



CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS
DEL NOROESTE, S.C.

Programa de Estudios de Posgrado

**FLUJOS Y ALMACENES DE CARBONO EDÁFICO EN UN
ECOSISTEMA ÁRIDO DEL NOROESTE DE MÉXICO: UN
ENFOQUE MULTIESCALAR**

TESIS

Que para obtener el grado de

Doctor en Ciencias

Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales
(Orientación en Ecología)

Presenta

FERNANDO AYALA NIÑO

La Paz, Baja California Sur, abril de 2018

ACTA DE LIBERACIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B. C. S., siendo las 12:00 horas del día 10 del

Mes de Abril del 2018, se procedió por los abajo firmantes, miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

"FLUJOS Y ALMACENES DE CARBONO EDÁFICO EN UN ECOSISTEMA ÁRIDO DEL NOROESTE DE MÉXICO: UN ENFOQUE MULTIESCALAR"

Presentada por el alumno:

Fernando Ayala Niño

Aspirante al Grado de DOCTOR EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACIÓN EN Ecología

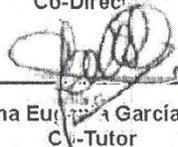
Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron su **APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

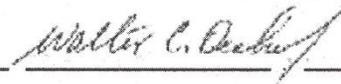
LA COMISIÓN REVISORA

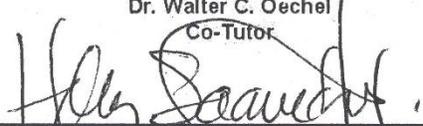

Dra. Yolanda Maya Daigrad,
Co-Director de Tesis


Dr. Enrique Troyo Diéguez,
Co-Director


Dr. Salvador Lluch Cota,
Co-Tutor


Dra. Norma Eugenia García Calderón,
Co-Tutor


Dr. Walter C. Oechel,
Co-Tutor


Dra. Norma Yolanda Hernández Saavedra,
Directora de Estudios de Posgrado y
Formación de Recursos Humanos

Conformación de Comités

Comité tutorial

Dr. Enrique Troyo Diéguez
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
Co-director de tesis

Dra. Yolanda L. Maya Delgado
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
Co-directora de tesis

Dr. Salvador Lluch Cota
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
Co-tutor

Dra. Norma Eugenia García Calderón
Universidad Nacional Autónoma de México -UMDI
Co-tutor

Dr. Walter C. Oechel
San Diego State University
Co-tutor

Miembros del Comité Revisor de Tesis

Dr. Enrique Troyo Diéguez
Dra. Yolanda L. Maya Delgado
Dr. Salvador Lluch Cota
Dra. Norma Eugenia García Calderón
Dr. Walter C. Oechel

Jurado de Examen de grado

Dr. Enrique Troyo Diéguez
Dra. Yolanda L. Maya Delgado
Dr. Salvador Lluch Cota
Dra. Norma Eugenia García Calderón
Dr. Walter C. Oechel

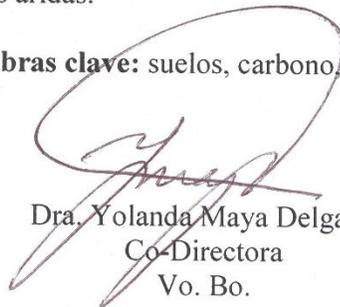
Suplentes

Dra. Alejandra Nieto Garibay
Dra. Elisa Serviere Zaragoza

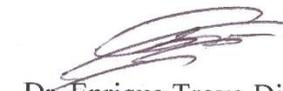
Resumen

Las concentraciones de bióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera se han incrementado considerablemente por actividades antrópicas. Como un sumidero de carbono (C) los ecosistemas terrestres participan dentro del flujo y balance global, por lo que la estimación de los almacenes y flujos a diferentes escalas de aproximación es fundamental para entender la dinámica sobre el suelo, la vegetación y la atmósfera. En las zonas áridas de México la información disponible sobre el ciclo del C y sus interacciones aún es escasa. Los objetivos de la presente investigación fueron: (i) conocer el contenido y capacidad de almacenamiento de C mediante perfiles edáficos en los suelos de una región árida y su relación con la geomorfología a escala regional; (ii) estimar la influencia de las costras biológicas del suelo (CBS) y del cambio de uso de suelo sobre las tasas de respiración edáfica; y (iii) comparar mediante el análisis de datos (*eddy covariance* e índices hidroambientales), la influencia del monzón de Norteamérica sobre los flujos de CO₂ entre dos ecosistemas del noroeste de México. Tras la elaboración de un mapa geomorfológico, perfiles de suelo fueron descritos y muestreados. Se identificaron ocho grupos de suelo, así como los contenidos de carbono orgánico con variaciones de 0.15 a 45.55 Mg ha⁻¹ e inorgánico de 0.045 to 32.07 Mg ha⁻¹. Para estimar la tasa de respiración edáfica se colocaron treinta collares de acero en dos condiciones de uso de suelo (matorral y erosión) con la presencia y ausencia de CBS. Durante 24 meses se midió el intercambio neto de CO₂ obteniendo valores positivos de respiración al inicio del periodo de estudio (0.099 a 0.828 $\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$) tras el paso del huracán Odile, posterior a este evento, solo se registraron valores negativos (0.000 a -0.055 $\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$). Para comparar el intercambio neto del ecosistema entre dos ecosistemas (matorral sarcocaula y selva baja caducifolia), se utilizaron series de datos de flujos de C para 2006 y 2007. Valores promedio de NEE van de -0.01 a 1.66 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y de -0.98 a 1.16 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, para los meses de enero a julio del año 2006 y 2007 respectivamente. Ambos ecosistemas presentan evidentes periodos de captura de C (julio a septiembre) siendo más notorio en la selva baja caducifolia debido a la producción de follaje y una mayor densidad de cobertura vegetal en la temporada húmeda, por lo que el uso de indicadores hidro-ambientales constituye una herramienta útil de análisis en la identificación de la activación de los procesos ecosistémicos. La presente investigación cumple con el objetivo general de identificar la interacción del ciclo del C en la relación suelo-vegetación-atmósfera en el ecosistema árido de la Paz BCS, noroeste de México, por lo que los resultados obtenidos podrían ser usados como un referente para generar políticas públicas orientadas al pago por servicios ambientales por captura de C en zonas áridas.

Palabras clave: suelos, carbono, costras biológicas, respiración del suelo, *eddy covariance*



Dra. Yolanda Maya Delgado
Co-Directora
Vo. Bo.

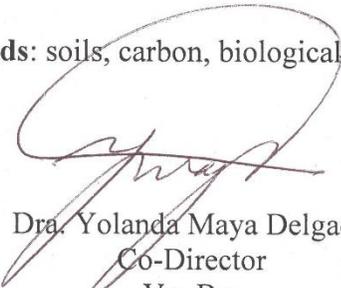


Dr. Enrique Troyo Diéguez
Co-Director
Vo. Bo.

Summary

Carbon dioxide (CO₂) concentrations in the atmosphere have been increased considerably due anthropogenic activities. As a carbon sink (C), terrestrial ecosystems take part in the global flux and balance, so the estimations of fluxes and C storage at different scales is essential to understand the dynamics between soil, vegetation and the atmosphere. In the arid zones of Mexico information available about C cycle and its interactions is still scarce. The aims of the of the present study were: (i) know the content and C storage capacity in an arid region through soil pits, and their relation with geomorphology at the regional scale, (ii) to estimate the influence of biological soil crusts (BSC) and land use changes on soil respiration rates, and (iii) to compare the influence of the North American Monsoon System (NAMS) over the CO₂ fluxes between two ecosystems of northwest Mexico, using eddy covariance and precipitation data analysis. After the creation of a geomorphologic map, selected soil profiles were described and sampled. Eight soil groups were identified with organic carbon content ranging from 0.15 to 45.55 Mg ha⁻¹, and soil inorganic carbon with variations of 0.045 to 32.07 Mg ha⁻¹. To estimate the soil respiration rate, thirty stainless steel soil collars were placed in two land use conditions (desert scrub and erosion), with the presence and absence of BSC. During 24 months Net Carbon Exchange (NCER) was measured obtaining positive values at the beginning of the study period (0.099 to 0.828 μmol s⁻¹ m⁻²) due to the hurricane Odile; after that, only negative values were recorded (0.000 to -0.055 μmol s⁻¹ m⁻²). Scrub areas with presence of BSC acted as C sink and only under specific conditions of humidity and temperature they become a C source; areas with absence of BSC showed to be a C source. To compare the net ecosystem exchange between two ecosystems (desert scrub and tropical dry forest) of northwest Mexico, datasets of C flux of 2006 and 2007 were used. Average values of NEE for January to July of 2006 and 2007 were from -0.01 to 1.66 μmol m⁻² s⁻¹ and -0.98 to 1.16 μmol m⁻² s⁻¹ respectively. Both ecosystems showed evident C capture periods from July to September, but it was higher at tropical dry forest due to a denser canopy cover, a higher foliar leaf area index at wet season, and water availability. To apply several hydric-environmental indexes such as Index of hydric-environmental availability and Index of hydric-environmental drought proved useful to identify ecosystem processes activation. Finally, this research accomplished the general objective: to identify the interaction of C cycle in the relation soil-vegetation-atmosphere in an arid ecosystem of La Paz BCS, northwest Mexico; the obtained results could be used as a referent to generate public policies oriented to the payment of environmental services by C capture in soils of drylands.

Key words: soils, carbon, biological soil crusts, soil respiration, *eddy covariance*.



Dra. Yolanda Maya Delgado
Co-Director
Vo. Bo.



Dr. Enrique Troyo Diéguez
Co-Director
Vo. Bo.

Dedicatoria

Para Miriam y Ángel con todo mi amor y cariño. Sin ustedes a mi lado no lo hubiera logrado.

A mis padres por alentarme siempre a seguir adelante y por todo su apoyo.

A mis hermanos Pablo y Carlos por su apoyo incondicional.

A toda mi familia

A los que ya no están con nosotros

A Josefina, Gloria y Carmen por guiarme desde el cielo †

Agradecimientos

Al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. (CIBNOR) por permitirme ser parte del Posgrado en el Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme una beca para realizar mis estudios de Doctorado (Becario 246829).

A la Dra. Yolanda Lourdes Maya Delgado por su paciencia, apoyo, consejos, enseñanzas e innumerables correcciones que me hicieron ser mejor cada día. Pero principalmente por su amistad. Mil gracias.

Al Dr. Enrique Troyo Diéguez por su apoyo, consejos, enseñanzas y ayuda inmediata cuando más la necesité. Pero principalmente por su amistad. Mil gracias.

A la Dra. Norma Eugenia García Calderón por permitirme realizar una estancia doctoral en el Laboratorio de Conservación y Rehabilitación de los Recursos Edáficos de la Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación, Campus UNAM-Juriquilla, Querétaro. Así como por su apoyo, consejos y atinadas observaciones que enriquecieron mi investigación. Mil gracias.

Al Dr. Salvador Lluch por sus atinadas observaciones que siempre me pusieron a pensar más allá de los resultados presentados, así como de sus comentarios y sugerencias hacia el presente trabajo. Mil Gracias.

Al Dr. Walter C. Oechel por darme la oportunidad de realizar una estancia doctoral con el grupo de Investigación en Cambio Climático de la Universidad Estatal de San Diego (SDSU). Así como por darme el apoyo y la confianza para reconstruir y operar la Torre de Flujos de La Paz.

Al Dr. Pedro Peña Garcillán por su amistad, pláticas y enseñanzas para ser cada vez mejor científico en este oficio de la Ciencia.

A Christian Silva Bejarano, responsable del Laboratorio de Ecología Vegetal por su apoyo incondicional en esas salidas al campo, desveladas realizando mediciones y viajes por equipo al otro lado. Pero principalmente por tu amistad. Mil gracias

A Luis Carlos Moreno Galván del área de Redes, por apoyarme y ayudarme a resolver cada uno de los problemas técnicos y de comunicación de la torre de La Paz. Gracias por tus enseñanzas.

Al Ing. Arturo Flores Escobar, del área de Ingeniería y Mantenimiento Electrónico, por la disposición de revisar y darle mantenimiento mes con mes al equipo de respiración de suelo. Mil gracias por las atenciones y ayuda en los momentos críticos.

A mis amigos y compañeros de generación con los que compartí experiencias durante estos cuatro años.

A la oficina de Posgrado en donde Tania, Leticia y Osvelia siempre me recibieron y ayudaron de la mejor manera en todos los trámites pertinentes.

A Manuel Trasviña y Miriam L. de Haro Hernández, del Laboratorio de Edafología del CIBNOR y a Elizabeth Fuentes de la UNAM-Juriquilla por su ayuda en los análisis de suelo en el Laboratorio.

Quiero agradecer a Adrián Jordán y Raymundo Ceseña del PAZA por su ayuda en campo y a Álvaro González Michel del Laboratorio de Hidrología e Irrigación por el apoyo en la obtención de información meteorológica del área del Comitán.

Finalmente a todas aquellas personas e instituciones que de una u otra forma colaboraron en esta tesis y que me ayudaron en todo este camino a solventar los problemas que se fueran presentando. Mil gracias.

Contenido

Resumen	i
Summary	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	x
Acrónimos y unidades	xi
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
2.1 Las zonas áridas de México	3
2.2 Los suelos áridos de Baja California Sur, México.	3
2.3 Materia orgánica del suelo	4
2.4 Carbono en el suelo	5
2.5 Respiración del suelo	5
2.6 Las costras biológicas del suelo	6
2.6 Eddy Covariance	8
2.7 Cambio de uso de suelo	9
2.8 Servicios ambientales	10
2.9 Enfoque multiescalar	11
3. JUSTIFICACIÓN	13
4. HIPOTESIS	14
5. OBJETIVOS	15
5.1 Objetivo General	15
5.2 Objetivos Específicos.	15
6. MATERIALES Y MÉTODOS	16
6.1 Descripción de la región de estudio para el almacenamiento de carbono	16
6.2 Geología	17
6.3 Suelos	18
6.4 Fisiografía e Hidrología	18
6.5 Vegetación	18
6.5.1 Ecorregión Costa Central del Golfo	19
6.5.2 Matorral Tropical del Cabo	19
6.6 Ubicación del área de estudio para los registros de respiración del suelo y torre de flujos eddy covariance	20
6.6.1 Estación Biológica (CIBNOR).	20
6.7 Ubicación del área de estudio de la torre de flujos eddy covariance en Sonora, México.	21
6.7.1 Rosario de Tesopaco.	21
6.8 Secuestro de carbono en suelos a escala regional (Sección 1)	22
6.8.1 Mapa Geomorfológico	22
6.8.2 Muestreo y Análisis	22
6.8.3 Carbono orgánico, inorgánico y relación C:N	23

6.9 Influencia de las CBS y del cambio de uso de suelo sobre la tasa de respiración edáfica (Sección 2)	24
6.9.1 Muestreo y Análisis	24
6.9.2 Análisis estadísticos	26
6.9.3 Experimento de respiración de las CBS	26
6.10 Comparación de los flujos de C entre 2 localidades del noroeste de México mediante la técnica EC (Sección 3)	27
6.10.1 Muestreo y Análisis	27
6.10.2 Mediciones mediante la técnica de covarianza de flujos (Eddy Covariance)	28
6.10.3 Análisis de la sequía y estimación de la brecha hídrica	29
7. RESULTADOS	31
7.1 Secuestro de C en suelos a escala de cuenca (Sección 1).	31
7.2 Influencia de las CBS sobre la tasa de respiración edáfica y el cambio de uso de suelo (Sección 2).	40
7.2.1 Experimento de respiración de costras del suelo	44
7.3 Comparación de los flujos de C entre 2 ecosistemas del noroeste de México mediante la técnica EC (Sección 3).	46
7.3.1 Condiciones meteorológicas en 2006 y 2007.	46
7.3.3 Análisis de la precipitación y estimación de la brecha hídrica	48
8. DISCUSIÓN	50
8.1 Contenidos de COS y CIS por unidad geomorfológica y uso de suelo (Sección 1).	50
8.2 Tasas de respiración edáfica y la influencia de las CBS bajo diferentes usos de suelo (Sección 2)	55
8.3 Intercambio neto del ecosistema (NEE) en dos ecosistemas del noroeste de México (Sección 3)	60
8.4 Discusión general	64
9 CONCLUSIONES	68
9.1 Almacenamiento de COS y CIS por unidad geomorfológica y uso de suelo (Sección 1)	68
9.2 Tasas de respiración edáfica y la influencia de las CBS (Sección 2).	70
9.3 Intercambio neto del ecosistema (NEE) en dos ecosistemas del noroeste de México (Sección 3).	70
9.4 Conclusiones Generales	70
10. LITERATURA CITADA	72
11. ANEXOS	87
ANEXO A Descripción de los perfiles de suelo	87
	88
ANEXO B Artículo Publicado en Terra Latinoamericana	104
ANEXO C Artículo sometido a Journal of Arid Environments	117

Lista de figuras

Figura 1. Esquema de una costra biológica del suelo (Belnap y Lange, 2001).	7
Figura 2. Enfoque multiescalar del área de estudio	16
Figura 3. Ubicación del área de trabajo a escala regional.	17
Figura 4. Área de estudio del experimento de respiración edáfica y ubicación de la torre de flujos eddy covariance (La Paz, BCS, México).	20
Figura 5. Área de trabajo y distribución de los cuadrantes de muestreo.	25
Figura 6. Ejemplos de puntos de muestreo: (A) collar sin CBS, (B) collar con CBS.	26
Figura 7. Muestras de CBS del experimento de producción de CO ₂ (respiración R _s).	27
Figura 8. Mapa del noroeste de México mostrando la localización de los sitios de medición eddy covariance usando como referencia la clasificación de ecorregiones de Norteamérica (Omernik, 1987).	28
Figura 9. Mapa geomorfológico del área de estudio y puntos de muestreo de perfiles de suelo.	31
Figura 10. Contenido relativo de C orgánico por uso de suelo y unidad geomorfológica. Lla: llanura aluvial; Lo: lomerío; Si: sierra; Ba: barra arenosa; Uso de suelo: (A): agrícola; (F): forestal; (U): urbano.	34
Figura 11. Contenido de carbono orgánico (COS) y carbono inorgánico (CIS) por unidad de área, uso de suelo y unidad geomorfológica. Lla: llanura aluvial; Lo: lomerío; Si: sierra; Ba: barra arenosa. Uso de suelo: (A): agrícola; (F): forestal; (U): urbano.	35
Figura 12. Distribución del carbono orgánico en los perfiles de suelo agrupados por unidad geomorfológica: (a) llanuras aluviales; (b) lomeríos; (c) sierras y barra arenosa. Lla: llanura aluvial; Lo: lomerío; Ba: barra arenosa; Si: sierra; (A): agrícola; (F): forestal; (U): urbano. Las descripciones de los perfiles A a la O se presentan en el ANEXO A.	36
Figura 13. Técnica de escalamiento multidimensional (MDS) y correlación de factores medioambientales relacionados con el contenido COS almacenado en los perfiles de suelo. Unidad geomorfológica: Lla: llanura aluvial; Lo: lomerío; Ba: barra arenosa; Si: sierra; Uso de suelo: (A): agrícola; (F): forestal; (U): urbano.	37
Figura 14. Relaciones entre pendiente y espesor como factores independientes con el carbono orgánico del suelo (COS) como variable de respuesta ambiental.	38
Figura 15. Precipitación mensual y respiración del suelo. NCER=tasa de intercambio neto de CO ₂ ; Mx= medición extra en marzo; MCC: suelo de matorral con costra; MSC: suelo de matorral sin costra; ECC: suelo erosionado con costra; ESC: suelo erosionado sin costra.	40
Figura 16. Fragmento de la variación temporal de la precipitación y respiración del suelo. NCER=tasa de intercambio neto de CO ₂ ; Mx= medición extra en marzo; MCC= suelo de matorral con costra; MSC= suelo de matorral sin costra; ECC= suelo erosionado con costra; ESC= suelo erosionado sin costra.	40
Figura 17. Tasa de intercambio neto y temperatura del suelo para sitios con CBS durante todo el periodo de estudio (valores relacionados con las lluvias extremas causadas por el	

huracán Odile fueron descartados). NCER: tasa de intercambio neto de CO ₂ ; MCC _{neto} : costras del suelo de matorral; ECC _{neto} : costras del suelo erosionado.	42
Figura 18. Resultados del análisis de componentes principales presentados como biplots. Wflux= tasa de intercambio neto de H ₂ O; T _{soil} = temperatura del suelo; PAR= radiación fotosintéticamente activa; MCC= suelo de matorral con costras; MSC= suelo de matorral sin costras; ECC= suelo erosionado con costras; ESC= suelo erosionado sin costras.	43
Figura 19. Resultados del experimento de respiración usando la mismas CBS que las medidas en campo después de 5 días de mediciones. NCER (tasa de intercambio neto de CO ₂). MCC _{neto} = costras de suelo de matorral; ECC _{neto} = costras de suelo erosionado.	45
Figura 20. Precipitación mensual y temperaturas promedio de las zonas de estudio. TS= Rosario de Tesopaco, Sonora; LP= La Paz, BCS.	46
Figura 21. Evolución temporal del intercambio neto del ecosistema (NEE) para el año 2006. TS= Rosario de Tesopaco, Sonora; LP= La Paz, BCS.	47
Figura 22. Evolución temporal del intercambio neto del ecosistema (NEE) para el año 2007. TS= Rosario de Tesopaco, Sonora; LP= La Paz, BCS.	48
Figura 23. Fluctuación de los indicadores IDHA (Índice de Disponibilidad Hidro-ambiental e ISHA (Índice de Sequía Hidro-ambiental) en 2 sitios del noroeste de México. a) La Paz, BCS; b) Rosario de Tesopaco, Sonora.	48
Figura 24. Perfil EBLAC-Torre SDSU.	87
Figura 25. Perfil Rancho El Bajío	88
Figura 26. Perfil Plaza Central CIBNOR.	89
Figura 27. Perfil Agrícola Los Planes.	90
Figura 28. Perfil Carretera a Los Planes.	91
Figura 29. Perfil Sierra La Ventana.	92
Figura 30. Perfil Rancho San Patricio.	93
Figura 31. Perfil Rancho San Lorenzo	94
Figura 32. Perfil Agrícola CEPROVEG.	95
Figura 33. Perfil Lomerío San Pedro.	95
Figura 34. Perfil Lomerío El Novillo-San Pedro.	95
Figura 35. Perfil Sierra Las Cruces.	95
Figura 36. Perfil Sierra Balandra.	95
Figura 37. Perfil Presa Buena Mujer.	95
Figura 38. Perfil Agrícola Aeropuerto.	95
Figura 39. Perfil Forestal Aeropuerto.	95

Lista de tablas

Tabla I. Grupos de suelo, unidad geomorfológica y usos de suelo encontrados en el área de estudio.	32
Tabla II. Promedios de C en el suelo y contenidos de nitrógeno (\pm desviación estándar) identificados por unidad geomorfológica y uso de suelo.	33
Tabla III. Principales propiedades físicas del suelo por unidad geomorfológica y uso de suelo.	33
Tabla IV. Textura y espesor por perfil de suelo.	36
Tabla V. Resultados de la prueba de ANOVA entre el contenido de COS, CIS y espesor del perfil de suelo	36
Tabla VI. Almacenamiento de carbono orgánico del suelo (COS) reportado para diversas regiones áridas y semiáridas.	38
Tabla VII. Resultados de las principales variables físicas para cada condición.	41
Tabla VIII. Correlaciones entre la tasa de intercambio neto de CO ₂ y variables físicas para las cuatro condiciones.	42
Tabla IX. Varianza total explicada por condición a través del ACP.	43
Tabla X. Resultados de las pruebas de ANOVA entre todas las condiciones (MCC, MSC, ECC and ESC) para el mes de octubre de 2014 y octubre 2015.	44

Acrónimos y unidades

C: Carbono.

CBS: Costras Biológicas del Suelo.

CONAZA: Comisión Nacional de Zonas Áridas.

CIS: Carbono Inorgánico del Suelo.

COS: Carbono Orgánico del Suelo.

CO₂: Dióxido de carbono.

CH₄: Metano.

EEA: European Environment Agency (Agencia Europea de Medio Ambiente).

EC: Eddy Covariance

FAO: Food and Agriculture Organization (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación).

GEI: Gases de efecto Invernadero.

INECC: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático).

MEA: Millennium Ecosystem Assessment (Evaluación de los ecosistemas del Milenio).

Mg: Megagramos.

MOS: Materia Orgánica del Suelo.

N₂O: Óxido Nitroso.

Pg: Petagramos.

PSA: Pago por Servicios Ambientales.

SA: Servicios Ambientales.

WRB: World Reference Base for Soil Resources (Base Referencial Mundial del Recurso Suelo).

1. INTRODUCCIÓN

Las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) han aumentado a niveles sin precedentes en los últimos 800,000 años (IPCC, 2013). El CO₂ es el GEI antropogénico más importante (atribuible a las actividades humanas como la quema de combustibles fósiles y procesos de cambio de uso de suelo) más importante, con un aumento de su concentración en alrededor del 40% desde la época preindustrial (1790) al año 2011, excediendo el intervalo natural de la tendencia estimada hasta el siglo XIX (Conde, 2010; IPCC, 2013). De proseguir las emisiones de GEI a una tasa igual o superior a la actual, el calentamiento aumentaría y el sistema climático mundial experimentaría durante el siglo XXI numerosos cambios, muy posiblemente superiores a los observados durante el siglo XX con impactos severos sobre los biomas y servicios ecosistémicos (IPCC, 2007).

La disminución a largo plazo de los GEI a la atmósfera (principalmente CO₂) establecidas en el Protocolo de Kyoto (FAO, 2007; Houghton *et al.*, 1997; IPCC 2007), han impulsado ampliamente el interés en el manejo adecuado de los suelos para incrementar su contenido de carbono (C) buscando alternativas para su captura (FAO, 2007; Segura-Castruita *et al.*, 2005). Dado que es posible retirar CO₂ de la atmósfera mediante acciones adecuadas, el efecto benéfico incrementaría el contenido de materia orgánica (MO) en los suelos hasta por miles de años (Schlesinger, 1990), lo cual tendría un impacto sobre el ambiente, la biodiversidad de los ecosistemas y la prevención de su degradación (FAO, 2007).

El suelo es un elemento importante y a menudo descuidado del sistema climático (EEA, 2015). Constituye la interfase entre la superficie terrestre y la atmósfera, siendo el medio donde se desarrolla una parte importante de la vida en nuestro planeta, además de proporcionar valiosos servicios ambientales (MEA, 2005; Palm *et al.*, 2007), entre los que destacan el soporte y suministro de nutrientes para la producción de alimentos, captura y filtrado de agua para la recarga de acuíferos y ser el medio en el que se desarrollan importantes ciclos biogeoquímicos necesarios para la vida en el planeta Tierra. Sin embargo, los servicios ambientales que el suelo provee son poco valorados al grado de que

frecuentemente se concibe al suelo sólo como soporte de construcciones o infraestructura, lo que favorece su aislamiento o sellamiento (Cram *et al.*, 2008). Por esta razón, el suelo no tiene del mismo reconocimiento ni aprecio como el que se les brinda a los bosques y a las selvas (Zinck, 2005), toda vez que son dichos ecosistemas en los que se han concentrado los esfuerzos sobre el conocimiento y la dinámica del C (Batjes, 1996; Lal, 2002; Maya y Arriaga, 1996), dejando de lado y subestimando el potencial que presentan los suelos como sumideros de C.

Aunque el suelo representa sólo una porción dentro del flujo global del C, el interés sobre el almacenamiento global y el conocimiento sobre el ciclo del C del suelo ha aumentado considerablemente (Amundson, 2001). Por lo anterior, en esta investigación se buscó identificar la relación que presentan los suelos de una región árida del noroeste de México con el flujo, captura y almacenamiento de C con un enfoque multiescalar.

2. ANTECEDENTES

2.1 Las zonas áridas de México

La aridez es una condición física dependiente de la interacción de variables mensurables, incluyendo la radiación solar, la temperatura, la precipitación, la dirección y fuerza del viento y la evapotranspiración, por lo que su interpretación resulta sumamente compleja (Mosiño, 1983). En este sentido, las zonas áridas, semiáridas o subhúmedas secas son consideradas como aquellas áreas en las que el promedio de lluvias es menor que las pérdidas por humedad a través de la evaporación y la evapotranspiración (FAO, 2007; UNEP, 2002; White y Nackoney, 2003). En México, la Comisión Nacional de Zonas Áridas (CONAZA, 2016) define como zonas áridas a aquellas superficies del territorio nacional en donde las precipitaciones son menores de 250 mm anuales, y como semiáridas a aquellas en donde la precipitación oscila entre 250 y 500 mm. Tales zonas con climas secos y muy secos o que presentan condiciones de aridez se localizan en el norte y algunas partes del centro de México, las cuales representan más de la mitad del territorio nacional (Mosiño, 1983; Rzedowsky, 1978; SIAP, 2015; Wurl, 2011). Sin embargo, bajo el criterio del balance de humedad en el suelo y su disponibilidad para las plantas, México cuenta con un déficit de humedad que va de moderado a severo o muy severo, y representa cerca del 61.2% del territorio Nacional (Dunne y Leopold, 1978; Monterroso y Gómez, 2003).

Para el caso específico del estado de Baja California Sur, situado en el noroeste de México, la influencia del centro semipermanente de alta presión del Pacífico norte (CSAP), y de la corriente oceánica fría de California mantienen sobre el estado condiciones de aridez, ocasionando bajos niveles de precipitación. Sin embargo, durante la época de verano-otoño, la región se encuentra sometida a la influencia de la actividad ciclónica del Pacífico Tropical, la cual proporciona masas de aire húmedo que originan lluvias de regular intensidad (García y Mosiño, 1968).

2.2 Los suelos áridos de Baja California Sur, México.

La distribución de los suelos está directamente vinculada con los factores formadores de suelo dentro de cada región y su ecosistema correspondiente (García-Calderón, 2011;

Hudson, 1992). Para el caso específico de Baja California Sur, cerca del 72% de los suelos de la entidad presentan limitantes físicas en profundidad o en superficie, un 8% tiene restricciones químicas por altos contenidos en sales solubles y sólo un 20% no tiene ninguna limitante. Además, dominan los suelos de baja fertilidad, poca capacidad de intercambio catiónico y muy baja capacidad de retención de agua. Como resultado de los bajos índices de precipitación y la excesiva evapotranspiración los suelos se encuentran secos durante la mayor parte del año, por lo que la disponibilidad de agua en el suelo es escasa (INEGI, 1995).

Por lo anterior, los suelos de las regiones áridas y semiáridas se caracterizan principalmente por tener baja fertilidad para la producción agrícola, escaso desarrollo, textura arenosa y pedregosidad, además de ubicarse en regiones con una escasa precipitación que limita el desarrollo y crecimiento de las especies vegetales (Camargo y Esperón, 2005; García-Calderón, 2011).

De acuerdo con la World Reference Base for Soil Resources (WRB; IUSS, 2007), los Arenosoles, Calcisoles, Durisoles, Gypsisoles, Leptosoles y Solonchaks, son los grupos de referencia de los ecosistemas áridos y semiáridos. Sin embargo, en la península de Baja California se presenta un notorio contraste entre los procesos formadores de suelo, material parental, clima, vegetación y relieve a nivel regional con cambios muy variados en el paisaje, propiciando la existencia de otros grupos de suelo como Planosoles, Phaeozems, Cambisoles, Regosoles, Fluvisoles, Vertisoles y Gleysoles (Maya *et al.*, 2011).

2.3 Materia orgánica del suelo

La materia orgánica del suelo (MOS) es uno de los recursos naturales más importantes y es la base de la fertilidad del suelo. Se refiere generalmente a la cantidad de carbono orgánico total, contenido en su mayoría en las sustancias húmicas. El contenido de MOS varía de menos de 1% en suelos arenosos y desérticos a 2.5% en los primeros 15 cm de suelos agrícolas minerales y hasta más de 50% en suelos orgánicos.

El funcionamiento de los suelos está influenciado de manera significativa por su contenido de materia orgánica. La capacidad del suelo para almacenar nutrientes, retener humedad,

liberar gases de efecto invernadero, resistir la degradación física, química y biológica y para su productividad dependen en una porción importante de la calidad y cantidad de materia orgánica que contiene.

2.4 Carbono en el suelo

El carbono en el suelo tiene dos componentes fundamentales: el carbono orgánico (COS) y el carbono inorgánico (CIS). El primero se encuentra en forma de residuos orgánicos de microorganismos, animales y vegetales en diversos estados de descomposición, compuestos orgánicos particulados y disueltos, así como en forma de humus, el cual está conformado por un conjunto heterogéneo de sustancias muy complejas y poco conocidas, de peso molecular relativamente alto, de color oscuro, con propiedades coloidales e hidrofílicas marcadas y un alta capacidad de intercambio catiónico que se encuentran unidas a la fracción mineral del suelo (Almendros, 2004; Stockmann *et al.*, 2013).

El CIS, por su parte, comprende diferentes minerales predominantes estables como calcita (CaCO_3), magnesita (MgCO_3), aragonita (CaCO_3) y dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] y siderita (FeCO_3), provenientes del intemperismo de la roca madre o por procesos pedogenéticos de formación de carbonatos secundarios (Lal, 2009). En este sentido, estimaciones globales de CIS varían en los primeros 100 cm de profundidad en el rango de los 695-748 (Batjes, 1996), 930 (Schlesinger, 1997) e incluso 1738 Pg de C inorgánico (Eswaran *et al.*, 1995), los cuales finalmente, conducen a la retención del CO_2 atmosférico.

2.5 Respiración del suelo

El flujo de CO_2 del suelo a la atmósfera, también conocido como respiración del suelo (Raich y Schlesinger, 1992), es el resultado del metabolismo de la microflora, raíces y micorrizas asociadas (respiración autótrofa), mientras que la descomposición de componentes orgánicos por microorganismos es conocida como respiración heterótrofa (Guerrero-Ortíz *et al.*, 2012; Hanson *et al.*, 2000; Hörberg *et al.*, 2001).

La respiración del suelo es reconocida como el flujo más importante del ciclo global del C, representa alrededor de tres cuartas partes de la respiración total del ecosistema (Law *et al.*,

2001) y desempeña un papel fundamental en la regulación de las concentraciones de CO₂ atmosférico y dinámicas climáticas a escala global (Schimel, 1995). Además, representa alrededor del 25% de las emisiones globales y es uno de los principales procesos de pérdida de C, con estimados globales de 80.4 Pg de CO₂ anualmente (1 Pg = 10¹⁵ g), lo cual es aproximadamente 10 veces más que la emisión de CO₂ por combustibles fósiles y la deforestación combinadas (Raich y Schlesinger, 1992; Schimel, 1995; Conant *et al.*, 2000; Raich *et al.*, 2002).

Después de la producción primaria bruta (cantidad de C total que entra al ecosistema vía fotosíntesis), la respiración del suelo es el segundo flujo más grande de C en los ecosistemas terrestres (Yuste *et al.*, 2005). Sin embargo, a pesar de su importancia global, sólo se cuenta con un limitado entendimiento de la magnitud de la respiración de suelos y sus respuestas sobre los controles bióticos y abióticos.

La respiración del suelo es una de las mediciones más importantes para determinar la salud del ecosistema y está directamente relacionada con el soporte de raíces, macro y micro organismos, descomposición de la materia orgánica, mineralización e inmovilización de nutrientes y actividad microbiana en general. Tasas rápidas de respiración de suelo indican una intensa actividad biológica. Por el contrario, tasas lentas pueden indicar una actividad biológica reducida, causada por estrés inducido por mal manejo, perturbaciones climáticas o limitación de recursos (substrato, agua, nutrientes) requeridos por la actividad biológica (Singh *et al.*, 2011).

2.6 Las costras biológicas del suelo

Las costras biológicas de suelo (CBS) se encuentran en la superficie del suelo de la mayoría de los ecosistemas áridos y semiáridos alrededor del mundo y son uno de los componentes bióticos más importantes de estas áreas. Son comunidades que se desarrollan dentro y sobre escasos milímetros de la superficie y están formadas por diversos organismos, incluyendo cianobacterias, hongos, líquenes, musgos y briofitas, que están íntimamente asociados con las partículas del suelo (Belnap *et al.*, 2001; Belnap y Lange, 2003; Fig. 1).

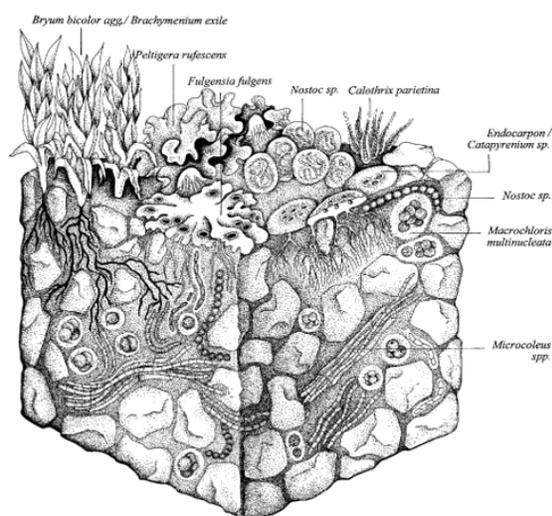


Figura 1. Esquema de una costra biológica del suelo (Belnap y Lange, 2001).

Las CBS están ampliamente distribuidas en diversos tipos de suelo y donde la luz pueda alcanzar la superficie del suelo (Belnap, 2006), aunque son particularmente dominantes en ambientes de baja productividad como las zonas áridas y semiáridas, logrando alcanzar hasta 70% de la cobertura total del suelo (Belnap y Lange, 2003). Participan considerablemente en procesos clave para el funcionamiento del ecosistema entre los que destaca el ciclo del C y nutrientes (Bowker *et al.*, 2011; Castillo-Monroy *et al.*, 2011; Delgado-Baquerizo *et al.*, 2010). Además, la presencia de las CBS tiene un notable impacto en la modificación física del sustrato, incremento del contenido de nutrientes, retención de agua y mantenimiento de la humedad del suelo, así como la secreción de metabolitos secundarios y formación de complejos órgano-minerales (Bowker *et al.*, 2006; Rivera-Aguilar *et al.*, 2006) por lo que son consideradas como elementos clave en ambientes áridos y semiáridos (Eldridge *et al.*, 2010; Miller *et al.*, 2011).

A pesar de que existen diferencias en la composición de especies en las CBS de una región a otra, incluyendo especies endémicas y de distribución local o regional, numerosas especies son comunes a todas las zonas con CBS. Entre las especies de algas y cianobacterias se encuentran *Microcoleus* sp., *Scytonema* sp., *Nostoc* sp., *Calothrix* sp., *Hantzschia* sp., *Pinnularia* sp., *Schizothrix* sp., y *Tolypothrix* sp. Líquenes *Catapyrenium* sp., *Collema* sp.,

Heppia sp., *Psora* sp. y *Toninia* sp. y musgos cosmopolitas como *Bryum* sp. y *Pterygoneurum* sp. (Rosentreter y Belnap, 2001).

Durante las últimas dos décadas ha aumentado el interés por las CBS, lo que ha promovido importantes avances en el conocimiento de la estructura, composición y biogeografía de dichas comunidades. Sin embargo, la mayor parte de la investigación se ha realizado en los ecosistemas áridos y semiáridos de los Estados Unidos, Australia, Israel, China y en años recientes en España (Maestre *et al.*, 2011).

En Baja California Sur, el primer trabajo de descripción fue el realizado por Maya *et al.* (2002), en la sierra La Laguna. Las especies de cianobacterias que se encontraron fueron: *Scytonema ocellatum*, *Scytonema* sp. *Microcoleus paludosus*, *Microcoleus sociatus*, *Phormidium* sp., *Nostoc microscopicum* y *Calothrix marchica*, *Calothrix elenkinii*.

En el área del presente estudio también se registraron otras especies de cianobacterias: *Microcoleus paludosus* (Küts) Gomont., *Microcoleus chthonoplastes* (Thur.) Gomont., *Microcoleus vaginatus* Gomont., *Microcoleus sociatus* West & West., *Microcoleus steenstrupii* Boye-Petersen., *Microcoleus* spp., *Phormidium inundatum* (Kuetz) Gomont., *Nostoc microscopicum* Carmich. Ex Harv., *Nostoc* sp., *Scytonema* sp., *Scytonema stuposum* (Kuetz) Born., *Scytonema ocellatum* Kützing (Gómez-Sánchez, 2010).

2.6 Eddy Covariance

La metodología de *Eddy Covariance* (EC), también conocida como covarianza de flujos turbulentos o covarianza de vórtices, permite la cuantificación del intercambio de masa y energía entre la superficie terrestre y la atmósfera. Lo anterior se logra por mediciones de velocidad del viento, temperatura del aire y concentraciones de trazadores pasivos a escalas temporales que permiten capturar una amplia gama de movimientos turbulentos, así como para estimar tasas de consumo, flujos de calor sensible, calor latente, agua, CO₂ y CH₄ (Aubinet *et al.*, 2000; Baldocchi *et al.*, 2003; Bell, 2012; Valentini *et al.*, 2000).

La técnica de *Eddy Covariance* es una herramienta precisa, directa y confiable para la medición de flujos de gases y seguimiento de emisiones provenientes de áreas con dimensiones que van desde algunos cientos a millones de metros cuadrados (Burba y Anderson, 2010). En combinación con las técnicas micro-meteorológicas, proveen un medio alternativo para medir los intercambios químicos entre la biósfera y la atmósfera con múltiples ventajas, entre las que destacan: su ubicación *in situ*, mediciones continuas y mediciones promediadas en conjunto con las tasas de intercambio y que pueden proporcionar medidas precisas de los flujos del ecosistema sobre un espectro de escalas de tiempo en un intervalo desde horas hasta años (Aubinet *et al.*, 2000; Baldocchi *et al.*, 1988; Baldocchi *et al.*, 2001).

La red Ameriflux de sitios de medición EC ha estimulado globalmente registros en una amplia gama de ecosistemas donde los flujos de carbono, energía y de *momentum* se miden durante todo el año. Los datos obtenidos a partir de este esfuerzo se utilizan para mejorar nuestra comprensión de la eco-fisiología del ecosistema y para la predicción de respuestas a futuros entornos, así como para el monitoreo de ecosistemas importantes y el suministro de datos meteorológicos para modelos de ecosistemas y climas (Wever *et al.*, 2002).

Actualmente existen más de 650 sitios de EC que estudian los flujos de CO₂ en cerca de 30 redes regionales a largo plazo ubicadas en los cinco continentes (Baldocchi *et al.*, 2001; FLUXNET, 2016). La información obtenida por estas técnicas puede ser utilizada para estimar ciclos confiables de C y agua a escalas regionales y globales (Dolman *et al.*, 2006; Houghton, 2002; Mahadevan *et al.*, 2008).

Sin embargo, sólo nueve de estos sitios están ubicados en ambientes áridos y desiertos cálidos; uno de ellos se encuentra en la estación Biológica del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR), siendo una de las primeras torres de medición de flujos instalada en un ecosistema árido en el noroeste de México.

2.7 Cambio de uso de suelo

Los estudios sobre los procesos de cambio en la cobertura y uso de suelo se encuentran en el centro de la atención de la investigación ambiental (Bocco *et al.*, 2001). El cambio en la

cobertura y uso del suelo proporcionan la base para conocer las tendencias de los procesos de deforestación, degradación, desertificación y pérdida de la biodiversidad de una región determinada (Lambin *et al.*, 2001).

Los estudios de caso sobre el cambio de uso de suelo en las diferentes regiones de México se han concentrado en el trópico húmedo o en bosques templados. Sin embargo, las zonas áridas año con año se ven afectadas por dicho fenómeno que es el resultado de actividades humanas, que incluyen el desarrollo de vías de comunicación, la expansión urbana, agrícola, ganadera, minera y turística. Tales cambios afectan el ambiente físico y biológico, erosionando el suelo, modificando el hábitat, las interacciones biológicas y los procesos ecosistémicos (Arriaga *et al.*, 2004; Nellemann, 2001; Trombulack y Frissell, 2000).

En la región de estudio, la tendencia de los últimos años ha sido el establecimiento de asentamientos humanos en los alrededores de la ciudad de La Paz, en donde se observan desmontes sin uso de suelo definido o para el establecimiento de cultivos y pastizales inducidos. Todos los tipos de cambio de uso de suelo registrados están generando el desmonte acelerado del matorral sarcocaulé, que es el principal tipo de vegetación que cubre planicies y lomeríos bajos de la región de la Paz.

2.8 Servicios ambientales

Los servicios ambientales (SA) o servicios ecosistémicos, son los beneficios directos que los seres humanos obtienen de los ecosistemas. Éstos incluyen servicios de provisión como comida, agua, madera y fibras; servicios de regulación que afectan el clima, inundaciones, enfermedades y calidad del agua; servicios culturales que proveen beneficios recreativos, estéticos y espirituales; así como servicios de soporte, que incluyen la formación de suelos, producción primaria y ciclo de nutrientes (MEA, 2005).

La preocupación mundial por mitigar el efecto de los GEI ha dado lugar a una política internacional dirigida a entender los procesos de generación y absorción de los mismos. Ello ha permitido reconocer la importancia que tiene la vegetación al capturar el CO₂ atmosférico por medio de la fotosíntesis para incorporarlo a las estructuras vegetales y, de esta forma,

reducir la concentración de CO₂ en la atmósfera, mitigando el efecto del cambio climático (Ordóñez-Díaz, 2008).

Bajo este contexto, la captura de carbono está ligada al potencial de formación de biomasa, por lo que las regiones localizadas a lo largo de las llanuras costeras, sur y sureste del país (principalmente forestales), se consideran importantes por su capacidad de equilibrar las concentraciones de CO₂ producto de la actividad humana, dejando de lado a las zonas áridas y semiáridas que dominan las áreas del norte y centro del país (CONABIO, 1998; INECC, 2016).

Por otro lado, el suelo ha sido denominado como un capital natural que produce un flujo de bienes y servicios que provee una variedad de funciones y procesos (almacenamiento de C en el suelo, ciclo de nutrientes en el suelo, retención de humedad, soporte y provisión de nutrientes, entre otros), los cuales son considerados componentes clave del ecosistema terrestre ya que respaldan la prestación de los SA de los ecosistemas (Dominati *et al.*, 2010).

En este sentido, el recurso suelo es uno de los reservorios terrestres de C más grandes y puede almacenar más de tres veces el equivalente de C contenido en la vegetación y dos veces más que el que se encuentra en la atmósfera, por lo que el SA de regulación por captura de C ha generado un punto focal de interés científico y un campo de investigación en rápida expansión a causa de la enorme cantidad de C orgánico almacenado (Amundson, 2001).

En las regiones áridas y semiáridas, el secuestro de C en el suelo puede oscilar de 0 a 200 kg C ha⁻¹ año⁻¹, sin embargo, el incremento de la cantidad y cantidad de C en el suelo depende de las características del ecosistema (clima, textura del suelo, vegetación), así como de las actividades antrópicas y estrategias de manejo (Lal, 2009; Adhikari y Hartemink, 2016).

2.9 Enfoque multiescalar

El análisis de la interacción entre la variabilidad climática, la dinámica de la vegetación, el cambio de uso de suelo y los ciclos biogeoquímicos a diferentes escalas, puede proveer información valiosa para el desarrollo de políticas públicas y acciones de manejo, así como

el desarrollo de modelos de predicción necesarios para la gestión de los recursos naturales dentro del contexto del cambio climático (Chapin *et al.*, 2002; Parry *et al.*, 2007).

Abordar el tema del ciclo del carbono a diferentes escalas es de suma relevancia ya que el ciclo del carbono es altamente variable entre las mismas (Falkowski *et al.*, 2000); es por ello que los almacenes y flujos de C aún presentan diferencias reflejadas por los modelos predictivos y esfuerzos de síntesis numérica (Huntzinger *et al.*, 2012; Le Quéré *et al.*, 2009).

A pesar de la importancia de las estimaciones del intercambio de C entre la superficie terrestre y la atmósfera, el detalle del análisis rara vez se toma en cuenta de manera explícita en el diseño de las investigaciones (Zhao *et al.*, 2010). Las estimaciones de las fuentes y sumideros de C son dependientes de la escala y varían con la extensión y con la resolución espacial (Chave, 2013; Levin, 1992). Por tal motivo, debe conocerse cómo se traslada la información entre un estudio a detalle a otro a mayor escala y viceversa, con el fin de desarrollar estrategias adecuadas para mejorar la captura de C en los ecosistemas terrestres (Anderson y Bows, 2008).

Las metodologías utilizadas para el análisis del ciclo del carbono en los diferentes ecosistemas están basadas en la combinación de diversas técnicas orientadas de diferente manera: a mayor escala como percepción remota y modelos globales de circulación (Gurney *et al.*, 2002); otras a escala de ecosistema como la utilización de técnicas micro-meteorológicas, tales como la covarianza de flujos o Eddy Covariance (Baldocchi, 2003), así como técnicas enfocadas a escala puntual, como los perfiles de suelo y el uso de cámaras dinámicas para la estimación de la respiración del suelo (FAO, 2001; Knoepp y Vose, 2002; Sakin *et al.*, 2010; Sánchez *et al.*, 2004; Shi *et al.*, 2012; Stevenson, 1986).

3. JUSTIFICACIÓN

Si bien los estudios de captura de carbono en ecosistemas tropicales y boscosos han sido bien documentados a nivel mundial, los realizados en suelos de las regiones áridas y semiáridas, particularmente de México, son escasos. En este sentido, estudios sobre los contenidos de C orgánico e inorgánico, respiración edáfica y flujos de C a nivel ecosistémico en regiones áridas representan oportunidades para la identificación de las variables y procesos que influyen directamente sobre la dinámica del carbono a diferentes escalas.

Por lo anterior, la presente investigación establece la dinámica del flujo del C en la interacción suelo-vegetación-atmósfera de un ecosistema árido ubicado en el noroeste de México, logrando vincular esta investigación dentro de los objetivos y temas prioritarios del Programa Mexicano de Carbono con respecto al estudio de la dinámica del C y sus interacciones en los principales ecosistemas de México.

4. HIPOTESIS

H1= Las características geomorfológicas y la condición del uso del suelo determinan en una proporción relevante la cantidad de C almacenada en los suelos a escala regional.

H2= Las costras biológicas del suelo intervienen de manera significativa en la tasa de respiración edáfica y, en consecuencia, en el secuestro de carbono de los suelos de zonas áridas.

H3= Dada la influencia del sistema de monzón de Norteamérica (NAMS) sobre el noroeste de México, la tasa de intercambio neto de C en el ecosistema, estará asociada a la ocurrencia de las primeras lluvias de verano ocasionadas por el NAMS.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo General

Analizar el almacén de carbono del suelo, así como los flujos del C en la interacción suelo-vegetación-atmósfera de un ecosistema árido de la región de la Paz, B.C.S. a diferentes escalas de aproximación.

5.2 Objetivos Específicos.

-Conocer el contenido y capacidad de almacenamiento de C en los suelos de una región árida con matorral sarcocaulé de la ecorregión Costa Central del Golfo, en perfiles edáficos representativos y su relación con la geomorfología a escala regional.

-Identificar las características físicas, químicas y biológicas del suelo que puedan influir en el almacenamiento de C bajo diferentes condiciones de uso de suelo (natural, agrícola y urbano).

-Estimar la influencia de las costras biológicas del suelo y del cambio de uso de suelo bajo diferentes condiciones (suelo de matorral y suelo con erosión) sobre la tasa de respiración edáfica.

-Comparar mediante el análisis de datos (Eddy Covariance y análisis de precipitación), la influencia del monzón de Norteamérica sobre los flujos de CO₂ entre dos ecosistemas (selva baja caducifolia en Sonora y matorral sarcocaulé en La Paz).

6. MATERIALES Y MÉTODOS

En este apartado se describen las metodologías empleadas en 3 secciones: (1) secuestro de C en los suelos a escala regional; (2) tasas de respiración edáfica e influencia de las CBS y el cambio de uso de suelo; y (3) comparación de los flujos de C entre 2 ecosistemas (matorral sarcocaula y selva baja caducifolia) mediante la técnica EC (Fig. 2).

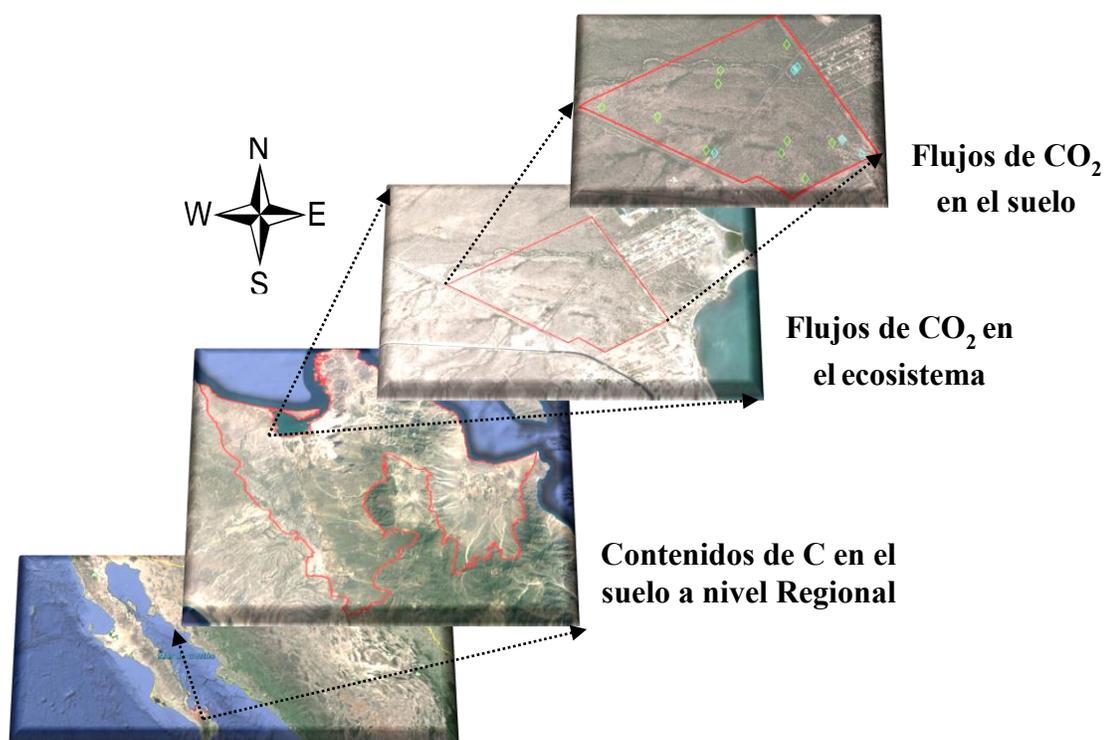


Figura 2. Enfoque multiescalar del área de estudio

6.1 Descripción de la región de estudio para el almacenamiento de carbono

El estudio a escala regional comprende la cuenca de La Paz y parte de la cuenca de los Planes, cerca del extremo sur de la península de Baja California. La región está ubicada entre las coordenadas $24^{\circ} 23' 12''$ N, $110^{\circ} 35' 35''$ O y $23^{\circ} 37' 33''$ N, $109^{\circ} 53' 41''$ O (Fig. 3).

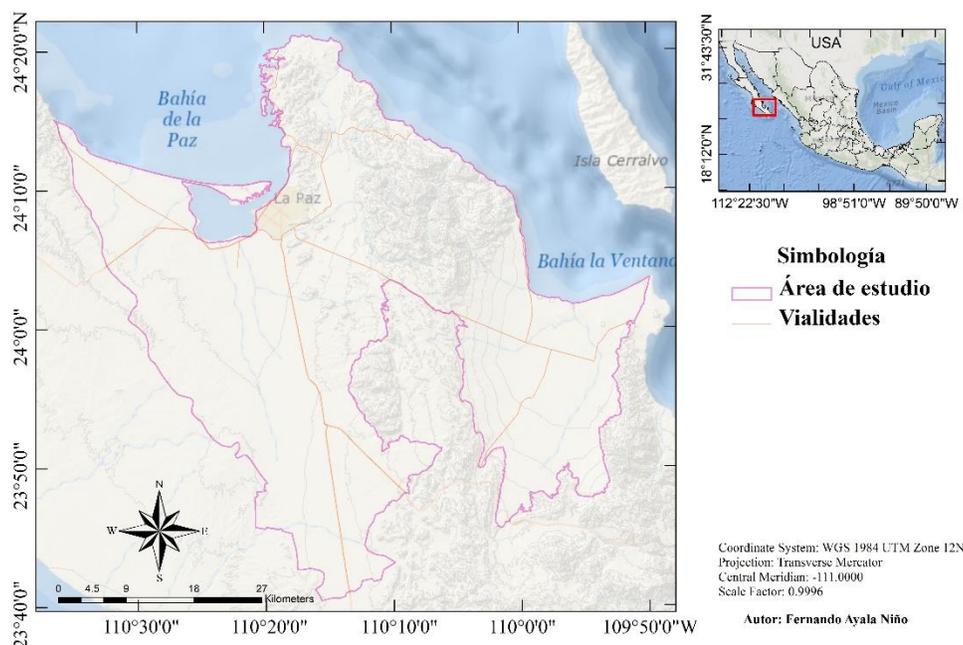


Figura 3. Ubicación del área de trabajo a escala regional.

El clima en la región de estudio es seco, cálido y extremadamente árido durante el año. La temperatura media anual es de 23 °C, alcanzando temperaturas máximas en los meses de julio, agosto y septiembre de hasta 45 °C. El periodo de radiación más elevado es de abril a agosto (Troyo-Diéguez *et al.*, 1990, 2014). El valor promedio de retención de humedad es alrededor de $0.1135 \text{ cm}^{-3} \text{ H}_2\text{O cm}^{-3}$ de suelo, el cual indica un marcado estrés hídrico. La precipitación anual promedio es de 156.6 mm (CONAGUA, 2011), con los valores más altos en agosto y septiembre, asociados principalmente a la ocurrencia de huracanes. Lluvias ligeras ocasionales pueden ocurrir durante el invierno.

6.2 Geología

La geología superficial del macizo montañoso y sus estribaciones está constituida por rocas ígneas intrusivas de grano grueso y fuertemente consolidadas, esencialmente granitos y sienitas que formaban parte de un batolito del Jurásico Superior o del Cretácico Inferior (Hamond, 1954). Los llanos están formados por aluviones de arenas estratificadas y gravas del Cuaternario (Guertin *et al.*, 1988).

6.3 Suelos

Los suelos son predominantemente arenosos, de colores claros, con bajos contenidos de materia orgánica, pH de neutros a ligeramente alcalinos y en las llanuras pueden alcanzar más de 100 cm de profundidad. La península de Baja California presenta un notorio contraste entre los procesos formadores de suelo, material parental, clima, vegetación y relieve con cambios muy variados en el paisaje. Basados en la World Reference Base for Soil Resources (WRB) (IUSS, 2014), los grupos de suelo dominantes en el área de estudio son Leptosoles, Regosoles, Cambisoles y Calcisoles. Otros como los Planosoles, Phaeozems, Cambisoles, Regosoles, Fluvisoles, Vertisoles y Gleysoles, también están representados, aunque en menor medida (Maya *et al.*, 2011).

6.4 Fisiografía e Hidrología

De acuerdo con el INEGI (1995), el área de estudio se ubica dentro de la provincia fisiográfica Península de Baja California y dentro de la discontinuidad Llanos de Magdalena, limitando al norte y al oriente con la subprovincia Sierra La Giganta; al poniente y al sur con el Océano Pacífico y al sureste con la Discontinuidad del Cabo. Perteneció a la región hidrológica No. 6 “Baja California Sureste” (La Paz), que abarca la cuenca 6A “La Paz-Cabo San Lucas” y la subcuenca “La Paz” con una superficie de 660.91 km².

6.5 Vegetación

De acuerdo con Garcillán *et al.* (2010) existen numerosas regionalizaciones biológicas de la península de Baja California, basadas principalmente en los distintos niveles de organización ecológica, biogeográfica y de filogeografía. Con base en lo anterior, González-Abraham *et al.* (2010) definen un total de 14 ecorregiones dominantes basadas en la información proporcionada por expertos, así como del análisis de diversos atributos geográfico, sin embargo, nuestra región de estudio se localiza dentro de dos de estas ecorregiones las cuales se detallan a continuación.

6.5.1 Ecorregión Costa Central del Golfo

Esta ecorregión es una estrecha banda de desierto que se extiende a lo largo de 800 km de la costa del Golfo de California, desde bahía de Los Ángeles, siguiendo por el piedemonte oriental de la sierra de San Borja hasta la bahía de La Paz. Incluye las islas de mayor tamaño del Golfo de California y 400 km de llanura costera en Sonora. Su paisaje se caracteriza por colinas desnudas y arroyos secos bordeados por cantos rodados y depósitos de arena. Su elevación máxima oscila entre los 200 y 300 m de altitud. Es una zona con altas temperaturas y aridez, con precipitación procedente principalmente de tormentas y huracanes del sur hacia finales del verano. La vegetación es dominada por plantas con troncos grandes y carnosos, incluyendo al copalquín (*Pachycormus discolor*) con su corteza anaranjada, torote (*Bursera microphylla*), copal (*B. hindsiana*), lomboy (*Jatropha cinerea*), matacora (*J. cuneata*), palo blanco (*Lysiloma candidum*), cardón (*Pachycereus pringlei*), palo Adán (*Fouquieria diguetii*), junto con numerosas especies de cactáceas (*Opuntia bigelovii*, *O. cholla*, *O. ramosissima* y *O. tesajo*) (González-Abraham *et al.*, 2010).

6.5.2 Matorral Tropical del Cabo

Esta ecorregión comprende las tierras bajas situadas al este y sur de la falla de La Paz; dicha línea geológica divide las formaciones graníticas de la Región del Cabo de los basaltos volcánicos de la Giganta, y marca la frontera entre los ecosistemas tropicales secos y los estrictamente desérticos en la península. Exhibe un paisaje característico como las llanuras aluviales costeras, que van desde el nivel del mar hasta aproximadamente 500 m de altitud. Con una precipitación anual menor a 200 mm de origen monzónico o de esporádicas tormentas tropicales, están cubiertas por un matorral bajo de troncos carnosos (sarcocaula), con mayor riqueza de especies y endemismo que otros matorrales desérticos. La vegetación de esta ecorregión se compone principalmente de plantas semi-suculentas como el torote (*Bursera microphylla*), lomboy (*Jatropha cinerea*), matacora (*J. cuneata*), ciruelo (*Cyrtocarpa edulis*); especies arborescentes como paloverde (*Parkinsonia florida* subsp. *peninsulare*), cacachila (*Karwinskia humboldtiana*), Colubrina triflora, higuera (*Ficus brandegeei*), palo chino (*Havardia mexicana*), palo Adán (*Fouquieria diguetii*), palo amarillo (*Esenbeckia flava*), mesquite (*Prosopis articulata*); y elementos suculentos como el

cardón barbón (*Pachycereus pecten-aboriginum*), cardón (*P. pringlei*) y cholla pelona (*Opuntia cholla*) (González-Abraham *et al.*, 2010).

6.6 Ubicación del área de estudio para los registros de respiración del suelo y torre de flujos eddy covariance

A escala de ecosistema, el estudio se desarrolló en la Estación Biológica “Dra. Laura Arriaga Cabrera” del CIBNOR, la cual se ubica entre las coordenadas 24° 7' 36" N, 110° 26' 51" O y 24° 7' 22" N, 110° 25' 34" O, a 12 km al oeste de la Ciudad de La Paz BCS. (Fig. 4).

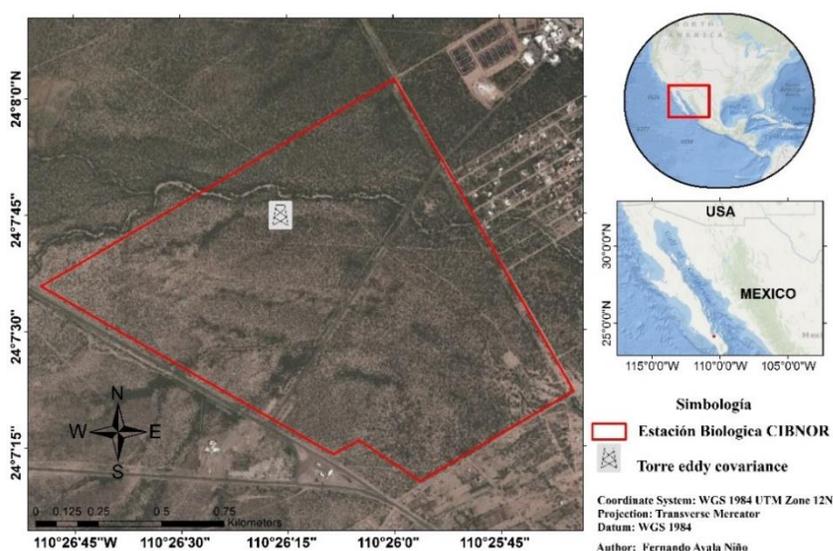


Figura 4. Área de estudio del experimento de respiración edáfica y ubicación de la torre de flujos eddy covariance (La Paz, BCS, México).

6.6.1 Estación Biológica (CIBNOR).

El área de estudio se localiza sobre una planicie aluvial donde los suelos dominantes son Cambisoles y Calcisoles (IUSS Working Group WRB 2014), los cuales son predominantemente arenosos, profundos y bien drenados, con horizontes débilmente diferenciados y una fase química ligeramente salina en algunos sitios. La vegetación es de tipo matorral sarcocaulé; fisonómicamente es una vegetación transicional entre el Desierto Sonorense y la selva baja caducifolia de la Región del Cabo (Shreve y Wiggins, 1964; Rzedowsky, 1978; Wiggins, 1980), en donde dominan plantas con troncos grandes y

carnosos como *Cyrtocarpa edulis* (Brandege) Standl (ciruelo), *Jatropha cinerea* (Ortega) Muell. Arg. (lomboy), *J. cuneata* Wiggins & Rollins (matacora), *Bursera microphylla* A. Gray (torote), *Prosopis articulata* S. Watson (mezquite), *Fouquieria diguetii* (Tiegh.) (palo adán) y numerosas especies de cactáceas como *Pachycereus pringlei* (S. Watson) Britton & Rose (cardón), *Stenocereus gummosus* (Engelm.) A. Gibson & K.E. Horak (pitaya agria), *Stenocereus thurberi* (Engelm.) Buxb (pitaya dulce) y *Opuntia* spp. (Maya y Arriaga, 1996).

6.7 Ubicación del área de estudio de la torre de flujos eddy covariance en Sonora, México.

6.7.1 Rosario de Tesopaco.

El sitio de observación se localiza sobre un lomerío en las faldas de la Sierra Madre Occidental, ~86 km al noreste de Ciudad Obregón, Sonora, México, donde el clima es seco, semiárido con una temperatura media anual de 24.3 °C (CONAGUA, 2011). El promedio de precipitación media anual es de 647 mm año⁻¹, con las mayores aportaciones durante la temporada del monzón de Norteamérica (julio a septiembre). La geología está dominada por rocas ígneas intrusivas y sedimentarias. Los grupos de suelos dominantes son Leptosoles, Cambisoles, Regosoles y Vertisoles. La vegetación corresponde a una selva baja caducifolia dominada por especies de leguminosas incluyendo *Lysiloma divaricatum* (Jacq.) J.F. Macbr, *Ipomoea arborescens* (Humb. & Bonpl. Ex Willd.) G. Don, *Acacia cochliacantha* (Willd.), *Haematoxylum brasiletto* H. Karst, *Celtis reticulata* Torr. (Verduzco *et al.*, 2015).

6.8 Secuestro de carbono en suelos a escala regional (Sección 1)

6.8.1 Mapa Geomorfológico

Se elaboró un mapa geomorfológico de la región de estudio para la determinación de los sitios de muestreo a partir de cartas topográficas escala 1:250,000 (INEGI, 1980,1997) y la interpretación de fotografías aéreas (INEGI, 1993) con base en el manual de Geopedología de Zinck (2012). Se identificaron los diferentes usos de suelo, agrupándolos en tres categorías (forestales, agrícolas y urbanas). Las unidades diferenciadas se digitalizaron con el Sistema de Información Geográfica ESRI® ArcMap 10.0.

6.8.2 Muestreo y Análisis

Se seleccionaron dieciséis puntos sobre las unidades geomorfológicas más representativas, incluyendo los diferentes usos de suelo, los cuales solamente se pudieron identificar sobre llanuras aluviales. En cada punto se abrió un pozo a cielo abierto a 1 metro de profundidad o hasta donde se ubicara una fase física limitante y se realizó la descripción morfológica y muestreo del perfil del suelo. La clasificación del suelo en cada perfil se basó en la World Reference Base 2014 (IUSS Working Group, 2014).

Se colectó una muestra de cada uno de los horizontes y fue llevada al laboratorio para determinar sus principales características físicas y químicas: textura, pH, conductividad eléctrica, carbono orgánico (COS), densidad aparente, carbonatos (CO_3^{2-}) y bicarbonatos (HCO_3^-), con base en la Norma Oficial Mexicana (NOM-021-SEMARNAT-2000, 2002). La textura fue determinada usando un analizador de distribución de tamaño de partícula (Horiba Ltd. Japón); el nitrógeno total fue analizado mediante el método micro-Kjeldahl (Speed Digester K-425 y Scrubber B-414 BÜCHI), en donde la muestra es digerida en ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno con selenio como catalizador. El nitrógeno orgánico obtenido es convertido en sulfato de amonio. Posteriormente la solución se torna alcalina y el nitrógeno se destila como amoniaco. El amoniaco es atrapado en ácido bórico y se titula con ácido clorhídrico 0.1M (ISRIC, 2002).

6.8.3 Carbono orgánico, inorgánico y relación C:N

La determinación del COS se efectuó por el método de oxidación de Walkley y Black (Nelson y Sommers, 1982). El carbono inorgánico del suelo (CIS) se estimó sumando el C en forma de bicarbonatos (HCO_3^-), obtenidos por titulación con ácido sulfúrico y anaranjado de metilo como indicador (Reitemeier, 1943), y carbonatos (CO_3^{2-}), obtenidos por titulación con hidróxido de sodio y azul de bromotimol como indicador, debido a los valores de pH de las muestras, que van de neutrales a ligeramente alcalinas (Jolly, 2010). La relación C:N se estimó por la división entre los valores de C y N en porcentaje, obtenidos de la capa superior de cada uno de los perfiles de suelo.

Para determinar la cantidad y distribución del contenido de COS y CIS en perfiles individuales de suelo con n capas, se utilizaron las siguientes ecuaciones de acuerdo con Batjes (1996).

$$SOC_d = \sum_{i=1}^n SOC_i = \sum_{i=1}^n \rho_i \times P_i \times D_i \times (1 - S_i) \quad (1)$$

$$SIC_d = \sum_{i=1}^n SIC_i = \sum_{i=1}^n \rho_i \times P_i \times D_i \times (1 - S_i) \quad (2)$$

Donde n es el número de horizontes o capas, SOC_d y SIC_d son la cantidad total de C orgánico e inorgánico almacenados en el suelo; SOC_i y SIC_i es el contenido de C orgánico e inorgánico del suelo por unidad de superficie (Mg m^{-2}) en la capa i ; ρ_i es la densidad aparente (Mg m^{-3}); P_i es la proporción estimada de C orgánico e inorgánico ($\text{g SOC-C g suelo}^{-1}$ y $\text{g SIC-C g suelo}^{-1}$, respectivamente) en la capa i ; D_i es el espesor de la capa (en m); y S_i es el volumen de la fracción o fragmentos de roca mayores a 2mm.

Tres pruebas de ANOVA con un valor de significación de $P < 0.05$ fueron aplicadas para estimar las diferencias en el contenido de C y en la relación C:N: (1) entre las llanuras aluviales, ya que ésta fue la única forma de relieve con diferentes usos de suelo; (2) entre todas las formas del relieve con uso de suelo forestal; y (3) para probar la relación entre el espesor de los perfiles de suelo y los contenidos de COS y CIS; para este propósito, los

perfiles de suelo se dividieron en tres clases: hasta 10 cm, de 11 a 75 cm y > 100 cm de espesor. De manera adicional, se aplicaron una prueba de escalamiento multidimensional (MDS) (Kruskal, 1964) para representar las similitudes entre un conjunto de datos, así como un análisis de regresión simple para identificar los factores con una posible relación con el almacenamiento de C en el área de estudio. Los datos fueron procesados con el software PAST (Hammer *et al.*, 2001).

6.9 Influencia de las CBS y del cambio de uso de suelo sobre la tasa de respiración edáfica (Sección 2)

6.9.1 Muestreo y Análisis

Se estableció una malla con cuadrantes de 100 m × 100 m (1 ha) sobre el área de estudio donde se eligieron aleatoriamente quince cuadrantes en dos condiciones, diez en suelo de matorral y cinco en suelos erosionados; los primeros se eligieron mediante números aleatorios y los segundos a partir de su historial de manejo (Fig. 5). Cada cuadrante seleccionado incluyó dos puntos de muestreo, uno con CBS y otro sin CBS; cada punto de muestreo fue identificado como una de cuatro condiciones: suelo de matorral con costras (MCC), suelo de matorral sin costras (MSC), suelo erosionado con costras (ECC) y suelo erosionado sin costras (ESC), estableciendo un total de 30 puntos de muestreo.

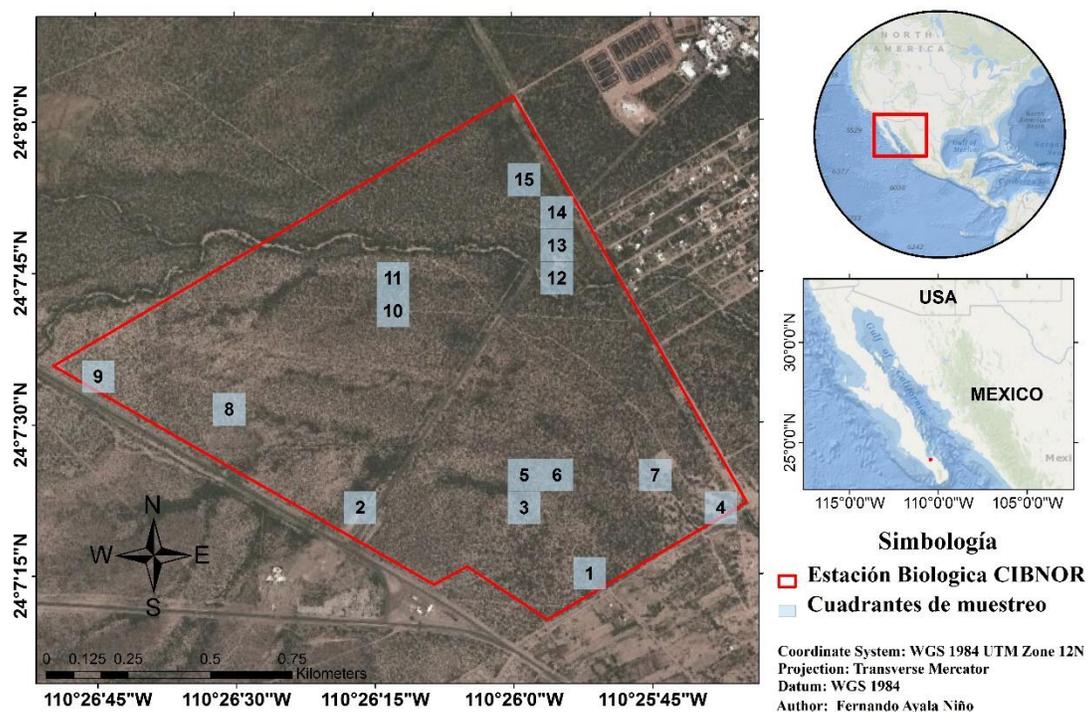


Figura 5. Área de trabajo y distribución de los cuadrantes de muestreo.

Se registraron variables ambientales incluyendo, temperatura del suelo (T_{soil}), radiación fotosintéticamente activa (PAR), tasa de intercambio neto de agua (W_{flux}) y tasa de intercambio neto de CO_2 (NCER), las cuales se midieron *in situ* mensualmente (de octubre de 2014 a octubre de 2016) en los 30 puntos de muestreo usando un equipo medidor de intercambio de gases LCpro+ (ADC Bioscientific Ltd., UK). Dicho instrumento contaba con una campana para mediciones de flujo de CO_2 en el suelo que se acoplaba a collares de acero inoxidable (97.5 cm^2 , insertados a 7 cm dentro del suelo), los cuales fueron colocados en cada punto de muestreo un mes antes del inicio del registro de datos, tiempo suficiente para estabilizar la atmósfera y estructura del suelo (Fig. 6). Todos los registros se realizaron de 06:00 a 11:00 h (hora local, GM-7) para evitar altas temperaturas del suelo, que en verano alcanzaron hasta $50 \text{ }^\circ\text{C}$ antes del mediodía, causando un mal funcionamiento del equipo.

Los puntos registrados siempre se midieron en el mismo orden, la mitad el primer día, la otra mitad al día siguiente. Además, las mediciones comenzaron a la misma hora durante todo el

año. En noviembre de 2014, julio y noviembre de 2015 y julio de 2016, no se registraron datos debido al mantenimiento preventivo del equipo.



Figura 6. Ejemplos de puntos de muestreo: (A) collar sin CBS, (B) collar con CBS.

6.9.2 Análisis estadísticos

Para identificar las posibles relaciones entre las variables registradas en campo (T_{soil} , PAR, NCER y W_{flux}) se utilizaron diferentes pruebas estadísticas: (1) correlación de Pearson y el uso de valores críticos de r para identificar su significación; (2) pruebas de ANOVA de una sola vía con un nivel de significación preestablecido de $p < 0.05$ para estimar las diferencias entre los conjuntos de datos de un mismo mes (octubre) para dos diferentes años (2014 y 2015) entre variables y condiciones; y (3) se aplicó un análisis de componentes principales (ACP) para analizar las variables con una posible correlación con la tasa de intercambio neto de C (NCER) en el área de estudio. Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software PAST (Hammer *et al.*, 2001).

6.9.3 Experimento de respiración de las CBS

Para cuantificar la influencia de las CBS sobre las tasas de respiración, al terminar el monitoreo en campo se estableció un experimento usando la misma biomasa de las CBS contenida en los collares probados en campo. Quince muestras de CBS fueron colectadas de ambas condiciones (diez en suelo de matorral y cinco en suelo erosionado). Cada muestra fue colectada cuidadosamente, removiendo en lo posible suelo, raíces y fauna edáfica que pudieran contribuir al flujo de CO_2 , e identificada con el número de punto de muestreo correspondiente y transportada en cajas Petri.

Se colocaron quince collares de acero sobre una losa de concreto y se llenaron con suelo, el cual fue colectado en campo y esterilizado (30 minutos, 120 °C, a 15 lb de presión). Las muestras de CBS fueron colocadas sobre el suelo esterilizado y humedecido a punto de saturación por 24 horas (Fig. 7). Después de dicho periodo, en cada muestra se midieron los mismos parámetros (T_{soil} , PAR, $NCER$ y W_{flux}) a lo largo de cinco días, de la misma manera y a la misma hora que fueron registrados en campo, para lo cual se utilizó el mismo equipo (LCpro+, ADC Bioscientific Ltd., UK).



Figura 7. Muestras de CBS del experimento de producción de CO₂ (respiración Rs).

6.10 Comparación de los flujos de C entre 2 localidades del noroeste de México mediante la técnica EC (Sección 3)

6.10.1 Muestreo y Análisis

Para estimar el flujo de C entre 2 ecosistemas localizados en el noroeste de México (matorral sarcocaulé y selva baja caducifolia), durante 2006 y 2007, dos áreas que contaban con equipo de medición Eddy Covariance fueron seleccionadas; una de ellas ubicada en el Ejido La Estrella, ~7.5 km al este del poblado de Rosario de Tesopaco Sonora (27° 50' N, 109° 17' O)

con una elevación 460 msnm, y la otra en la estación biológica del CIBNOR, donde la torre se ubica en las coordenadas $24^{\circ} 07' 45.23''$ N, $110^{\circ} 23' 16.75''$ O con una elevación de 21 msnm (Fig. 8).

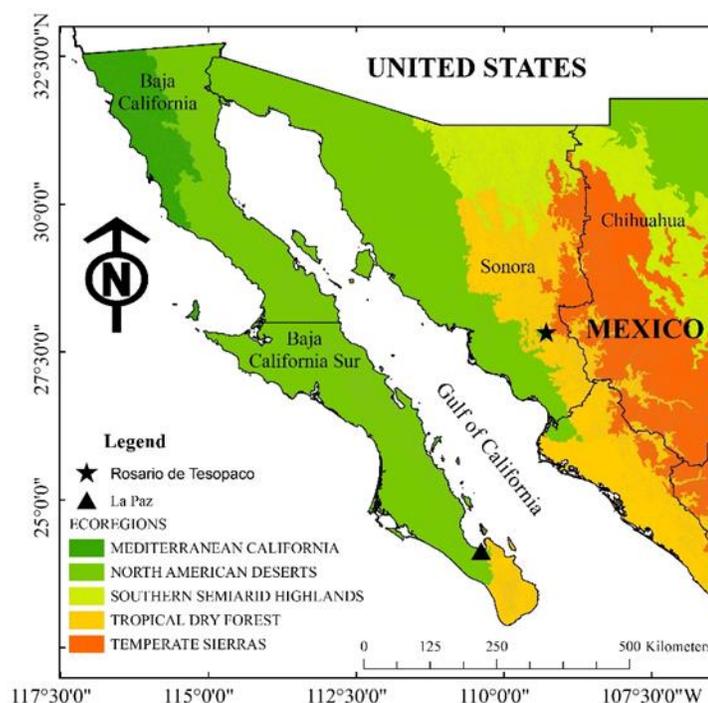


Figura 8. Mapa del noroeste de México mostrando la localización de los sitios de medición eddy covariance usando como referencia la clasificación de ecorregiones de Norteamérica (Omernik, 1987).

6.10.2 Mediciones mediante la técnica de covarianza de flujos (Eddy Covariance)

El intercambio neto de CO_2 y vapor de agua fue registrado en dos ecosistemas diferentes del noroeste de México: La Paz (LP) y Rosario de Tesopaco (TS), utilizando el método de covarianza de vórtices o *Eddy Covariance*. Para estimar los valores medios y fluctuantes de la velocidad y la temperatura del viento vertical y lateral, en el sitio LP se utilizó un anemómetro sónico tridimensional de respuesta rápida (10 Hz, Wind Master Pro, Gill Instruments, Lymington, UK), en tanto que en el sitio RT se utilizó un anemómetro sónico tridimensional (CSAT-3, Campbell Scientific Inc, Logan, UT). En ambos sitios se utilizó un analizador de gases infrarrojo de trayectoria abierta (LI-7500, LI-COR Inc.) de respuesta rápida (10Hz) instalado en torres meteorológicas de 13 m de altura. Durante el periodo de

estudio de enero de 2006 a diciembre de 2007, las mediciones de los flujos atmosféricos de CO₂/H₂O se calcularon a lo largo de un intervalo de 30 minutos, incluyendo la covarianza entre la velocidad del viento vertical y la relación de mezcla CO₂/H₂O. Los datos de vapor de H₂O y CO₂ registrados de cada media hora fueron convertidas de voltajes a densidades al multiplicarse por las constantes de calibración requeridas (Moncrief *et al.*, 1996); en este contexto, las fluctuaciones de la densidad del aire fueron corregidas de acuerdo con Webb *et al.* (1980), usando el software de post procesamiento EddyPro (LI-COR, Lincoln, NE, USA).

6.10.3 Análisis de la sequía y estimación de la brecha hídrica

Se seleccionaron seis estaciones meteorológicas para obtener series de datos de precipitación y temperatura, las cuales se obtuvieron de la Base de Datos Climatológica Nacional (CLICOM, <http://clicom-mex.cicese.mx/>), administrada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Se desarrolló un análisis comparativo de precipitación y temperatura a través de la determinación del Índice de Martonne (Wang y Takahashi, 1999), modificado por Troyo-Diéguez *et al.* (2014), quienes para determinar los indicadores de aridez entre sitios alcanzando una sensibilidad alta en ecosistemas áridos aplicaron las siguientes ecuaciones.

$$IDHA = Ke (12 * PP) / (t + 10) \quad (3)$$

Donde *IDHA* es el Índice de Disponibilidad Hidroambiental, *PP* es la precipitación mensual en mm, *t* es la temperatura media mensual en grados centígrados y *Ke* es un coeficiente adimensional de ajuste de escala, con valor de 0.193. A su vez, para complementar la condición hídrica a partir del índice *IDHA* (ecuación 3), se definió la siguiente relación:

$$ISHA = 10 - IDHA \quad (4)$$

Donde *ISHA* es el Índice de Sequía Hidroambiental. El valor de ajuste *Ke* en la ecuación 3, propuesto para modificar el Índice de Martonne (IM), fue establecido con valor de 0.193, en virtud de que en las condiciones de aridez de la zona de estudio resuelve con mayor sensibilidad numérica a la variación de las sequías. Dichos cálculos se realizaron de manera individual para cada sitio.

Para calcular la brecha hídrica estandarizada (BHE) se restó el valor del índice ISHA al valor de IDHA registrado para el mismo mes o periodo en los sitios; en consecuencia, BHE se determina mediante las siguientes ecuaciones, en valores adimensionales:

$$BHE = ISHA - IDHA \quad (5)$$

$$BHE = 10 - (2 \times IDHA) \quad (6)$$

Finalmente, en términos de las variables consideradas en el IM, la BHE se expresa de acuerdo a la ecuación (7) para construir las gráficas de los sitios:

$$BHE = 10 - [4.632 \times PP / (t + 10)] \quad (7)$$

El valor 4.632 corresponde a la simplificación de los valores de IDHA en la ecuación 6.

7. RESULTADOS

7.1 Secuestro de C en suelos a escala de cuenca (Sección 1).

Un total de dieciséis perfiles de suelo fueron descritos dentro del área de estudio que cubre alrededor de 250×10^3 ha (Fig. 9). De acuerdo con las pruebas de campo y resultados de laboratorio, se identificaron un total de 8 grupos de suelo, 4 unidades geomorfológicas representativas y 3 clases de uso de suelo (Tabla I). A partir de dichos resultados se creó un formato de identificación usando las abreviaturas de las unidades geomorfológicas y uso de suelo, por ejemplo: Lla (A) (Llanura aluvial con uso de suelo agrícola). Sólo en las llanuras aluviales se identificaron los 3 usos de suelo (forestal, agrícola y urbano).

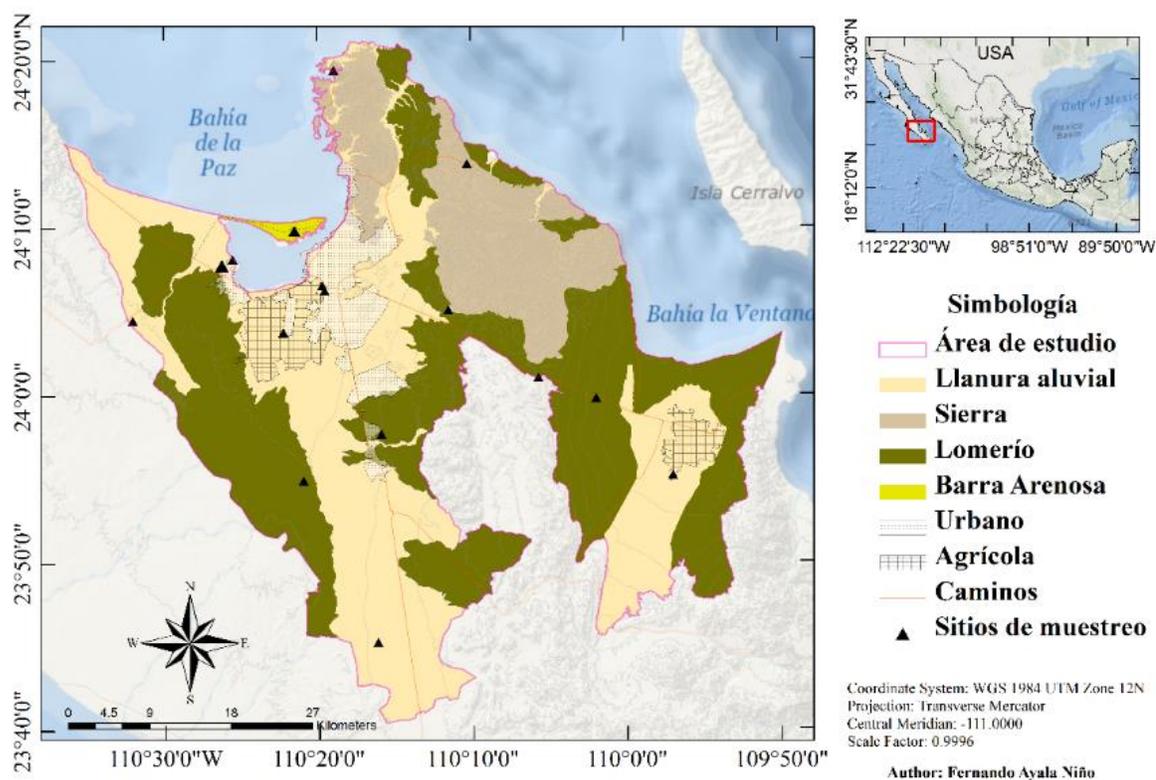


Figura 9. Mapa geomorfológico del área de estudio y puntos de muestreo de perfiles de suelo.

Tabla I. Grupos de suelo, unidad geomorfológica y usos de suelo encontrados en el área de estudio.

Unidad Geomorfológica Representativa	Uso de Suelo	Clave de Unidad	WRB 2014
Barra Arenosa	Forestal	Ba (F)	Eutric Fluvisol (Arenic)
	Agrícola	Lla (A)	Hortic Anthrosol Eutric Cambisol
Llanura Aluvial	Forestal	Lla (F)	Eutric Cambisol Eutric Skeletic Cambisol Haplic Calcisol
	Urbano	Lla (U)	Ekranic Technosol Spolic Technosol
Lomerío	Forestal	Lo (F)	Skeletic Leptic Regosol Cambic Skeletic Leptic Calcisol Vertic Endocalcic Phaeozem
Sierra	Forestal	Si (F)	Eutric Hyperskeletic Nudilithic Leptosol

Lla: llanura aluvial; Lo: lomerío; Ba: barra arenosa; Si: sierra; A: agrícola; F: forestal; U: urbano

La tabla II muestra para cada unidad geomorfológica y uso de suelo los resultados de las muestras de laboratorio para COS (g kg^{-1}), HCO_3^- , CO_3^{2-} y N, en tanto que COS y CIS en Mg ha^{-1} se obtuvieron usando las ecuaciones (1) y (2) propuestas por Batjes (1996). La amplia variación en el contenido de C en los suelos se puede apreciar en las desviaciones estándar. La llanura aluvial forestal Lla (F) mostró el valor más alto de contenido de COS y la sierra forestal Si (F) el más bajo. El contenido de CIS (carbonatos + bicarbonatos) fue muy variable en todas las condiciones. La relación C:N, osciló entre 7.9 y 13.9.

Tabla II. Promedios de C en el suelo y contenidos de nitrógeno (\pm desviación estándar) identificados por unidad geomorfológica y uso de suelo.

Unidad	SOC (g kg ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ (g kg ⁻¹)	CO ₃ ²⁻ (g kg ⁻¹)	N (g kg ⁻¹)	C:N	SOC (Mg ha ⁻¹)	SIC (Mg ha ⁻¹)
Lla (A)	12.49 \pm 6.98	1.02 \pm 0.31	6.30 \pm 0.82	1.07 \pm 0.51	13.68 \pm 4.37	45.40 \pm 19.31	32.07 \pm 3.59
Lla (F)	10.44 \pm 5.54	1.09 \pm 0.67	6.23 \pm 2.58	0.65 \pm 0.19	10.26 \pm 3.66	45.55 \pm 53.33	22.55 \pm 3.21
Lla (U)	11.04 \pm 4.93	0.74 \pm 0.06	5.92 \pm 1.13	1.08 \pm 0.23	7.90 \pm 1.70	39.98 \pm 3.67	28.89 \pm 1.70
Lo (F)	9.73 \pm 7.77	0.82 \pm 0.74	4.29 \pm 3.35	0.92 \pm 0.57	11.48 \pm 2.07	23.30 \pm 20.57	13.53 \pm 8.44
Si (F)	6.10 \pm 1.23	0.10 \pm 0.05	1.68 \pm 0.008	0.43 \pm 0.12	13.88 \pm 0.80	0.15 \pm 0.06	0.045 \pm 0.007
Ba (F)	2.12 \pm 0.61	0.017 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00	0.01 \pm 0.004	11.58 \pm 0.007	13.39 \pm 8.52	0.123 \pm 0.10

Unidad geomorfológica: Lla: llanura aluvial; Lo: lomerío; Si: sierra; Ba: barra arenosa. Uso de suelo: (A): agrícola; (F): forestal; (U): urbano; COS: carbono orgánico del suelo; CIS: carbono inorgánico del suelo.

La tabla III muestra los valores promedio de las principales características físicas y químicas de los perfiles de suelo. Los intervalos de pH sugieren valores neutrales a ligeramente alcalinos en las sierras con uso de suelo forestal Si (F), donde se encontraron algunos valores ligeramente ácidos. Aunque la densidad aparente fue muy similar entre las unidades geomorfológicas y usos de suelo, el lomerío forestal Lo (F) y Si (F) mostraron los valores más bajos.

Tabla III. Principales propiedades físicas del suelo por unidad geomorfológica y uso de suelo.

Unidad	Densidad aparente (g cm ⁻³)	Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	pH
Lla (A)	1.49 \pm 0.17	0.62 \pm 0.79	7.57 \pm 0.26
Lla (F)	1.50 \pm 0.18	0.15 \pm 0.05	7.45 \pm 0.17
Lla (U)	1.44 \pm 0.10	3.55 \pm 3.06	7.29 \pm 0.30
Lo (F)	1.32 \pm 0.09	0.92 \pm 0.80	7.46 \pm 0.22
Si (F)	1.38 \pm 0.09	0.30 \pm 0.15	5.98 \pm 0.12
Ba (F)	1.44 \pm 0.00	0.0009 \pm 0.00003	6.98 \pm 0.28

Unidad geomorfológica: Lla: llanura aluvial; Lo: lomerío; Si: sierra; Ba: barra arenosa. Uso de suelo: (A): agrícola; (F): forestal; (U): urbano.

La figura 10 muestra el promedio del contenido del COS y CIS en porcentaje con relación a las unidades geomorfológicas y usos de suelo, indicando distintas variaciones entre las unidades geomorfológicas. La figura 11 muestra la distribución del COS y CIS por unidad de área. Las llanuras aluviales agrícolas y forestales Lla (A) y Lla (F) tienen los mayores contenidos de COS y las sierras los menores Si (F).

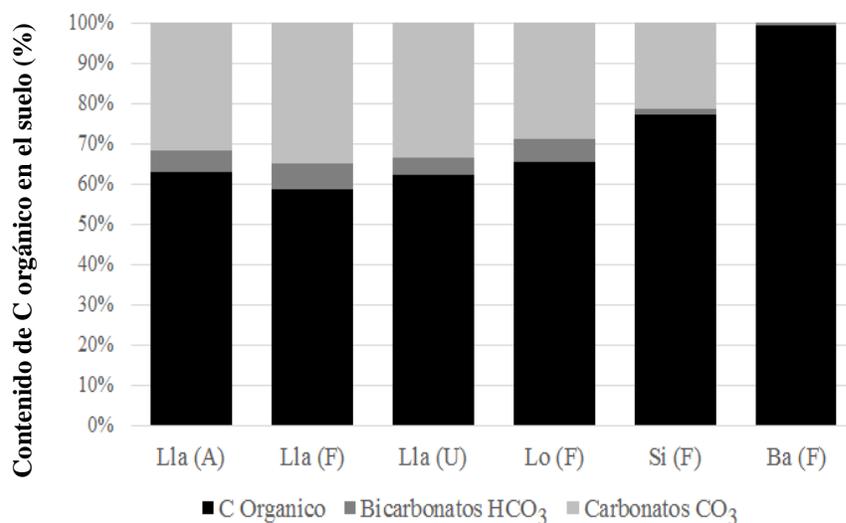


Figura 10. Contenido relativo de C orgánico por uso de suelo y unidad geomorfológica. Lla: llanura aluvial; Lo: lomerío; Si: sierra; Ba: barra arenosa; Uso de suelo: (A): agrícola; (F): forestal; (U): urbano.

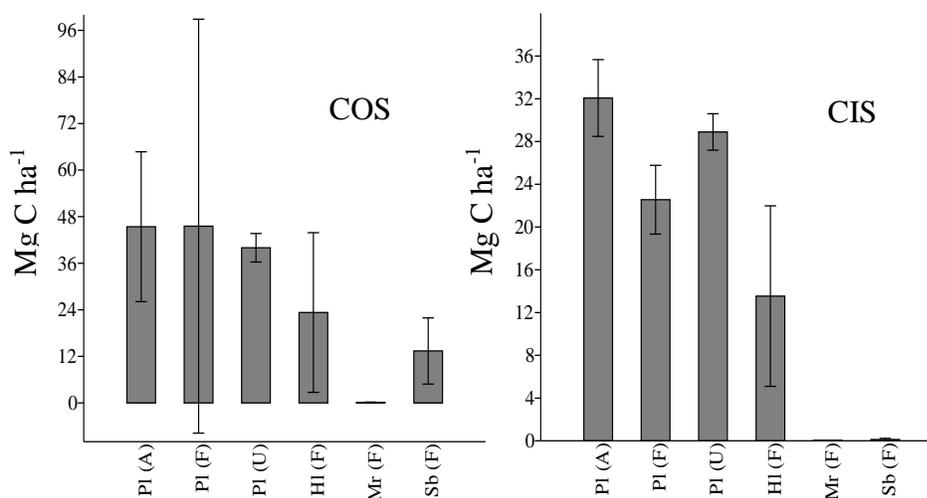
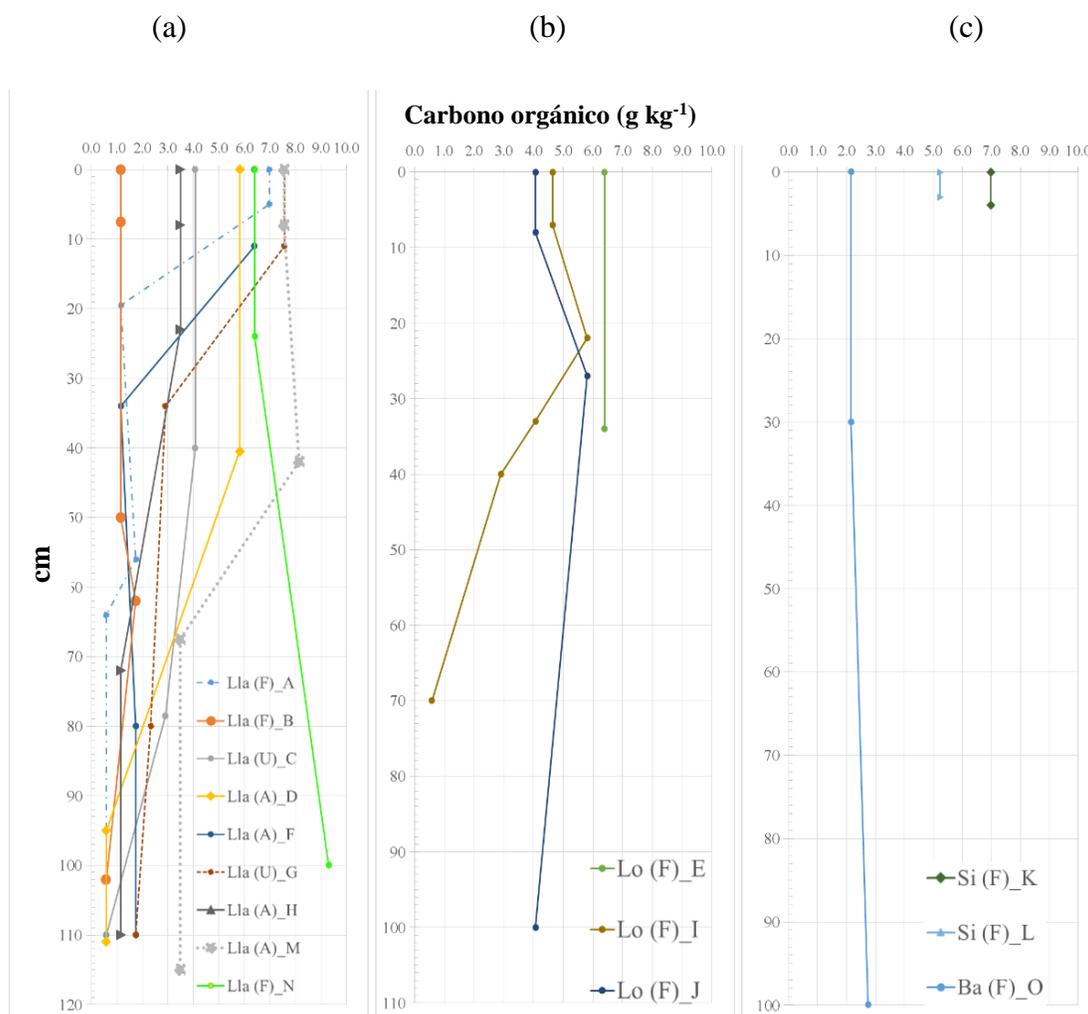


Figura 11. Contenido de carbono orgánico (COS) y carbono inorgánico (CIS) por unidad de área, uso de suelo y unidad geomorfológica. Lla: llanura aluvial; Lo: lomerío; Si: sierra; Ba: barra arenosa. Uso de suelo: (A): agrícola; (F): forestal; (U): urbano.

En la figura 12a, se observa que las llanuras aluviales (Lla) mostraron la mayor variación de COS. En algunos casos, el contenido de COS comenzó a disminuir después de los primeros 10 cm de espesor, y en otros casos después de los 40 cm. El suelo asociado a los lomeríos (Fig. 12b) muestra un incremento en el contenido de COS después de los 10 cm de espesor con una disminución gradual hasta 1 m de profundidad. En las sierras (Fig. 12c), los suelos son muy poco profundos y no fue posible cuantificar una variación, mientras que la barra arenosa no mostró variación en el contenido de COS a pesar del espesor del perfil.



A su vez, en la tabla IV se observa que la mayoría de los perfiles de suelo alcanzaron más

Figura 12. Distribución del carbono orgánico en los perfiles de suelo agrupados por unidad geomorfológica: (a) llanuras aluviales; (b) lomeríos; (c) sierras y barra arenosa. Lla: llanura aluvial; Lo: lomerío; Ba: barra arenosa; Si: sierra; (A): agrícola; (F): forestal; (U): urbano. Las descripciones de los perfiles A a la O se presentan en el ANEXO A.

de 100 cm de espesor en las llanuras aluviales (Lla), seguidas por los lomeríos (Lo) y finalmente las sierras (Si) con los suelos más delgados alcanzando sólo 5 cm de espesor. La llanura aluvial forestal Lla (F) (perfil N), mostró el mayor contenido de limo, mientras que en el resto de los perfiles de suelo predominaron las arenas.

Tabla IV. Textura y espesor por perfil de suelo.

Unidad	Identificador del perfil de suelo	Espesor del suelo cm	Textura del suelo		
			Arena -----	Limo g kg ⁻¹	Arcilla -----
Lla (A)	(D)	>100	686	306	8
	(F)	>100	831	167	2
	(H)	>100	838	160	2
	(M)	>100	381	611	8
Lla (F)	(A)	>100	715	272	13
	(B)	>100	895	105	0
	(N)	>100	169	822	9
Lla (U)	(C)	>100	765	231	4
	(G)	>100	777	219	4
	(E)	34	362	617	21
Lo (F)	(I)	70	372	577	51
	(J)	>100	591	398	11
Si (F)	(K)	4	739	256	5
	(L)	3	651	318	31
Ba (F)	(O)	>100	932	16	52

Unidad geomorfológica: Lla: llanura aluvial; Lo: lomerío; Si: sierra; Ba: barra arenosa. Uso de suelo: (A): agrícola; (F): forestal; (U): urbano.

En la Tabla V se observan los resultados entre las diferencias entre las llanuras Lla con los diferentes usos de suelo (F, A y U). Ya que las llanuras cuentan con todos los usos de suelo.

Tabla V. Resultados de la prueba de ANOVA entre el contenido de COS, CIS y espesor del perfil de suelo

Fuente de variación	gl	SC total	SC entre grupos	CM	F	P	Significancia
COS	2	413.49	198.44	99.22	5.075	0.0274	Significativa
CIS	2	180.85	109.32	54.66	8.406*	0.0060	Significativa

COS: carbono orgánico del suelo; CIS: carbono inorgánico del suelo; gl: grados de libertad; SC; suma de cuadrados; CM: cuadrado medio; Significancia: * $p < 0.01$

La figura 13 muestra los resultados del análisis de escalamiento multidimensional (MDS), en donde la similitud entre distancias de los valores y el índice de clasificación (euclidiano), sugieren que el espesor del suelo y la forma de la pendiente son un factor determinante en el contenido de COS. Una correlación positiva ($R^2=0.99$) y un valor de bondad de ajuste de (0.001%), indicaron una estrecha relación entre similitudes y distancias. La mayoría de los grupos de suelo Lla (A), (F) y (U), Lo (F) y Ba (F) se correlacionaron con la variable de espesor, mientras que los componentes asociados a la condición sierra forestal Si (F) mostraron alta similitud con la variable pendiente. Con base en estos resultados, se realizaron análisis de regresión y correlación para las variables espesor y pendiente, encontrando altos valores de correlación ($R^2= 0.6$ y 0.9) para COS con estas variables independientes (Fig. 14).

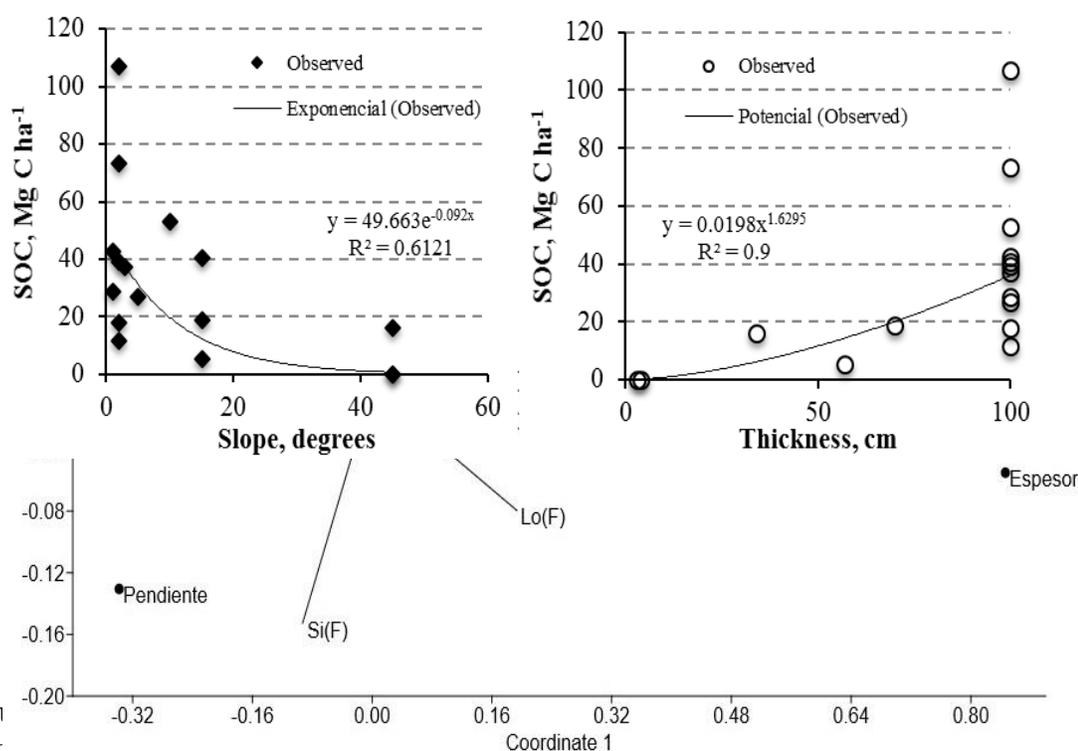


Fig Unidad geomorfológica: Lla: llanura aluvial; Lo: lomerío; Ba: barra arenosa; Si: sierra; Uso se suelo: (A): agrícola; (F): forestal; (U): urbano.

Figura 14. Relaciones entre pendiente y espesor como factores independientes con el carbono orgánico del suelo (COS) como variable de respuesta ambiental.

La tabla VI compara los resultados obtenidos de COS con otros reportes de regiones áridas y semiáridas de México y otros países. Puede observarse que no sólo se obtuvo un valor menor, sino que también excedió los valores reportados por Batjes (1996) para los Yermosoles.

Tabla VI. Almacenamiento de carbono orgánico del suelo (COS) reportado para diversas regiones áridas y semiáridas.

Autor	Fuente de datos	Contenido de
-------	-----------------	--------------

Zona de estudio		COS	COS
		kg m ⁻²	Mg ha ⁻¹
Batjes, 1996	Global	Soil Map of the World (FAO-UNESCO, 1974)	
		Soil Map of the World (FAO, 1991)	
Batjes, 1996	Global	World Inventory of Soil Emission Potential Database (WISE)	42–62
		ISRIC's Soil Information System (ISIS)	4.2–6.2
Batjes, 1996	Global	Soil Database System of FAO (1989)	31–34
		Digital soil data compiled by the National Soil Conservation Service of the United States of America (NRCS)	3.1–3.4
Cairns <i>et al.</i> , 1997	URSS, USA, México y Brasil	Global database (Olson <i>et al.</i> , 1983)	273
		Global Soils Database (Zinke <i>et al.</i> , 1984).	
Jobbágy y Jackson, 2000	Global	National Soil Characterization Database	
		World Inventory of Soil Emission Potential Database (WISE)	6.2
Návar-Chaidez, 2008	Matorral Espinoso Tamaulipeco	International Soil Reference and Information Center	62
		Canadian Forest Service	
Návar-Chaidez, 2008	Matorral Espinoso Tamaulipeco	Inventario Nacional forestal (Palacios-Prieto, 2000)	136–138
Montaño <i>et al.</i> , 2016	Desierto Sonorense y chihuahuense		2.1–18
		Datos publicados y comunicaciones personales	
Este estudio	Ecosistemas semiáridos		11.9-72
		Extremo sur de la Península de BC	0.15–45.5

7.2 Influencia de las CBS sobre la tasa de respiración edáfica y el cambio de uso de suelo (Sección 2).

Se realizaron mediciones durante 22 meses consecutivos de la tasa de intercambio neto de CO_2 (NCER), así como del análisis mensual de las precipitaciones (Fig. 15).

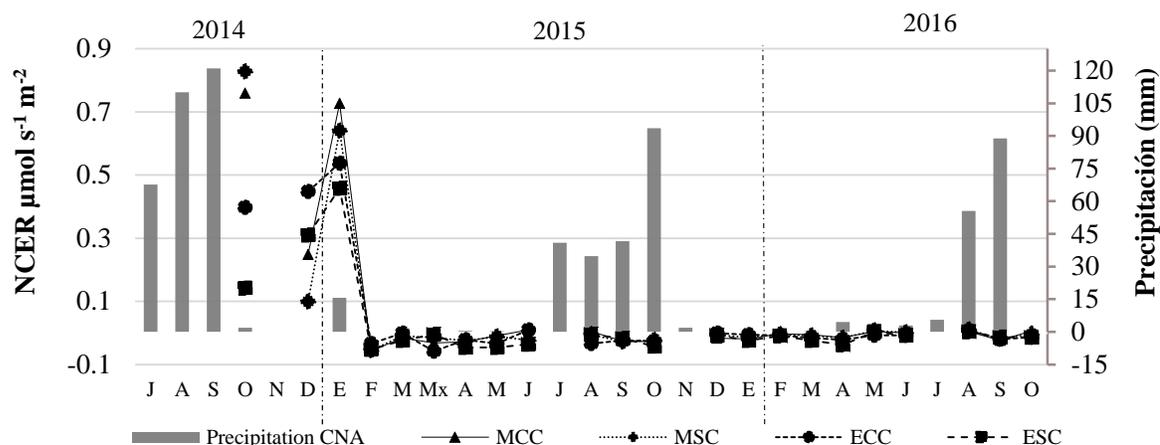


Figura 15. Precipitación mensual y respiración del suelo. NCER=tasa de intercambio neto de CO_2 ; Mx= medición extra en marzo; MCC: suelo de matorral con costra; MSC: suelo de matorral sin costra; ECC: suelo erosionado con costra; ESC: suelo erosionado sin costra.

Para un mejor entendimiento de los resultados obtenidos, en la figura 16 se muestra el gráfico detallado del comportamiento de la respiración del suelo después de los eventos de lluvia extrema.

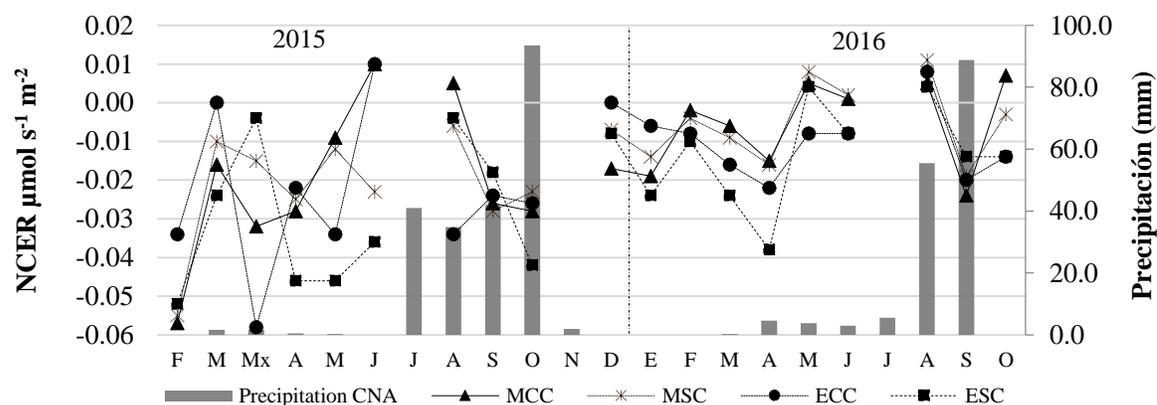


Figura 16. Fragmento de la variación temporal de la precipitación y respiración del suelo. NCER=tasa de intercambio neto de CO_2 ; Mx= medición extra en marzo; MCC= suelo de matorral con costra; MSC= suelo de matorral sin costra; ECC= suelo erosionado con costra; ESC= suelo erosionado sin costra.

Los valores promedio de la tasa de intercambio neto de CO₂ (NCER), W_{flux} , T_{soil} y PAR para cada condición incluyendo los valores causados por el huracán Odile se muestran en la tabla VII. Se observa la amplia variación en la NCER para cada condición, sugerida por los rangos de las desviaciones estándar. La condición suelo de matorral con costras (MCC) muestra las mayores tasas de intercambio neto de CO₂ e intercambio neto de H₂O, en tanto que las condiciones sin costras (MSC y ESC), muestran los valores más bajos.

Tabla VII. Resultados de las principales variables físicas para cada condición.

Condición	NCER	W_{flux}	T_{soil}	PAR
	($\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$)	($\text{m mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$)	(°C)	($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
MCC	0.067 ± 0.226	0.141 ± 0.050	24.9 ± 7.5	542.2 ± 604.5
MSC	0.059 ± 0.221	0.114 ± 0.056	25.2 ± 7.2	596.4 ± 602.5
ECC	0.048 ± 0.170	0.139 ± 0.065	25.7 ± 6.9	748.8 ± 539.5
ESC	0.023 ± 0.125	0.121 ± 0.057	25.7 ± 6.3	707.4 ± 558.6

NCER: tasa de intercambio neto de CO₂; W_{flux} : tasa de intercambio neto de H₂O; T_{soil} : temperatura del suelo; PAR: radiación fotosintéticamente activa; MCC: suelo de matorral con costra; MSC: suelo de matorral sin costra; ECC: suelo erosionado con costra; ESC: suelo erosionado sin costra.

Para descartar los efectos causados por las lluvias extraordinarias del huracán Odile, nos enfocamos en los datos a partir de febrero de 2015 a octubre de 2016. Correlaciones lineales y valores de significación se muestran en la tabla VIII. La variable flujo de agua (W_{flux}) no mostró valores significativos para las condiciones suelo de matorral y suelo erosionado sin costras (MSC y ESC), en tanto que las demás variables mostraron valores significativos para el resto de las condiciones.

Tabla VIII. Correlaciones entre la tasa de intercambio neto de CO₂ y variables físicas para las cuatro condiciones.

Tasa de intercambio neto de CO ₂ (NCER)	Componentes físicos					
	W _{flux}		T _{soil}		PAR	
	r	Significancia	r	Significancia	R	Significancia
Condiciones						
MCC	0.274	0.117**	0.631	0.117**	0.466	0.117**
MSC	0.082	NS	0.475		0.422	
ECC	0.282	0.165**	0.421	0.165**	0.394	0.165**
ESC	0.119	NS	0.501		0.423	

NCER: tasa de intercambio neto de CO₂; W_{flux}: tasa de intercambio neto de H₂O; T_{soil}: temperatura del suelo; PAR: radiación fotosintéticamente activa; r= coeficiente de correlación; MCC: suelo de matorral con costra; MSC: suelo de matorral sin costra; ECC: suelo erosionado con costra; ESC: suelo erosionado sin costra. *regresiones lineales significativas ($p < 0.01^{**}$).

La Figura 17 muestra la contribución del flujo de CO₂ por las costras biológicas del suelo en el campo. Los valores se estimaron restando los resultados de la condición suelo de matorral y erosión sin costra (MSC y ESC) a la condición suelo de matorral y erosión con costra (MCC y MSC) por cada par de puntos de muestreo. Las costras de suelo erosionado (ECC_{neto}) mostraron mayor liberación de CO₂ que las costras de suelo de matorral (MCC_{neto}), las cuales absorben CO₂; ambos procesos se concentran en un intervalo de 12 a 45 °C.

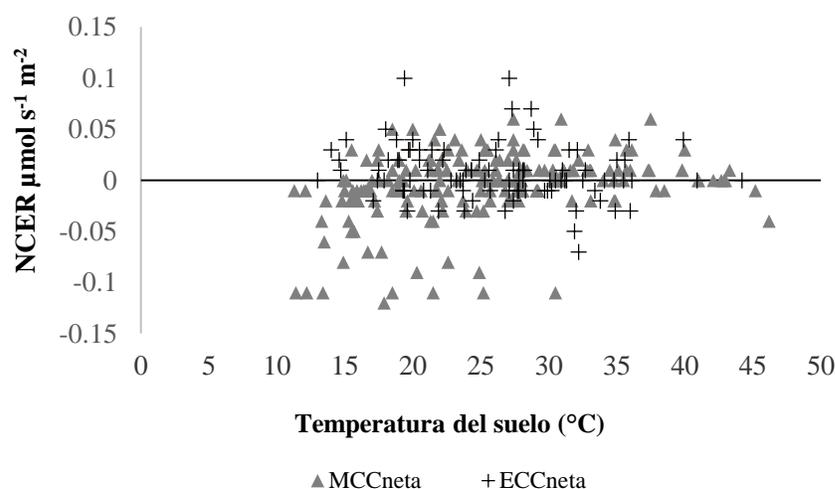


Figura 17. Tasa de intercambio neto y temperatura del suelo para sitios con CBS durante todo el periodo de estudio (valores relacionados con las lluvias extremas causadas por el huracán Odile fueron descartados). NCER: tasa de intercambio neto de CO₂; MCC_{neto}: costras del suelo de matorral; ECC_{neto}: costras del suelo erosionado.

La figura 18 muestra el análisis de componentes principales (ACP) considerando 220 muestras para suelo de matorral con y sin costras (MCC y MSC), y 110 muestras para suelo erosionado con y sin costras (ECC y ESC). Las condiciones MCC, MSC y ESC mostraron la misma tendencia con las variables flujo de agua y temperatura del suelo, las cuales se correlacionaron positivamente con la tasa de intercambio neto de CO₂, mientras que la radiación fotosintéticamente activa se correlacionó negativamente. Sin embargo, sólo la condición ECC mostró una variación en donde la radiación fotosintéticamente activa mostró un comportamiento opuesto. La tabla IX muestra los componentes principales que explican la variación en los datos.

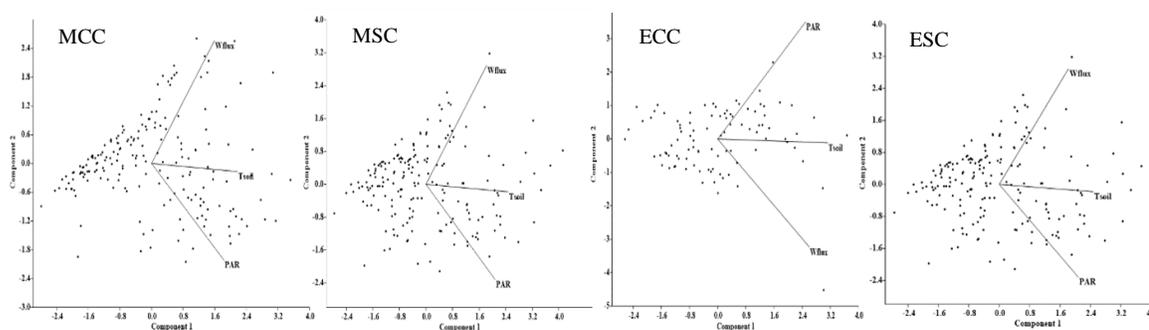


Figura 18. Resultados del análisis de componentes principales presentados como biplots. Wflux= tasa de intercambio neto de H₂O; T_{soil}= temperatura del suelo; PAR= radiación fotosintéticamente activa; MCC= suelo de matorral con costras; MSC= suelo de matorral sin costras; ECC= suelo erosionado con costras; ESC= suelo erosionado sin costras.

Tabla IX. Varianza total explicada por condición a través del ACP.

PC	MCC		MSC		ECC		ESC	
	Eigenvalue	% Variación						
1	1.8827	62.70	1.8827	62.75	1.7642	58.80	1.5043	50.14
2	0.8257	27.52	0.8257	27.52	0.8103	27.01	1.0101	33.67
3	0.2915	9.71	0.2915	9.71	0.54253	14.17	0.4855	16.18

MCC= suelo de matorral con costras; MSC= suelo de matorral sin costras; ECC= suelo erosionado con costras; ESC= suelo erosionado sin costras.

La tabla X muestra los resultados de los análisis de ANOVA de una sola vía para las diferentes variables y condiciones aplicadas a los datos del mismo mes (octubre) de los años 2014 y 2015. Se realizó un total de ocho pruebas; sólo las variables NCER y W_{flux} mostraron

diferencias significativas entre años. Las variables T_{soil} y PAR no mostraron diferencias significativas entre condiciones, incluso después de lluvias extraordinarias.

Tabla X. Resultados de las pruebas de ANOVA entre todas las condiciones (MCC, MSC, ECC and ESC) para el mes de octubre de 2014 y octubre 2015.

Suelo de matorral con y sin costras (MCC y MSC)							Suelo erosionado con y sin costras (ECC y ESC)				
Variable	gl	SC Total	SC entre grupos	CM	F	p	SC Total	SC entre grupos	CM	F	p
NCER ($\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$)	3	17.50	6.73	2.24	7.50**	0.0005	1.53	0.63	0.21	3.70*	0.033
Wflux ($\text{m mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$)	3	0.21	0.04	0.01	3.01*	0.0428	0.13	0.10	0.03	19.47*	1.37e ⁻⁰⁵

NCER= tasa de intercambio neto de CO₂; Wflux= tasa de intercambio neto de H₂O; gl: grados de libertad; SC: suma de cuadrados; CM: cuadrado medio; Significancia * $p < 0.05$; $p < 0.001$ **

7.2.1 Experimento de respiración de costras del suelo

En la figura 19 se muestran los resultados de los flujos de CO₂ del experimento con CBS. Sólo se registraron valores negativos a lo largo de los 5 días de mediciones bajo condiciones de saturación de agua y al aire libre; las muestras se humedecieron 2 veces al día para mantener el punto de saturación de las CBS. El CO₂ capturado entre las condiciones MCC_{neto} y ECC_{neto} durante los primeros 2 días respondieron al incremento de la temperatura del suelo disminuyendo la tasa de consumo de CO₂; después de este periodo la condición ECC_{neto} mostró un incremento en la tasa de consumo de CO₂ en respuesta directa a la disminución de la temperatura del suelo; por el contrario, la condición MCC_{neto} disminuyó el consumo de CO₂ para finalmente incrementar nuevamente la absorción de CO₂ a bajas temperaturas.

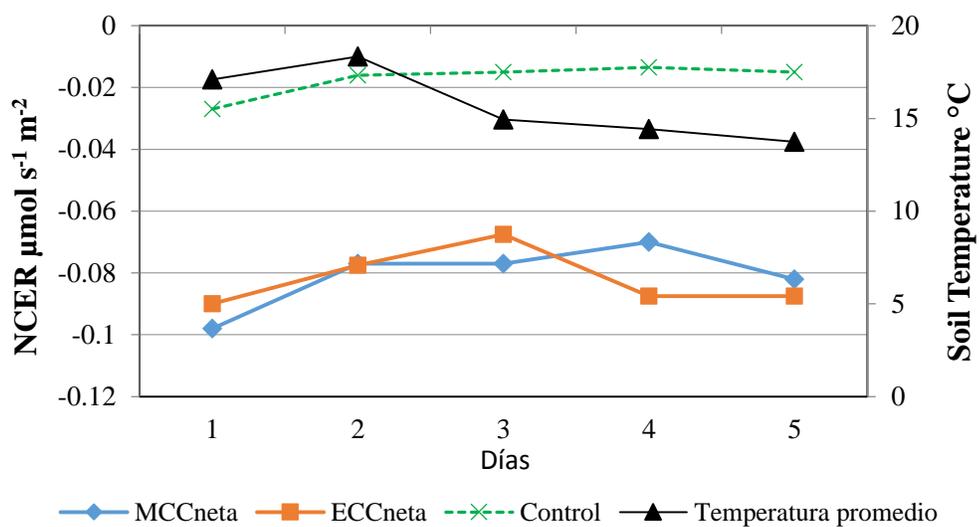


Figura 19. Resultados del experimento de respiración usando la mismas CBS que las medidas en campo después de 5 días de mediciones. NCER (tasa de intercambio neto de CO_2). MCC_{neta} = costras de suelo de matorral; ECC_{neta} = costras de suelo erosionado.

7.3 Comparación de los flujos de C entre 2 ecosistemas del noroeste de México mediante la técnica EC (Sección 3).

7.3.1 Condiciones meteorológicas en 2006 y 2007.

De acuerdo con el análisis de la precipitación entre las estaciones meteorológicas de los sitios de muestreo (Fig. 20), el sitio Rosario de Tesopaco (TS) en Sonora, muestra la mayor cantidad de lluvia (568.7 y 780.2 mm), mientras que el sitio La Paz, (LP) registró valores menores, con 221.7 y 159.8 m para los años 2006 y 2007 respectivamente. El periodo con mayor precipitación fue durante los meses de junio a septiembre para ambos años; sin embargo, el año 2007 fue un año más húmedo con un periodo extra de lluvias durante los meses de noviembre y diciembre para ambos sitios.

La temperatura media anual durante el periodo de estudio fue similar 24.3 ± 4.7 (TS) y 23.6 ± 4.9 °C (LP) para 2006 y 2007. Las temperaturas medias más bajas se registraron durante los meses de enero y diciembre (16.4-17.6 y 14.4-15.6 °C, respectivamente), en tanto que las medias más altas se registraron en los meses de julio a septiembre de 29.8 a 31.4 °C para ambos años.

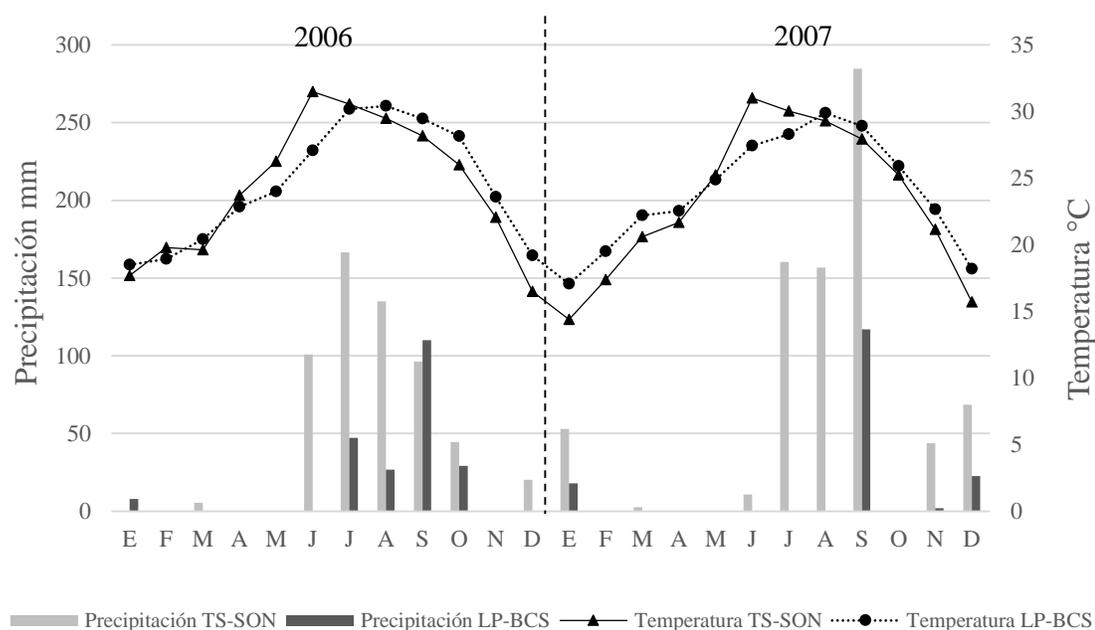


Figura 20. Precipitación mensual y temperaturas promedio de las zonas de estudio. TS= Rosario de Tesopaco, Sonora; LP= La Paz, BCS.

7.3.2 Variaciones interanuales del Intercambio Neto del Ecosistema (NEE)

Se realizaron mediciones durante 24 meses consecutivos de la tasa de intercambio neto del ecosistema (NEE) en ambos ecosistemas del noroeste de México, los cuales registraron patrones similares desde el inicio del periodo de estudio, mostrando baja actividad del NEE. Valores negativos de NEE, sugieren una captura de C, se registraron en 2006 para el sitio TS durante los meses de julio a septiembre, en tanto que para el sitio LP se registraron durante septiembre y noviembre (Fig. 21).

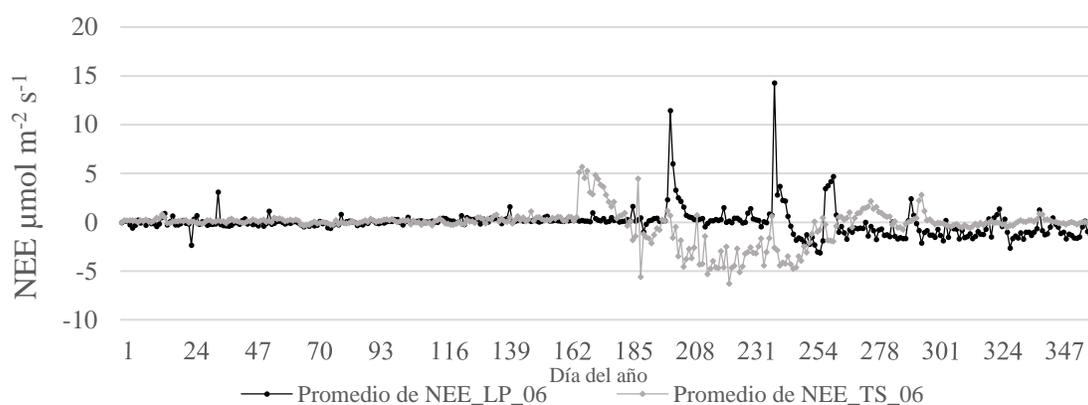


Figura 21. Evolución temporal del intercambio neto del ecosistema (NEE) para el año 2006. TS= Rosario de Tesopaco, Sonora; LP= La Paz, BCS.

Para el año 2007, el sitio TS tuvo valores negativos de NEE durante los meses de julio a noviembre, mientras que para el sitio La Paz, dichos valores se registraron de octubre a diciembre (Fig. 22).

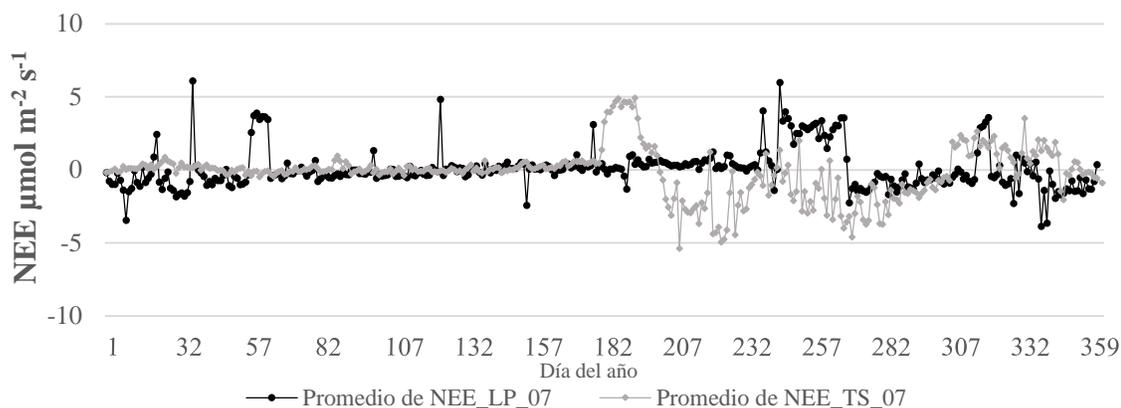


Figura 22. Evolución temporal del intercambio neto del ecosistema (NEE) para el año 2007. TS= Rosario de Tesopaco, Sonora; LP= La Paz, BCS.

7.3.3 Análisis de la precipitación y estimación de la brecha hídrica

De las estaciones analizadas en BCS y Sonora para los años 2006 y 2007, el índice de disponibilidad hidro-ambiental (IDHA) fue muy bajo durante los primeros meses de ambos años con respecto al valor máximo posible (IDHA=10). Las medias mínimas se observaron con mayor claridad en el sitio LP con promedios anuales de IDHA=1.0 y 0.8 para 2006 y 2007 respectivamente. A su vez, el índice de sequía hidro-ambiental (ISHA) presentó valores altos la mayoría de los meses y sólo durante septiembre de cada año el ISHA disminuye reduciéndose la brecha hídrica estandarizada (BHE=-2.93 y -3.93) alcanzando su valor mínimo (Cuadro a, Fig. 23).

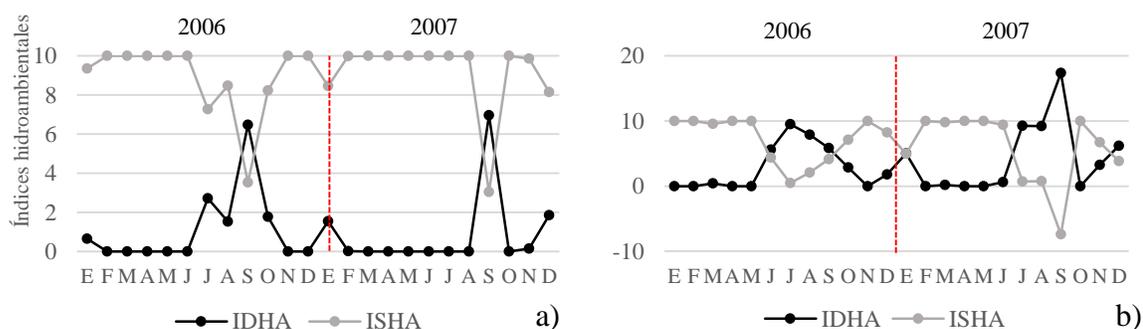


Figura 23. Fluctuación de los indicadores IDHA (Índice de Disponibilidad Hidro-ambiental e ISHA (Índice de Sequía Hidro-ambiental) en 2 sitios del noroeste de México. a) La Paz, BCS; b) Rosario de Tesopaco, Sonora.

Para el sitio TS, el índice de disponibilidad hidro-ambiental (IDHA) es muy bajo durante los primeros meses con respecto al valor máximo posible (IDHA=10). Promedios anuales de IDHA= 2.8 y 4.2 indican condiciones con escasa oferta hídrica, alcanzando los valores más altos de disponibilidad hídrica durante julio de 2006 y septiembre de 2007. El índice de sequía hidro-ambiental (ISHA) presenta valores altos durante el primer semestre, comenzando a disminuir durante el mes de junio alcanzando su valor menor durante julio, regresando de manera paulatina a su valor máximo en noviembre del 2006; dicha tendencia fue similar para el año 2007. Sin embargo, tanto el IDHA y el ISHA alcanzaron valores superiores a los máximos y mínimos durante el mes de septiembre reduciéndose la brecha hídrica estandarizada (BHE= -9.0 y -24.7) (Cuadro b, Fig. 23).

8. DISCUSIÓN

8.1 Contenidos de COS y CIS por unidad geomorfológica y uso de suelo (Sección 1).

Los resultados obtenidos sobre el contenido de COS quedaron incluidos e incluso excedieron el intervalo de valores reportado por Batjes (1996) para Yermosoles (31 a 34 Mg ha⁻¹), pero no alcanzaron el máximo valor para Xerosoles (42 a 62 Mg ha⁻¹). Los Yermosoles y Xerosoles corresponden en este estudio a Cambisoles o Calcisoles de las llanuras aluviales. Las diferencias entre los resultados alcanzados y los publicados por Batjes (1996) se pueden atribuir a la escala de análisis, ya que su trabajo fue una generalización a escala global, basada en descripciones de 4 353 perfiles para todo el mundo, donde sólo una pequeña fracción correspondía a zonas áridas, utilizando además datos de suelos bien desarrollados. En contraste, nuestro estudio se llevó a cabo a escala regional, incluyendo suelos poco profundos con escaso desarrollo, comunes en regiones con estrés hídrico bien definido y donde patrones fisiográficos complejos promueven una intensa dinámica de transporte hidráulico de sedimentos.

De acuerdo con los resultados obtenidos, las llanuras aluviales y los lomeríos mostraron contenidos relativos similares en porcentaje de COS y CIS, mientras que en las sierras y la barra arenosa fueron mayores para el COS. Dichos contenidos relativos muestran que el COS y CIS son componentes importantes de los diferentes perfiles de suelo por unidad geomorfológica y desempeñan una función importante en el secuestro de C de las zonas áridas del noroeste de México. De acuerdo con Lal (2009), la tasa de secuestro de COS es mayor que la evidenciada por el CIS, lo cual coincide con los resultados encontrados (Tabla II). Por otro lado, el secuestro de COS y CIS mostró diferencias asociadas al espesor, condición que se evidenció en los perfiles de suelo de la sierra forestal Si (F), los cuales mostraron el menor contenido de COS y CIS debido a su espesor (3 a 5 cm). El CIS mostró también variaciones contrastantes reflejadas principalmente en los valores menores observados en la sierra (Si) y de la barra arenosa (Ba) (Tabla II), en tanto que la agricultura y las llanuras aluviales urbanas Lla (A) y (U) mostraron los valores más altos (Fig. 10). En este sentido, los altos valores de CIS en la agricultura se explican por las aplicaciones de riego desde hace más de 30 años con aguas residuales y agua subterránea, incrementando los

carbonatos, bicarbonatos, calcio y sales de magnesio en la solución del suelo, precipitando como CaCO_3 , MgCO_3 o $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ secundarios en condiciones secas. En el caso del uso de suelo urbano, los altos valores de CIS (Tabla II) se explican por el transporte de partículas de suelo, materiales de desecho para rellenos o por desgaste de materiales para construcción.

Diferentes autores han reportado sobre la distribución vertical del COS en perfiles de suelos de regiones áridas (Jobbágy y Jackson, 2000; Wang *et al.*, 2010). Los citados estudios se centraron en la cuantificación de COS y CIS a intervalos sistemáticos, lo que permitió realizar comparaciones a espesores específicos. La presente investigación se basó en los contenidos de COS y CIS de cada horizonte en el perfil. En la mayoría de los casos, la cantidad de COS disminuyó con el espesor, pero en algunos casos se observó un aumento en la capa subsuperficial. De acuerdo con los resultados obtenidos (perfiles identificados con N, I y J; Fig. 11a), el aumento del contenido de C corresponde a la planicie aluvial Lla (F) y al lomerío Lo (F). Lo anterior se explica por el mayor contenido de limo (Tabla IV), lo que podría promover la retención de C orgánico (Matus *et al.*, 2000). En el caso de las Llanuras aluviales forestales, el aumento obedece a la incorporación de materia orgánica por la biota del suelo, por raíces muertas o por el transporte de materia orgánica particulada, derivado de la escorrentía y percolación después de fuertes lluvias.

Aunque el contenido de CIS en el área de estudio (0.045 a 32.07 Mg ha^{-1} , Tabla II) fue menor que el COS, los carbonatos (CO_3^{2-}) y bicarbonatos (HCO_3^-) son formas importantes de almacenamiento de C en regiones áridas y semiáridas en todo el mundo (Grossman *et al.*, 1995; Schlesinger, 2002). Adicionalmente, la identificación de Calcisoles típicos (Anexo A; Figs. 33 y 39), localizados en las llanuras aluviales y lomeríos, confirma la presencia de carbonatos secundarios (IUSS Working Group WRB 2014), los cuales aportan alrededor de 23.97 Mg ha^{-1} almacenados de forma inorgánica para este grupo de suelo. Además, los diversos grupos de suelo identificados y descritos en el presente estudio presentaron variaciones en los contenidos de CIS (Tabla II); aunque en la mayoría de los perfiles la presencia de carbonatos no era evidente (Anexo I), las pruebas de campo y laboratorio confirmaron la presencia carbonatos secundarios en todos los grupos de suelo, incluso en los suelos de las sierras forestales Si (F) con valores de 0.05 y 0.04 Mg ha^{-1} . Los resultados

sugieren variaciones muy bajas en el contenido de CIS a través del espesor del perfil, aunque en regiones áridas de China se ha detectado una amplia variación con la profundidad (Wang *et al.*, 2010). Dichas diferencias podrían explicarse por el clima de la región de estudio, donde el intemperismo por hidrólisis y solubilización es lento y gradual, además de la escasez relativa de rocas calcáreas.

Jobbágy y Jackson (2000) concluyeron que, en las zonas áridas con vegetación de matorral en climas fríos, la distribución del COS alcanzó un mayor espesor, lo cual se debe principalmente a la mayor cobertura de la vegetación y no a las condiciones climáticas. En el matorral árido, los procesos de descomposición y la liberación de nutrientes están controlados por las interacciones del clima del suelo, la calidad de la hojarasca y la comunidad de descomponedores (por ejemplo, bacterias, hongos y mesofauna del suelo), reguladas por factores físicos (lluvia, luz solar y radiación). De acuerdo con Maya y Arriaga (1996) y Arriaga y Maya (2007), la producción de hojarasca y los procesos de descomposición están limitados por sequedad extrema y altas temperaturas, donde la degradación por factores abióticos como la radiación reviste suma importancia. Además, las condiciones secas de la región de estudio, aunadas a un alto déficit hídrico, restringen el crecimiento de las plantas, lo que refleja una vegetación escasa, compuesta en una proporción importante por especies caducifolias, que producen cantidades de hojarasca únicamente de manera estacional (Augé, 2001). Diversos estudios en las zonas áridas y semiáridas de México (Montaño *et al.*, 2016) reportaron resultados similares para el COS con valores que fluctúan de 2.1 a 72 Mg C ha⁻¹, donde los valores más altos de almacenamiento de COS se localizan en las zonas semiáridas (Hidalguense y Tehuacanense), en tanto que los valores más bajos e intermedios corresponden en las regiones áridas (Sonorense y Chihuahuense); dichos autores encontraron que las diferencias se debían principalmente a las variaciones en el tipo de vegetación, la ubicación biogeográfica y las condiciones climáticas estacionales, lo cual define en gran medida la descomposición y la incorporación de la materia orgánica del suelo (Tabla VI).

Un amplio intervalo en el contenido de COS (0.15 a 45.55 Mg ha⁻¹) se explica por diferencias en el espesor del suelo (Tabla IV), lo que refleja una intensa influencia de la topografía como

uno de los principales factores formadores de suelo. Al respecto, los resultados de ANOVA mostraron diferencias significativas entre los grupos (Tabla V). Sin embargo, para obtener una mayor validez sobre esta afirmación, los resultados de la prueba de escalamiento multidimensional (MDS), donde la similitud entre distancias de los valores y el índice de clasificación (euclidiano) en el espacio es mínimo, sugieren que el espesor del suelo y la forma de la pendiente es una variable importante que puede ser un factor determinante en el contenido de COS, incluso más que la relación C:N o la inclinación de la pendiente (Fig. 12). Por otra parte, los análisis de correlación simple indicaron que el COS mostró una alta correlación con el espesor y la pendiente, obteniendo valores altos de correlación ($R^2= 0.6$ y 0.9) acordes a los resultados del MDS (Fig. 13). Por lo antes expuesto, los resultados apoyan la hipótesis de que diferentes formas del relieve tendrán un efecto significativo sobre el almacenamiento del COS debido al espesor del perfil del suelo relacionado con la topografía. Además, los resultados de ANOVA para el contenido de C y las llanuras aluviales con diferentes usos de suelo, así como las formas del relieve con uso de suelo forestal no mostraron diferencias significativas ($P < 0.05$), en consecuencia, se rechaza la segunda hipótesis que establecía que diferentes usos de suelo en geoformas de relieves similares tienen una posible relación sobre el almacenamiento de C.

En ambientes áridos, las condiciones óptimas de temperatura y humedad sólo se producen en periodos cortos y esporádicos, de modo que la descomposición y mineralización del N ocurre generalmente después de breves pulsos de precipitación (Arriaga y Maya, 2007). Además, el N del suelo está ligado a bacterias fijadoras de N en asociaciones específicas con plantas leñosas y columnares (Geesing *et al.*, 2000) y costras biológicas del suelo (Belnap y Lange, 2003). La precipitación en las zonas áridas es variable y se produce en periodos cortos de lluvias muy intensas seguidas de largos periodos de sequedad extrema. Un ejemplo es la cuenca de la Paz, en donde la brecha hídrica estandarizada (SHG) sólo disminuye durante la estación lluviosa, en septiembre y octubre (Troyo-Diéguez *et al.*, 2014).

El N del suelo en regiones áridas es muy bajo según Schlesinger (1997), Geesing *et al.* (2000) y Celaya-Michel y Castellanos-Villegas (2011), lo que coincide con los resultados obtenidos (Tabla II), excepto por el alto contenido en las llanuras aluviales agrícolas y urbanas Lla (A),

(U). Dichas condiciones pueden ser explicadas por la adición de agroquímicos ricos en N para promover el crecimiento de los cultivos en las zonas agrícolas. Adicionalmente, la depredación entre los microorganismos en el suelo promueve la liberación de nutrientes que son reutilizados en los procesos de descomposición y mineralización y son considerados como un reservorio de nitrógeno. En los sitios con uso de suelo urbano, el contenido de N en el perfil del suelo pudo permanecer almacenado y sellado debajo de una capa de concreto o podría ser transportado desde o hacia otro lugar, por efecto de actividades antropogénicas.

La relación C:N del suelo es un componente importante de la calidad y productividad del suelo; varios factores influyen en dicha relación, como las condiciones climáticas, la actividad biológica, las propiedades del suelo, la disponibilidad de C y las prácticas de manejo (fertilización y rotación de cultivos). En los ecosistemas áridos la biomasa y la productividad son bajas, por lo que se produce una escasa cantidad de N a partir de la materia orgánica, promoviendo una baja relación C:N (Tateno y Chapin, 1997; Perroni-Ventura *et al.*, 2010). En este sentido, la materia orgánica procedente de la vegetación del matorral presenta relaciones C:N diversas de acuerdo con las diferentes especies vegetales; siendo consideradas como vegetación mejorante a aquellas especies que almacenan mayor cantidad de N en su biomasa, lo que permite una rápida descomposición de la hojarasca aportando materia orgánica rica en N (Arriaga y Maya, 2007).

Sin embargo, no se observaron diferencias significativas en la relación C:N entre los usos de suelo, rechazando nuestra hipótesis sobre diferentes usos del suelo que tienen efectos significativos sobre la relación C:N en el suelo. Sin embargo, nuestros resultados fueron más altos de lo esperado (7.90 a 13.88; Tabla II) en comparación con Batjes (1996) quien reportó valores de 7.0 para Xerosoles y 10.9 para Yermosoles. Nuestros valores más altos se encontraron en la sierra forestal Si (F) y en las llanuras aluviales agrícolas Lla (A); la primera podría ser explicada por adición limitada de materia orgánica fresca producto de la ausencia de especies vegetales arbóreas, siendo que las hojas de la vegetación arbustiva son transportadas por el viento quedando sólo materia seca con alto contenido de ligninas, en tanto que los altos valores de la relación C:N en las condiciones agrícolas obedecen a la presencia de residuos vegetales de los cultivos acumulados en la superficie del suelo, que

afectan la cantidad y calidad de materia orgánica devuelta al suelo y por lo tanto a los niveles de C y N del suelo.

8.2 Tasas de respiración edáfica y la influencia de las CBS bajo diferentes usos de suelo (Sección 2)

Se registraron altas tasas de respiración (0.099 a $0.828 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$) al principio del periodo de estudio (octubre 2014 a enero 2015, Fig. 14), las cuales podrían asociarse a las lluvias extraordinarias ocurridas durante los meses de julio y agosto (67.7 y 110 mm) y con las causadas por el huracán Odile en septiembre de 2014 (121 mm). De acuerdo con Schwinning y Sala (2004), los pulsos de precipitación desencadenan una serie de procesos biológicos y biogeoquímicos que dependen de su duración y profundidad para promover las actividades biológicas como la respiración del suelo. Sin embargo, condiciones ambientales similares a las que ocurrieron durante los primeros meses de mediciones no se presentaron posteriormente, por lo que después de dicho periodo todos los valores mostraron una amplia fluctuación y una disminución a intervalos muy bajos, incluso registrando valores negativos -0.055 a $0.000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Fig. 15).

Según los resultados alcanzados (Tabla VII), los sitios con una alta tasa de intercambio de CO_2 fueron aquellos con suelo de matorral con CBS (0.067 ± 0.311), seguidos de suelo con matorral sin costras (0.059 ± 0.374). Dichos resultados son similares a los reportados por Castillo-Monroy *et al.* (2011) y Maestre y Cortina (2003), donde la respiración del suelo fue mayor en micro sitios dominados por plantas vasculares y CBS, en comparación con áreas dominadas únicamente por CBS. Además, la información registrada sobre radiación fotosintéticamente activa (PAR) sugiere que las condiciones de suelo de matorral con y sin costras (MCC y MSC), recibieron menor radiación solar que las condiciones de suelo erosionado con y sin costras (ECC y ESC). Lo anterior se podría explicar por la sombra que produce la vegetación sobre los sitios de muestreo durante las mediciones. Por el contrario, la condición suelo erosionado con costras (ECC) registró valores elevados de PAR, incluso mayores que la condición suelo erosionado sin costra (ESC), lo cual puede deberse al color oscuro de los parches de CBS (principalmente cianobacterias).

A partir de los estimadores calculados mediante análisis de correlación (Tabla VIII), la tasa de intercambio neto de CO₂ mostró un coeficiente de correlación (r) positivo entre la tasa de intercambio neto de H₂O y la temperatura del suelo, así como un coeficiente de correlación positivo con el PAR. Aunado a ello, los resultados del ACP mostraron que sólo el intercambio neto de H₂O y el PAR podrían explicar poco más de la mitad de la varianza de todas las condiciones.

De acuerdo con la Figura 5, la temperatura influyó sobre la dinámica de la respiración en las CBS, donde el suelo de matorral con costras (MCC_{neto}) consumió CO₂ a bajas temperaturas, en tanto que el suelo erosionado con costras (ECC_{neto}) tendió a liberar CO₂ hacia la atmósfera en la misma condición. En este sentido, es posible que el PAR ejerza influencia directa sobre la capacidad de respiración de las CBS, lo que se explica con los registros de valores positivos en la tasa de intercambio neto de CO₂ durante las mañanas, toda vez que los valores negativos se registraron conforme aumentaba la radiación solar antes del mediodía. Variaciones en la exposición pueden afectar los fotoperiodos diarios, la temperatura del suelo, la humedad del suelo y máxima irradiación, según el ángulo de la superficie del suelo con respecto a la elevación solar, partículas minerales y biota del suelo (Belnap y Lange, 2001). Además, Karsten *et al.* (2016), indicaron que en muestras de CBS de la región semi-árida de Sudáfrica obtuvieron la máxima tasa fotosintética entre los 30 y 35°C, pero que a 40°C la tasa fotosintética fue notoriamente inhibida.

De acuerdo con el ACP (Fig. 17 y Tabla IX), el flujo de agua fue la principal variable relacionada con los valores positivos de la tasa de intercambio neto de CO₂ y PAR con los valores negativos de intercambio neto de CO₂ para todas las condiciones. Ello en respuesta al contenido de agua en el suelo, incrementado por eventos de lluvias extraordinarias (huracán Odile) al principio del periodo de estudio. Sin embargo, el PAR podría explicar los valores negativos, asumiendo que la alta radiación solar y la baja humedad en el suelo limitan la actividad respiratoria de las CBS a tasas de respiración muy bajas o no detectables, permitiendo la actividad fotosintética en las cianobacterias únicamente por periodos cortos de tiempo. Para el caso específico de la condición erosión con costra (ECC), los valores positivos están relacionados con el PAR y podrían explicarse por eventos de alta humedad

relativa y rocío en las madrugadas (usuales en el área de estudio), donde sólo se necesita la presencia de radiación solar y un incremento de temperatura para activar las tasas de respiración en las CBS.

Resultados del experimento de respiración indican que las CBS en condiciones de saturación de agua asimilan CO₂ a bajas temperaturas y son capaces de reducir su consumo conforme incrementa la temperatura y viceversa. Aunque se mostraron tasas similares de consumo de CO₂, existen diferencias entre mediciones después de las primeras 48 horas de haber sido activadas por agua, donde el comportamiento de ambas condiciones fue opuesto (Fig. 17). De acuerdo con Gómez-Sánchez (2010), después de un periodo de reactivación de 48 horas, la comunidad de cianobacterias y líquenes han restablecido su actividad metabólica, en tanto que después de 96 horas, la comunidad de cianobacterias muestra un evidente crecimiento en su biomasa y presencia de fauna edáfica sobre las CBS. Sin embargo, aun cuando las evidencias sugieren una regulación en el consumo de CO₂ a bajas temperaturas, las mismas no fueron suficientes para explicar los mecanismos de consumo por las CBS después de 48 horas en ambas condiciones.

Reportes para regiones áridas y semiáridas sobre valores negativos de intercambio neto de CO₂ son escasos, sin embargo, los hallazgos de la presente investigación sugieren que dichos valores serían un indicativo de consumo de C (Hastings *et al.*, 2005). A partir de las conclusiones de estudios realizados por Thomas *et al.* (2008), Su *et al.* (2012, 2013) y Karsten *et al.* (2016), los resultados encontrados y observaciones directas en campo, los valores negativos obtenidos podrían ser consecuencia de diversas causas:

i) Bajas tasas de precipitación, alto déficit hídrico debido a las altas temperaturas, baja retención de humedad y elevada evapotranspiración (Troyo-Diéguez *et al.*, 2014). Aunque los pulsos de precipitación en el área de estudio son muy variables, los resultados no reflejaron un rápido incremento en el flujo de CO₂ inmediatamente después del humedecimiento como lo reportado por Belnap y Lange (2003). A pesar de que nuestros resultados mostraron algunos picos en la tasa de respiración del suelo, estos no parecen corresponder con la cantidad de precipitación (Figs. 14 y 15). Estos picos podrían ser causados por la presencia de agua debido a la alta humedad relativa y rocío durante la mañana

(usuales en el área de estudio). De acuerdo con nuestros resultados, periodos de lluvias intensas, por ejemplo, lluvias extraordinarias asociadas a huracanes, parecen ser suficientes para activar los procesos metabólicos de las CBS para que la tasa de respiración supere a la tasa fotosintética liberando CO₂ a la atmósfera.

ii) De acuerdo a Maestre y Cortina (2003), Su *et al.* (2013) y Thomas *et al.* (2008), la tasa fotosintética de las CBS en los ecosistemas áridos y semiáridos es mayor que el flujo de CO₂ proveniente del suelo. De esta manera los valores negativos podrían ser causados por un incremento en la fijación de CO₂ por los organismos fotosintéticamente activos de las CBS. *Microcoleus* spp. y *Scytonema* sp. son las especies dominantes de cianobacterias en las CBS del área de estudio. En este sentido, suponemos que *Microcoleus* spp., la cual vive pocos milímetros debajo de la superficie, puede sobrevivir por largos periodos de tiempo bajo condiciones extremas, por lo que su capacidad fotosintética es mayor a su tasa de respiración sólo en condiciones favorables de humedad y temperatura por debajo del nivel óptimo. En este sentido, sólo cuando las condiciones de humedad y temperatura son completamente favorables para las CBS, estas rápidamente se tornan de color verde (*greening*) y la tasa de respiración será más alta que la tasa fotosintética liberando CO₂ a la atmósfera.

iii) Xie *et al.* (2009), observó flujos negativos de CO₂ en suelos de un desierto salino. Los investigadores sugieren que el agua en estos suelos es alcalina, por lo que el CO₂ contenido en la atmósfera del suelo se disuelve en el agua formando ácido carbónico (H₂CO₃). Sin embargo, las condiciones de salinidad/alcalinidad reportadas en este estudio no están presentes en nuestros suelos, al evidenciar salinidad escasa como se estableció en la descripción de nuestra área de estudio con un intervalo de (0.14 a 0.24 dS m⁻¹), así como valores de pH neutros a ligeramente alcalinos (7.92 a 8.10).

iv) La posibilidad de errores instrumentales u operativos debido a cuestiones de calibración fue descartada, por lo que el uso de una cámara dinámica abierta para la medición de los flujos de CO₂ *in situ*, como la usada en el presente estudio, tiene limitantes. De acuerdo con Knoepp y Vose (2002), la limitante en este tipo de técnicas de medición es la ausencia de un flujo real de CO₂, el cual podría ser posible sólo bajo condiciones de laboratorio. Además,

en nuestro estudio se contó con el uso de una trampa de hidróxido de calcio y sodio (soda lime), que de acuerdo con los mismos autores podría sobreestimar en 25% el flujo real.

Contrario a lo expresado en nuestra primera hipótesis sobre que la respiración de suelos en áreas erosionadas podría ser menor debido al cambio de uso de suelo, la condición suelo erosionado con costras (ECC) mostró una alta emisión de CO₂ hacia la atmósfera, más que la condición suelo de matorral con costras (MCC) durante el periodo de estudio (Fig. 16). Además, los resultados de esta investigación claramente soportan nuestra segunda hipótesis sobre la contribución significativa de las CBS al total del flujo de CO₂ del suelo, la cual parece ser posible bajo condiciones específicas de humedad y temperatura, principalmente después de eventos extraordinarios de precipitación. Además, los resultados de las pruebas de ANOVA sólo mostraron diferencias significativas para la tasa de intercambio neto de CO₂ (NCER) e intercambio neto de H₂O entre años, soportando parcialmente nuestra tercera hipótesis, en la que las variables temperatura y precipitación podrían causar variaciones significativas en las tasas de respiración del suelo a lo largo del año.

Por lo anterior, en la última década un total de 28 estudios sobre respiración edáfica se han llevado a cabo en México, particularmente en agroecosistemas y bosques de las principales regiones templadas y tropicales (Cueva *et al.*, 2016). A este respecto, estudios enfocados sobre respiración edáfica en regiones áridas en México son incipientes y más aún bajo condiciones de estrés hídrico y bajo la influencia de costras biológicas del suelo. En este sentido, los estudios muestran que la respiración del suelo de diversas regiones áridas alrededor del mundo fluctúan entre 0.5 a 3.0 $\mu\text{mol C m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Castillo-Monroy *et al.*, 2011); 0.25 a 2.22 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Oyonarte *et al.*, 2012); 0.2 a 2.8 (Rey *et al.*, 2011); en las regiones semiáridas de España y de 0.32 a 3.26 en el desierto Chihuahuense, 0.0 a 3.30 en el desierto de Mojave y 0.02 a 10.2 en el desierto Sonorense (Cable *et al.*, 2011). Los resultados de respiración obtenidos en el presente estudio (0.099 a 0.828 $\mu\text{mol s}^{-1} \text{ m}^{-2}$) son muy bajos en comparación con los anteriormente expuestos, sin embargo, constituyen un aporte significativo y cuantitativo al conocimiento de las regiones áridas de México y del mundo sobre las tasas y periodos de descomposición de la materia orgánica, particularmente después de periodos de lluvias extraordinarias. Adicionalmente, el registro de valores negativos en

nuestra región de estudio (0.000 to $-0.055 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$), constituye uno de los pocos estudios que tratan de explicar las causas de este fenómeno además de lo anteriormente expuesto por Thomas *et al.* (2008), Su *et al.* (2012, 2013) y Karsten *et al.* (2016).

Finalmente, nuestra investigación demostró que en la región árida del extremo sur de la península de Baja California se observa una tendencia hacia un comportamiento de autoconsumo de CO_2 , incluso a una participación del flujo no evidente. La mayor variabilidad en la tasa de respiración del suelo en este estudio podría atribuirse a diferencias puntuales en las especies dominantes y a las características morfológicas y estructurales entre CBS, así como a múltiples procesos que podrían ser activados por eventos de lluvias intensas.

8.3 Intercambio neto del ecosistema (NEE) en dos ecosistemas del noroeste de México (Sección 3)

Los resultados sobre la tasa de intercambio neto del ecosistema entre 2006 y 2007 mostraron similitudes durante los primeros meses del año entre los dos sitios, donde debido a la escasez de agua y limitada actividad biológica, el NEE tiende a valores cercanos a cero (Pérez-Ruiz *et al.*, 2010). Valores promedio de NEE van de los -0.01 a $1.66 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y de -0.98 a $1.16 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, para los meses de enero a julio de los años 2006 y 2007 respectivamente. Un incremento en la tasa de intercambio neto de CO_2 a partir del día 171 para el sitio Rosario de Tesopaco (TS) y día 205 para el sitio La Paz (LP) podría explicarse por la llegada de las primeras lluvias asociadas a la influencia del sistema del monzón de Norteamérica (NAMS). En el sitio LP se muestran dos eventos importantes de emisión de CO_2 hacia la atmósfera (valores positivos), particularmente en los días 206 y 245 (11.48 y $14.32 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), los cuales se encuentran relacionados directamente con la emisión de CO_2 producido por la actividad biológica del suelo después de eventos de precipitación (Verduzco *et al.*, 2015; Yépez *et al.*, 2007), así como por la respiración de las costras biológicas del suelo (Ayala-Niño *et al.*, en preparación) (Fig. 21).

En contraste, ambos ecosistemas muestran evidentes periodos de captura de carbono (flujos negativos) durante los meses de julio a septiembre para el caso del sitio TS y de septiembre a diciembre en el sitio LP. Este marcado periodo de captura de C, es más notorio y de mayor duración en el sitio TS para ambos años, lo cual probablemente sería producto de la

producción de follaje, debida en gran parte a la influencia de las precipitaciones originadas por el NAMS (Pérez-Ruíz *et al.*, 2010; Verduzco *et al.*, 2015). En contraste, el sitio LP muestra una menor captura de C, la cual puede ser explicada debido a diversas características físicas y biológicas del ecosistema que intervienen en el funcionamiento de los estomas y adaptaciones en la hoja (Noy-Meir, 1973), una menor y discontinua cobertura vegetal (Maya y Arriaga, 1996), así como un limitado desarrollo del follaje que dependerá de la cantidad y duración del periodo de lluvias (Hastings *et al.*, 2005).

Aunque la emisión de flujos positivos de CO₂ se asocia con la llegada de las primeras lluvias en ambos sitios de estudio, estos también pueden ser explicados por el proceso de respiración edáfica así como por las costras biológicas del suelo (Ayala-Niño *et al.*, en preparación). Existen diferencias entre los sitios de estudio con respecto a estas emisiones y pueden ser causadas debido a la duración de los pulsos de precipitación, así como la profundidad a la que puede llegar el pulso para promover las actividades biológicas y la descomposición de la MO del suelo (Schwinning y Sala, 2004). En el sitio LP la producción y descomposición de la hojarasca está limitada por su presencia en el suelo, sequía y altas temperaturas; al ser un área con menor densidad de organismos vegetales, la acción del viento sobre la hojarasca ejerce dos factores determinantes: 1) promueve el fraccionamiento mediante la fricción con el suelo y 2) sobre su permanencia y almacenamiento en la superficie del suelo, por lo que sólo después de pulsos de precipitación (que activan a la comunidad de descomponedores) la descomposición de la MO se lleva a cabo (Arriaga y Maya, 2007). Por el contrario, en el sitio TS la acumulación de la MO en el suelo, en conjunto con la presencia de condiciones de humedad y temperatura proporcionan un periodo de descomposición más prolongado permitiendo el desarrollo de un mayor número de procesos ecológicos en el ecosistema (Schwinning y Sala, 2004; Verduzco *et al.*, 2015) (Fig. 20).

De acuerdo con nuestros resultados (Fig. 22), se muestra un retraso en las lluvias de verano de 14 y 44 días en 2007 con respecto al año anterior. Estas variaciones pueden explicarse a causa del sistema de monzón de Norteamérica (NAMS), en el cual se presenta un cambio en la dirección de los vientos de oeste a este debido al contraste entre las temperaturas del mar y el continente, el cual produce un rápido comienzo de las lluvias a partir de junio en el

noroeste de México hacia el suroeste de Estados Unidos (Brito, 2010; Cavazos, 2008; Gutiérrez-Ruacho, 2011). Además, en el noroeste de México las precipitaciones presentan alta variabilidad debido a la influencia del El Niño Oscilación del Sur (ENSO), considerado como el modulador global más importante de la variabilidad climática interanual (Gutiérrez-Ruacho, 2011). Aunado a lo anterior, otro factor determinante que puede explicar las diferencias en los periodos de lluvias es la ubicación geográfica y condiciones climáticas entre los sitios; mientras que el sitio LP se encuentra localizado en una región de elevada temperatura y aridez con precipitaciones procedentes mayoritariamente de tormentas y huracanes al final del verano (González-Abraham *et al.*, 2010), el sitio TS se localiza en las faldas de la Sierra Madre Occidental (SMO), por lo que la influencia del NAMS junto con el vapor de agua proveniente del Golfo de California, al chocar con la gran cadena montañosa de la SMO asciende hasta alcanzar su nivel de condensación precipitando en la serranía, por lo que esta región es considerada como una zona meteorológicamente menos árida (Salinas-Zavala *et al.*, 1998), demostrando que los intercambios de C entre los ecosistemas y la atmósfera son altamente dependientes a las variaciones anuales y estacionales de las lluvias (Méndez-Barroso *et al.*, 2009; Schwinning y Sala, 2004).

De acuerdo con el análisis de la precipitación, durante el 2007 se observó un incremento en la precipitación para ambos sitios con respecto al año anterior, lo cual podría explicarse por la entrada del huracán “Henriette” en septiembre de 2007 que ocasionó precipitaciones de 284.6 y 116.9 para los sitios TS y LP respectivamente.

Con base en nuestros resultados del análisis de precipitación mediante el uso de indicadores para comparar la condición hídrica de los periodos húmedos y secos (Troyo-Diéguez *et al.*, 2014), en los sitios TS y LP, se confirmó que durante los primeros meses del año (enero a mayo y enero a junio de 2006; febrero a agosto y febrero a junio de 2007) fueron los más secos, siendo que el índice de disponibilidad hidro-ambiental (IDHA) no aumentó de su valor más bajo (0) y el índice de sequía hidro-ambiental (ISHA) no disminuyó de su valor más alto (10). Sin embargo, para el sitio LP se observó un incremento considerable del IDHA alcanzando su valor más alto en septiembre tanto en 2006 como en 2007, mientras que para el sitio TS se observó un incremento del IDHA desde el mes de junio, alcanzando un máximo

durante el mes de julio y disminuyendo gradualmente hasta el mes de noviembre de 2006. Lo anterior obedece directamente a la fluctuación de la precipitación recibida en cada uno de los sitios durante el periodo de estudio (Fig. 20). Sin embargo, los índices aplicados sólo confirmaron la activación y desactivación de los procesos ecosistémicos a través de los pulsos de precipitación.

Por otro lado, para el sitio TS, la llegada del huracán “Henriette” durante septiembre de 2007, provocó precipitaciones superiores a los 120 mm, por lo que tanto el IDHA registró valores superiores al máximo establecido, en tanto que el ISHA registró los valores mínimos (Fig. 23). En este sentido, las precipitaciones generadas por el NAMS son aprovechadas por el ecosistema, en virtud de que el aporte de lluvias extraordinarias generadas por la actividad en el Pacífico Oriental (tormentas tropicales y huracanes) contribuye de manera significativa a la precipitación total anual (Jáuregui, 2003) y a la producción de hojarasca, con incremento estacional en la producción de materia orgánica y en consecuencia, de C orgánico.

Finalmente, aunque ambos ecosistemas han sido documentados en diversos aspectos ecológicos, la carencia de mediciones específicas sobre las tasas de descomposición y de respiración edáfica en el sitio TS no permiten una comparación bien fundamentada entre los procesos ecológicos de ambos sitios, ya que sólo se hace referencia a lo sugerido en estudios previos (Jarvis *et al.*, 2007; Xiang *et al.*, 2008). Sin embargo, aún con la carencia de información, el presente estudio representa el primer comparativo sobre la dinámica del ciclo del C en dos ecosistemas áridos del noroeste de México.

8.4 Discusión general

Dentro de los ecosistemas terrestres, los suelos participan de manera activa en la dinámica de los ciclos biogeoquímicos, así como en múltiples funciones y servicios ambientales que proporcionan a la sociedad y al bienestar humano. Estas capacidades han posicionado al estudio del suelo dentro del ámbito científico, debido principalmente a su capacidad de almacenamiento de C orgánico e inorgánico.

En el presente estudio se destaca la problemática sobre de la escasez de información cuantitativa acerca del ciclo del C en las regiones áridas, así como el planteamiento de preguntas específicas sobre su interacción y dinámica con el suelo, vegetación y atmósfera de una región árida al sur de la península de Baja California.

En estas regiones, el C atmosférico es secuestrado vía fotosíntesis por medio de la vegetación y de las CBS. La biomasa constituida en su mayoría por restos vegetales y animales, se deposita en el edafosistema, donde es fragmentada por procesos bióticos y abióticos; controlados por la interacción de los ciclos tróficos de la fauna edáfica y las comunidades de micro organismos descomponedores, las cuales sólo se activan después de pulsos de precipitación y los segundos dominados por la acción de la radiación solar y el viento, los cuales favorecen la degradación de la hojarasca.

La cantidad de C almacenado en el suelo estimado a partir de la descripción morfológica del paisaje y del análisis de perfiles edáficos, nos indica que los depósitos de biomasa (particularmente material vegetal) fueron minoritarios con respecto del estabilizado dentro de los perfiles de los suelos estudiados, encontrando que la actividad biológica y no biológica (inorgánica) de la región árida de la Paz almacenaron 45.5 y 32.0 Mg C ha⁻¹ respectivamente. El primero supera el contenido de C reportado para los Yermosoles y se ubica dentro del rango establecido para los Xerosoles a nivel global; en tanto que, para el segundo, los contenidos de C inorgánico son aún escasos y no existen referencias sobre el contenido en las regiones áridas del noroeste de México, con excepción de la indicada en el presente estudio.

La fase de descomposición del ciclo de C de la biomasa depositada en el suelo se estimó con base en la tasa de respiración edáfica; su análisis y evaluación nos permitió identificar el grado de la actividad biológica a través de la emisión de CO₂ hacia la atmósfera. La presencia de costras biológicas en nuestra área de estudio (distribuidas en forma de parches sobre el suelo), nos dio la oportunidad de comprobar su influencia sobre la tasa de respiración edáfica.

En nuestra área de estudio, la respiración del suelo fue muy baja e incluso imperceptible con valores de -0.055 a 0.000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ durante la temporada seca e incluso posterior a pulsos de precipitación. Estas tasas de respiración tan bajas son producto de las condiciones ambientales extremas de temperatura y estrés hídrico, ya que, de acuerdo con la literatura, la respiración edáfica está condicionada a la presencia de humedad y temperatura; en el área de estudio las altas temperaturas no permiten la permanencia de humedad en el suelo, al evaporarse rápidamente. En este sentido, es sólo después de lluvias muy intensas (asociadas a tormentas tropicales), o a la presencia de alta humedad relativa del rocío durante las mañanas, cuando se observa un incremento en la tasa de respiración (con valores de CO₂ emitido del suelo a la atmósfera en un rango de 0.099 a 0.828 $\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$), y por consiguiente su aumento en el flujo de CO₂ hacia la atmósfera debido a la activación de las comunidades de microorganismos y costras biológicas del suelo.

Logramos identificar que las costras biológicas del suelo presentan una doble función en el ecosistema (fuente y sumidero de C) y que éstas logran regular el consumo de CO₂ atmosférico en función de la temperatura y presencia de humedad.

A nivel del suelo, las mediciones de respiración edáfica fueron puntuales, se identificaron las variaciones en los flujos C hacia la atmósfera, logrando entender que, aunque la dinámica de la respiración de las comunidades de descomponedores y de las costras biológicas del suelo está en función de los pulsos de precipitación, su tasa de descomposición responde en mayor proporción a los eventos extraordinarios provocados por huracanes y tormentas tropicales.

A escala ecosistémica, la técnica de covarianza de flujos o *Eddy covariance* nos permitió cuantificar la capacidad que tiene el suelo de la región árida de la Paz BCS para liberar CO₂ a la atmósfera, registrando picos de emisión de hasta 14.32 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. La respiración del

suelo influye en el intercambio neto de C observándose picos de respiración (flujos positivos de CO₂) posterior a los pulsos de precipitación, lo cual se relaciona de manera directa con lo registrado para la respiración de las comunidades de descomponedores y costras biológicas del suelo después de las primeras lluvias de verano. Por otra parte, los flujos negativos detectados fueron en respuesta al C secuestrado a través de la vegetación vía fotosíntesis.

Lo anterior sugiere que la respiración edáfica (autótrofa y heterótrofa en conjunto) responde al mismo tiempo que la vegetación y contribuye al flujo total del C del ecosistema, aunque en pequeña magnitud dado que en el ecosistema alcanzó más de 15 veces lo registrado en las cámaras de medición de respiración edáfica.

La comparación entre el ecosistema de matorral de la región árida de La Paz, BCS y la selva baja caducifolia en Sonora, además de su cercanía, se basa en la similitud de la estacionalidad de los pulsos de precipitación controladas por el sistema de monzón de Norteamérica. Tomando en cuenta los flujos de C a nivel de ecosistema, en el matorral al sur de la península de Baja California, los flujos de C son menores que los de la selva baja caducifolia en Sonora.

Las principales diferencias radican en que la selva baja caducifolia presenta un mayor periodo de captura de C, lo cual se explica por un periodo más largo de las precipitaciones, así como una mayor capacidad de secuestro de C por la densidad en la cobertura vegetal y una mayor producción de follaje y por lo tanto de entrada al edafosistema. Por el contrario, en el matorral, la cobertura vegetal es menor al igual que la producción de follaje, capturando una menor cantidad de CO₂ a través de la fotosíntesis.

El matorral mostró ser más sensible a los pulsos de precipitación, encontrando que las emisiones de CO₂ (pulsos positivos) a la atmósfera fueron de mayor magnitud pero con menor duración en comparación con los pulsos positivos de Sonora, lo cual puede ser a causa de la respiración edáfica, que en el matorral está limitada a breves periodos de tiempo hasta la llegada del siguiente pulso de precipitación, así como a la presencia de las costras biológicas del suelo, las cuales no se encuentran en la selva baja.

Por otra parte, se logró establecer un referente sobre la dinámica del ciclo del C en un ecosistema árido en el noroeste de México a diferentes escalas de aproximación. Los

contenidos de C orgánico e inorgánico excedieron el intervalo descrito en la literatura para las regiones áridas a nivel global, incluso considerando perfiles de suelo poco profundos y de escaso desarrollo a escala regional. A nivel de respiración edáfica, los resultados obtenidos son relevantes debido a que se describe el comportamiento de la actividad biológica del suelo justo después de eventos de precipitaciones extraordinarias (causadas por huracanes), así como bajo condiciones de estrés hídrico durante la mayor parte del año. Finalmente los resultados de los flujos de C a nivel de ecosistema mediante la técnica de *Eddy covariance*, constituyen el primer estudio comparativo entre dos ecosistemas contrastantes en el noroeste de México bajo la influencia del sistema de monzón de Norteamérica. Aun con el avance en el conocimiento sobre la dinámica del ciclo del C a diferentes escalas, es recomendable y necesario aumentar los periodos de las mediciones tanto a nivel de suelo como de ecosistema con el fin de aportar una mayor información sobre los flujos de C bajo las diferentes condiciones ambientales y de paisaje predominantes en la península de Baja California.

Finalmente, el presente estudio cumplió con el objetivo general de identificar y aportar información sobre los flujos de C en la interacción suelo-planta-atmósfera en un ecosistema árido al sur de la península de Baja California.

9 CONCLUSIONES

9.1 Almacenamiento de COS y CIS por unidad geomorfológica y uso de suelo (Sección 1)

El uso de unidades geomorfológicas para explicar los patrones de almacenamiento y distribución de las reservas orgánicas e inorgánicas de C en suelos bajo condiciones de estrés hídrico mostraron diferencias significativas relacionadas con el espesor del perfil debido a la fuerte influencia de la topografía como factor formador del suelo, el cual podría ser útil en la evaluación del contenido de C en una región árida.

Los resultados de este estudio sobre el almacenamiento de C mostraron que se podrían reportar cantidades mayores o menores de acuerdo con los atributos locales de una región árida específica, comparando el método de muestreo y la escala de análisis. En contraste con los reportes basados en análisis de bases de datos globales, las estimaciones deberían considerarse a un nivel regional.

Los contenidos de COS y CIS reportados para el sur de la península de Baja California contribuyen de manera significativa al conocimiento sobre la dinámica del C en los suelos del noroeste de México, incluso en aquellos que han sido afectados por actividades de cambio de uso de suelo.

La presencia de carbonatos (CO_3^{2-}) y bicarbonatos (HCO_3^-) almacenados de manera evidente en los Calcisoles en forma de concreciones, así como su presencia en los diferentes horizontes subsuperficiales de suelo del resto de los perfiles, señalan su importancia como formas de secuestro de CIS y su papel en la dinámica del C en entornos con escasez de agua.

La relación C:N del suelo no pudo utilizarse como un indicador robusto de los procesos de degradación por cambios en el uso del suelo en nuestra región de estudio debido a que no hubo diferencias significativas.

9.2 Tasas de respiración edáfica y la influencia de las CBS (Sección 2).

En los ecosistemas áridos del noroeste de México la cantidad de estudios referentes a la dinámica del flujo de C a través de la respiración del suelo bajo condiciones climáticas extremas (aridez, sequía, evapotranspiración extrema) son aún incipientes.

Aunque muchos huracanes se forman en el Océano Pacífico, sólo unos pocos llegan a la península de Baja California y una menor proporción de ellos trae consigo altos volúmenes de agua. El periodo de este estudio abarcó diferentes estaciones (secas y húmedas), lo que nos permitió registrar la respuesta y el comportamiento de las CBS sobre la tasa de respiración edáfica tras el paso de un fenómeno meteorológico extremo.

Nuestros resultados sugieren que bajos volúmenes de precipitación, altas temperaturas y baja retención de humedad no alcanzan para activar la respuesta metabólica de las CBS para la respiración en un ambiente árido. Por el contrario, flujos negativos registrados durante el periodo de estudio indican una captura de C en el suelo que, en el caso de las CBS, podría explicarse por la absorción de CO₂ para autoconsumo; en este caso la tasa fotosintética sería mayor que la tasa de respiración y sólo bajo condiciones muy específicas de humedad y temperatura en el suelo, las CBS serán capaces de liberar CO₂ a la atmósfera.

Nuestro estudio demostró diferencias en los flujos de C del suelo entre los sitios con ecosistemas estables y perturbados (matorral y erosión). Esto sugiere que las costras de la condición de matorral y erosión juegan un papel importante en el autoconsumo de carbono, encontrando un doble comportamiento (fuente y sumidero) en la región árida del sur de la península de Baja California. Consideramos que el papel de otras propiedades del suelo, así como la actividad microbiana y la respiración por grupos de cianobacterias deberían ser evaluados en futuros estudios.

Además de describir la dinámica de la respiración edáfica, nuestros resultados representan el primer estudio formal sobre la respiración del suelo en un ecosistema árido al sur de la península de Baja California, lo que puede considerarse como una línea base y de referencia para estudios futuros sobre la influencia del cambio climático en la tasa de respiración edáfica.

9.3 Intercambio neto del ecosistema (NEE) en dos ecosistemas del noroeste de México (Sección 3).

El presente trabajo comprende el primer estudio comparativo entre el intercambio neto de dos ecosistemas del noroeste de México mediante la técnica de *Eddy Covariance* bajo la influencia del Sistema de Monzón de Norteamérica (NAMS).

La influencia del NAMS sobre el noroeste de México es de suma importancia por las precipitaciones que deja sobre la región; aunque se observó un desfase de respuesta del intercambio neto del ecosistema entre los sitios, de 14 y 44 días, rechazando nuestra hipótesis sobre que el NEE no mostraría diferencias ante la caída de las primeras lluvias provocadas por la influencia del NAMS sobre la región.

Aunque ambos sitios cuentan con información referente al intercambio neto del ecosistema mediante la técnica de *Eddy Covariance*, estudios referentes a la dinámica de la respiración edáfica, análisis de las tasas de descomposición de la hojarasca, así como análisis del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), no se han realizado de manera sistemática en ambos sitios lo que impide un análisis más profundo de los procesos y respuestas del ecosistema ante las precipitaciones.

El uso de índices hidro-ambientales en el presente estudio fue de suma importancia para la confirmación de los periodos de sequía y disponibilidad hídrica para los sitios de estudio, por lo que pueden ser adoptados como base metodológica en los diferentes sitios de medición como herramienta de análisis.

9.4 Conclusiones Generales

Este trabajo conforma el primer estudio formal sobre la dinámica, almacenamiento y flujos de C en suelos de matorral bajo condiciones de estrés hídrico y altas temperaturas.

Los resultados sobre el contenido de C en los suelos de la región de La Paz, BCS, pueden servir para el establecimiento de políticas públicas y estrategias de conservación, así como un referente para el establecimiento de una línea base para el pago de servicios ambientales por concepto de captura de C en los suelos de las regiones áridas y semiáridas.

El análisis de los flujos de C sirven para entender su dinámica en el ecosistema y su relación con los diversos componentes en suelo y como herramienta de análisis alternativo para la estimación a corto, mediano y largo plazo de la cantidad de C que pueden almacenar o emitir los suelos (principalmente Cambisoles y Calcisoles), en zonas bajo diversas categorías o programas de conservación.

En México, el análisis de la respiración del suelo es aún incipiente con un total de 28 estudios en la última década, desarrollados principalmente en ecosistemas templados, tropicales y mediterráneos. Ninguno se había llevado a cabo en una región árida al sur de la península de Baja California y mucho menos considerando la influencia de costras biológicas del suelo, las bases de datos obtenidas pueden incorporarse al desarrollo de modelos regionales y servir como funciones de edafotransferencia a nivel local.

10. LITERATURA CITADA

Adhikari, K., A.E. Hartemink. 2016. Linking soils to ecosystem services –A global review. *Geoderma*. 262:101-111.

Almendros, G. 2004. Investigaciones básicas sobre el origen y la estructura molecular de las formas estables de materia orgánica relacionadas con el proceso de secuestro de carbono en los suelos. *Edafología*. 11:229-249.

Anderson, K., A. Bows. 2008. Reframing the climate change challenge in light of post- 2000 emission trends. *Phil. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 366:3863–3882.

Amundson, R. 2001. The Carbon Budget in Soils. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 29:535-562.

Arriaga, L., A. E. Castellanos, E. Moreno, J. Alarcón. 2004. Potential Ecological Distribution of Alien Invasive Species and Risk Assessment: a Case Study of Buffel Grass in Arid Regions of Mexico. *Conserv. Biol.* 18:1504-1514.

Arriaga, L., Y. Maya. 2007. Spatial Variability in Decomposition Rates in a Desert Scrub of Northwestern Mexico. *Plant. Ecol.* 189:213-225.

Aubinet, M., A. Grelle, A. Ibrom, Ü. Rannik, J. B. Moncrieff, T. Foken, A. S. Kowalsky, P. H. Martin, P. Berbigier, C. Bernhofer, R. Clement, J. A. Elbers, A. Granier, T. Grünwald, K. Morgenstern, K. Pilegaard, C. Rebmann, W. Snijders, R. Valentini, T. Vesala. 2000. Estimates of the Annual Net Carbon and Water Exchange of Forest: The EUROFLUX Methodology. *Adv. Ecol. Res.* 30:113-175.

Augé, R. M. 2001. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*. 11:3-42.

Ayala-Niño, F., Y. Maya-Delgado, E. Troyo-Diéguez, P. Peña-Garcillán. 2018. Influence of biological soil crusts over soil respiration rate in a desert scrub of northwest Mexico. *iForest*. (Manuscrito sometido).

Baldocchi, D. D., B. B. Hicks, T. P. Meyers. 1988. Measuring Biosphere-Atmosphere Exchanges of Biologically Related Gases with Micrometeorological Methods. *Ecology*. 69:1331-1340.

Baldocchi, D. D., E. Falge, L. Gu, R. Olson, D. Hollinger, D. Running, P. M. Anthoni, C. Bernhofer, K. J. Davis, R. Evans, J. D. Fuentes, A. H. Goldstein, G. G. Katul, B. E. Law, Z. Lee, Y. Malhi, T. P. Meyers, W. Munger, W. Oechel, U. K. T. Paw, K. Pilegaard, H. P. Schmid, R. Valentini, S. B. Verma, T. Vesala, K. B. Wilson, S. C. Wofsy. 2001. FLUXNET: A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem-Scale Carbon Dioxide, Water Vapor and Energy Flux Densities. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 82:2415-2434.

- Baldocchi, D. D. 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rate of ecosystems: past, present and future. *Glob. Change. Biol.* 9:479-492.
- Batjes, N. H. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur. J. Soil. Sci.* 47:151-163.
- Bell, T. W., O. Menzer, E. Troyo-Diéguez, W. C. Oechel. 2012. Carbon dioxide exchange over multiple temporal scales in an arid shrub ecosystem near La Paz, Baja California Sur, México. *Glob. Change. Biol.* 18:2570-2582.
- Belnap, J., R. Rosentreter, S. Leonard, J. H. Kaltenecker, J. Williams, D. Eldridge. 2001. *Biological Soil Crust: Ecology and Management*. Technical reference 1730-2, 2001. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey.
- Belnap, J., O. L. Lange. 2001. Structure and Functioning of Biological Soil Crusts: a Synthesis. *Biological Soil Crusts Structure Function and Management*. 150:471-479.
- Belnap, J., O. L. Lange. 2003. *Biological Soil Crust: Structure, Function, and Management*. Springer Verlag, Berlin Alemania. 503p.
- Belnap, J. 2006. The potential roles of biological soil crust in dryland hydrological cycles. *Hydrol. Process.* 20:3159-3178.
- Bocco, G., M. Mendoza, O. R. Masera. 2001. La dinámica del cambio de uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Invest. Geogr.* 44:18-38.
- Bowker, M. A., J. Belnap, D. W. Davidson, H. A. Goldstein. 2006. Correlates of biological soil crust abundance across a continuum of spatial scales: support for a hierarchical conceptual model. *J. Appl. Ecol.* 43:152-163.
- Bowker, M. A., R. L. Mau, F. T. Maestre, C. Escolar, A. P. Castillo-Monroy. 2011. Functional profiles reveal unique ecological roles of various biological soil crust organism. *Funct. Ecol.* 25:787-795.
- Brito, L., M. A. Crimmins, S. C. Díaz. 2010. Clima. En Molina-Freaner F. y T. R. Van Devender. 2010. *Diversidad Biológica de Sonora*. UNAM-CONABIO. México, D.F. 596 p.
- Burba, G., D. Anderson, G. Burba. 2010. *A brief practical guide to eddy covariance flux measurements: Principles and workflow examples for scientific and industrial applications*. Lincoln, Neb: LI-COR. 213p.

Cable, J. M., K. Ogle, W. L. Richard, T. E. Huxman, M. E. Loik, S. D. Smith, D. T. Tissue, B. E. Ewers, E. Pendall, J. M. Welker, T. N. Charlet, M. Cleary, A. Griffith, R. S. Nowak, M. Rogers, H. Steltzer, P. F. Sullivan, N. C. van Gestel. 2011. The temperature response of soil respiration in deserts: a seven deserts synthesis. *Biogeochemistry*. 103:71-90.

Cairns, M. A., J. K. Winjum, D. L. Phillips, T. P. Kolchugina, T. S. Vinson. 1997. Terrestrial carbon dynamics: Case studies in the former Soviet Union, the conterminous United States, México and Brazil. *Mitig. Adapt. Strat. GL*. 1:363-383.

Camargo-Ricalde, S. L., M. Esperón-Rodríguez. 2005. Efecto de la heterogeneidad espacial y estacional del suelo sobre la abundancia de esporas de hongos micorrizógenos arbusculares en el valle semiárido de Tehuacán-Cuicatlán, México. *Rev. Biol. Trop.* 53:339-352.

Castillo-Monroy, A. P., F. T. Maestre, A. Rey, S. Soliveres, P. García-Palacios. 2011. Biological soil crust microsites are the main contributor to soil respiration in a semiarid ecosystem. *Ecosystems*. 14:835-847.

Cavazos, T. 2008. Climate change in North American Monsoon. *Border Climate Summary*. 8:1-15.

Celaya-Michel, H., A. E. Castellanos-Villegas. 2011. Mineralización del Nitrógeno en suelos de zonas áridas y semiáridas. *Terra Latinoamericana*. 29:343-356.

CLICOM. Base de Datos Climatológica Nacional. 2017. Disponible en: <http://clicom-mex.cicese.mx/> (visitado el 10 de noviembre del 2017).

Conde, A. C. 2010. El cambio climático. De lo inequívoco a lo incierto. En: Delgado, G. C., C. Gay, M. Imaz, M. A. Martínez. (eds.). México frente al cambio climático: retos y oportunidades. Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM. México, D.F. pp 17-33.

Chapin, F. S., III, W. Eugster, J. P. McFadden. 2002. Arctic Tundra Flux Study in the Kuparuk River Basin (Alaska), 1994-1996. Data set. Available on-line [<http://www.daac.ornl.gov>] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. doi:10.3334/ORNLDAAAC/629.

Chave, J. 2013. The problem of pattern and scale in ecology: what have we learned in 20 years? *Ecol. Lett.* 16:4-16.

Cram, S., H. Cotler, L. M. Morales, I. Sommer, E. Carmona. 2008. Identificación de los servicios ambientales potenciales de los suelos en el paisaje urbano del Distrito Federal. *Invest. Geogr.* 66:81-104.

CONABIO. Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad. 1998. Climas (Clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1 000 000. México D.F. www.conabio.gob.mx (visitado el 10 de septiembre de 2014)

CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. 2011. Estadísticas del agua en México. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx> (visitado el 3 de octubre del 2016).

CONAZA. Comisión Nacional de las Zonas Áridas. 2016. Disponible en: <http://www.conaza.gob.mx> (Visitado el 15 de marzo del 2016).

Conant, R. T., J. M. Klopatek, C. C. Klopatek. 2000. Environmental factors controlling soil respiration in three semiarid ecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:383-390.

Cueva, A., C. A. Robles-Zazueta, J. Garatuza-Payan, E. A. Yépez. Soil respiration in México. *Advances and future directions. Terra Latinoamericana.* 34:253-269.

Delgado-Baquerizo, M., A. P. Castillo-Monroy, F. T. Maestre, A. Gallardo. 2010. Plants and biological soil crust modulate the dominance of N forms in a semi-arid grassland. *Soil Biol. Biochem.* 42:376-378.

Dokuchaev, V. V. 1967. *Selected Works of V. V. Dokuchaev*. Translated from russian by N. Kaner, Israel Program of Scientific Translations, Jerusalem.

Dolman, A. J., J. Noilhan, P. Durand, C. Serrat, A. Brut, B. Piguet, A. Butet, N. Jarosz, Y. Brunet, D. Loustau, E. Lamaud, L. Tolck, R. Ronda, F. Miglietta, B. Gioli, V. Magliulo, M. Esposito, C. Gerbig, S. Körner, P. Glademard, M. Ramonet, P. Ciais, B. Neininger, R. W. A. Hutjes, J. Elbers, R. Macatangay, O. Schrems, G. Pérez-Landa, M. J. Sanz, Y. Scholz, G. Facon, E. Ceschia, P. Beziat. 2006. The CARBOEUROPE regional experiment strategy. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 87:1367-1379.

Dominati, E., Patterson, M, Mackay, A. 2010. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecol. Econ.* 69:1858-1868.

Dunne, T., L. B. Leopold. 1978. *Water in Environmental Planning*. Freeman, San Francisco, Ca. 818p.

Eldridge, D. J., M. A. Bowker, F. T. Maestre, R. L. Mau, J. Papadopolous. 2010. Interactive effects of three ecosystem engineers on infiltration in a semi-arid mediterranean grassland. *Ecosystems* 13:499-510.

EEA. European Environment Agency. 2015. Disponible en: <http://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2015/articulos/el-suelo-y-elcambio-climatico> (visitado el 5 de octubre del 2016).

Eswaran, H., H. Van den Bery, P. Reich, J. Kimble. 1995. Carbon pool in world soils. In: Lal, R., J. M. Kimble, E. Levine, B. A. Stewart (eds.). Soils and Global Change. CRC/Lewis Publishers. Boca Raton, FL. pp 27-44

FAO-UNESCO. 1974. Soil Map of the World (1:5 000 000), Vol. 1: Legend. UNESCO – FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), Paris.

FAO. 1989. FAO-ISRIC Soil Database (SDB). World Soil Resources Report 64, Food and Agriculture Organization, Rome.

FAO. 1991. The Digitized Soil Map of the World. World Soil Resources Report 67/1 (Release 1.0). Food and Agriculture Organization, Rome.

FAO. 2001. Soil carbon sequestration for improved land management. Food and Agriculture Organization of the United Nations. World Soil Reports 96. Rome.

FAO. 2007. Carbon sequestration in drylands. Report on World Soil Resources, No.102. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Falkowski, P., R. J. Scholes, E. Boyle, J. Canadell, D. Canfield, J. Elser. 2000. The global carbon cycle: a test of our knowledge of Earth as a system. *Science*. 290:291–296.

FLUXNET. 2016. Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center (ORNL DAAC). 2016. Disponible en: <http://fluxnet.ornl.gov> (Visitado el 18 de noviembre del 2016).

García, E., A. Mosiño. 1968. Los climas de la Baja California. En: Comité Nacional Mexicano para el Decenio Hidrológico Internacional, Instituto de Geofísica, UNAM. Memoria 1966-1967. pp 29-56.

García-Calderón, N. E. 2011. Los ecosistemas como factor geográfico de distribución de suelos. En: Pavel Krasilnikov *et al.* (eds.). Geografía de suelos de México. México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, pp 99-118.

Geesing, D.P. Felker, R.L Bingham. 2000. Influence of mesquite (*Prosopis glandulosa*) on soil nitrogen and carbon development: Implications for global carbon sequestration. *J Arid Environ.* 46:157-180.

Gómez-Sánchez, J.P., 2010. Efecto de la humedad sobre la estructura de la comunidad de cianobacterias en costras biológicas de suelo de matorral sarcocaula en la península de Baja California. Universidad Autónoma Indígena de México. 70 p.

Grossman, R. B., R. J. Ahrens, L. H. Gile, C.E. Montoya, O. A. Chadwick. 1995. Areal evaluation of organic and carbonate carbon in a desert area of southern New Mexico. En: Lal, R., J. Kimble, E. Levine, B. A. Stewart (eds.). Soils and global change. CRC/Lewis Publisher, Florida. pp 81-91.

Guerrero-Ortíz, P. L., R. Quintero-Lizaola, V. Espinoza-Hernández, G. S. Benedicto-Valdés, M de J. Sánchez-Colín. 2012. Respiración de CO₂ como indicador de la actividad microbiana en abonos orgánicos de *Lupinus*. Terra Latinoamericana. 30:355-362.

Guertin, P. D., P. Folliot, M. Fogel. 1988. Características fisiográficas e hidrológicas. Cap. 3. En: Arriaga, L., A. Ortega (eds.). La sierra de La Laguna de Baja California Sur. Centro de Investigaciones Biológicas de Baja California Sur, A.C. Publi. No. 1. México, pp 37-43.

Gurney, K. R., R. M. Law, A. S. Denning, P. J. Rayner, D. Baker, P. Bousquet. 2002. Towards robust regional estimates of CO₂ sources and sinks using atmospheric transport models. Nature. 415:626-630.

Gutiérrez-Ruacho, O. G. 2011. Análisis de la variabilidad climática del noroeste de México. Tesis (Doctorado). Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste CIBNOR S.C. 92p.

Hammer, Ø., D. A. T. Harper, P. D. Ryan. 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. Palaeontol. Electron. 4.

Hamond, E. 1954. A geomorphologic study of the Cape Region of Baja California. University of California Press. Berkeley and Los Angeles, Ca., USA. 98p.

Hanson, P. J., N. T. Edwards, C. T. Garten, J. A. Andrews. 2000. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. Biogeochemistry. 48:115-146.

Hastings, S. J., W. C. Oechel, A. Muhlia-Melo. 2005. Diurnal, seasonal and annual variation in the net ecosystem CO₂ exchange of a desert shrub community (*Sarcocaulis*) in Baja California, Mexico. Glob. Change. Biol. 11:927-939.

Houghton, J. T., L. G. Meira Filho, B. Lim, K. Treanton, I. Mamaty, Y. Bonduky, D. J. Griggs, B. A. Callender. 1997. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse house gas inventory. Reference Manual Volume 3. Intergubernamental Panel on Climate Change. Ginebra. Suiza.

Houghton, R. A. 2002. Terrestrial carbon sink. Biologist. 49:155-160.

Hörberg, E., A. Nordgren, N. Buchmann, F. S. A. Taylor, A. Ekblad, M. N. Hörberg, G. Nyberg, M. Ottosson-Löfvenimus, D. J. Readk. 2001. Photosynthesis drivers soil

respiration large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration. *Nature*. 411:789-792.

Hudson, B. D. 1992. Soil survey as a paradigm-based science. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 56:836-841.

Huntzinger, D. N., W. M. Post, Y. Wei, A. M. Michalak, T. O. West, A. R. Jacobson, I. T. Baker, J. M. Chen, K. J. Davis, D. J. Hayes, F. M. Hoffman, A. K. Jain, S. Liu, A. D. McGuire, R. P. Neilson, Chris Potter, B. Poulter, David Price, B. M. Raczka, H. Q. Tian, P. Thorton, E. Tomelleri, N. Viovy, J. Xiao, W. Yuan, N. Zeng, M. Zhao, R. Cook. 2012. North American Carbon Program (NACP) regional interim synthesis: Terrestrial biospheric model intercomparison. *Ecol. Model.* 232:144–157.

INECC. 2016. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Disponible en: www.inecc.gob.mx (Visitado el 18 de octubre del 2014).

INEGI. 1980. Instituto Nacional de Estadística y Geografía Mapa Topográfico San José del Cabo. Escala 1:250,000. México D.F.

INEGI. 1993. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Fotografías Aéreas (blanco y negro), Escala 1:75 000., México D.F.

INEGI. 1995. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Síntesis Geográfica de Baja California Sur. México D.F. 52 pp. + 12 mapas.

INEGI. 1997. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Mapa Topográfico La Paz. Escala 1:250,000. México D.F.

IPCC. 2007. Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático. Informe de Síntesis. Ginebra, Suiza. 104p.

IPCC. 2013. Climate change 2013. The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 34p.

IUSS. Grupo de Trabajo WRB. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales del Suelo No. 103. FAO. Roma.

IUSS. Working Group WRB. 2014. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.

- Jarvis, P., A. Rey, C. Petsikos, L. Wingate, M. Rayment, J. Pereira, J. Banza, J. David, F. Miglietta, M. Borghetti. 2007. Drying and wetting of Mediterranean soils stimulates decomposition and carbon dioxide emission: The “Birch effect”. *Tree Physiol.* 27:929–940.
- Jáuregui, E. 2003. Climatology of Landfalling Hurricanes and Tropical Storms in Mexico. *Atmósfera.* 16:193-204.
- Jobbágy, E. G., R. B Jackson. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecol. Appl.* 10:423-436.
- Jolly, L.W. 2010. *Modern Inorganic Chemistry.* Second ed. Mc Graw-Hill College. pp 46-49.
- Karsten, U., K. Herburger, A. Holzinger. 2016. Living in biological soil crust communities of African deserts-Physiological traits of green algal *Klebsormidium species* (Streptophyta) to cope with desiccation, light and temperature gradients. *J. Plant. Physiol.* 194:2-12.
- Knoepp, J., J. M. Vose. 2002. Quantitative comparison of *in situ* soil CO₂ flux measurement methods. Southern Research Station. 1–11.
- Kruskal, J. B. 1964. Multidimensional scaling by optimising goodness of fit to a nonmetric hypothesis. *Psychometrika.* 29:1-27.
- Lal, R. 2002. Carbon sequestration in dryland ecosystem of West Asia and North Africa. *Land Degrad. Dev.* 13:45-59.
- Lal, R. 2009. Sequestering carbon in soils of arid ecosystems. *Land Degrad. Dev.* 20:441-454.
- Lambin, E. F., B. L. Turner, J. Helmut, S. B. Geist, A. A. Agbola, O. T. John W. Bruce, R. D. Coomes, F. Gunther, F. Carl, P. S. George, K. Homewood, J. Imbernon, R. Leemans, L. Xiubin, E. F. Moran, M. Mortimore, P. S. Ramakrishnan, J. F. Richards, H. Skanes, W. Steffen, G. D. Stone, U. Svedin, T. A. Veldkamp, C. Vogel, J. Xu. 2001. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global. Environ. Chang.* 11:261–269.
- Law, B., F. M. Kelliher, D. D. Baldocchi, P. M. Anthoni, J. Irvine, D. Moore, S. Van Tuyl. 2001. Spatial and temporal variation in respiration in a young ponderosa pine forest during a summer drought. *Agric. For. Meteorol.* 110:27-43.
- Le Quéré, C., M. R. Raupach, J. P. Canadell, G. Marland, L. Bopp, P. Ciais, P. Conway, T. J. Doney, S. C. Feely, R. A. Foster, P. N. Friedlingstein, P. Gurney, K. Houghton, R. A. House, J. I. Huntingford, C. Levy, P. E. Lomas, M. R. Majkut, J. Metzl, N. Ometto, J. P. Peters, G. P. Prentice, I. C. Randerson, J. T. Running, S. W. Sarmiento, J. L. Schuster, U.

- Sitch, S. Takahashi, T. Viovy, N. van der Werf, G. R. Woodward. 2009. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nat. Geosci.* 2:831–836.
- Levin, S. A., 1992. The Problem of Pattern and Scale in Ecology: The Robert H. MacArthur Award Lecture. *Ecology.* 73:1943-1967.
- Mahadevan, P., S. C. Wofsy, D. M. Matross, X. Xiao, A. L. Dunn, J.C. Lin, C. Gerbig, J. W. Munger, V. Y. Chow, E. W. Gottlieb. 2008. A satellite-based biosphere parameterization for net ecosystem CO₂ exchange: Vegetation Photosynthesis and Respiration Model (VPRM) Global. *Biogeochem. Cy.* 22:GB2005.
- Matus, F. J., G. Maire., R. Christian. 2000. Interaction between soil organic matter, soil texture and the mineralization rates of carbon and nitrogen. *Agric. Tec.* 60:112-126.
- Maya, Y., L. Arriaga. 1996. Litterfall and phenological patterns of the dominant overstorey species of a desert scrub community in north-western México. *J. Arid Environ.* 34:23-35.
- Maya, Y., A. López-Cortés, A. Soeldner. 2002. Cyanobacterial Microbiotic Crusts in Eroded Soils of a Tropical Dry Forest in the Baja California Peninsula, Mexico. *Geomicrobiol. J.* 19:505-518.
- Maya, Y., F. R. Venegas, F. J. Manríquez. 2011. Geografía de suelos regional: península de Baja California. En: Krasilnikov P., F. J. Jiménez-Nava, T. Reyna-Trujillo, García-Calderón N.E (eds.). *Geografía de suelos de México.* México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, 2011. pp 217-253.
- Maestre, F. T., M. A. Bowker, Y. Cantón, A. P. Castillo-Monroy, J. Cortina, C. Escolar, A. Escudero, R. Lázaro, I. Martínez. 2011. Ecology and functional roles of biological soil crusts in semi-arid ecosystems of Spain. *J. Arid Environ.* 75:1282-1291
- Maestre, F. T., J. Cortina. 2003. Small-scale spatial variation in soil CO₂ efflux in a Mediterranean semiarid steppe. *Appl. Soil Ecol.* 23:199–209.
- MEA. Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis.* Island Press, Washington, DC.
- Méndez-Barroso, L. A., E. R. Vivoni, C. J. Watts, J. C. Rodriguez. 2009. Seasonal and interannual relation between precipitation, surface soil moisture and vegetation dynamics in the North American monsoon region, *J. Hydrol.* 377:59–70.
- Miller, M. E., R. T. Belote, M. A. Bowker, S. L. Garman. 2011. Alternative states of a semiarid grassland ecosystem: implications for ecosystem services. *Ecosphere.* 2:1-18.

Moncrieff, J. B., Y. Mahli, and R. Leuning. 1996. The propagation of errors in long term measurements of land atmosphere fluxes of carbon and water. *Glob. Change. Biol.* 2:231–240.

Monterroso, A. I., J. D. Gómez. 2003. Delimitación de las Zonas Áridas y Subhúmedas Secas de acuerdo a la Metodología de Thornthwaite Modificado. Comisión Nacional de las Zonas Áridas y Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.

Montaño, N. M., F. Ayala, S. H. Bullock, O. F. Briones, O. R. García, S. García., Y. Maya, Y. Perroni, C. Siebe, Y. T. Tapia, E. Troyo, E. Yépez. 2016. Almacenes y flujos de Carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México: Síntesis y Perspectivas. *Terra Latinoamericana.* 34:39-59.

Mosiño, A. P. 1983. Climatología de las zonas áridas y semiáridas de México. En: *Memorias del simposio: Caracterización, uso actual y potencial de los recursos agrícolas de zonas áridas y semiáridas de México.* (1983, Chapingo, México). Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. pp 9-36.

Návar-Chaidez, J. J. 2008. Carbon fluxes resulting from land-use changes in Tamaulipan thornscrub of northeastern Mexico. *Carbon Balance Manag.* 3:1-11.

Nelson, D. W., L. E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. En: *Page, A. L. R. H. Miller, D. R. Keeney.* (eds.). *Methods of Soil Analysis, Agronomy 9, part 2, 2nd ed.,* Madison, WI. pp 539-577.

Nellemann, C., L. Kullerud, I. Vistnes, B. C. Forbes, G. P. Kofinas, B. P. Kaltenborn, O. Grøn, D. Henry, M. Magomedova, C. Lambrechts, T. S. Larsen, P. J. Schei, and R. Bobiwash. 2001. GLOBIO—Global methodology for mapping human impacts on the biosphere. The Arctic 2050 scenario and global application. United Nations Environmental Programme, Nairobi, Kenya.

NOM-021-SEMARNAT-2000. Especificaciones sobre fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. Diciembre 31, 2002. México D.F.

Noy-Meir, I. 1973. Desert ecosystems: environment and producers. *Annu Rev Ecol Syst* 4:25-41

Olson, J. S, J. A. Watts, L. J. Allison. 1983. Carbon in live vegetation of major world ecosystems. Report ORNL-5862, Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge, TN.

Omernik J. M. 1987. Ecoregions of the Conterminous United States. *Ann. Assoc. Am. Geogr.* 77:118-125.

Ordóñez-Díaz, J. A. 2008. Cómo entender el manejo forestal, la captura de carbono y el pago de servicios ambientales. *Ciencias*. 90:37-42.

Palacios-Prieto, J. L., G. Bocco, A. Velázquez, J. F. Mas, F. Takaki-Takaki, A. Victoria, L. Luna-González, G. Gómez-Rodríguez, J. López-García, M. Palma-Muñoz, I. Trejo-Vázquez, A. Peralta-Higuera, J. Prado-Molina, A. Rodríguez-Aguilar, R. Mayorga-Saucedo, González-Medrano, F. 2000. Condición actual de los recursos forestales en México. Resultados del Inventario Nacional Forestal 2000. *Invest. Geogr.* 43:183-203.

Palm, C., P. Sanchez, S. Ahamed, A. Awiti. 2007. Soils: a contemporary perspective. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 32:99-129.

Parry, M. L., O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden, C. E. Hanson. 2007. IPCC, 2007: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Pérez-Ruíz, E. R., E. A. Yépez, J. Garatuzza-Payán, C. Watts, J. C. Rodríguez, E. R. Vivoni, L. A. Méndez-Barroso. 2010. Carbon dioxide and water vapour exchange in a tropical dry forest as influenced by the North American Monsoon System (NAMS), *J. Arid Environ.* 74:556–563.

Perroni-Ventura, Y. C. Montaña, García-Oliva F. 2010. Carbon-nitrogen interactions in fertility island soil from a tropical semi-arid ecosystem. *Funct. Ecol.* 24:233-242.

Raich, J. W., W. H. Schlesinger. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus* 44B:81-99.

Raich, J. W., C. S. Potter, D. Bhawagati. 2002. Interannual variability in global soil respiration, 1980-1994. *Glob. Chang. Biol.* 8:800-812.

Reitemeier, R. F. 1943. Semimicroanalyses of saline soil solutions. *Ind Eng Chem Anal Ed.* 15:393-402.

Rivera-Aguilar, V., G. Montejano, S. Rodríguez-Zaragoza, A. Durán-Díaz. 2006. Distribution and composition of cyanobacteria, mosses and lichens of the biological soil crust of the Tehuacán Valley, Puebla, México. *J. Arid Environ.* 67:208-225.

Rzedowsky, J. 1978. *Vegetación de México*. Limusa. México. 432 pp.

Rosentreter, R., J. Belnap. 2001. Biological Soil Crust of North America. En: *Biological Soil Crust: Structure, Function and Management*. Belnap, J., O. L. Lange (eds.). *Ecological Studies*. Vol. 150. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

- Sánchez, J., L. Recatalá, M. Goberna. 2004. Secuestro de carbono inorgánico en el suelo: Una primera estimación en el ámbito semiárido Español. *Edafología*. 11:309-317.
- Sakin, E., A. Deliboran, E. D. Sakin., H. Aslan. 2010. Carbon and nitrogen stocks and C:N ratio of Harran Plain Soils. *Not Sci Biol*. 2:104-110.
- Salinas-Zavala, C. A., D. Lluch-Belda, S. Hernández-Vázquez, D. B. Lluch-Cota. 1998. La aridez en el noroeste de México. Un análisis de su variabilidad espacial y temporal. *Atmósfera*. 11:29-44.
- Schimel, D. S. 1995. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Glob. Chang. Biol*. 1:77-91.
- Schlesinger, W. H. 1990. Evidences from chronosequence studies for low carbon-storage potential of soils. *Nature* 348:232-234.
- Schlesinger, W. H. 1997. *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*, 2nd edition. Academic Press: San Diego, CA.
- Schlesinger, W. H. 2002. Inorganic carbon and the global carbon cycle. In Lal R (ed.) *Encyclopedia of Soil Science*. Marcel Dekker, New York. pp. 706-708.
- Schwinning, S., O. Sala. 2004. Hierarchy of responses to resource pulses in and semi-arid ecosystems, *Oecologia*, 141:211-220.
- Segura-Castruita, M. A., P. Sánchez-Guzmán, C. A. Ortiz-Solorio, M. C. Gutiérrez-Castorena. 2005. Carbono orgánico en suelos de México. *Terra Latinoamericana*. 23:21-28.
- SEMARNAT/CONAFOR. 2001. Programa Estratégico Forestal para México 2025, Guadalajara, 189 pp.
- Shi, X. H., X. M. Yang, C. F. Drury, W. D. Reynolds, N. B. McLaughlin, X. P. Zhang. 2012. Impact of ridge tillage on soil organic carbon and selected physical properties of a clay loam in southwestern Ontario. *Soil Till Res*. 120:1-7.
- Schlesinger, W. H. 1997. *Biogeochemistry, an analysis of global change*, 2nd ed. Academic Press, New York.
- Shreve, F., I. L. Wiggins. 1964. *Vegetation and Flora of the Sonoran Desert*. Stanford University Press. Stanford, CA.
- SIAP. 2015. Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en: <http://www.sagarpa.gob.mx/quienesomos/datosabiertos/siap/Paginas/default.aspx> (visitado el 10 de abril del 2015).

Singh, P. B., V. R. Courcelles, M. A. Adams. 2011. Soil Respiration in Future. Global Change Scenarios. En: Soil Health and Climate Change. Singh, P. B., A. L. Cowie, K. Y. Chan. (eds.). Soil Biology Volume 29. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. pp 131-153.

Stevenson F. J. 1986. Cycles of soil. John Wiley & Sons. New York. 380p

Stockmann, U., M. A. Adams, J. W. Crawford, D. J. Field, N. Henakaarchchi, M. Jenkins, B. Miasny, A. B. McBratney, V. de Remy de Courcelles, K. Singh, I. Wheeler, L. Abbott, D. A. Angers, J. Baldock, M. Bird, P. C. Brookes, C. Chenu, J. D. Jastrow, R. Lal, J. Lehmann, A. G. O'Donnell, W. J. Parton, D. Whitehead, M. Zimmermann. 2013. The knows, know unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agric, Ecosyst Environ.* 164:80-99.

Su, Yan-gui., Wu, Lin, Zhang, Yuan-ming. 2012. Characteristics of carbon flux in two biologically crusted soils in the Gurbantunggut Desert, Northwestern China. *Catena.* 96:41–48.

Su, Y. G., L. Wu, Z. B. Zhou, Y. B. Liu, Y. M. Zhang. 2013. Carbon flux in deserts depends on soil cover type: A case study in the Gurbantunggute desert, North China. *Soil Biol. Biochem.* 58:332–340.

Tateno, M., F. S. Chapin. 1997. The logic of carbon and nitrogen interactions in terrestrial ecosystems. *Amer Nat.* 149:723-744.

Thomas, A. D., S. R. Hoon, P. E. Linton. 2008. Carbon dioxide fluxes from cyanobacteria crusted soils in the Kalahari. *Appl. Soil Ecology.* 39:254–263.

Trombulack, S. C., C. A. Frissell. 2000. Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. *Conserv. Biol.* 14:18-30.

Troyo-Diéguez E., F. de Lachica-Bonilla, J. L. Fernández-Zayas. 1990. A simple aridity equation for agricultural purposes in marginal zones. *J. Arid Environ* 19:353-362.

Troyo-Diéguez, E., G. Mercado-Mancera, A. Cruz-Falcón, A. Nieto-Garibay, R. D. Valdez-Cepeda, J. L. García Hernández, B. Murillo-Amador. 2014. Análisis de la sequía y desertificación mediante índices de aridez y estimación de la brecha hídrica en Baja California Sur, noroeste de México. *Invest. Geogr.* pp. 66–81.

UNEP. 2002. Drylands Systems. In: *Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends. Global Environment Outlook 3.* United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.

Valentini, R., G. Matteucci, A. J. Dolman, E. D. Schulze, C. Rebman, E. J. Moors, A. Granier, P. Gross, N. O. Jensen, K. Pilegaard, A. Lindroth, A. Grelle, C. Bernhofer, T.

- Grünwald, M. Aubinet, R. Ceulemans, A. S. Kowalski, T. Vesala, Ü. Rannik, P. Berbigier, D. Loustaud, J. Gudmundsson, H. Thorgeirsson, A. Ibrom, K. Morgenstern, R. Clement, J. B. Moncrieff, L. Montagnani, S. Monerbi, P. G. Jarvis. 2000. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature*. 404:861-865.
- Van Reeuwijk, L.P (ed.). 2002. Procedures for Soil Analysis. International Soil Reference and Information Centre ISRIC-FAO. Technical Paper 9, 6th ed. Wageningen, Netherlands.
- Verduzco, V. S., J. Garatuza-Payán, E. A. Yépez, C.J. Watts, J. C. Rodríguez, A. Robles-Morua, E. R. Vivoni. 2015. Variations of net production due to seasonal precipitation differences in a tropical dry forest of northwest Mexico. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 120:1-14.
- Wang, Y, Li. Y, Ye. X, Chu. Y, Wang. X. 2010. Profile storage of organic/inorganic carbon in soil: From forest to desert. *Sci. Total. Environ.* 408:1925-1931.
- Wang, Q., H. Takahashi. 1999. A land surface water deficit model for an arid and semiarid region: Impact of desertification on the water deficit status in the Loess Plateau, China. *J. Climate*. 12:244–257.
- Webb, E. K., G. I. Pearman, R. Leuning. 1980. Corrections of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 106:85–100.
- Wever, L A., L. B. Flanagan, P. J. Carlson. 2002. Seasonal and interannual variation in evapotranspiration, energy balance and Surface conductance in a northern temperate grassland. *Agr. Forest. Meteorol.* 112:31-49.
- White, R. P., Nackoney, J. 2003. Drylands, People, and Ecosystem Goods and Services: A web-based geospatial analysis. World Resources Institute. Washington DC. 58p.
- Wiggins, I. 1980. Flora of Baja California. Stanford University Press, Stanford, CA.
- Wurl, J., M. A. Imaz-Lamadrid, A. Breceda-Solís, E. Troyo, A. R. Valdéz-Aragón, B. Murillo-Amador. 2011. El problema del agua en zonas áridas: dos ejemplos de Baja California Sur, México. En: Frutos. L, L. Castorena (eds.). *Uso y gestión del agua en las zonas semiáridas y áridas. El caso de la Región de Murcia (España) y Baja California Sur (México)*. Universidad de Murcia. pp 91-110.
- Xie, J., Y. Li, C. Zhai, C. Li, Z. Lan. 2009. CO₂ absorption by alkaline soils and its implication to the global carbon cycle. *Environ. Geol.* 56:953–961.
- Xiang, S. R., A. Doyle, P. A. Holden, J. P. Schimel. 2008. Drying and rewetting effects on C and N mineralization and microbial activity in surface and subsurface California grassland soils, *Soil. Biol. Biochem.* 40:2281–2289.

Yépez, E., R. Scott, W. Cable, D. Williams. 2007. Intraseasonal variation in water and carbon dioxide flux components in a semiarid riparian woodland. *Ecosystems*. 10:1100-1115.

Yuste, J. C., M. Nagy, I. A. Janssens, A. Carrara, R. Ceulemans. 2005. Soil respiration in a mixed temperate forest and its contribution to total ecosystem respiration. *Tree. Physiol.* 25:609–619.

Zhao, S. Q., S. Liu, Z. Li, T. L. Sohl. 2010. A spatial resolution threshold of land cover in estimating terrestrial carbon sequestration in four counties in Georgia and Alabama, USA. *Biogeosciences*. 7:71–80.

Zinck, A. 2005. Suelos, información y sociedad. *Gaceta Ecológica*. Instituto Nacional de Ecología, México. 76:7-22.

Zinck, A. J. 2012. Geopedology. Geomorphology elements for soil studies and natural hazards. Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation. Enschede, The Netherlands.

Zinke, P. J., A. G. Stangenberger, W. M. Post, W. R. Emanuel, J. S. Olson. 1984. Worldwide organic soil carbon and nitrogen data. Report ORNL/TM-8857. Oak Ridge, TN

11. ANEXOS

ANEXO A Descripción de los perfiles de suelo

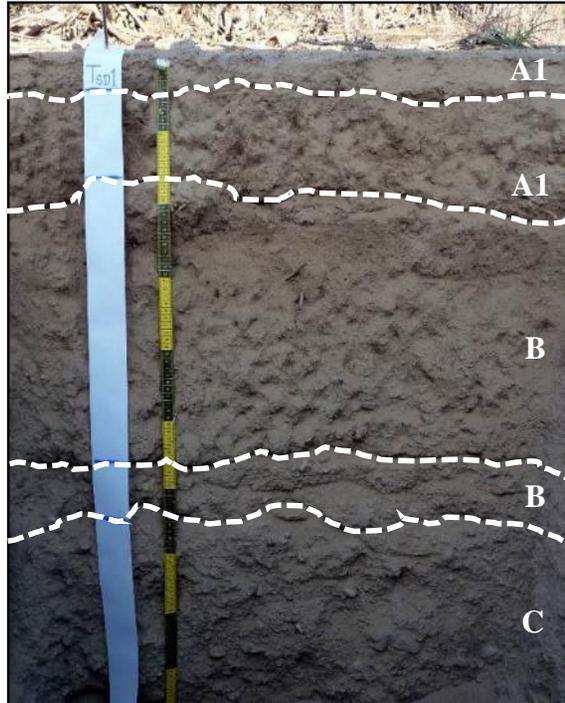


Figura 24. Perfil EBLAC-Torre SDSU.

Punto	1		Localidad: “El Comitán” Estación Biológica Laura Arriaga Cabrera (EBLAC) Torre de flujos SDSU”.		
Ubicación del punto:	12R 557142 mE / 2668690 mN		Datum:	WGS84	
Tipo de vegetación:	Matorral Sarcocaula				
Denominación del suelo WRB 2014: Eutric Cambisol					
	1	2	3	4	5
Horizonte:	A11	A12	B2	B3	C1
Profundidad	0-5 cm	5-17/22 cm	17/22-56 cm	56-64 cm	64 - >100cm
Textura al tacto:	Migajón Arenoso (MA)	Migajón Arenoso (MA)	(MAL)	Migajón Arenoso (MA)	(AM)
Reacción al HCl 10%:	Muy Débil	Muy Débil	Fuerte	Muy Fuerte	
Estructura:	Bloques subangulares	Bloques subangulares	Bloques subangulares	Bloques subangulares	Bloques subangulares
Color en seco:	10YR 6/3 pardo pálido	10YR 6/3Pardo pálido	7.5YR 7/2 gris rosáceo	7.5YR 6/2 gris rosáceo	7.5YR 7/2 gris rosáceo
Color en Húmedo:	10YR 4.5/3 pardo	10YR 4/3 pardo	10YR 5/2 pardo grisáceo	7.5YR 5/2 pardo	7.5YR 4/3 pardo
pH	7.2 neutro	7.3 neutro	7.5 neutro	7.5 neutro	7.6 neutro
% Materia Org.	1.2	0.2	0.3	0.1	0.1
Raíces:	Finas frecuentes	Finas frecuentes y Medias abundantes	Finas y Medias frecuentes; Gruesas escasas	Finas frecuentes	Gruesas escasas
Denominación de horizonte:	OCRICO / CAMBICO				

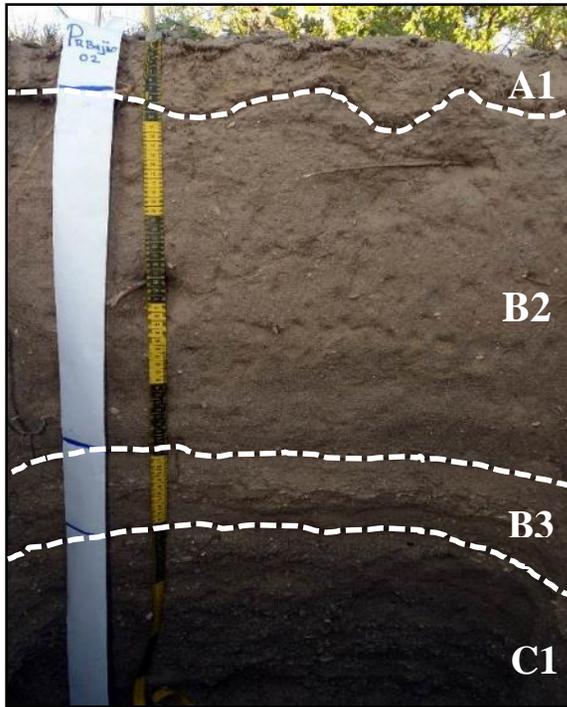


Figura 25. Perfil Rancho El Bajío

Punto	2	Localidad	"Rancho El Bajío"		
Ubicación del punto:	12R 547319 mE / 2662606 mN		Datum:	WGS84	
Tipo de vegetación:	Matorral Sarcocaulé				
Denominación del suelo WRB 2014: Eutric Skeletic Cambisol 4					
Horizonte:	A1	B2	B3	C1	
Profundidad	0-6/9 cm	6/9-50 cm	50-62 cm	62-102 cm	
Textura al tacto:	(MRA)	Migajón Arenoso (MA)	Migajón Arenoso (MA)		
Reacción al HCl 10%:	Muy Débil	Nula	Débil	Muy Débil	
Estructura:	Laminar	Bloques subangulares	Bloques subangulares		
Color en seco:	10YR 6/2.5 pardo pálido	10YR 5.5/2 pardo grisáceo	10YR 6/2 gris ligeramente pardo		
Color en Húmedo:	10YR 3/3 pardo oscuro	7.5YR 4/2 pardo	10YR 4/2 pardo oscuro grisáceo		
pH	7.3 neutro	7.6 neutro	7.6 neutro	7.6 neutro	
% Materia Org.	0.2	0.2	0.3	0.1	
Raíces:	Finas Abundantes	Finas frecuentes, Medias escasas y Gruesas escasas	Finas escasas	Finas escasas	
Denominación de horizonte:	OCRICO				

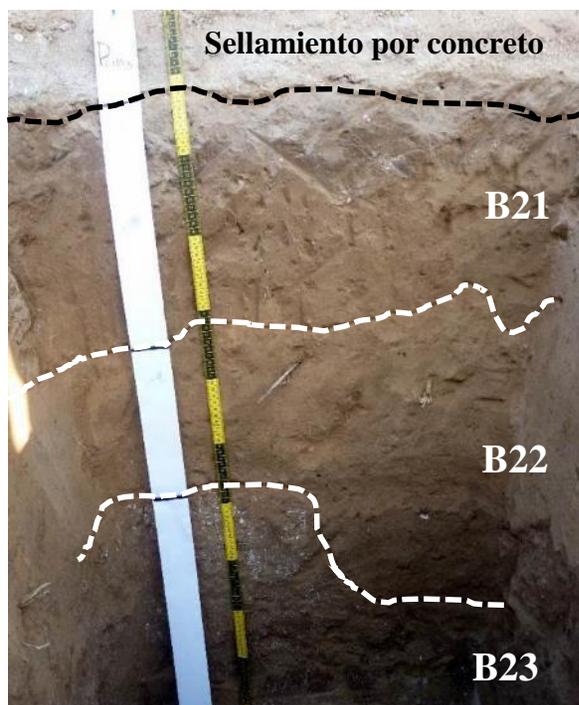


Figura 26. Perfil Plaza Central CIBNOR.

Punto	3		Localidad	"Plaza Central CIBNOR"			
Ubicación del punto:	12R 558316 mE / 2669376 mN			Datum:	WGS84		
Tipo de vegetación:	Urbano-Mezquite en jardinera						
Denominación del suelo WRB 2014: Ekranic Technosol							
	1		2		3		4
Horizonte:	Sellamiento por concreto		B21		B22		B23
Profundidad			12-38/42 cm		38/42-66/91 cm		66/91-110 cm
Textura al tacto:			(MRA)		(MAR)		(MAR)
Reacción al HCl 10%:			Muy Débil		Muy Fuerte		Moderada
Estructura:			Bloques subangulares		Bloques subangulares		Bloques subangulares
Color en seco:	10YR 5.5/3		pardo		10YR 6/3 pardo pálido		10YR 4/3 pardo
Color en Húmedo:	10YR 4/3		pardo		10YR 4/3 pardo		10YR 4/3 pardo
pH			7.15 neutro		7.37 neutro		7.14 neutro
% Materia Org.			0.7		0.5		0.1
Raíces:			Finas escasas		Finas escasas		Finas escasas
Denominación de horizonte:	CAMBICO / CALCICO						

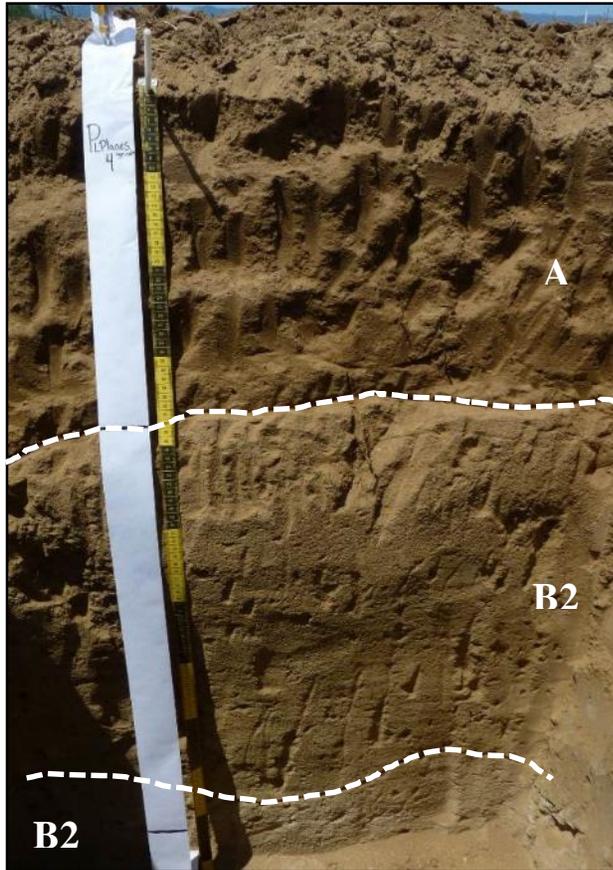


Figura 27. Perfil Agrícola Los Planes.

Punto	4	Localidad:	“Agrícola Los Planes”.	
Ubicación del punto:	12R 606910 mE / 2645750 mN		Datum:	WGS84
Tipo de vegetación:	Terreno barbechado para siembra de frijol			
Denominación del suelo WRB 2014: Hortic Irragric Anthrosol				

	1	2	3
Horizonte:	A1	B21	B22
Profundidad	0-37/44 cm	34/44-91/99 cm	91/99-111 cm
Textura al tacto:	(MAR)	(MRA)	(MRA)
Reacción al HCl 10%:	Nula	Nula	Débil
Estructura:	Bloques subangulares	Masiva	Bloques angulares
Color en seco:	10YR 5/4 pardo amarillento	10YR 5/3 pardo	10YR 6/4 pardo claro amarillento
Color en Húmedo:	10YR 5/3 pardo	10YR 4/3 pardo	10YR 5/4 pardo amarillento
pH	7.1 neutro	7.3 neutro	7.1 neutro
% Materia Org.	1.0	0.1	0.1
Raíces:	Finas escasas	Finas escasas	Finas escasas
Denominación de horizontes:	TERRICO / OCRICO / CAMBICO		

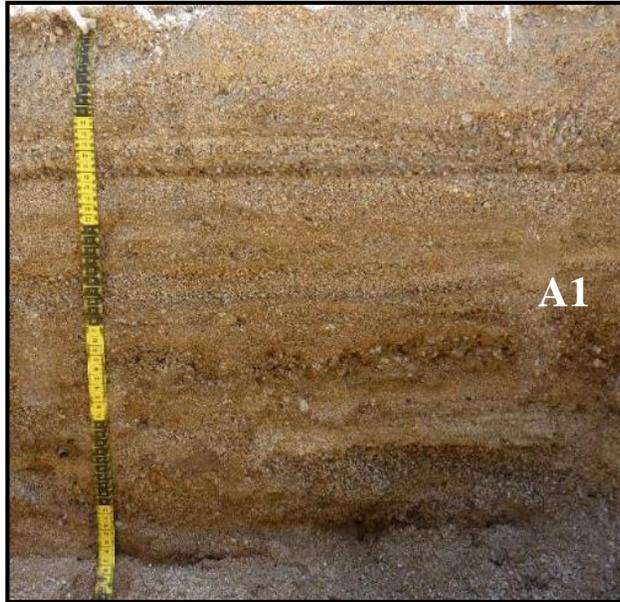


Figura 28. Perfil Carretera a Los Planes.

Punto	5	Localidad:	"Carretera a Los Planes" (abanico aluvial)	
Ubicación del punto:	12R 598438 mE / 2654204 mN		Datum:	WGS84
Tipo de vegetación:	Matorral Sarcocaula			
Denominación del suelo WRB 2014: Eutric Leptic Fluvisol				

	1
Horizonte:	A1
Profundidad	0-57 cm
Textura al tacto:	Gravilla de cuarzo
Reacción al HCl 10%:	Nula
Estructura:	---
Color en seco:	10YR 6/3 pardo pálido
Color en Húmedo:	10YR 5/3 pardo
pH	7.5 neutro
% Materia Org.	1.1
Raíces:	
Denominación de horizontes:	

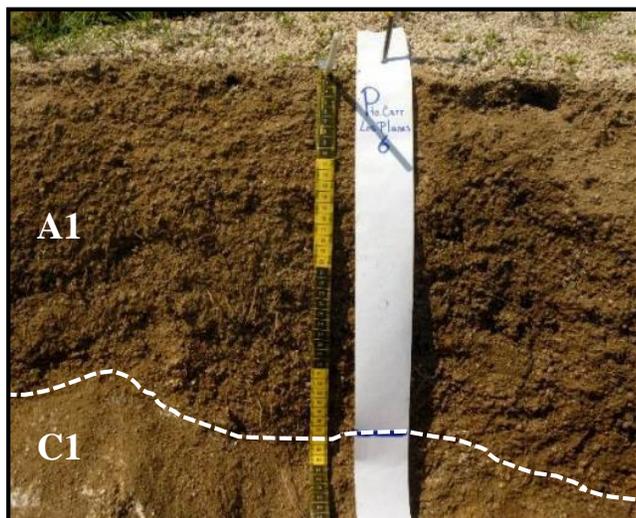


Figura 29. Perfil Sierra La Ventana.

Punto	6	Localidad:	“Sierra La Ventana-Carretera a los Planes”	
Ubicación del punto:	12R 592048 mE / 2656478 mN		Datum:	WGS84
Tipo de vegetación:	Matorral / Selva baja caducifolia			
Denominación del suelo WRB 2014: Leptic Skeletic Regosol				

	1	2
Horizonte:	A1	C1
Profundidad	0-34 cm	34-45 cm
Textura al tacto:	Migajón Arenoso (MA)	Roca madre
Reacción al HCl 10%:	Nula	Nula
Estructura:	Bloques Subangulares	
Color en seco:	10YR 6/3 pardo pálido	
Color en Húmedo:	10YR 5/4 pardo amarillento	
pH	7.5 neutro	
% Materia Org.	1.1	
Raíces:	Finas abundantes	
Denominación de horizonte:	OCRICO / ROCA INTEMPERIZADA	

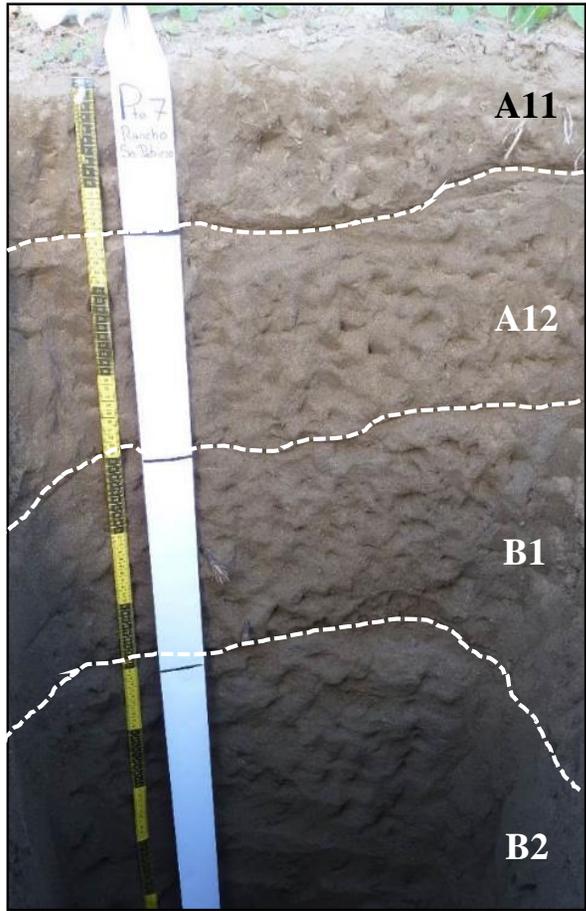


Figura 30. Perfil Rancho San Patricio.

Punto	7	Localidad:	Rancho "San Patricio".	
Ubicación del punto:	12R 568476 mE / 2665963 mN		Datum:	WGS84
Tipo de vegetación:	Cultivo de árboles frutales (Naranjales)			
Denominación del suelo WRB 2014: Hortic Irragric Anthrosol				

	1	2	3	4
Horizonte:	A11	A12	B21	B22
Profundidad	0-11 cm	11-34 cm	34-80 cm	80-110 cm
Textura al tacto:	(MRA)	(MRA)	(MR)	(MRA)
Reacción al HCl 10%:	Nula	Nula	Nula	Muy fuerte
Estructura:	Bloques subangulares	Bloques subangulares	Bloques subangulares	Bloques subangulares
Color en seco:	2.5Y 5/3 pardo oliva claro	2.5Y 5/3 pardo oliva claro	2.5Y 5/3 pardo oliva claro	2.5Y 5/3 pardo oliva claro
Color en Húmedo:	2.5Y 3/2 pardo grisáceo muy oscuro	2.5Y 3.5/3 pardo grisáceo oscuro	2.5Y 3/2 pardo grisáceo muy oscuro	2.5Y 3/2 pardo grisáceo muy oscuro
pH	7.6 neutro	7.7 neutro	7.6 neutro	7.4 neutro
% Materia Org.	1.1	0.2	0.3	0.3
Raíces:	Finas abundantes / Medias escasas	Finas abundantes	Finas escasas/Medias escasas	
Denominación de horizonte:	MOLICO / OCRICO / CAMBICO			

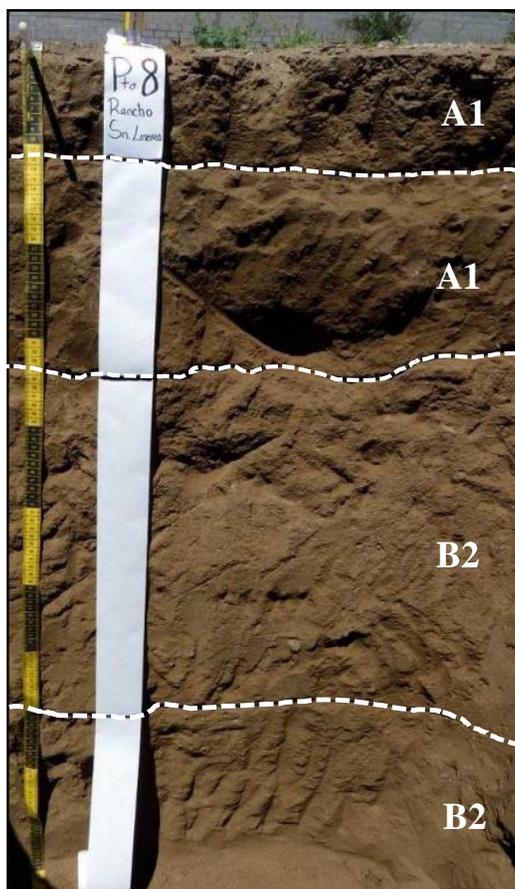


Figura 31. Perfil Rancho San Lorenzo

Punto	8		Localidad:	Rancho "San Lorenzo".	
Ubicación del punto:	12R 568211 mE / 2666500 mN		Datum:	WGS84	
Tipo de vegetación:	Ninguno, nivelado para uso urbano.				
Denominación del suelo WRB 2014: Spolic Technosol					
	1		2		3
	4				
Horizonte:	A11		A12		B21
Profundidad	0-11 cm		11-34 cm		34-80 cm
Textura al tacto:	(MRA)		(MRA)		(MR)
Reacción al HCl 10%:	Nula		Nula		Nula
Estructura:	Bloques subangulares		Bloques subangulares		Bloques subangulares
Color en seco:	2.5Y 5/3 pardo oliva claro		10YR 4/3 pardo		10YR 4/3 pardo
					2.5Y 5/3 pardo oliva claro
Color en Húmedo:	2.5Y 4/4 pardo oliva		10YR 3/3 pardo oscuro		10YR 3/3 pardo oscuro
					2.5Y 3/2 pardo grisáceo muy oscuro
pH	7.4 neutro		6.8 ligeramente ácido		7.31 neutro
% Materia Org.	1.3		0.5		0.4
Raíces:	Finas escasas		Finas escasas		
Denominación de horizonte:	OCRICO / CAMBICO				

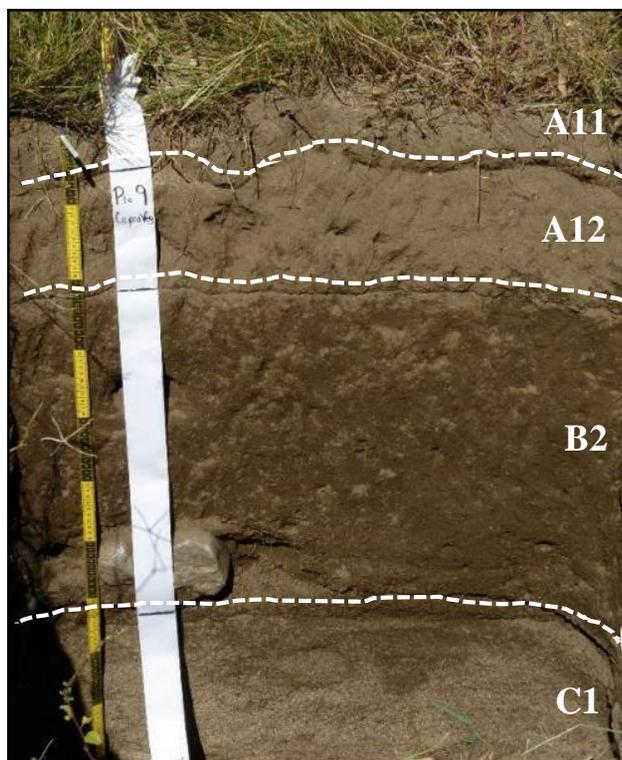


Figura 32. Perfil Agrícola CEPROVEG.

Punto	9		Localidad:	Agrícola "CEPROVEG".				
Ubicación del punto:	12Q 574419 mE / 2627210 mN			Datum:	WGS84			
Tipo de vegetación:	Agrícola (Huerta de Naranjales)							
Denominación del suelo WRB 2014: Hortic Irragric Anthrosol								
	1		2		3		4	
Horizonte:	A11		A12		B2		C1	
Profundidad	0-8 cm		8-23 cm		23-72 cm		72-110	
Textura al tacto:	Arenosa		Arenosa		(MA)		Arenosa	
Reacción al HCl 10%:	Nula		Nula		Nula		Nula	
Estructura:	Suelta		Bloques subangulares		Bloques subangulares		Suelta	
Color en seco:	2.5Y 5/3 pardo oliva claro		2.5Y 5/3 pardo oliva claro		2.5Y 5/3 pardo oliva claro		2.5Y 5/3 pardo oliva claro	
Color en Húmedo:	2.5Y 3/2 pardo grisáceo muy oscuro		2.5Y 4/4 pardo oliva		2.5Y 3/3 pardo oliva oscuro		2.5Y 3/2 pardo grisáceo muy oscuro	
pH	7.8 neutro		7.7 neutro		7.8 neutro		7.7 neutro	
% Materia Org.	0.6		0.6		0.2		0.2	
Raíces:	Finas abundantes y medias abundantes		Finas abundantes y medias escasas		Finas frecuentes y medias frecuentes			
Denominación de horizonte:	OCRICO / CAMBICO							

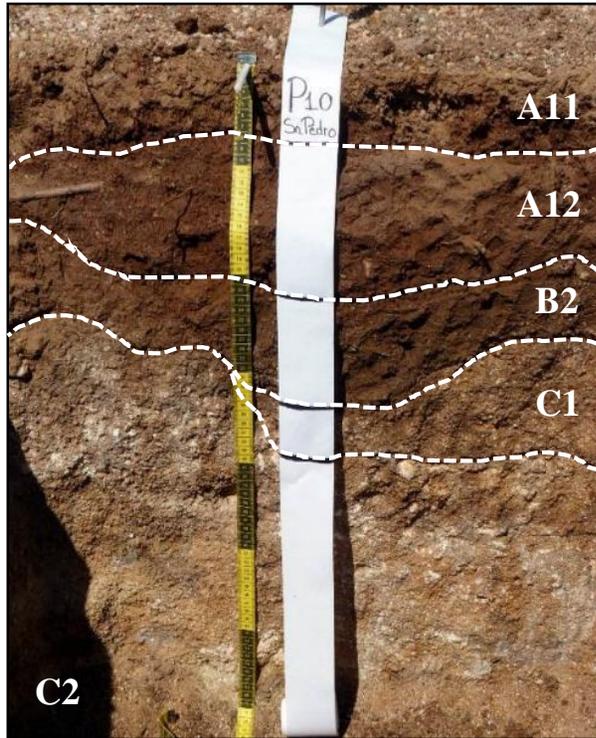


Figura 33. Perfil Lomerío San Pedro.

Punto	10	Localidad:	Lomerío "San Pedro"		
Ubicación del punto:	12Q 574752 mE / 2650175 mN		Datum:	WGS84	
Tipo de vegetación:	Matorral sarcocaulé / Selva Baja				
Denominación del suelo WRB 2014: Leptic Cambic Skeletic Calcisol					
	1	2	3	4	5
Horizonte:	A11	A12	B2	C1	C2
Profundidad	0-7 cm	7-18/22 cm	18/22-26/33	26/33-26/40	40-70 cm
Textura al tacto:	Arcilla	Arcilla	Arcilla	(MAR)	
Reacción al HCl 10%:	Nula	Nula	Muy fuerte	Muy fuerte	
Estructura:	Bloques angulares	Bloques angulares	Bloques angulares	Bloques subangulares	
Color en seco:	5YR 4/4 pardo rojizo	5YR 4/4 pardo rojizo	5YR 4/3 pardo rojizo	5YR 5/4 pardo rojizo	7.5YR 6/3 pardo claro
Color en Húmedo:	5YR 3.5/4 pardo oscuro rojizo	2.5YR 2.5/4 pardo oscuro rojizo	5YR 3/4 pardo oscuro rojizo	7.5YR 5/4 pardo	7.5YR 5/4 pardo
pH	7.4 neutro	7.7 neutro	7.3 neutro	7.2 neutro	7.2 neutro
% Materia Org.	0.8	1.0	0.7	0.5	0.1
Raíces:	Finas abundantes y medias escasas	Finas, medias y gruesas escasas	Medias escasas		
Denominación de horizonte:	OCRICO / CAMBICO / CALCICO				

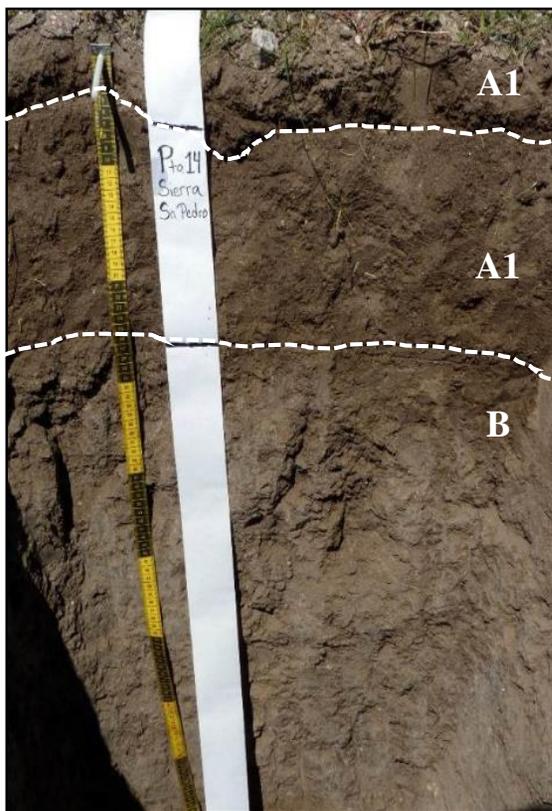


Figura 34. Perfil Lomerío El Novillo-San Pedro.

Punto	11	Localidad:	Lomerío “El Novillo-San Pedro”		
Ubicación del punto:	12Q 566172 mE / 2645005 mN		Datum:	WGS84	
Tipo de vegetación:	Matorral sarcocaulé				
Denominación del suelo WRB 2014: Vertic Endocalcic Phaeozem					
		1	2	3	
Horizonte:		A11	A12	B2	
Profundidad		0-5/11 cm	5/11-27 cm	27-100 cm	
Textura al tacto:		(MRL)	Arcilla	Arcilla	
Reacción al HCl 10%:		Muy fuerte	Muy fuerte	Muy fuerte	
Estructura:		Bloques subangulares	Bloques subangulares	Masiva	
Color en seco:		10YR 4/1 gris oscuro	10YR 5/2 pardo grisáceo	10YR 5/1 gris	
Color en Húmedo:		10YR 4/2 pardo oscuro grisáceo	10YR 3.5/2 pardo grisáceo muy oscuro	10YR 3/2 pardo grisáceo muy oscuro	
pH		7.5 neutro	7.8 neutro	7.2 neutro	
% Materia Org.		0.7	1.0	0.7	
Raíces:		Finas abundantes y Medias frecuentes	Finas abundantes	Finas escasas	
Denominación de horizontes:		MOLICO / VERTICO			



Figura 35. Perfil Sierra Las Cruces.

Punto	12	Localidad:	Sierra "Las Cruces"	
Ubicación del punto:	12R 584140 mE / 2679990 mN		Datum:	WGS84
Tipo de vegetación:	Matorral sarcocaulé			
Denominación del suelo WRB 2014: Nudilithic Hyperskeletal Eutric Leptosol				

Horizonte:	1
	A1
Profundidad	0-4 cm
Textura al tacto:	Arena
Reacción al HCl 10%:	Nula
Estructura:	Granular
Color en seco:	10YR 6/4 pardo ligeramente amarillento
Color en Húmedo:	10YR 4/4 pardo oscuro amarillento
pH	5.9 ácido
% Materia Org.	1.2
Raíces:	Finas abundantes, Medias y gruesas escasas
Denominación de horizontes:	OCRICO



Figura 36. Perfil Sierra Balandra.

Punto	13	Localidad:	Sierra "Balandra"	
Ubicación del punto:	12R 569437 mE / 2690281 mN		Datum:	WGS84
Tipo de vegetación:	Matorral sarcocaulé			
Denominación del suelo WRB 2014: Nudilithic Hyperskeletal Eutric Leptosol				
1				
Horizonte:	A1			
Profundidad	0-3 cm			
Textura al tacto:	Arcilla			
Reacción al HCl 10%:	Nula			
Estructura:	Bloques subangulares			
Color en seco:	10YR 4/3 pardo			
Color en Húmedo:	10YR 4/3 pardo			
pH	6.0 ligeramente ácido			
% Materia Org.	0.9			
Raíces:	Finas abundantes, Medias y gruesas escasas			
Denominación de horizontes:	OCRICO			



Figura 37. Perfil Presa Buena Mujer.

Punto	14	Localidad:	Presa “Buena Mujer”	
Ubicación del punto:	12R 582106 mE / 2663876 mN		Datum:	WGS84
Tipo de vegetación:	Selva Baja Caducifolia / Matorral sarcocaule			
Denominación del suelo WRB 2014: Lithic Hiperskeletal Eutric Leptosol				

	1
Horizonte:	A1
Profundidad	0-9 cm
Textura al tacto:	(AM)
Reacción al HCl 10%:	Nula
Estructura:	Bloques subangulares
Color en seco:	10YR 4/2 pardo oscuro grisáceo
Color en Húmedo:	10YR 3/2 pardo grisáceo muy oscuro
pH	6.9 ligeramente ácido
% Materia Org.	5.0
Raíces:	Finas y Medias abundantes y Gruesas escasas
Denominación de horizontes:	OCRICO

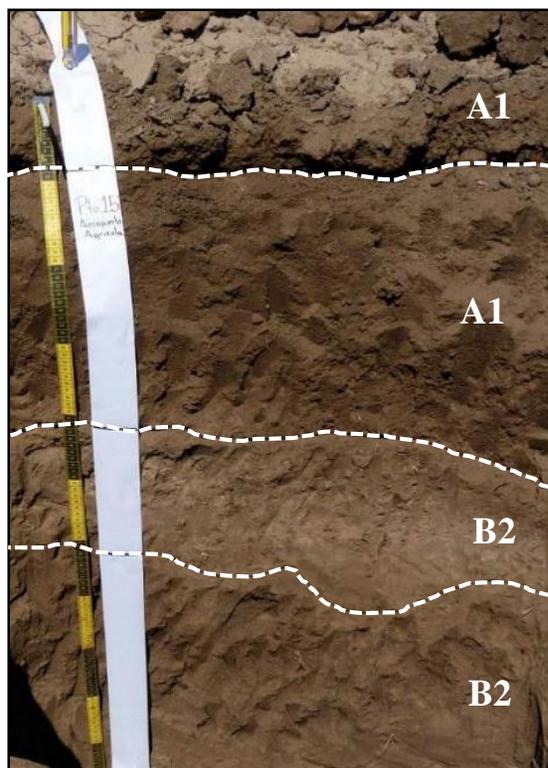


Figura 38. Perfil Agrícola Aeropuerto.

Punto	15	Localidad:	Agrícola "Aeropuerto"		
Ubicación del punto:	12R 563892 mE / 2661257 mN		Datum:	WGS84	
Tipo de vegetación:	Campo de cultivo de hortalizas				
Denominación del suelo WRB 2014: Hortic Irragric Anthrosol					
	1	2	3	4	
Horizonte:	A11	A12	B21	B22	
Profundidad	0-8 cm	8-42 cm	42-62/73 cm	62/73-115 cm	
Textura al tacto:	(MRL)	(MRL)	(MRL)	(MRL)	
Reacción al HCl 10%:	Muy fuerte	Muy fuerte	Muy fuerte	Muy fuerte	
Estructura:	Bloques angulares	Masiva	Bloques angulares	Bloques angulares	
Color en seco:	10YR 5/3 pardo	10YR 5/3 pardo	10YR 5/3 pardo	10YR 5/3 pardo	
Color en Húmedo:	10YR 4/2 pardo oscuro grisáceo	10YR 3/3 pardo oscuro	10YR 3.5/2 pardo muy oscuro grisáceo	10YR 3/2 pardo muy oscuro grisáceo	
pH	7.3 neutro	7.0 neutro	7.3 neutro	7.1 neutro	
% Materia Org.	1.3	1.4	0.6	0.6	
Raíces:	Finas escasas	Finas escasas	Finas y Medias escasas	Finas frecuentes y Medias escasas	
Denominación de horizonte:	OCRICO / CALCICO				

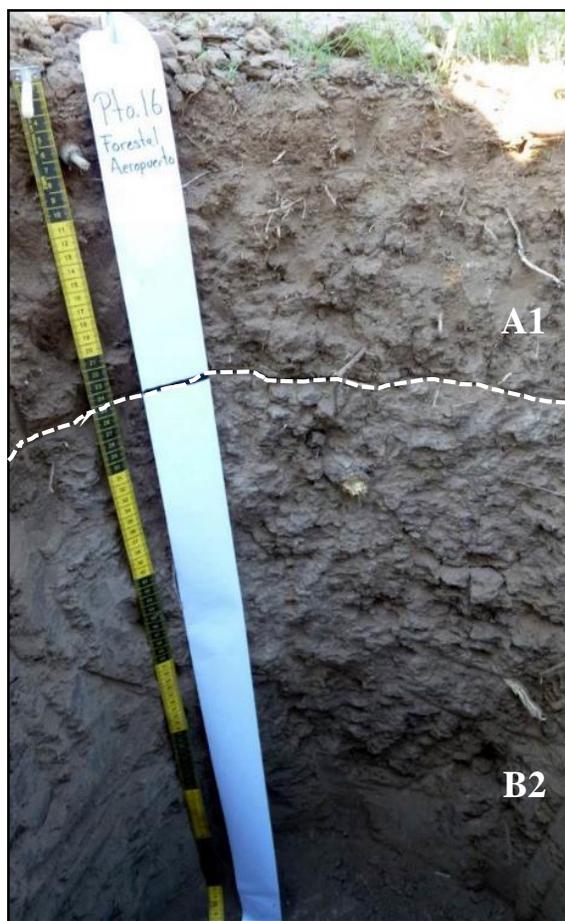


Figura 39. Perfil Forestal Aeropuerto.

Punto	16	Localidad:	Forestal "Aeropuerto"	
Ubicación del punto:	12R 563919 mE / 2661362 mN		Datum:	WGS84
Tipo de vegetación:	Matorral Sarcocule			
Denominación del suelo WRB 2014: Haplic Calcisol				

	1	2
Horizonte:	A1	B2
Profundidad	0-24 cm	24-100 cm
Textura al tacto:	MRL	MRL
Reacción al HCl 10%:	Fuerte	Muy Fuerte
Estructura:	Bloques Subangulares	Bloques angulares
Color en seco:	10YR 5/3 pardo	10YR 5/3 pardo
Color en Húmedo:	10YR 3/3 pardo oscuro	10YR 3/3 pardo oscuro
pH	7.3 neutro	7.1 neutro
% Materia Org.	1.1	1.6
Raíces:	Finas y Medias abundantes y Gruesas escasas	Finas, Medias y gruesas escasas
Denominación de horizonte:	OCRICO / CALCICO	