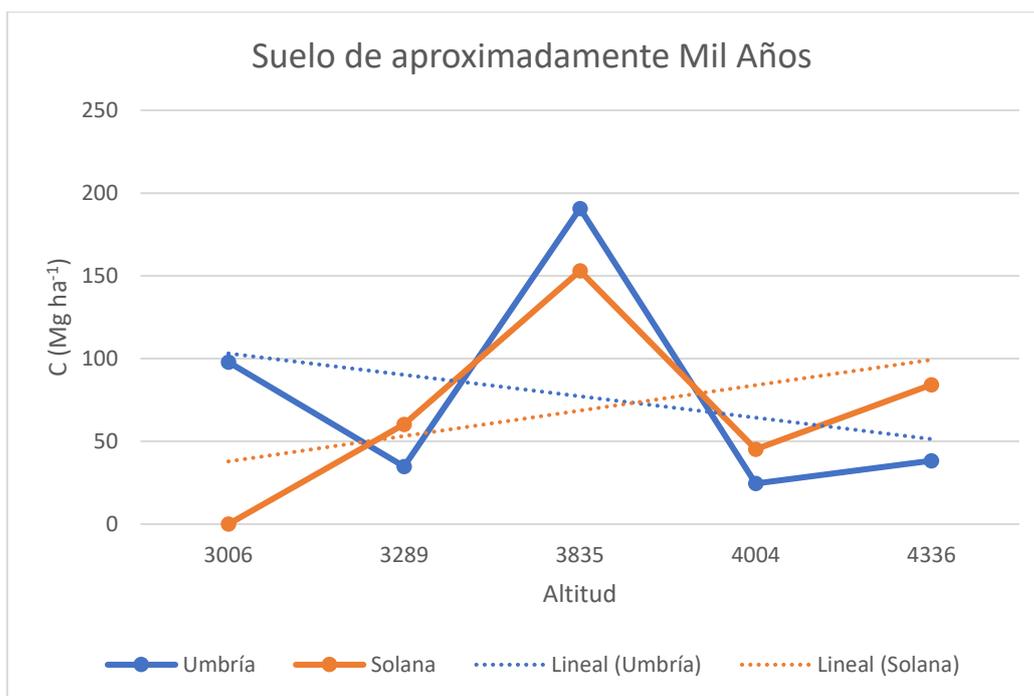


Figura 12.- Tendencia del contenido de C por ladera con respecto a la altitud en suelos de mil años.

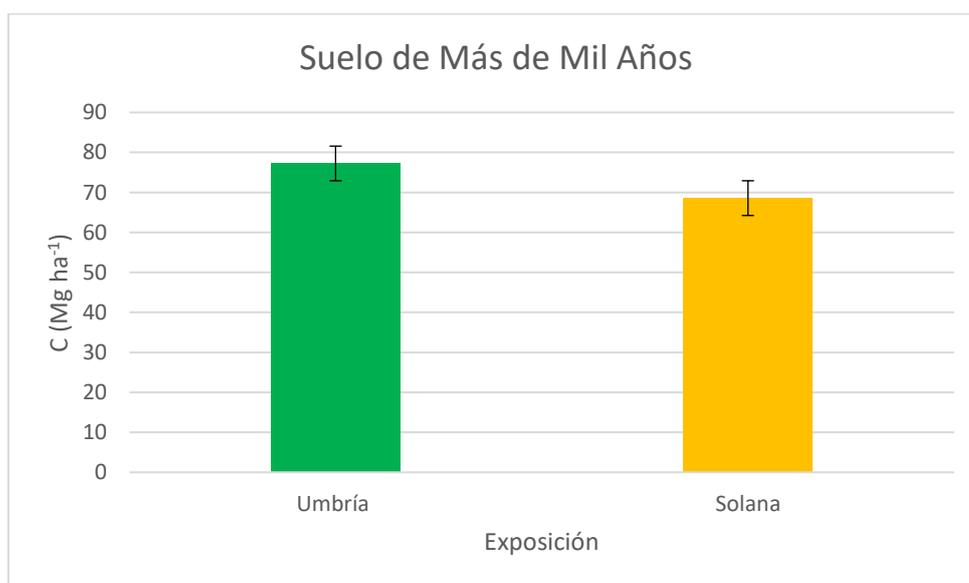


Figura 13.- Contenido de C por ladera en suelos de mil años.

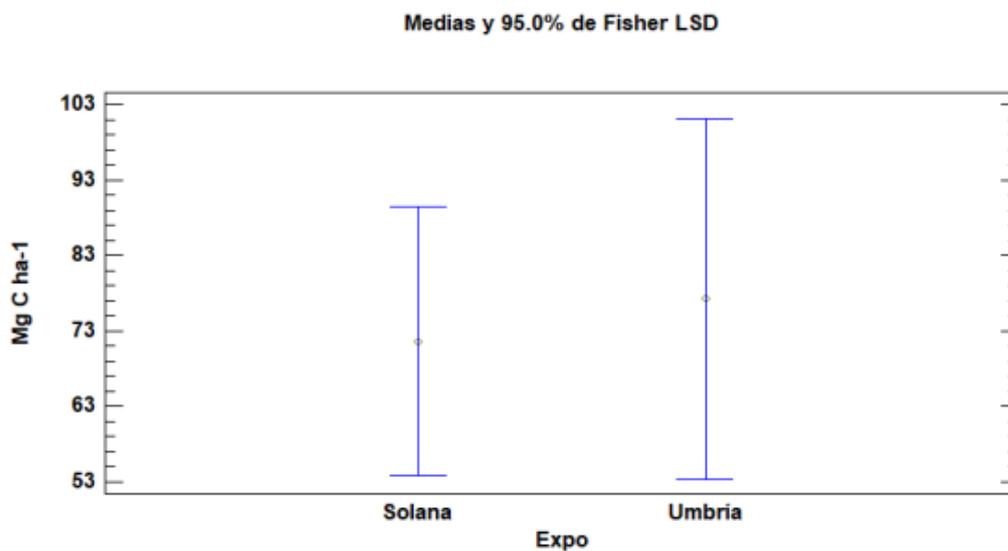


Figura 14.- Análisis estadístico de ANOVA del C por ladera en suelos de mil años.

El cuadro 8, muestra que en los suelos de  $\pm$  mil años en el sitio denominado “La Joya 1”, se encontraron los valores más altos de contenidos de carbono y, por otro lado, los valores más bajos de IM. Estos resultados concuerdan con lo ya descrito en los suelos recientes ya que en este mismo sitio también se encontraron los mayores valores de contenido de carbono y los más bajos del IM. Aunque en este sitio el suelo de más de mil años muestra menor porcentaje de carbono comparado con el suelo reciente, esto podría ser porque al ya no tener un aporte de material orgánico constante, el carbono de este compartimento sigue en movimiento, ligado a la actividad metabólica de las bacterias y las plantas.

Cuadro 8.- Promedio de los parámetros químicos y físicos obtenidos en laboratorio del suelo de mil años.

Sitio	Altitud	n	Espesor	Hum	DA	MO	CO	pH		CE	IM	Al <sub>o</sub> + <sup>1/2</sup> Fe <sub>o</sub>	Al <sub>p</sub> /Al <sub>o</sub>	Al <sub>o</sub> /Si <sub>o</sub>	C	
	_m snm_							_m_	_%_							g cm <sup>-3</sup>
Tomacoco 1	3006	6	0.27	21.26	0.96	7.01	4.07	5.95	.	9.75	0.52	.	1.49	0.25	1.81	97.91
Tomacoco 2	3006	6	0.54	.	.	3.14	1.82	.	.	.	.	.	1.15	0.10	1.49	.
Ameca 1	3289	3	0.13	29.28	0.74	6.24	3.62	5.02	.	.	0.58	.	2.11	0.23	1.45	34.74
Ameca 2	3289	12	0.40	14.65	1.05	2.60	1.51	5.39	4.55	.	0.53	.	1.41	0.12	1.14	60.32
La Joya 1	3835	3	0.51	96.33	0.67	9.62	5.58	5.61	4.48	11.22	0.54	1.33	2.50	0.36	1.25	190.72
La Joya 2	3835	3	0.82	64.36	1.08	2.75	1.59	6.05	5.31	10.94	0.52	.	2.89	0.08	1.60	152.99
La Joya 4	4004	3	0.28	38.95	0.84	1.76	1.02	6.20	4.22	10.91	0.51	1.58	1.82	0.13	1.47	24.54
La Joya 3	4004	3	0.24	25.32	0.82	4.04	2.34	6.06	4.61	10.02	0.53	1.82	1.07	0.14	2.25	45.26
La Reyna 1	4336	6	0.22	20.35	0.92	3.48	2.02	5.14	4.37	10.31	0.83	4.00	0.45	0.64	1.11	38.33
La Reyna 2	4336	6	0.20	28.25	0.99	8.01	4.65	4.89	5.23	.	1.42	3.60	0.76	0.40	1.71	84.27

n= número de repeticiones de la muestra. DA= Densidad Aparente; MO= Porcentaje de materia orgánica del suelo; %CO= porcentaje de carbono orgánico del suelo; CE= Conductividad Eléctrica; IM= índice Melánico; (Al<sub>o</sub>= Aluminio activo total; Fe<sub>o</sub>= Hierro activo total; Al<sub>p</sub>= Aluminio-humus puro; Si<sub>o</sub>= Sílice en alófono e imogolita. Tomados de Cornejo-Cruz, C. A., (2019).) (Los renglones sombreados corresponden a los suelos ubicados en umbría)

Al grupo de propiedades evaluadas en suelos de  $\pm$  mil años, también se le realizó un Análisis de Componentes Principales para encontrar las variables robustas que influyen en los contenidos de carbono con dicho ACP se observó que tres variables robustas dirigen el comportamiento de los contenidos de carbono de los suelos de esta edad y que representan en conjunto el 93% de la variabilidad en los parámetros evaluados: Espesor del horizonte del suelo, la proporción  $Al_p/Al_o$  relacionada con el grado de intemperismo y el pH determinado con  $CaCl_2$  relacionado con la estabilidad de la MOS (Cuadro 9 y Cuadro 10).

Cuadro 9.- Cuadro de eigenvalores en suelos de mil años.

<i>Componente</i>	<i>Eigenvalor</i>	<i>Porcentaje de Varianza</i>	<i>Porcentaje Acumulado</i>
1	7.28235	48.549	48.549
2	4.0312	26.875	75.424
3	2.68832	17.922	93.346
4	0.677852	4.519	97.865

Cuadro 10.- Tabla de eigenvectores para los suelos de mil años.

Variables	<i>Componente</i>	<i>Componente</i>	<i>Componente</i>
	1	2	3
Altitud <sub>msnm</sub>	0.325702	-0.226611	-0.0255944
Pendiente	0.187	-0.244141	-0.425402
<b>Espesor</b>	<b>-0.359668</b>	-0.111953	-0.00835053
% Humedad	-0.337623	-0.119407	-0.0125206
DA g cm <sup>-3</sup>	0.276775	-0.0594691	-0.0893779
% MO	-0.30837	-0.191514	0.24064
% CO	-0.30837	-0.191514	0.24064
pH en Agua	0.0169913	0.415364	-0.149398
pH en <b>CaCl<sub>2</sub></b>	0.00059714	-0.0476119	<b>0.604836</b>
pH en NaF	-0.293263	-0.114057	-0.328305
CE	0.173163	-0.425107	0.0705182
IM	0.278425	-0.311901	0.0379425
$Al_o/Fe_o$	-0.346829	0.0460665	-0.202565
<b><math>Al_p/Al_o</math></b>	-0.0407855	<b>-0.480147</b>	0.0695032
$Al_o/Si_o$	0.18182	0.294781	0.382285

Da gcm<sup>-3</sup> = Densidad aparente; % MO = Porcentaje de materia orgánica; % C = Porcentaje de Carbono orgánico; CE = Conductividad eléctrica; IM = Índice melánico;  $Al_o$  = Aluminio activo total;  $Fe_o$  = Hierro activo total;  $Al_p$  = Aluminio-humus puro;  $Si_o$  = Sílice en alófono e imogolita.

Los valores en negritas representan el valor absoluto más alto, que es el que identifica a la variable robusta (VR) de cada componente.

Para analizar cómo las variables evaluadas en suelos de mil años se relacionan con las VR derivadas del ACP, se realizó un análisis de correlación simple de Pearson (Cuadro 11) de manera similar a lo realizado para los suelos recientes.

Cuadro 11.- Correlación simple entre las variables robustas del Componentes Principales y parámetros físicos y químicos de los suelos de  $\pm$  mil años.

Componentes Principales	VARIABLES	Coefficiente r con Valor $p \leq 0.05$
Espesor del suelo	pH NaF	0.6271
	$Al_o + \frac{1}{2}Fe_o$	0.4406
	% de Humedad	0.4369
	% de C y MO	-0.3762
	$Al_p/Al_o$	-0.4542
	IM	-0.5747
$Al_p/Al_o$	Altitud	0.6048
	CE	0.3649
	Espesor	-0.4542
	$Al_o + \frac{1}{2}Fe_o$	-0.5774
pH $CaCl_2$	IM	0.5180
	CE	0.3831
	% de C y MO	0.3753
	Pendiente	-0.4106

En el Cuadro 11, se destaca que la variable robusta definida por el espesor del suelo tuvo correlación estadísticamente significativa con el pH evaluado con NaF (relación positiva más alta) y con el índice melánico (correlación negativa más alta). Por su parte, la proporción  $Al_p/Al_o$ , también considerada como VR por el ACP, se correlacionó positivamente con la altitud y negativamente con la proporción  $Al + \frac{1}{2}Fe_o$ .

El tercer componente principal (pH en  $CaCl_2$ ), presentó la correlación positiva más alta con el IM, mientras que la correlación negativa se ubicó con el grado de inclinación de la pendiente de la ladera.

Entre las variables más representativas en el presente proyecto de investigación, se puede apreciar que el IM presentó una correlación inversa con el espesor del horizonte del suelo respectivo y correlación directa con el pH determinado con  $CaCl_2$ .

Respecto de la relación inversa entre el espesor del suelo y el IM, la interpretación indica que conforme el desarrollo del suelo es mayor, la cantidad de ácidos húmicos en el suelo aumenta, lo cual va relacionado con el mayor tiempo que ha transcurrido en la formación

del suelo y lo que propicia que la materia orgánica se acumule y forme sustancias húmicas más estables. Por otro lado, la relación positiva entre el IM y el pH con  $\text{CaCl}_2$  indica que conforme la acidez potencial del suelo disminuye, existe un enriquecimiento en el contenido de ácidos fúlvicos en detrimento de los húmicos y en consecuencia, el almacén de C es menos estable. Este comportamiento se debe a que las moléculas de los ácidos fúlvicos son más ácidas que los húmicos. Según Zamboni, (2006) El carácter ácido de los ácidos fúlvicos se da por la abundancia de los grupos carboxílicos correspondientes a la primera y segunda constantes de disociación mientras que el de los húmicos se debe, principalmente, a la primera constante de disociación.

Del contenido de C en los suelos de mil años aproximadamente y su relación con las variables robustas (Cuadro 11), también se encontró que el espesor del suelo y el pH evaluado con  $\text{CaCl}_2$  tuvieron correlaciones significativas con la acidez potencial. La relación negativa entre contenidos de C y el espesor del suelo indica que conforme el suelo se hace más profundo, la cantidad de C sufre un efecto de dilución a lo largo del perfil dado que se concentra más en los primeros centímetros de este, superficie donde existe un mayor aporte de este elemento por la MO en descomposición y la mayor actividad de la biota edáfica en esos centímetros. Este comportamiento también lo han señalado Lal *et al*, (2003) y Jobbagy y Jackson (2000), al citar que la mayor actividad de la biota en el suelo se presenta en los primeros 20 cm de este. Por otra parte, la relación positiva del contenido de C con el pH potencial ( $\text{pH CaCl}_2$ ) se puede interpretar como que el incremento en la acidez potencial del suelo, libera los protones adheridos a la fase mineral en la que los compuestos de Fe y Al están en mayor cantidad formando complejos con la MOS que al hacerla menos activa libera en menor cantidad estos protones con potencial acidificante. Este comportamiento es congruente con la relación negativa entre la proporción de  $\text{Al}_p/\text{Al}_o$  y el espesor del horizonte del suelo, pues se observa que en espesores de suelo más delgados los valores del cociente  $\text{Al}_p/\text{Al}_o$  aumentan, al igual que el contenido de carbono orgánico. De acuerdo con la WRB 2014, el cociente  $\text{Al}_p/\text{Al}_o$  ayuda a saber la fracción del suelo en la que el Al está acomplejado. Se entiende que el Al extraído en pirofosfato ( $\text{Al}_p$ ) pertenece a la fracción acomplejada con la parte orgánica del suelo (organominerales), y el Al extraído por oxalato ( $\text{Al}_o$ ) se une con la sílice ( $\text{Al}_o$ ). Es así como valores del cociente  $\text{Al}_p/\text{Al}_o \geq 0.5$  son exclusivos de propiedades aluándicas del suelo debido a una mayor acomplejación del aluminio con el humus, lo que se relaciona con mayor retención de C. Por otro lado, valores del cociente  $\text{Al}_p/\text{Al}_o < 0.5$ , dan propiedades silándicas las cuales muestran una acomplejación del aluminio con

él sílice, lo cual ayuda a explicar la correlación negativa con el espesor concordando con el comportamiento del contenido de carbono y de la materia orgánica en estos suelos (Cuadro 11).

En los suelos de mil años de desarrollo aproximado, las variables que tuvieron correlación significativa con el porcentaje de carbono y la materia orgánica del suelo se muestran en el Cuadro 12. Los datos en este cuadro muestran que la mayor relación positiva se presentó con la conductividad eléctrica (CE) y la relación inversa más marcada con el grado de pendiente del terreno. Resalta también que cuatro parámetros con correlación significativa sean propiedades físicas, lo que indica la importancia de estas propiedades en la dinámica y edafogénesis de los suelos de aproximadamente mil años. El valor del grado de pendiente del suelo es otro factor que influye en la variación del contenido de COS, ya que depende de la topografía del lugar, siendo en la superficie en la que se acentúan las interacciones biológicas, por lo que el grado de pendiente forma parte importante de la formación de los suelos. En lugares donde los suelos se desarrollan sobre pendientes menos estables, se dificulta más el crecimiento de la vegetación, por lo que el aporte y recepción de materia orgánica es menor. De forma similar, en las pendientes más inclinadas se dificulta la permanencia de la materia orgánica ya que es más susceptible a ser arrastrada por el viento, la escorrentía del agua o incluso por el efecto de la gravedad. Efectos parecidos se relacionan con la conductividad eléctrica, ya que ésta mide la actividad de las sales presentes en el suelo. Éstas sales de igual forma, son lavadas por la escorrentía o son transportadas a sitios con pendientes más estables en los que fueron encontrados y en donde existe un mayor porcentaje de materia orgánica y carbono, mayor conductividad eléctrica, mayor porcentaje de humedad y valores de pH en  $\text{CaCl}_2$  mayores en un comportamiento muy relacionado con lo que se presenta en el Cuadro 11.

Cuadro 12.- Parámetros relacionados significativamente con el carbono y materia orgánica del suelo de mil años.

Variables	Valor de Coeficiente r ( $p \leq 0.05$ )
CE	0.5711
% de Humedad	0.4708
pH $\text{CaCl}_2$	0.3753
Espesor	-0.3762
Densidad Aparente	-0.4288
Grado de pendiente	-0.5723

CE= Conductividad eléctrica del suelo.

Respecto al valor del IM en los suelos de aproximadamente mil años, se encontró que los valores más bajos, tanto en umbría como en solana, se tuvieron a 3835 m snm (Figura 15), por otro lado, en la Figura 16 se puede apreciar que en la ladera solana se presentaron los valores promedio más altos de IM y los más bajos en ladera umbría.

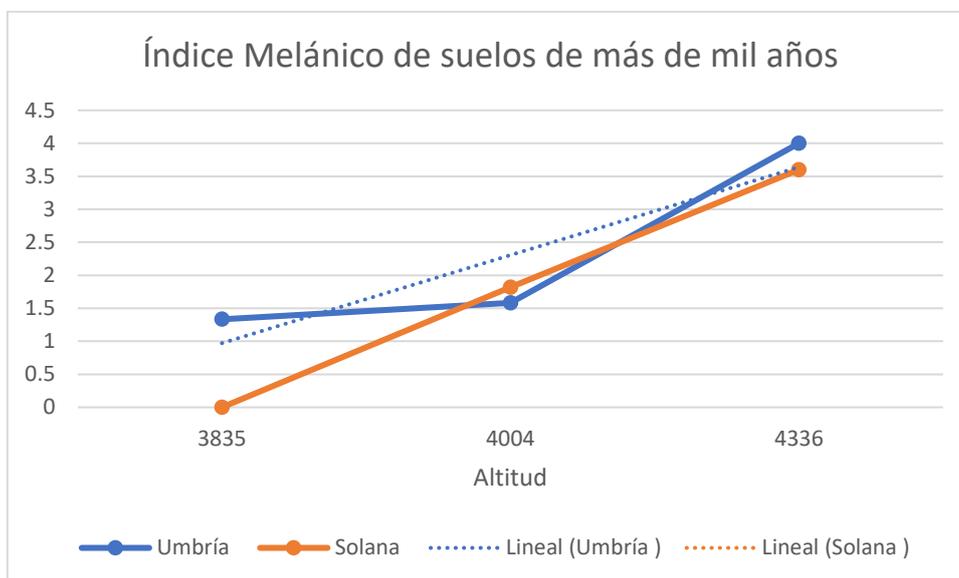


Figura 15.- Promedio del índice melánico con respecto a la Altitud.

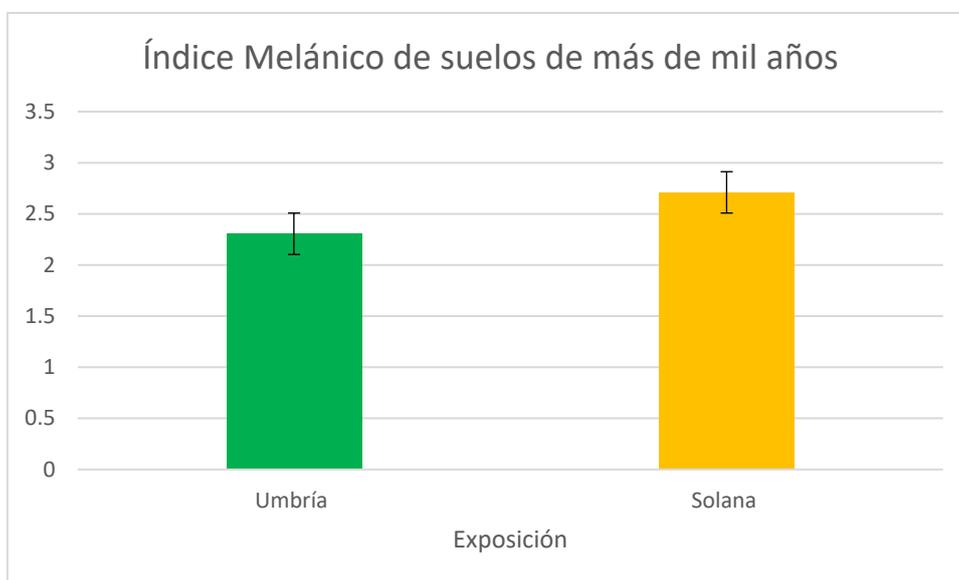


Figura 16.- Valores promedio de índice melánico del suelo con respecto a la exposición de ladera.

Los análisis de correlación simple de Pearson demostraron que el IM tuvo correlación significativa con todos los parámetros presentados en el Cuadro 13. El análisis de este cuadro señala que la altitud es un atributo determinante en el comportamiento del IM que

muestra que a mayor altitud, el suelo mantiene riqueza de ácidos fúlvicos, lo cual se atribuye a que en suelos ubicados a mayores altitudes la inclinación de la pendiente es casi siempre mayor, condiciones que contribuyen a aumentar la escorrentía del agua y es mayor la influencia de la fuerza de gravedad, haciendo que la materia orgánica y sustancias húmicas que se lleguen a formar sean lavadas y arrastradas a zonas más estables, donde las condiciones son más propicias para la formación de ácidos húmicos. Por otro lado, respecto a los valores de la correlación de Pearson se encontró una mayor correlación negativa con el parámetro que representa el cociente  $Al_0 + \frac{1}{2} Fe_0$ , el cual muestra que los suelos presentan propiedades mayormente silándicas a mayores altitudes y aluándicas en pisos altitudinales inferiores debido a que valores de IM menores, son indicadores de presencia de sustancias húmicas más estables, donde el Al llega a formar complejos con estos ácidos orgánicos, incrementando el valor del cociente  $Al_0 + \frac{1}{2} Fe_0$ .

Cuadro 13.- Propiedades del suelo correlacionadas significativamente con el índice melánico ( $p < 0.05$ ).

Variables correlacionadas significativamente con el IM	
Variables	Valor Coeficiente r
Altitud	0.962
CE	0.6929
pH $CaCl_2$	0.518
Espesor	-0.5747
pH en Agua	-0.7607
$Al_0 + \frac{1}{2} Fe_0$	-0.7922

### 8.3.-Carbono en Suelos de 5000 años de edad aproximada

Los suelos de  $\pm 5000$  años de desarrollo fueron derivados de los que se conoce como "Pómez Ocre o P5" de aproximadamente 4,950 años A.P. que fueron descritos por Arana *et al.*, (2010). Las diversas condiciones de la edafogénesis, más los horizontes retrabajados, condicionaron la presencia de los paleosuelos de esta edad que se encontraron en 4 sitios (Tomacoco 1, Ameca 1, la Joya 3 y la Joya 4), de esta manera sólo se pudo tener un par homólogo de paleosuelos en ambas laderas. Por lo expuesto anteriormente, a diferencia de los suelos de  $\pm 1000$  años y suelos recientes, solo se pudo determinar el contenido de carbono y su IM en el par homólogo citado (Joya 3 y la Joya 4). El análisis de los resultados mostró que existe mayor contenido de carbono en ladera umbría comparado con ladera solana (Figura 17). Para establecer si esta diferencia fue estadísticamente significativa, se llevó a cabo un ANOVA con una prueba de Kruskal-

Wallis, (Figura 18), que demostró que no existe diferencia significativa ( $p \leq 0.05$ ) entre los contenidos de C de ambas exposiciones en suelos de  $\pm 5000$  años.

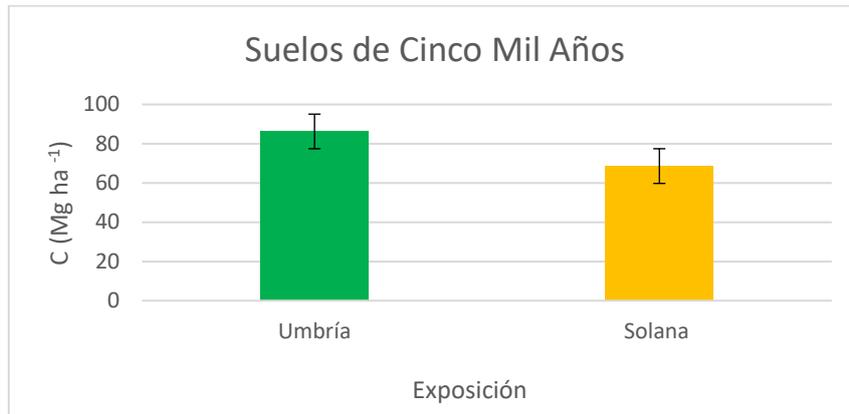


Figura 17.- Contenido de C promedio por ladera en suelo de 5,000 años.

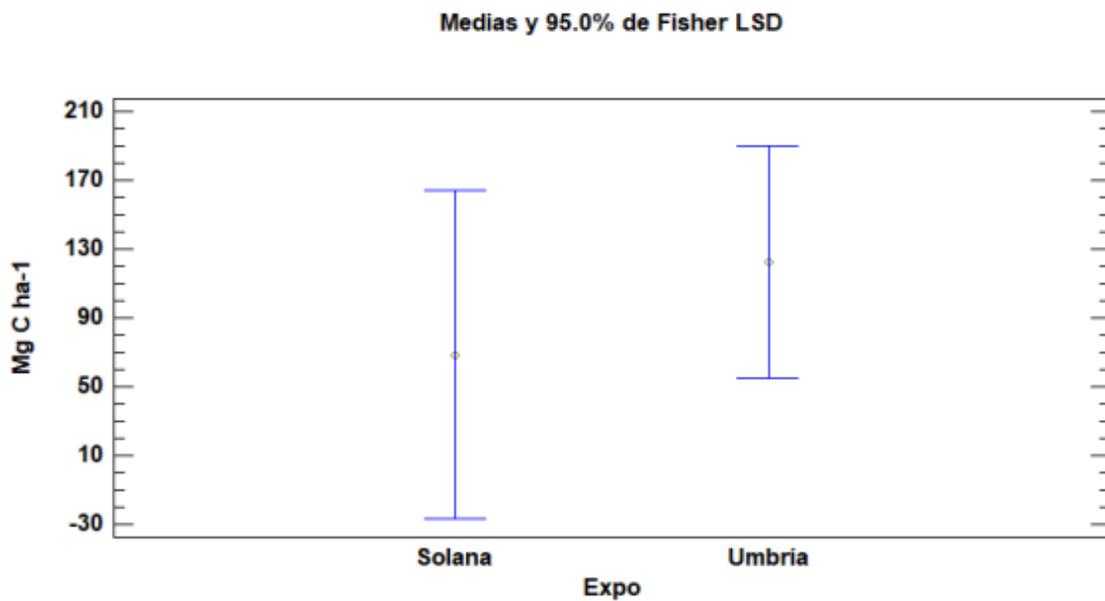


Figura 18.- Análisis estadístico ANOVA del C por ladera en suelos de cinco mil años.

Con el análisis del Cuadro 14, se pudo observar que los contenidos más altos de C se encuentran en el sitio de Ameca 1, pero el sitio con el valor de índice melánico más bajo, representando a los suelos con mayor grado de humificación es el de la Joya 3.

Cuadro 14.-Parámetros químicos y físicos de los suelos de cinco mil años.

Sitio	Altitud _m snm_	n	Espesor _m_	Hum _%_	DA g cm <sup>-3</sup>	MO _%_	CO	pH			CE dS m <sup>-1</sup>	IM	Al <sub>o</sub> + <sup>1/2</sup> Fe <sub>o</sub>	Al <sub>p</sub> /Al <sub>o</sub>	Al <sub>o</sub> /Si <sub>o</sub>	C Mg ha <sup>-1</sup>
								H <sub>2</sub> O 1:2.5	CaCl <sub>2</sub> 1:2.5	NaF 1N						
Tomacoco 1	3006	3	0.22	25.61	0.89	4.30	2.50	6.05	.	10.17	0.85	3.07	3.00	0.13	1.53	44.94
Ameca 1	3289	6	0.60	33.64	0.69	5.38	3.12	4.86	.	.	0.64	1.73	1.63	0.15	1.14	127.56
La Joya 4	4004	3	0.24	.	.	2.97	1.72	6.50	5.28	11.09	0.49	1.86	1.76	0.08	1.69	.
La Joya 3	4004	3	0.46	23.85	1.07	2.41	1.40	6.09	4.46	10.56	0.70	1.25	1.41	0.09	1.66	68.59

n= número de repeticiones de la muestra. DA= Densidad Aparente; MO= Porcentaje de materia orgánica del suelo; %CO= porcentaje de carbono orgánico del suelo; CE= Conductividad Eléctrica; IM= índice Melánico; (Al<sub>o</sub>= Aluminio activo total; Fe<sub>o</sub>= Fierro activo total; Al<sub>p</sub>= Aluminio-humus puro; Si<sub>o</sub>= Sílice en alófono e imogolita. Tomados de Cornejo-Cruz, C. A., (2019).) (Los renglones sombreados corresponden a los suelos ubicados en umbría)

Con un análisis equivalente al realizado en los suelos de los capítulos anteriores, se realizó un ACP con la finalidad de reconocer a las VR que determinan la mayor variabilidad de los parámetros evaluados para los contenidos de carbono en estos paleosuelos de 5000 años de desarrollo aproximado. El Cuadro 14 muestra que para el pH evaluado con CaCl<sub>2</sub> y en NaF se tienen ausencia de valores, por lo que se tomó la decisión de excluirlos del ACP. Así, se pudo conocer que las VR fueron la Densidad aparente y el Al<sub>o</sub> + 1/2 Fe<sub>o</sub> con el 98% de la variabilidad del análisis en conjunto (Cuadro 15 y Cuadro 16).

Cuadro 15.- Eigenvalores de los suelos de cinco mil años.

<i>Componente Número</i>	<i>Eigenvalor</i>	<i>Porcentaje de Varianza</i>	<i>Porcentaje Acumulado</i>
1	9.04109	69.547	69.547
2	3.76496	28.961	98.508
3	0.193952	1.492	100.000
4	4.5601E-16	0.000	100.000

Cuadro 16.- Cuadro de eigenvectores de los suelos de cinco mil años.

<i>Factores</i>	<i>Componente 1</i>	<i>Componente 2</i>
Altitud msnm	0.249764	0.3403
Pendiente	-0.329499	0.044218
Espesor	0.246626	0.345752
% Humedad	-0.311402	0.180602
<b>DA g cm<sup>-3</sup></b>	<b>0.332553</b>	0.00190184
PorMo	-0.332519	-0.00881413
PorC	-0.332519	-0.00881413
pHAgua	0.291621	-0.236236
CE	0.160873	-0.445166
IM	-0.20583	-0.404588
<b>Al<sub>o</sub>/ 1/2 Fe<sub>o</sub></b>	-0.110459	<b>-0.485889</b>
Al <sub>p</sub> /Al <sub>o</sub>	-0.324658	0.111777
Al <sub>o</sub> /Si <sub>o</sub>	0.261975	-0.252321

DA g cm<sup>-3</sup> = Densidad aparente; % MO = Porcentaje de materia orgánica; % C = Porcentaje de Carbono orgánico; CE = Conductividad eléctrica; IM = Índice melánico; Al<sub>o</sub> = Aluminio activo total; Fe<sub>o</sub> = Hierro activo total; Al<sub>p</sub> = Aluminio-humus puro; Si<sub>o</sub> = Sílice en alófono e imogolita.

Para conocer si existe alguna relación entre las VR del ACP con los demás parámetros físicos y químicos evaluados, se hizo un análisis de correlación simple de Pearson (Cuadro 17). Con ello, se pudo observar que solo la DA tuvo correlación significativa con el porcentaje de carbono, la materia orgánica, el grado de pendiente del terreno y la proporción  $Al_o/Si_o$ .

Esto muestra que la DA presenta relación estrecha con el contenido de materia orgánica, ya que ésta es la que se encarga de aumentar el espacio poroso en el suelo, dando como resultado una menor densidad, lo que también se relaciona a su vez con zonas más estables y de menor pendiente, donde la materia orgánica puede acumularse mejor. El aumento de la proporción del  $Al_o$  conforme la DA aumenta, se puede atribuir a que al haber menos materia orgánica y sustancias húmicas complejables, la concentración del aluminio activo en la solución del suelo es mayor.

Cuadro 17.- Análisis de correlación entre las variables del Análisis de Componentes Principales y los parámetros del suelo de más de cinco mil años.

Componentes Principales	Variables	Valor de Coeficiente r con $p < 0.05$
	$Al_o/Si_o$	0.8212
DA	Pendiente	-0.9713
	% de C y MOS	-0.9888

El análisis de correlación simple de Pearson también mostró que existen tendencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre los porcentajes de C y MOS con los parámetros mostrados en el Cuadro 18. Al analizar los valores de este cuadro, se puede ver que, a mayor altitud la cantidad de aporte de MOS y, en consecuencia, de C, disminuye, lo cual se atribuye a que hace más de cinco mil años, la distribución de la vegetación estuvo restringida a menor altitud con respecto a la de la actualidad debido a una mayor cobertura de los glaciares que cubrieron la zona, lo cual limitó el aporte de materia orgánica en suelos de sitios ubicados hoy a mayores altitudes. Esta tendencia explica la correlación negativa entre el contenido de C y la proporción  $Al_o/Si_o$ , ya que el aluminio activo en el suelo pasa a complejarse con las sustancias húmicas, dejando en mayor proporción al sílice. Asimismo, tal comportamiento ayuda a entender por qué si aumenta la DA, el contenido de C y MOS disminuyen al tiempo que aumenta la proporción  $Al_o/Si_o$ , relacionándose así con propiedades aluándicas (WRB, 2015).

Cuadro 18.- Parámetros del suelo de aproximadamente 5,000 años relacionados significativamente con los contenidos de carbono.

Variables	Coficiente r Valor ( $p \leq 0.05$ )
pH en Agua	-0.6986
Altitud	-0.7447
Al <sub>o</sub> /Si <sub>o</sub>	-0.836
DA	-0.9888

Respecto del índice melánico que señala la estabilidad de los complejos organominerales, se muestra una relación significativa ( $p \leq 0.05$ ) e inversamente proporcional con la altitud de los sitios y con el espesor del suelo (Cuadro 20), lo que puede ser una prueba de que en los suelos desarrollados hace cinco mil años, a mayor altitud los ácidos húmicos incrementaban su contenido, lo que sugiere una mayor estabilidad de la MOS.

Al agrupar los valores de los contenidos de C por ladera y compararlos entre sí, se pudo constatar que, en promedio, la ladera solana presentó los suelos más humificados dados sus valores más bajos de IM (Figura 19). Como ya se discutió en los apartados anteriores, esto podría deberse a que los suelos tipo andosol presentan compuestos más viejos y propios de los ácidos húmicos en ladera umbría respecto a la ladera solana. Al respecto, Sánchez y Rubiano (2014) mencionan que durante el envejecimiento de los geles (formados de componentes húmicos y minerales), existe una estrecha relación con una alternancia estacional de humedecimiento y secado, lo cual sí ocurre en los suelos de ladera solana. Estos mismos autores señalan que Pulido en 2006 concluyó que si el suelo no se seca nunca o permanece con altos contenidos de humedad, esta fase de envejecimiento apenas se llega a presentar y los procesos de mineralización de los componentes orgánicos más evolucionados se ralentiza significativamente; así, en ladera solana se llevan a cabo procesos de humedecimiento y secado más marcadamente que en los suelos ubicados en la ladera umbría, por lo que en ciertos sitios, los suelos presentan valores de IM más bajos en ladera solana.

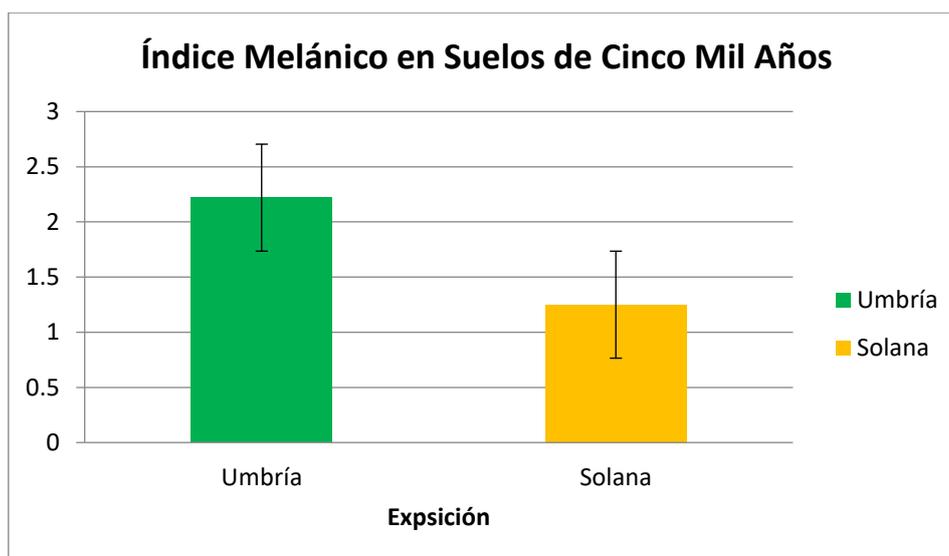


Figura 19.- Promedio del índice melánico con respecto a las laderas.

Cuadro 19.- Variables correlacionadas significativamente con el índice melánico.

Variables	Coefficiente r	Valor (p≤0.05)
Espesor	-0.6398	
Altitud	-0.6406	

#### 8.4- Comparación del Carbono del suelo e Índice melánico por edades.

Con la idea de sintetizar la información presentada en los capítulos anteriores y observar de una forma más clara el comportamiento del Carbono y del Índice melánico en los suelos estudiados en las diferentes edades, se realizaron las ilustraciones presentadas en las Figuras 20, 21 y 22 donde se agrega el perfil altitudinal con la distribución vertical de la vegetación actual, junto con la distribución que ésta tuvo hace mil y cinco mil años, según estudios de Miehlich (1991) y Lozano y Vázquez (2004).

Así mismo, de la Figura 23 en adelante se presentan las gráficas comparativas de los valores de los contenidos promedio de C y de los de los índices melánico por edad y tipo de ladera.

La Figura 20, muestra que, a 4,336 m, el suelo reciente contiene más carbono en ladera umbría y valores de IM más bajo que los suelos de hace mil años, sin embargo, en ambas edades los valores de IM indican que los suelos aún están enriquecidos con ácidos fúlvicos. Descendiendo en los pisos altitudinales y por los 3,835 m, se encontró más carbono en suelos recientes que los desarrollados hace mil años en ambas laderas.

A esta altitud (3835 m) en suelos recientes, la exposición umbría va presentando mayor contenido de ácidos húmicos que la ladera solana de acuerdo con los valores de IM, pero

en suelos bajo depósitos de mil años, ambas exposiciones presentan suelos enriquecidos de ácidos húmicos. Descendiendo a 3,006 m snm, nuevamente existe más carbono en suelos recientes que en los de edades de mil años. Este comportamiento se puede atribuir a que éstos se encuentran debajo de capas poco profundas de suelo reciente y depósito piroclástico, quedando así, expuestos a la actividad de raíces, agua y organismos que utilizan las reservas de C contenidas en esos suelos, lo cual explica que en el perfil localizado a 3,835 m, exista un IM que indica suelos húmicos hace mil años, pero con menor contenido de C que los suelos recientes. Respecto de la distribución de la vegetación, la misma Figura 20, muestra que la distribución vertical de la vegetación actual no difiere de la establecida hace mil años.

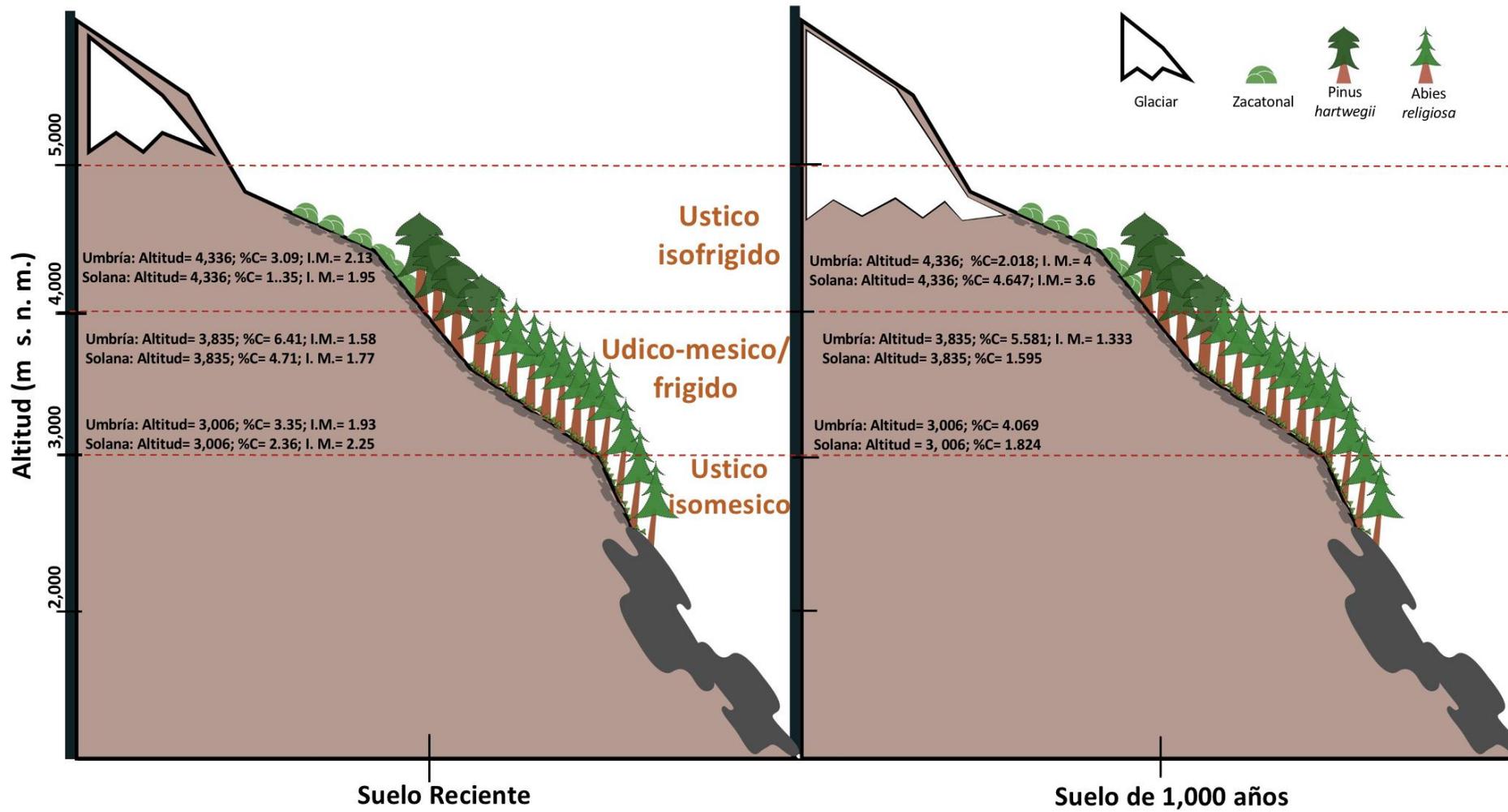


Figura 20.- Comparación del desplazamiento de la vegetación, con los datos de Lozano G.S., Vázquez S.L., 2004 y Miehlich G., 1991, de suelo reciente y hace mil años.

De la comparación entre los suelos actuales con los de hace cinco mil años, en la Figura 21 se puede observar que a 4,004 m snm, la vegetación en estos suelos hace más de cinco mil años ha retrocedido comparado con los suelos recientes, ya que únicamente se encontraban los zacatonales a esta altitud, por otro lado, no se tienen datos sobre a qué altitud se encontraba el glaciar. De igual forma se encontró con un único sitio a estas altitudes en exposición solana, donde se encontró un porcentaje de carbono de 1.4 y un índice melánico de 1.25, el valor más bajo de índice melánico de entre todos los suelos y edades. Descendiendo a 3,289 m, se localizó un solo sitio hace cinco mil años, con exposición umbría, cuyo porcentaje de carbono aumentó a 3.12 y su índice melánico fue de 1.73. A los 3,006 m snm, también se ubicó un sitio con exposición umbría hace cinco mil años. En él se observa que el porcentaje de carbono disminuye (2.49%) con respecto a los suelos recientes (3.35%) de este mismo sitio. Por su parte, el IM aumentó de 1.93 en suelos recientes a 3.0 hace cinco mil años. Como se puede observar en la Figura 22, el glaciar está referido a casi 4,100 m de altitud aproximadamente, por lo tanto, se puede sugerir un retroceso gradual hasta la actualidad, ligado a un aumento en la temperatura.

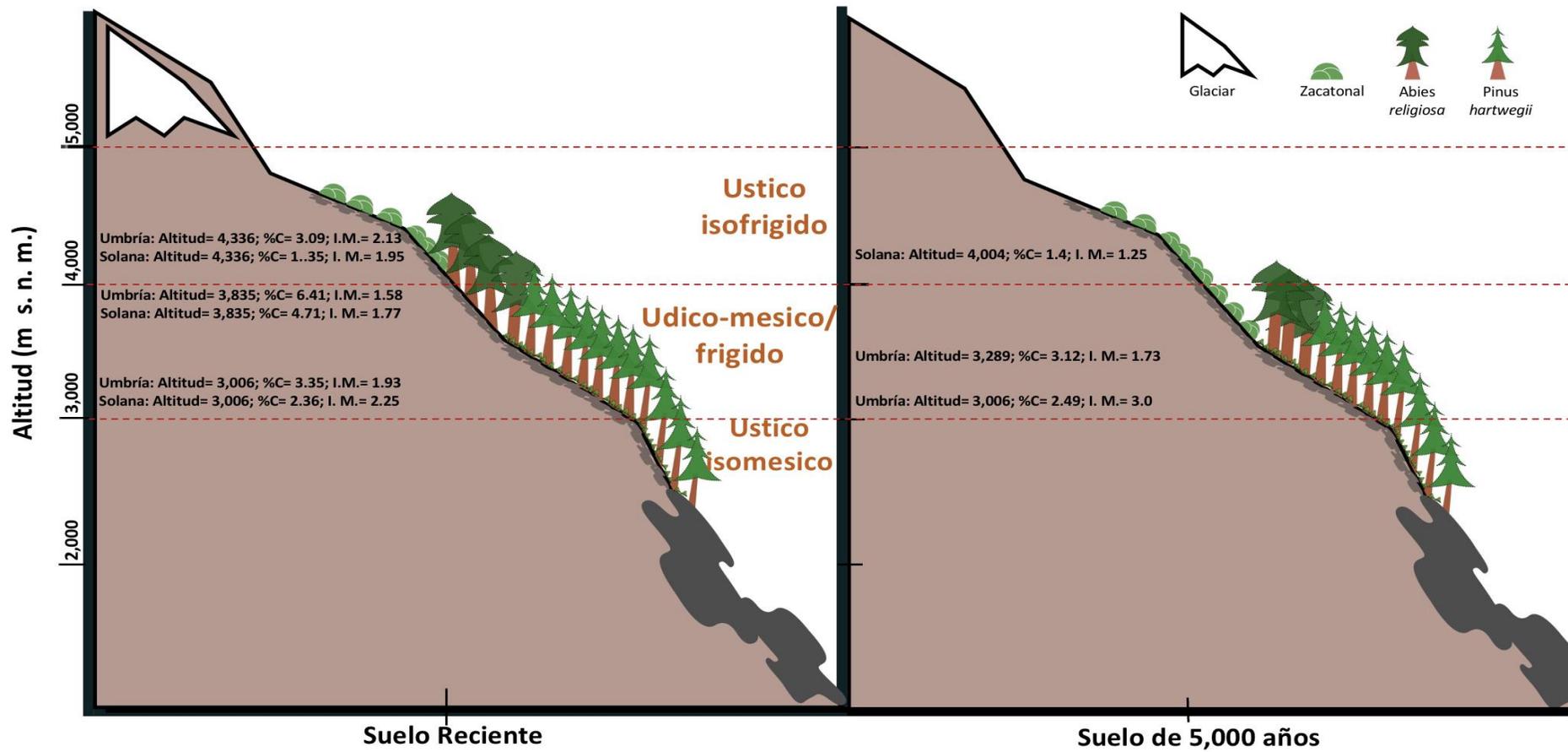


Figura 21.- Comparación del desplazamiento de la vegetación, con los datos de Lozano G.S., Vázquez S.L., 2004 y Miehlich G., 1991 de suelo reciente y hace cinco mil años.

En la Figura 22, se muestra una comparación entre las condiciones bajo las cuales se desarrolla el suelo reciente y las que determinaron el desarrollo de los de hace ocho mil años. Así, se observa un notorio descenso en la vegetación comparado con la época actual, ya que la línea terminal del bosque estaba a unos 700 metros más abajo.

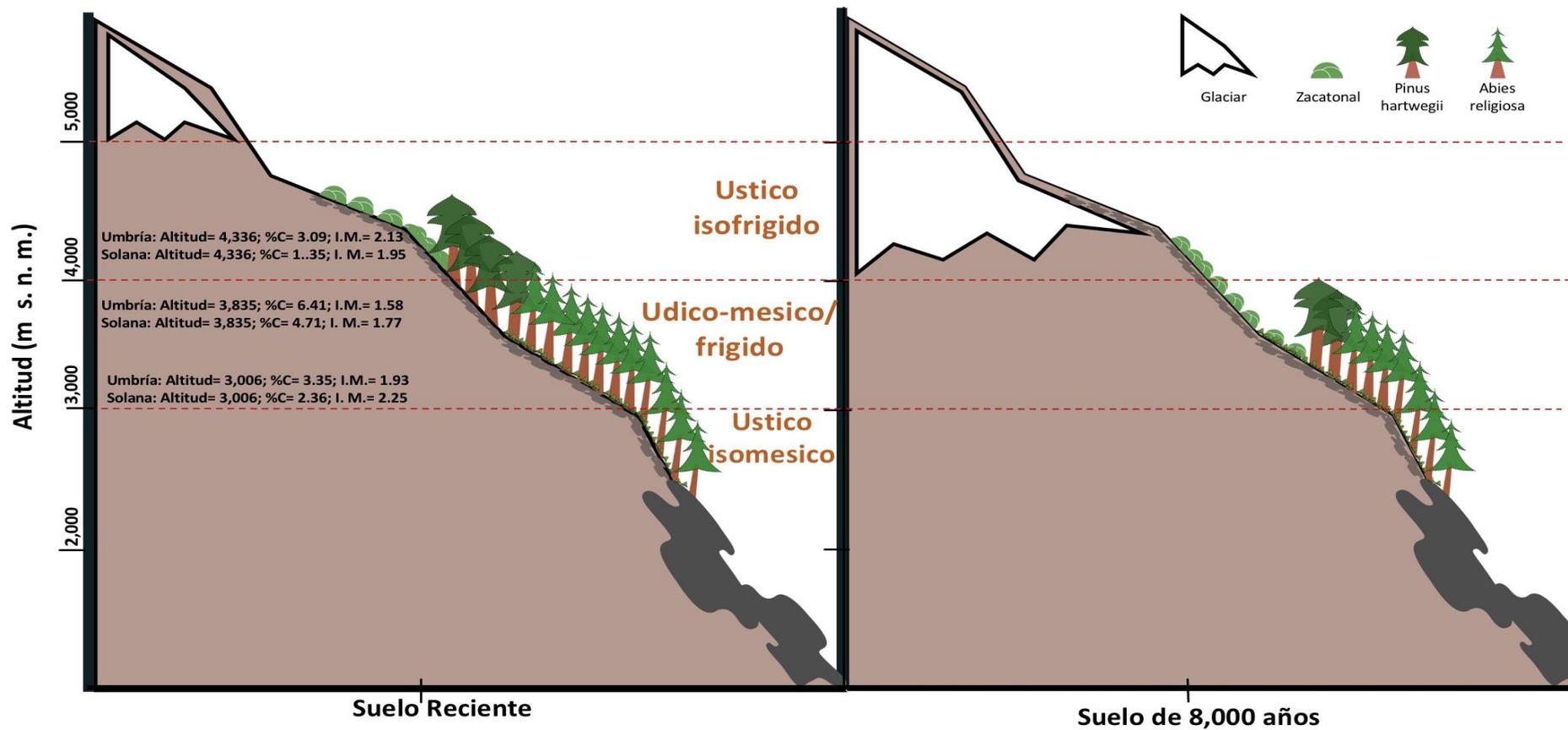


Figura 22.- Comparación del desplazamiento de la vegetación, con los datos de Lozano G.S., Vázquez S.L., 2004 y Miehlich G., 1991, de suelo reciente y hace ocho mil años.

Para observar los contenidos de C por edad, se agruparon los datos de los promedios de los contenidos de C (Figura 23), con lo cual se observó que, en todas las edades, el C promedio es mayor en las laderas umbría, siendo mayores sus contenidos en la actualidad. Así mismo, también se nota que los suelos con desarrollo de hace cinco mil años, tuvieron más carbono que los desarrollados bajo depósito de mil años, lo cual refuerza el supuesto de que la biota actual ha seguido haciendo uso del C de los suelos con una edad de mil años. En la ladera solana, los valores de C en los suelos de hace mil y cinco mil años ( $68.59 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) demuestran que este nutrimento se mantuvo sin cambios durante este periodo de tiempo. De acuerdo con Ibáñez y Manríquez-Cosío (2011) cuando en la génesis de los Andosols existe una deposición repetida de nuevas cenizas frescas debido a una actividad volcánica reciente, las capas finas de ceniza solo pueden rejuvenecer el material superficial del suelo, pero en grandes cantidades (capas gruesas) lo sepultan, interrumpiendo su edafogénesis, y comenzando una nueva que afecta principalmente a las cenizas recientes, formándose un nuevo perfil del suelo sobre el antiguo enterrado, mientras la formación del suelo en el horizonte A sepultado toma un curso diferente en respuesta al repentino descenso del suministro de materia orgánica y las diferencias en la humedad conforme se aleja de la superficie.

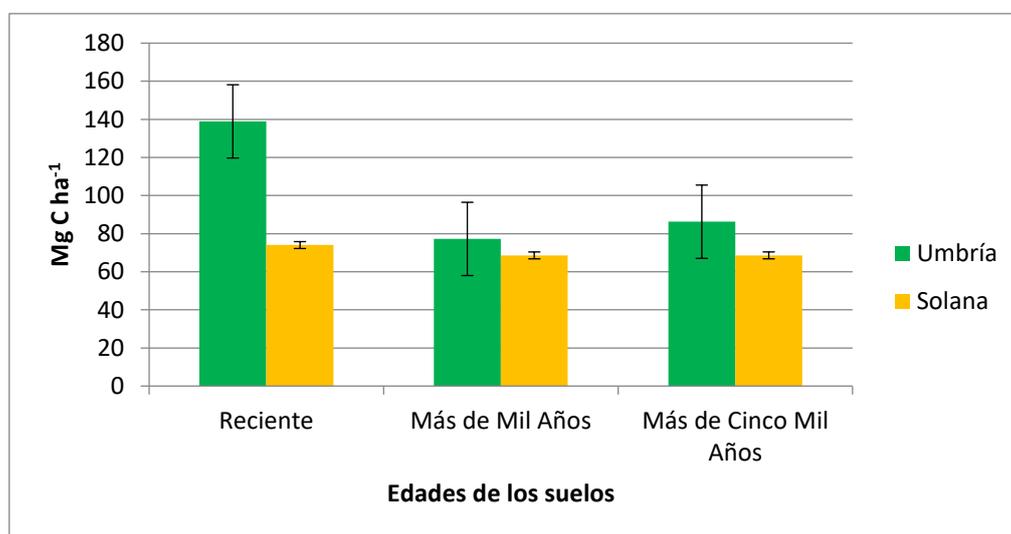


Figura 23.- Promedio de los  $\text{Mg C ha}^{-1}$  en solana y umbría a través de los últimos cinco mil años.

Para robustecer los datos presentados del C bajo suelos de diferente edad, se procedió a realizar un análisis estadístico tipo ANOVA para establecer diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre ellos. Así, con este análisis se pudo conocer que no existen diferencias

significativas entre los contenidos de C de los suelos estudiados en la presente investigación (Figura 24).

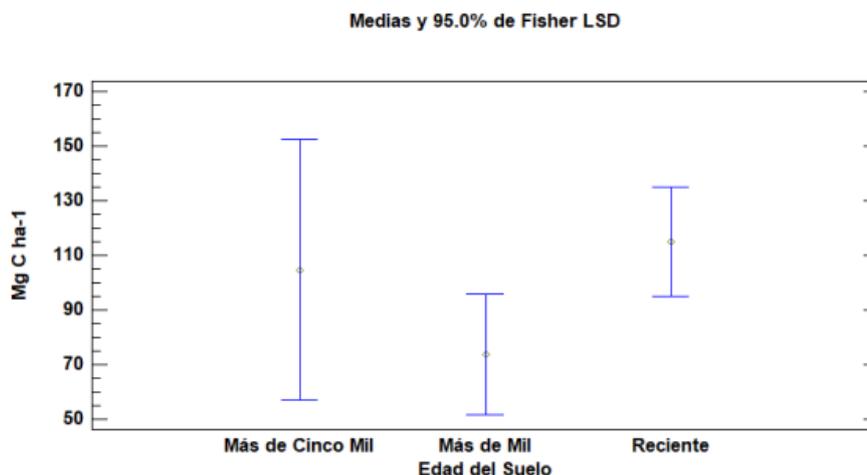


Figura 24.- Análisis estadístico de ANOVA de los Mg C ha<sup>-1</sup> de las tres edades.

Respecto del índice melánico, se agruparon sus promedios de acuerdo con la exposición de la pendiente y las edades. De esta forma, en la Figura 25 se puede observar que los suelos menos humificados corresponden a los desarrollados hace más de mil años, presentando los valores más altos de IM en ambas laderas (2.31 para umbría y 2.71 en solana). En suelos recientes, se encontró que valores cercanos a dos estuvieron presentes en ambas exposiciones (1.97 en umbría y 1.94 en solana). De los suelos de más de cinco mil años, el valor más alto del IM se presentó en la ladera umbría (2.22), mientras que en solana se presentaron los suelos más humificados de todas las edades dado que se presentó un valor igual a (1.25).

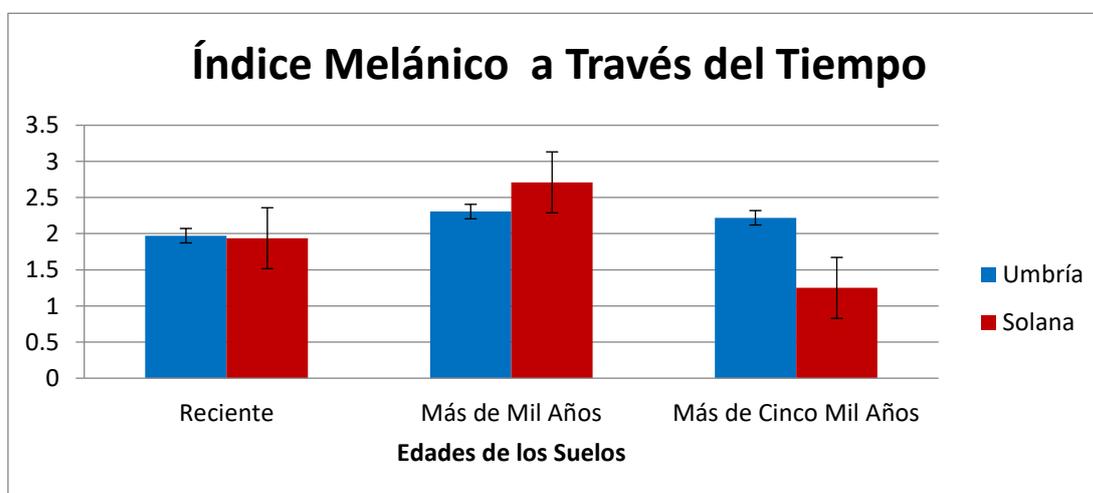


Figura 25.- Promedio del I.M. en solana y umbría a través de los últimos cinco mil años.

## 9.-Conclusiones:

Los suelos con desarrollo reciente contienen más contenido de C que los suelos de hace mil y cinco mil años, no obstante, los suelos más antiguos (5000 años) presentaron mayor cantidad de COS comparado con los de hace mil, por lo que se genera el supuesto de que éstos han quedado expuestos a la biota y actividad hidrológica actual que ha provocado una disminución de su contenido.

Los sitios homólogos en exposición y nivel altitudinal muestran una diferencia en desarrollo pedogenético y diferencias en los contenidos de carbono e IM, mostrando que en promedio la ladera con más contenido de carbono derivado de una mayor estabilidad de la MOS es la ladera umbría.

En suelos recientes, las variables robustas que rigen el comportamiento de los suelos fueron el pH en agua, la altitud y el espesor; en los suelos de mil años fueron el espesor, la proporción  $Alp/Alo$  y el pH en  $CaCl_2$ ; en tanto que en los suelos de cinco mil años fueron la densidad y el  $Alo + \frac{1}{2} Feo$  quienes determinan la dinámica de la capa edáfica. Por lo tanto, en términos generales, para los tres tipos de edades, el espesor del suelo, su acidez y el aluminio son las variables que rigen el comportamiento de los suelos a lo largo de su perfil y dentro de la cuenca Alcalica.

Respecto del índice melánico, en promedio se tienen suelos fúlvicos en todas las edades. Sin embargo, en sitios ubicados a 3,835 m snm se localizan suelos húmicos en capas edáficas recientes y de más de mil años. En los suelos de más de cinco mil años a 4,004 m snm se ubicaron suelos húmicos.

En suelos con edades de mil y cinco mil años las variables que determinaron su grado de humificación fueron la altitud y el espesor del suelo.

Derivado de las evidencias presentadas, la hipótesis planteada en la presente investigación no puede ser rechazada debido a que existen razones para pensar que el carbono de los suelos de mayor edad si contienen más carbono, como es el caso de los de cinco mil años, sin embargo, se sugiere considerar una mejor forma de obtener las muestras de paleosuelos a mayor profundidad y de capas menos expuestas al intemperismo.

## 10. Bibliografía:

1. Anaya A.C., Mendoza M., Rivera M., Páez R., Olivares M. L.D., 2015. Contenido de Carbono orgánico y retención de agua en suelos de un bosque de niebla en Michoacán México. Facultad de Biología. Michoacán México.
2. Arana S.L., Siebe C., Macías J.L., 2010. Dynamics of the ca. 4965 yr 14C BP "Ochre Pumice" plinian eruption of Popocatepetl volcano, México. *Journal of Vulcanology and Geothermal Research*. 192, 212-231.
3. Basile-Doelsch, I., Amundson, R., Stone, W.E.E., Borschneck, D., Bottero, J.Y., Moustier, S., Masin, F., Colin, F., (2007). *Mineral control of carbon pools in a volcanic soil horizon*. *Geoderma* 137, 477–489.
4. Bremner, J.M. (1965). *Methods of soil analysis, Agronomy 9*. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin. pp.1149-1178.
5. Bronger, A., y Catt, A. J. (1998). Summary Outline and Recommendations on Paleopedological Issues. *Quaternary International*, Gran Bretaña, Vol (51/52). pp. 5-16.
6. Broquen, P., Lobartini, J.C., Candan, F., y Falbo, G. (2004). *Allophane, aluminium, and organic matter accumulation across a bioclimatic sequence of volcanic ash soils of Argentina*. *Geoderma* 129, 167-177.
7. Cabrera, R. (2004). Materia. Facultad de ingeniería. Universidad nacional Autónoma de México.
8. Chen, Y., Senesi, N., Schnitzer, M. (1977). Chemical and physical characteristics of humic and fulvic acids extracted from soils of the mediterranean region. Instituto de investigación del suelo. Ottawa. Canada.
9. Chivilet, M. J. (2010). Ciclo del carbono y clima: la perspectiva geológica. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*. (18.1) p. 33-64.
10. CONANP y SEMARNAT. (2013). *Programa de Manejo Parque Nacional Iztaccihuatl*. México.
11. Cornejo-Cruz, C. A., (2019). *Cuantificación de Aluminio y Hierro en Suelos de Origen Volcánico en un Gradiente Altitudinal en el Parque Nacional Izta-Popo* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México. México.
12. Cruz-Flores G., Guerra-Hernández E. A. y Santiago-Aguilar I. 2020. Carbono orgánico en ecosistemas ribereños y manejo sustentable en la Reserva de la Biósfera Los Volcanes. *Elementos para Políticas Públicas* Vol. 4. Núm. 1: 43-60. ISSN 2448-5578.
13. Doran, J. W. y Parkin, T.B. (1994) *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Ed. SSSA y ASA. Madison, Wisconsin, USA.

14. EuropeAid Co-operation Office. (2011) *Edafología 1*. Espacio Gráfico Comunicaciones S.A. Colombia.
15. Eyherabide, M., Saínz, H., Barbieri, P. y Echeverría, E.H. (2014). Comparación de métodos para determinar carbono orgánico del suelo. *Ciencia del Suelo*. Argentina. 32 (1). pp. 13-19.
16. FAO, ISRIC y SICS. (1999). Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB). *FAO*. pp. 44
17. Galicia, L., A. M. Gamboa Cáceres, S. Cram, B. Chávez Vergara, V. Peña Ramírez, V. Saynes y C. Siebe. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana* 34: 1-29.
18. Granados, H., D. (1997). The glaciers of popocatepetl volano (Mexico): Changes and causes. UNAM. México.
19. Guerrero, D. T. 2014. *Biostatística*. UNAM. FES Zaragoza. México.
20. Hiederer, R., Köchy M. (2011). *Global Soil Organic Carbon Estimates and the Harmonized World Soil Database*. Oficina de la Union Europea. Italia.
21. Horwath, W. (2015). Ciclo del Carbono: La dinámica y formación de materia orgánica, Universidad de California. *Davis*. CA. USA.
22. Huerta, E.H. 2010. *Determinación de Propiedades Físicas y Químicas de suelos con mercurio en la religión de San Joaquín, Qro., y Su relación con el crecimiento Bacteriano*. Universidad. Autónoma de Querétaro, México. p. 13-20.
23. Ibañez J.J., Manríquez-Cosío F.J. 2011. Los Andosols (WRB 1998): Suelos Volcánicos, <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2011/11/23/140258>
24. Ingrid R. Zamoni C., María I. Ballesteros G.1 y Adriana M. Zamudio S.2. 2006. *Caracterización de Ácidos Húmicos y Fúlvicos de un Molisol Bajo Dos Coberturas Diferentes*. *Rev. Colomb. Quim.* 2006, 35(2):191-203.
25. IPCC. 2014. *Climate Change 2014: Synthesis, Report Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC.
26. Jackson, M.L. (1964). *Análisis químico de suelos*. Ed Omega. Barcelona, España
27. Jackson, M.L. (1964). *Análisis químico de suelos*. Traducción al español por J. Beitrán M. Omega, Barcelona, España.
28. Jasso, C., Sedov, S., Solleiro, E., Gama, J. 2002. *El Desarrollo de los paleosuelos como índice de la estabilidad del paisaje. Un ejemplo del centro de México*. Instituto de Geografía. UNAM. México.
29. Jobbágy G.E., Jackson B.R., 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Society of América*, USA.
30. Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climatic change. *Geoderma*. USA. 123: 1-22.

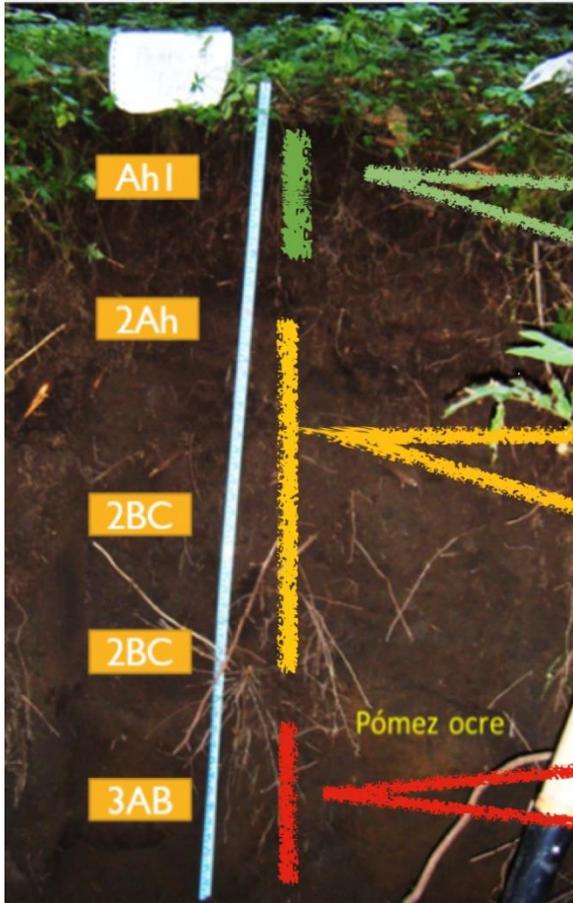
31. Lal R., Jacinthe P.A., Owens L.B., Hothem D.L., 2004. Transport of labile carbon in runoff as affected by land use and rainfall characteristics. *Soil and Tillage Research*. USA.
32. Lessard Ro., Gignac D. L. y Rochette, P. (2008). El ciclo de carbono: midiendo el flujo del CO<sub>2</sub> del suelo. *Universidad de Alberta*.
33. López-López, A., B. (2014). *Influencia del relieve sobre las propiedades del suelo en una catena en laderas de montaña del Parque Nacional Izta-Popo*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México. México.
34. Lozano G.S., Vázquez S.L., 2004. A high-elevation Holocene pollen record from Iztaccíhuatl volcano, central Mexico. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México.
35. Macías, F. (2004). Sumidero de carbono para el forzamiento climático antropoceno. Una visión de alternativas de actuación desde la ciencia del suelo. *Edafología*. Universidad de Santiago. Vol.11. pp.7-25,
36. Macías, L. J. (2006). *Geología e historia de algunos de los grandes volcanes activos de México*. Departamento de Vulcanología, Sociedad Geológica Mexicana, México.
37. Manahan, E., S. (2007). *Introducción a la química ambiental*. Reverté ediciones. México.
38. Miehlisch G., 1991. Chronosequence of Volcanic Ash Soils, Universidad de Hamburgo. pg. 9.
39. Miguel-Jiménez, J. D. (2013). Cobertura vegetal, materia orgánica y pH en suelo y su relación con el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en el Parque Nacional Iztaccíhuatl- Popocatepetl. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México. México.
40. O'Rourke, S.M., Angers, D. A., Holden, N.M., Mcbratney, A.B. 2015. Soil organic carbon across scales. *Global Change Biology*, 21: 3561- 3574.
41. Osman, K., T. (2013). *Soil: Principles, Properties and Management*. Springer. Londres R.U. 306 p.
42. Percival, H. J., Parfitt, R. L., Scott, N.A., (2000). *Factors controlling soil carbon levels in New Zealand grassland: is clay content important?* *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 1623–1630.
43. Rebolledo S.E., Sedov S., Sycheva S., Pérez S. S., Pustoviotov K. Sauer D. (2015). *Influencia de los paleosuelos en los procesos exógenos modernos en la porción noreste de la cuenca de México*. México.
44. Retallack, G. J. y Wright, V.p. (1990), Micromorphology of Lithified paleosols, *Developments in soil science*. vol (19) pp. 641-652.
45. Reyes, F., Lillo, A., Ojeda, N., Reyes, M., Alvear, M. (2011), *Efecto de la exposición y la toposecuencia sobre actividades biológicas del suelo en bosque relictivo del centro-sur de Chile*. Chile.

46. Richard, L.A. (1990). *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos*. Sexta edición. ed. Departamento de Agricultura de Estados Unidos de América. Limusa, México, D.F.
47. Romero B.C., García G.E., Hernández A. E., 2015. Materia orgánica y densidad aparente en suelos del suroeste de la Malinche, Tlaxcala, México.
48. Scholtes, W., H., Ruhe, R., V., Riecken, E., E. (1951) *Use of the morphology of buried soil profiles in the pleistocen of Iowa*. Academia de Ciencias de Iowa. EUA.
49. Scott, N.A., Tate, K.R., Giltrap, D.J., Smith, T. C., Wilde R.H. Newsome, P. F. J. y Davis, M. R. (2002). Monitoring land-use change effects on soil carbon in New Zeland: quantifying baseline soil carbon stocks. *Environmental Pollution*. 116. Nueva Zelanda.
50. Sedov S., Rebolledo S.E., Terhorst B., Solé J., Delgadillo F.L.M., Werner G. y Poetsch T. (2009). The Tlaxcala basin peleosol sequence: a multiscale proxy of middle to late Quaternary Environmental change in central Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. v.26. núm. 2. pp. 448-465.
51. Sedov S., Solleiro E., Gama J. y Jasso C. (2002). El desarrollo de los paleosuelos como índice de la estabilidad del paisaje. Un ejemplo del centro de México. *Investigaciones Geográficas. Boletín de Geografía*. UNAM. núm. 47, pp.20- 35.
52. Siebe, C., Jahn R. y Karl, S. (2006). *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*. Instituto de Geología. UNAM. pp. 14-27.
53. Valderrábano-Gómez, J., M. (2013). *Calidad del suelo forestal y su distribución espacial en bosques de coníferas del Parque Nacional IztaPopo*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México. México.
54. Valera P.M.A., Ríos P.A., Coyotl T.A., Linares F.G., Tenorio A.M.G., Sampedro R.M.L., 2015. El suelo como almacén de carbono: Criterios para la calidad de carbono secuestrado en suelos. BUAP. Puebla.
55. Vázquez, E. C. (2004). *Modificación de las propiedades ándicas en dos suelos desarrollados sobre anfibolitas*. Universidad de Santiago de Composta. pp. 52.
56. Volke Sepúlveda, T., Velasco-Trejo, J.A. y de la Rosa Pérez, D.A. (2005). Suelos Contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. *Secretaria de Medio ambiente y Recursos Naturales*. Instituto Nacional de Ecología. Impreso en México. Pp 19-31.
57. White, E.S. (2003). Quaternary glacial stratigraphy and chronology of Mexico. *Department of geology and mineralogy*. USA. vol. 5. p. 201-205.
58. Yaalon, D., H. (1975). Conceptual models in pedogenesis: Can soil-forming functions be solved? Departamento de Geología. Israel.



### 11.- Anexo

Perfil 3006 m snm, Umbría



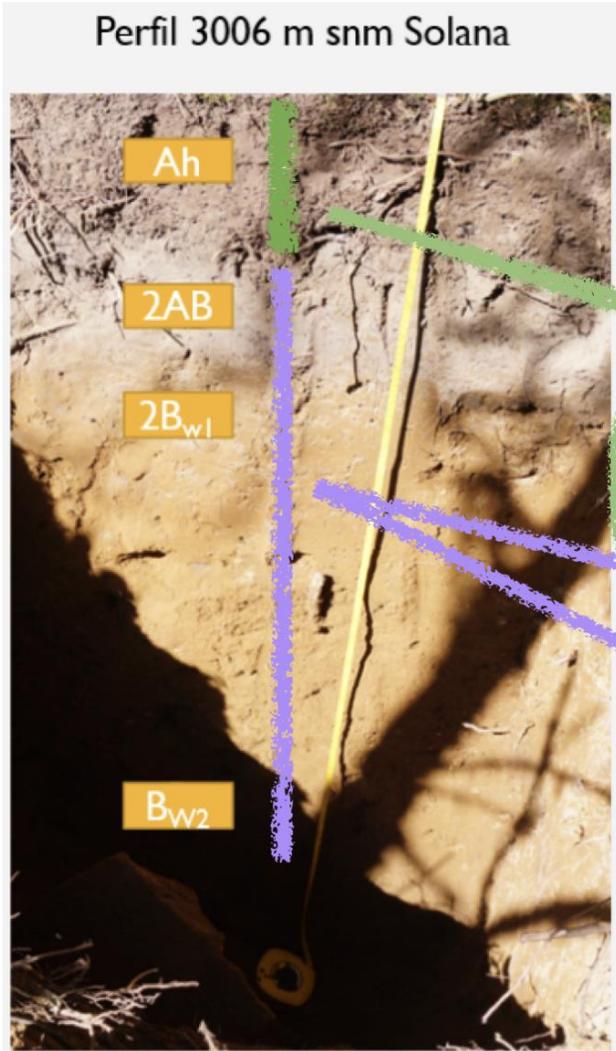
Tomacoco 1 - 09/12/2017		
Inclinación	Posición en el relieve	Características generales
23 grados	CL	Uso forestal, donde domina la presencia de <i>Abies religiosa</i> , formando un bosque mixto

Suelo Reciente				
Profundidad	Textura	Pedregosidad	Color	Estructura
0-29 cm	RA	1%	10 YR 3/2	Angular y granular

Suelo de más de 1000 años				
Profundidad	Textura	Pedregosidad	Color	Estructura
29-51 cm	CA	0.25%	10 YR 3/1	Angular que rompe a angular
51-83 cm	Ra	0.25%	10 YR 3/3	Subangular que rompe a subangular

Suelo de más de 5000 años				
Profundidad	Textura	Pedregosidad	Color	Estructura
83-103 cm	CR	-	7.5 YR 2.5/2	Angular que rompe en angular

Anexo 1.1. Cuadro de la descripción de campo hecha con el manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo (Siebe *et al*, 2006) del sitio Tomacoco 1



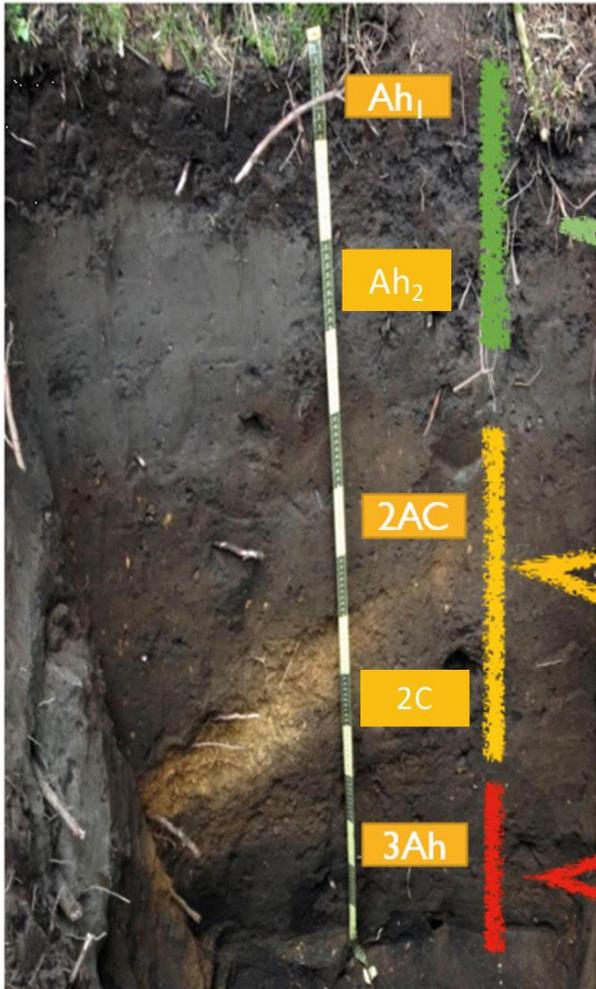
Tomacoco 2- 09/12/2017		
Inclinación	Posición en el relieve	Características generales
24 grados	Lomo (BS)	Estrato arbóreo alto, dominan los arboles adultos, también hay en menor proporción arboles de estrato medio y yerbas como Cenecio y Bocharis. Presencia de colibríes y lombrices.

Suelo Reciente				
Profundidad	Textura	Pedregosidad	Color	Estructura
0-24 cm	CA	Nula	7.5 YR 4/2	Subangular que rompe en angular

Suelo de más de 1000 años				
Profundidad	Textura	Pedregosidad	Color	Estructura
24-45 cm	Ceniza	1%	-	Subangular que rompe en angular muy fino
45-132 cm	CR	2%	10 YR/ 3/4	Granular
132-180	CLg	Nula	-	Granular que rompe en subangular

Anexo 1.2. Tabla de descripción de campo hecha con el manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo (Siebe *et al*, 2006) del sitio Tomacoco 2.

Perfil 3289 m snm Umbría



Ameca 1 - 09/08/2017		
Inclinación	Posición en el relieve	Características generales
32 grados	Lomo (BS)	Bosque de <i>Abies religiosa</i> perturbado.

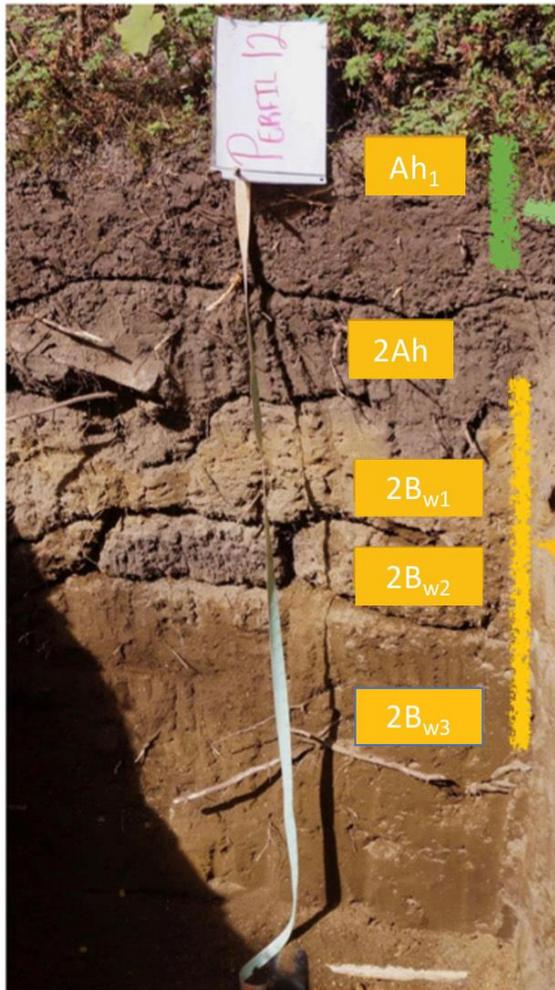
Suelo Reciente		
Profundidad	Textura	Color
0-13 cm	CR	10 YR 2/1
13-43 CM	CLF	10 YR 3/1

Suelo de más de 1000 años		
Profundidad	Textura	Color
43-70	CRL	10 YR 2/2
102-116 cm	CA	10 YR 2/2

Suelo de más de 5000 años		
Profundidad	Textura	Color
116-145 cm	Ra	10 YR 2/1

Anexo 1.3. Cuadro de la descripción de campo hecha con el manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo (Siebe *et al*, 2006) del sitio Ameca 1.

Perfil 3289 m snm Solana



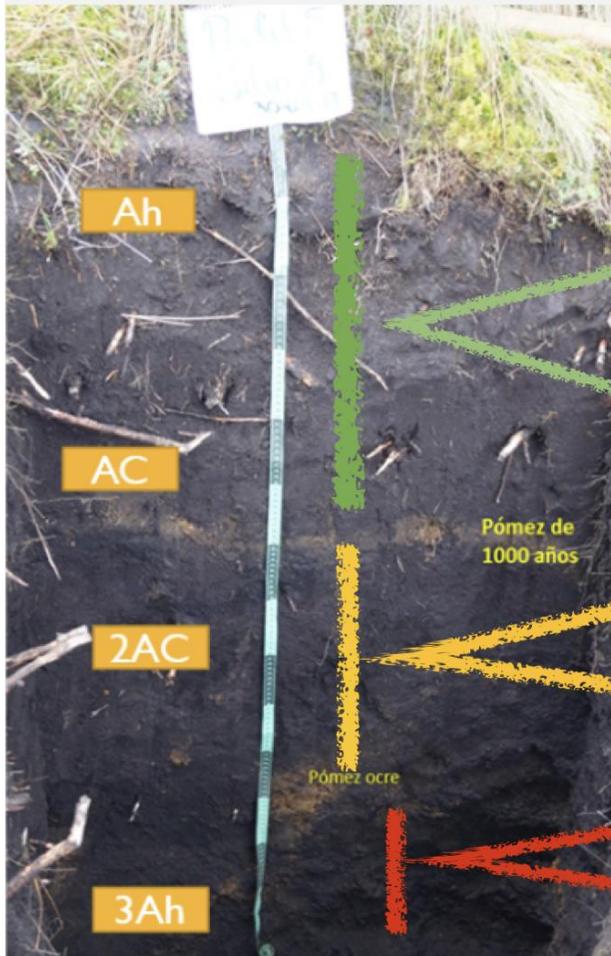
Ameca 2- 09/02/2018		
Inclinación	Posición en el relieve	Características generales
35 grados	Lomo de ladera	Bosque de <i>Abies religiosa</i> con signos de perturbación y con presencia de Potentilla y Senecio.

Suelo Reciente				
Profundidad	Textura	Pedregosidad	Color	Estructura
0-18 cm	CRL	1%	10 YR 2/2	Subangular que rompe a subangular, migajón.

Suelo de más de 1000 años				
Profundidad	Textura	Pedregosidad	Color	Estructura
18-44.5 cm	CLF	0.1%	10 YR 3/4	Subangular que rompe a subangular
44.5-61 cm	CLF	0.1	10 YR 3/4	Subangular que rompe a subangular
61-73 cm	CLF	10%	10 YR 3/4	Subangular que rompe a subangular débil
73-140 cm	CRA	7%	10 YR 3/3	Angular que rompe a angular

Anexo 1.4. Cuadro de la descripción de campo hecha con el manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo (Siebe *et al*, 2006) del sitio Ameca 2.

Perfil 3835 m snm Umbría



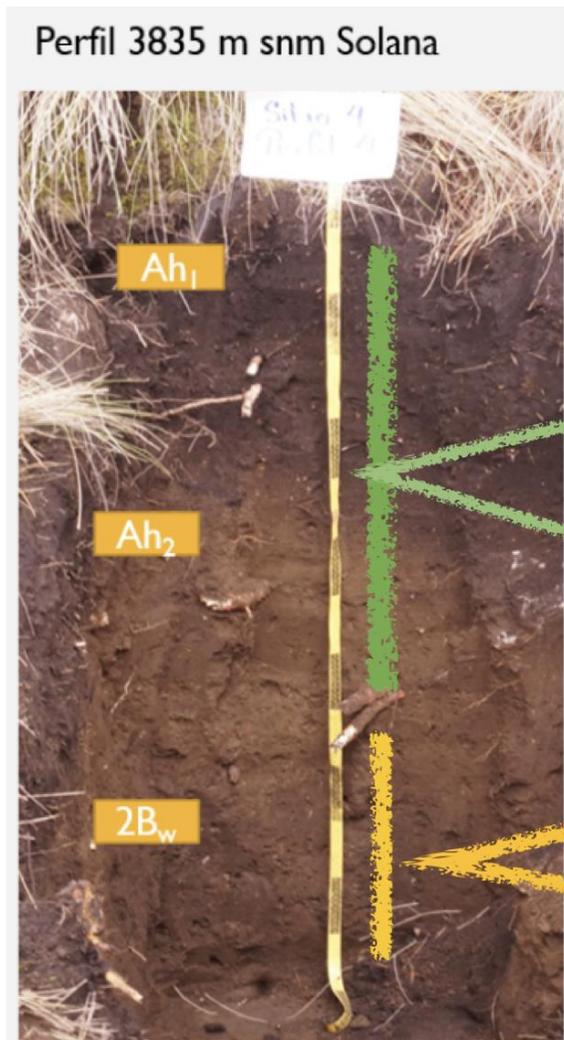
La Joya 1- 30/09/2017		
Inclinación	Posición en el relieve	Características generales
21 grados	Lomo (BS)	Bosque de <i>Pinus hartwegii</i> y zacatonal. Se observa un estrato arbóreo (alto, medio, bajo), herbáceo y rasante.

Suelo Reciente			
Profundidad	Textura	Color	Estructura
0-55 cm	CRA	7.5 YR 5/1	Angular rompe a subangular-granular

Suelo de más de 1000 años			
Profundidad	Textura	Color	Estructura
55-99 cm	CA	10 YR 5/2	Angular rompe en angular

Suelo de más de 5000 años			
Profundidad	Textura	Color	Estructura
99-150 cm	CA	10 YR 5/2	Angular rompe en subangular

Anexo 1.5. Cuadro de la descripción de campo hecha con el manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo (Siebe *et al*, 2006) del sitio La Joya 1.



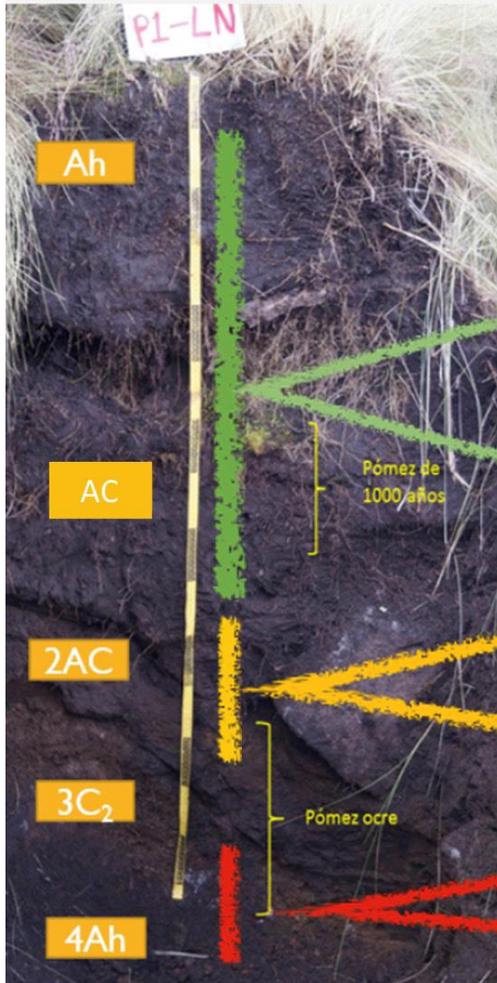
La Joya 2 - 30/09/2017		
Inclinación	Posición en el relieve	Características generales
31 grados	Lomo (BS)	Bosque de <i>Pinus hartwegii</i> con pastizal. Presencia de ramas caídas y algunos bloques de rocas expuestos. Hay trozos de carbon en los primeros horizontes.

Suelo Reciente			
Profundidad	Textura	Color	Estructura
0-38 cm	CA	10 YR 2/1	Angular rompe a subangular
38-55 cm	CA	10 YR 2/2	Subangular rompe en subangular-angular

Suelo de más de 1000 años			
Profundidad	Textura	Color	Estructura
55-137	CA	10 YR 2/2	Subangular-granular rompe en granular

Anexo 1.6. Cuadro de la descripción de campo hecha con el manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo (Siebe *et al*, 2006) del sitio La Joya 2.

Perfil 4004 m snm Umbría



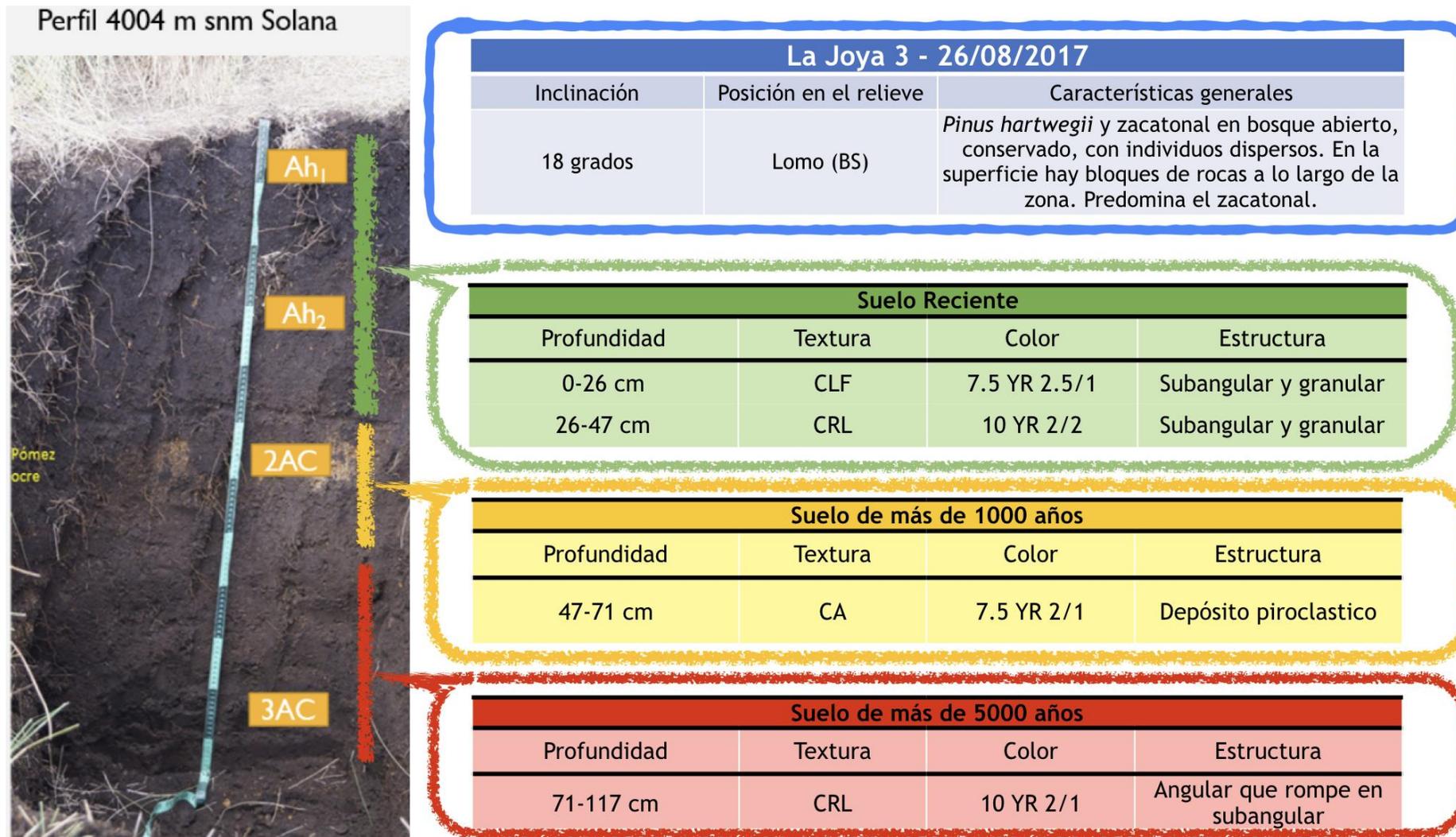
La Joya 4 - 25/08/2017		
Inclinación	Posición en el relieve	Características generales
33 grados	Lomo (BS)	Conservado con pastizal con rocas expuestas y líquenes en ellas, hay presencia de cardosanto y en el fondo del valle hay pastoreo y en la zona hay turismo de montaña.

Suelo Reciente				
Profundidad	Textura	Pedregosidad	Color	Estructura
0-74 cm	CRL	0.25%	7.5 YR 2/0	Subangular que rompe en granular
74-102 cm	CRA	2%	7.5 YR 4/2	Ganular que rompe en subangular

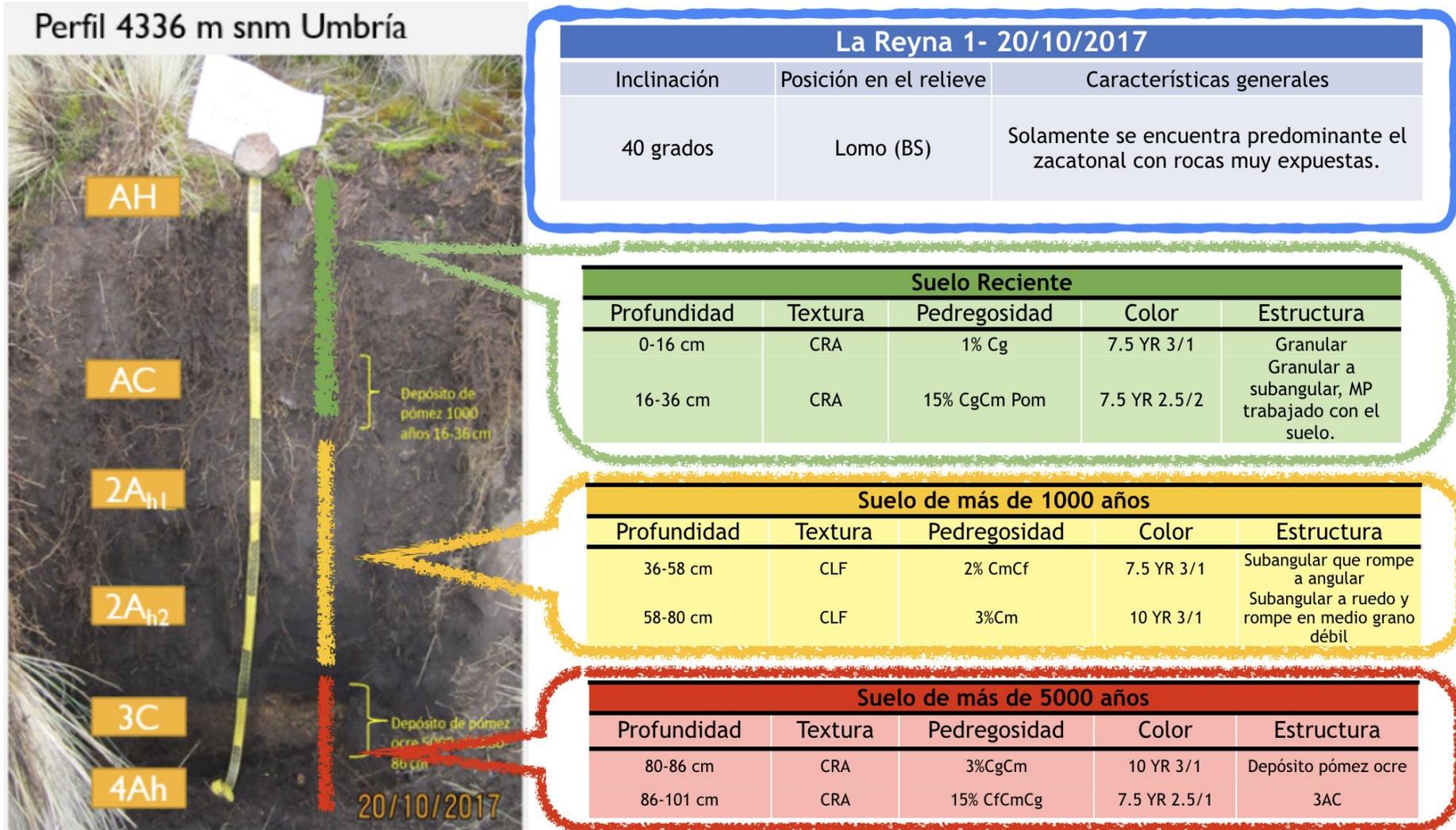
Suelo de más de 1000 años				
Profundidad	Textura	Pedregosidad	Color	Estructura
102-130 cm	CLF	0.25%	7.5 YR 3/2	Subangular que rompe en angular

Suelo de más de 5000 años				
Profundidad	Textura	Pedregosidad	Color	Estructura
130-154 cm	CA	50%	7.5 YR 3/4	Granular y subangular

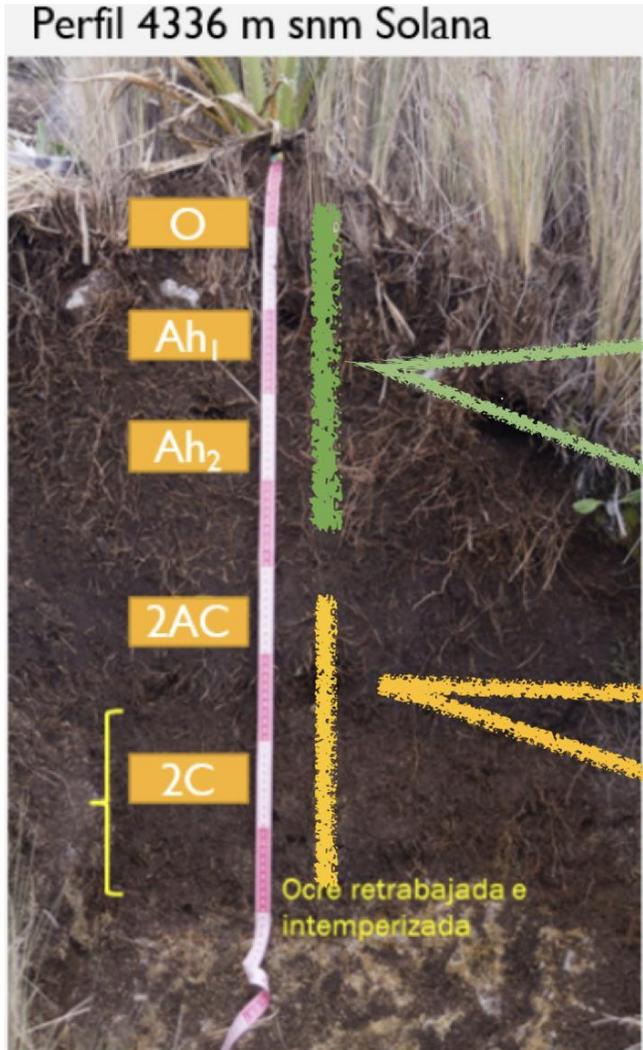
Anexo 1.7. Cuadro de la descripción de campo hecha con el manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo (Siebe *et al*, 2006) del sitio La Joya 4.



Anexo 1.8. Cuadro de la descripción de campo hecha con el manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo (Siebe *et al*, 2006) del sitio La Joya 3.



Anexo 1.9. Cuadro de la descripción de campo hecha con el manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo (Siebe *et al*, 2006) del sitio La Reyna 1.



Perfil 4336 m snm Solana

La Reyna 2- 25/08/2017		
Inclinación	Posición en el relieve	Características generales
22 grados	Hombro de ladera	Predomina el Zacatonal y el turismo de montaña.

Suelo Reciente		
Profundidad	Textura	Color
0-22 cm	CA	7.5 YR 2.5/3
22-45 cm	CLg	10 YR 4/3
45-52 cm	CA	10 YR 4/3

Suelo de más de 1000 años		
Profundidad	Textura	Color
52-65 cm	CA	10 YR 3/1
65-92 cm	CA	10 YR 3/2

Anexo 1.10. Cuadro de la descripción de campo hecha con el manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo (Siebe *et al*, 2006) del sitio La Reyna 2.