



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES**

CENTRO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

**MAESTRÍA EN CIENCIAS CON OPCIONES A AGRONÓMICAS O
VETERINARIAS**

TESIS

**VALORACIÓN DEL ALMACÉN DE CARBONO COMO SERVICIO
ECOSISTÉMICO EN LA ZONA ÁRIDA DEL ORIENTE DE AGUASCALIENTES,
MÉXICO.**

PRESENTA

Ing. José Alvarez Reyes

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS AGRONÓMICAS**

TUTOR

Dr. Antonio de Jesús Meraz Jiménez

CO-TUTOR

Dr. Armando López Santos

INTEGRANTES DEL COMITÉ TUTORAL

Dr. Joaquín Sosa Ramírez

Dr. Abraham Díaz Romo

Aguascalientes, Ags. Junio de 2019



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES
CENTRO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

OF. NO. CCA-D-11-15-071-19

DRA. EN ADMÓN. MARÍA DEL CARMEN MARTÍNEZ SERNA
DIRECTORA GENERAL DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
P R E S E N T E.

Por medio de la presente me permito comunicarle a usted que la tesis titulada "VALORACIÓN DE ALMACENES DE CARBONO COMO SERVICIO ECOSISTEMICO EN LA ZONA ORIENTE DE AGUASCALIENTES, MÉXICO", del alumno **JOSÉ ALVAREZ REYES**, egresado de la Maestría en Ciencias Agronómicas y Veterinarias, respeta las normas y lineamientos establecidos institucionalmente para su elaboración y su autor cuenta con el voto aprobatorio de su tutor y comité tutorial.

Sin más por el momento aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
Jesús María, Ags., 14 de junio del 2019
"SE LUMEN PROFERRE"

Dr. Raúl Ortiz Martínez
Decano del Centro



c.c.p. Jefa del Departamento de Control Escolar
c.c.p. Sección de Certificados y Títulos
c.c.p. Secretario Técnico
c.c.p. Estudiante
c.c.p. Archivo

DR. RAÚL ORTIZ MARTÍNEZ

DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

PRESENTE

Por medio del presente como TUTOR-Integrante del comité tutorial designado del estudiante **JOSÉ ALVAREZ REYES** con ID 119492 quien realizó la tesis titulada: **VALORACIÓN DE ALMACENES DE CARBONO COMO SERVICIO ECOSISTEMICO EN LA ZONA ORIENTE DE AGUASCALIENTES, MÉXICO**, y con fundamento en el artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

“SE LUMEN PROFERRE”

Aguascalientes, Ags., a 17 de junio 2019



DR. ANTONIO DE JESÚS MERAZ JIMÉNEZ

TUTOR



c.c.p – Interesado

c.c.p. – Secretaría Técnica del programa de Posgrado



"ENSEÑAR LA EXPLOTACION DE LA TIERRA, NO LA DEL HOMBRE"

UNIVERSIDAD AUTONOMA CHAPINGO
UNIDAD REGIONAL UNIVERISTARIA DE ZONAS ARIDAS

TELS.(01-872)776-01-60, 776-01-90 fax: 776-00-43
BERMEJILLO, DGO.

DEPENDENCIA: **Posgrado**

NUMERO DE OFICIO: **602.25/118**

EXPEDIENTE: **URUZA-CCA, UAA**

ASUNTO: Voto

Bermejillo, Durango, México a 14 de junio, 2019.

Dr. Raúl Ortiz Martínez
Decano del Centro de Ciencias Agropecuarias,
Universidad Autónoma de Aguascalientes
P R E S E N T E

Estimado Dr. Ortiz:

Por medio del presente como CO-TUTOR-Integrante del comité tutorial designado del estudiante **José Álvarez Reyes** con ID 119492, quien realizó la tesis titulada: **Valoración de Almacenes de Carbono como Servicio Ecosistémico en la zona Oriente de Aguascalientes, México**, y con fundamento en el artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **Voto Aprobatorio**, para que él pueda proceder a imprimirla, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E

Dr. Armando López Santos
Profesor-Investigador
Co-Tutor

AL CONTESTAR ESTE OFICIO CITENSE
LOS DATOS CONTENIDOS EN EL CUADRO
DEL ANGLULO SUPERIOR DERECHO

C.c.p c. *José Álvarez Reyes*.- Alumno de Posgrado del CCA-UAA/Interesado

Archivo/als

DR. RAÚL ORTIZ MARTÍNEZ

DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

PRESENTE

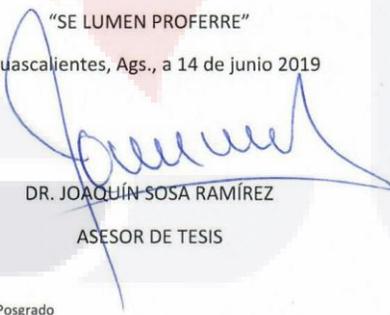
Por medio del presente, en mi calidad de ASESOR DE TESIS-Integrante del comité tutorial designado del estudiante **JOSÉ ALVAREZ REYES** con ID 119492 quien realizó la tesis titulada: **VALORACIÓN DE ALMACENES DE CARBONO COMO SERVICIO ECOSISTEMICO EN LA ZONA ORIENTE DE AGUASCALIENTES, MÉXICO**, y con fundamento en el artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

“SE LUMEN PROFERRE”

Aguascalientes, Ags., a 14 de junio 2019


DR. JOAQUÍN SOSA RAMÍREZ

ASESOR DE TESIS

c.c.p – Interesado

c.c.p. – Secretaría Técnica del programa de Posgrado



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

DR. RAÚL ORTIZ MARTÍNEZ

DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

PRESENTE

Por medio del presente como ASESOR DE TESIS, integrante del comité tutorial designado del estudiante **JOSÉ ALVAREZ REYES** con ID 119492 quien realizó la tesis titulada: **VALORACIÓN DE ALMACENES DE CARBONO COMO SERVICIO ECOSISTEMICO EN LA ZONA ORIENTE DE AGUASCALIENTES, MÉXICO**, y con fundamento en el artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"SE LUMEN PROFERRE"

Aguascalientes, Ags., a 14 de junio 2019

DR. ABRAHAM DÍAZ ROMO

ASESOR DE TESIS

c.c.p – Interesado

c.c.p. – Secretaría Técnica del programa de Posgrado



AGRADECIMIENTOS

A través de este pequeño apartado quiero expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que han sido parte de este trabajo, ya sea directa o indirectamente me han enseñado a crecer más como persona y como profesionista.

Primero agradezco a la Universidad Autónoma de Aguascalientes por la confianza brindada para realizar mis estudios de posgrado, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico en esta etapa, al Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV campus Irapuato) por el apoyo en mi estancia.

Muy especialmente al Dr. **Antonio de Jesús Meraz Jiménez** mi tutor y director de tesis, por la acertada orientación brindada y la confianza depositada para la realización de este proyecto de investigación.

Agradezco al **Dr Armando López Santos** mi co-tutor, por los conocimientos y consejos aportados, así como por demostrarme la capacidad y habilidades que puedo desarrollar en mi vida profesional, sus aportaciones en este trabajo han sido de suma importancia.

Al **Dr. Joaquín Sosa Ramírez** mi asesor de tesis, por sus oportunas aportaciones a lo largo del posgrado, por la colaboración teórica y el desarrollo de nuevas habilidades.

Al **Dr. Abraham Díaz Romo** mi asesor de tesis, por la colaboración en la parte técnica, el apoyo en aspectos de revisión metodológica.

Al **M. en C. Jorge Alejandro Torres González** por compartir sus conocimientos en enfoques digitales, por su colaboración en análisis y obtención de muestras, por el apoyo brindado durante el posgrado, por ser un pilar dentro de mi formación profesional, por su amistad, así como el sostén para desarrollar mis habilidades y capacidades.

A la **M. en C. Araceli Guadalupe Mendieta Vázquez** por su apoyo brindado durante el posgrado, tanto en laboratorio como en campo, por sus aportaciones en la toma de muestras y conocimientos en procesos metodológicos, así como su amistad.

Al **Ing. Fernando Rufino Rodríguez** por su amistad y colaboración dentro del posgrado, así como por su disponibilidad para la asesoría a lo largo del proyecto.

A la **M. en C. Liliana Barba de Alba** por compartirme sus conocimientos en el análisis de muestras, y por el apoyo en la realización del trabajo de laboratorio.

Al técnico **Arturo de Luna** por su apoyo durante el posgrado en el análisis de muestras en laboratorio.

Al **Ing. Marco Meraz** por su colaboración en mi estancia de investigación, tanto en la parte técnica como la parte práctica.

A mis amigos (as) de la maestría: Sergio, Salvador, Alberto, Alejandra, Elizabeth, Karla, Paulina, Melisa y Socorro, que me apoyaron con sus conocimientos, experiencia y su compañía ya que con ellos compartí los mejores momentos del posgrado.

A mi familia que me brindo apoyo durante el posgrado, en especial a mis padres y a mi esposa por acompañarme en este proceso, al formar parte incondicional en la motivación constante para seguir adelante.



DEDICATORIAS

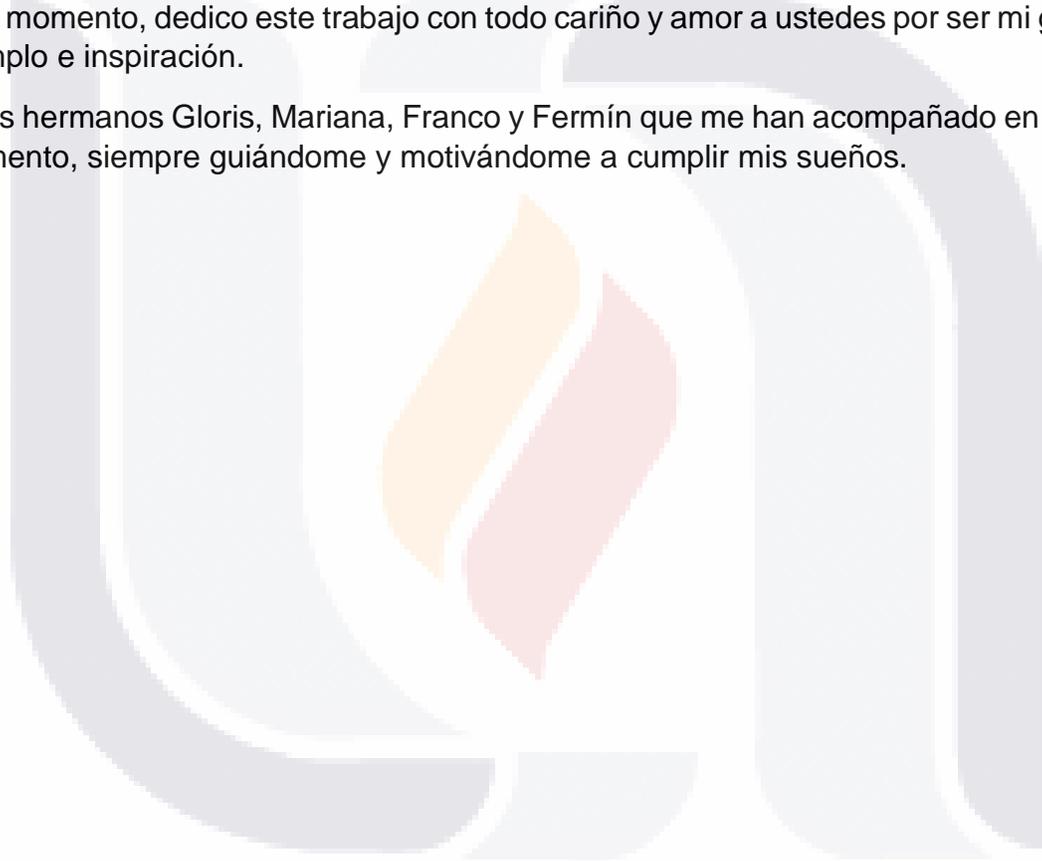
Doy gracias y dedico este trabajo...

A Dios por concederme la oportunidad de realizar este trabajo, por todo mi camino recorrido para llegar a esta instancia.

A mi esposa Annel por todo tu amor, comprensión y paciencia durante este tiempo, por toda la bondad e inspiración a seguir desarrollándome, gracias por toda la motivación que has reflejado en mi día con día.

A mis padres Francisco y Gloria por ser el pilar dentro de mi formación, por enseñarme las bondades de la vida y por la motivación que me han brindado en todo momento, dedico este trabajo con todo cariño y amor a ustedes por ser mi guía, ejemplo e inspiración.

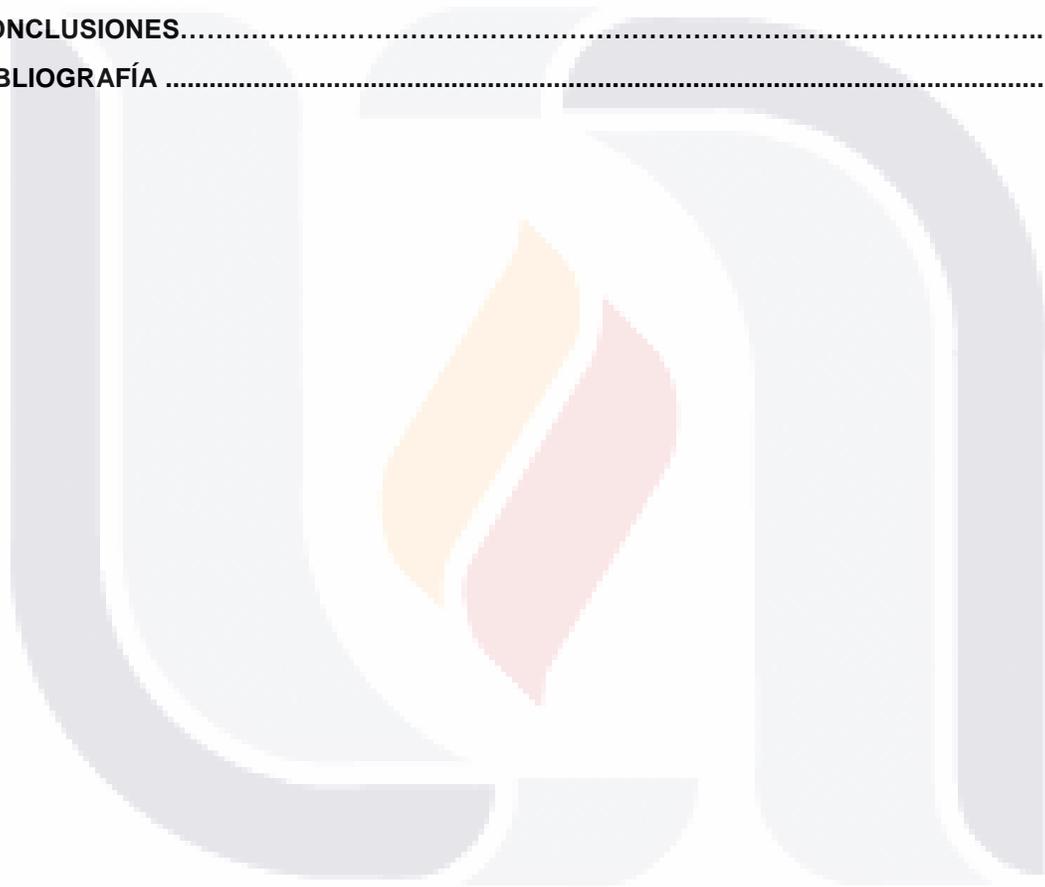
A mis hermanos Gloris, Mariana, Franco y Fermín que me han acompañado en todo momento, siempre guiándome y motivándome a cumplir mis sueños.



INDICE GENERAL

INDICE GENERAL.....	1
INDICE DE TABLAS Y FIGURAS	3
ACRÓNIMOS	5
RESUMEN.....	7
ABSTRACT	8
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1 SITUACIÓN ACTUAL DE ZONAS ÁRIDAS EN EL MUNDO.	9
1.1.1 <i>Pastizales</i>	10
1.1.2 <i>Situación en México</i>	11
1.2 TIPO Y USO DE SUELOS	12
1.2.1 <i>Conversión de suelo</i>	13
1.2.2 <i>Pastoreo</i>	13
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
3. JUSTIFICACIÓN.....	14
4. MARCO TEÓRICO	16
4.1 EL SUELO	16
4.1.1 <i>Condiciones favorables al suelo</i>	17
4.1.2 <i>Propiedades del suelo</i>	18
4.1.3 <i>Beneficios del Carbono orgánico en los suelos</i>	20
4.1.4 <i>Degradación del suelo</i>	20
4.2 RECURSOS NATURALES	23
4.3 SERVICIO ECOSISTÉMICO.....	23
4.3.1 <i>La clasificación de los Servicios Ecosistémicos</i>	24
4.3.2 <i>Estado de Aguascalientes como proveedor de SE</i>	25
4.4.1 <i>Carbono Orgánico</i>	27
4.4.2 <i>Emisiones de CO₂</i>	27
5. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	31
5.1 OBJETIVO GENERAL.....	31
5.1.1 <i>Objetivos particulares</i>	31
5.2 HIPÓTESIS GENERAL.....	31
5.2.1 <i>Hipótesis particulares</i>	31
6. MATERIALES Y MÉTODOS	32
6.2 SELECCIÓN DE SITIOS DE MUESTREO	34
6.3 RECORRIDO DE CAMPO Y MUESTREOS DE SUELO	34
6.4 ANÁLISIS DE LABORATORIO.....	36
6.4.1 <i>Análisis del Carbono</i>	39
6.4.1 OBTENCIÓN DE BIOMASA MICROBIANA.....	42
6.5 EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE CAPTURA DE CARBONO EN VEGETACIÓN	46
6.5.1 <i>Cambio de la vegetación en bosques y en otros tipos de vegetación leñosa</i>	48
6.5.2 <i>Emisiones de CO₂ procedentes de la conversión de bosque y praderas</i>	52
6.5.3 <i>Emisiones de gases traza distintos al CO₂, derivados de la quema in situ</i>	54

6.5.4 Mapa de estimación de Carbono en biomasa aérea..... 55
6.6 REALIZACIÓN DE MAPA DIGITAL DE CARBONO ORGÁNICO EN EL SUELO..... 56
 6.6.1 *Obtención de las covariables para el mapeo digital..... 57*
 6.6.2 *Uso de suelo y vegetación 61*
 6.6.3 *Clima 62*
7. RESULTADOS..... 63
 7.1 DENSIDAD APARENTE 63
 7.2 UNIDADES DE SUELO EN LA ZONA DE ESTUDIO 64
 7.3 CONTENIDO DE CARBONO EN EL SUELO 65
 7.5 REALIZACIÓN DE MAPEO DIGITAL DE CARBONO ORGÁNICO EN EL SUELO. 73
 7.5.1 *Realización de mapas con covariables..... 76*
8. CONCLUSIONES.....79
9. BIBLIOGRAFÍA 81



INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

FIGURA 1. DISTRIBUCIÓN DE LAS ZONAS ÁRIDAS EN EL MUNDO.	9
FIGURA 2. PRINCIPALES TIPOS DE SUELOS EN LAS ZONAS ÁRIDAS EN EL MUNDO.	10
FIGURA 3. DEGRADACIÓN DEL SUELO EN LA REPÚBLICA MEXICANA (ESCALA 1:250 000)	11
FIGURA 4 BIODIVERSIDAD DEL SUELO Y CARBONO ORGÁNICO EN LOS SUELOS.....	17
FIGURA 5. ESQUEMA DEL PERFIL DEL SUELO Y SUS HORIZONTES QUE LO CONFORMAN	19
FIGURA 6. SUPERFICIE AFECTADA POR PROCESOS DE DEGRADACIÓN DEL SUELO EN MÉXICO	21
FIGURA 7. CONJUNTO DE INDICADORES PARA ESTIMAR DEGRADACIÓN DE TIERRAS Y DESERTIFICACIÓN.	22
TABLA 1 PAÍSES CON MAYOR CONTRIBUCIÓN DE EMISIONES DE CO ₂ POR ESQUEMA DE COMBUSTIBLE FÓSIL EN 2009.	26
TABLA 2. EMISIONES DE LA CATEGORÍA USCUS (GG DE CO ₂ EQ.)	28
FIGURA 8. LOCALIZACIÓN DE ASIENTOS, EL LLANO Y TEPEZALÁ	32
FIGURA 9. TIPO DE VEGETACIÓN EN ASIENTOS, EL LLANO Y TEPEZALÁ	33
FIGURA 10. SUELOS DOMINANTES EN ASIENTOS, EL LLANO Y TEPEZALÁ.....	34
FIGURA 11. MAPA DE COBERTURA VEGETAL.....	35
FIGURA 12. SITIOS DE MUESTRAS REALIZADAS Y PERFILES OBTENIDOS DE LA CARTA EDAFOLÓGIA II DE INEGI (2010)	36
FIGURA 13. MOLINO IKA MF 10 CLASSIC.....	37
FIGURA 14. SOBRES DE LA MUESTRA MOLIDA.	38
FIGURA 15 PESADO Y ENCAPSULADO DE LAS MUESTRAS DE SUELO, MEDIANTE EL MANUAL DE PERKIN ELMER 2400 SERIES II.	39
FIGURA 16. EQUIPO DE DUMAS PARA DETERMINAR EL NITRÓGENO, (DUMAS 1830).....	40
FIGURA 17. EJEMPLO DE LA TÉCNICA DE LA CROMATOGRFÍA FRONTAL.....	41
FIGURA 18. PRE-INCUBACIÓN DEL SUELO.	43
FIGURA 19. MÉTODO PARA FUMIGACIÓN DEL SUELO CON CLOROFORMO LIBRE DE ETANOL.....	44
FIGURA 20. TITULACIÓN DE NAOH PARA OBTENER EL CONTENIDO DE C.	45
TABLA 3. SUPERFICIE PARA CADA TIPO DE VEGETACIÓN Y OTROS CONCEPTOS	47
TABLA 4. HOMOLOGACIÓN DE LOS GRUPOS DE VEGETACIÓN PARA EL CÁLCULO DE CAMBIOS DE BIOMASA DE BOSQUES Y OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN LEÑOSA.	49
FIGURA 21. MAPA DE HOMOLOGACIÓN CON DIFERENTES COBERTURAS.....	51
FIGURA 22 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL POR GRUPOS DE VEGETACIÓN Y OTROS USOS EN AGUASCALIENTES	53

TABLA 5. COVARIABLES EMPLEADAS PARA LA ELABORACIÓN DEL MAPA DIGITAL DE C.
 59

FIGURA 23. MAPA DE PENDIENTE DE AGUASCALIENTES CORTE DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN..... 60

FIGURA 24. MAPA DE ASPECTO DE AGUASCALIENTES, CORTE REALIZADO CON SAGA GIS DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN..... 60

FIGURA 25. DIAGRAMA DE CAJA Y BRAZOS DEL COMPORTAMIENTO DE LA DENSIDAD APARENTE RESPECTO A LA UNIDAD DE SUELO.....64

TABLA 6. CONTRIBUCIÓN DE LAS UNIDADES DE SUELO CON LOS TIPOS DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS QUE OFRECEN. 65

TABLA 7. MEDIAS DEL COS CON RESPECTO A LAS UNIDADES DE SUELO EN LA ZONA DE ESTUDIO..... 67

FIGURA 26. PROMEDIO DEL ALMACÉN DE CARBONO ORGÁNICO CON RELACIÓN A LA UNIDAD DE SUELO (TON HA⁻¹)..... 67

TABLA 8. COBERTURA VEGETAL DE LOS SITIOS DE MUESTREO PARA LA OBTENCIÓN DE C-BM 68

TABLA 9. BIOMASA MICROBIANA EN SUELOS DE LA REGIÓN..... 69

FIGURA 27. COMPARACIÓN DE MÉTODOS PARA CO Y BM..... 70

TABLA 10. USO DEL SUELO CLASIFICADO E IMPORTANCIA RELATIVA DE LA ZONA ORIENTE DE AGUASCALIENTES..... 70

FIGURA 28 BALANCE EN KILOTONELADAS DE CARBONO (KT DE C) PARA CAMBIOS DE BIOMASA Y OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN LEÑOSA PARA LOS DOS GRUPOS DE VEGETACIÓN CLASIFICADOS DE LA ZONA ORIENTE DE AGUASCALIENTES..... 71

TABLA 11. CONTENIDO DE C EN LOS DIFERENTES TIPOS DE VEGETACIÓN..... 72

FIGURA 29. CONTENIDO DE CARBONO EN BIOMASA AÉREA PARA LA ZONA DE ESTUDIO. 73

FIGURA 30. DISTRIBUCIÓN DE LOS DATOS DE CARBONO ORGÁNICO..... 74

FIGURA 31. MAPA DE PREDICCIÓN DE CARBONO ORGÁNICO PARA LA ZONA ÁRIDA DE ORIENTE DE AGUASCALIENTES..... 77

FIGURA 32 MAPA DE PREDICCIÓN DE CARBONO ORGÁNICO CON MUESTRAS PROPIAS PARA LA ZONA ÁRIDA DE ORIENTE DE AGUASCALIENTES 78

ACRÓNIMOS

ASF	Alaska Satellite Facility
COS	Carbono Orgánico del Suelo
C	Carbono
CH ₄	Metano
cm	Centímetros
CCA	Centro de Ciencias Agropecuarias
DA	Densidad Aparente
CO ₂	Dióxido de Carbono
FAO	Food an Agriculture Organization
GEI	Gases de Efecto Invernadero
Gg	Giga toneladas
°C	Grados Centígrados
ha	Hectárea
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IEF y SA	Inventario Estatal Forestal y de Suelo de Aguascalientes
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ITPS	Intergovernmental Technical Panel on Soils
Kt	Kilotoneladas
MO	Materia Orgánica
µm	Micrómetros
mm	Milímetros
MEA	Millennium Ecosystem Assessment
MS	Materia Seca
NO ₂	Dióxido de Nitrógeno
NO _x	Óxidos de Nitrógeno
PEACC	Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático
ONU	Organización de las Naciones Unidas

RN	Recursos Naturales
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
SE	Servicios Ecosistémicos
SMA	Secretaría del Medio Ambiente
RF	Random Forest



RESUMEN

Los suelos proveen servicios ambientales indispensables para asegurar el mantenimiento de la biodiversidad, alimentación y la regulación hidrológica. El flujo de carbono (C) en las regiones áridas y semiáridas de México está controlado por la estacionalidad y las lluvias anuales. Se reporta que pequeños eventos de lluvia pueden tener consecuencias para las pérdidas de carbono del suelo en los ecosistemas semiáridos. El objetivo del presente estudio fue valorar almacenes carbono en suelo y planta distribuidos en la zona árida del oriente de Aguascalientes en su función como servicio ecosistémico, se realizó en los municipios del Llano, Asientos y Tepezalá, presenta tres capítulos; el primero fue evaluar la condición de suelo, se calculó el contenido de carbono orgánico en los primeros 30 cm, en este mismo capítulo se realizó el cálculo de Carbono en la Biomasa Microbiana (C-BM), En el segundo capítulo se determinaron las emisiones o remociones de C y de CO₂ debido a cambios en la vegetación con metodología del IPCC, así mismo se creó un mapa de estimación de C en la biomasa aérea. En el tercer capítulo se realizó un mapa digital de estimación de carbono orgánico en la zona de estudio con un software estadístico. El promedio de contenido de COS para las muestras analizadas fue de 22.7651 ton ha⁻¹. En el C-BM los valores fluctuaron entre 121.66 y 316.86 mgC kgss⁻¹, siendo la vegetación un factor importante para dichos valores. Se estimó que de la Vegetación Leñosa Sujeta a Manejo Forestal (VSMF) mantuvo una captura de carbono (-42.371/ 41.559 KtC) mayor que la liberación de carbono, por lo que el balance neto en la función captura-emisión fue de -0.812 kt de C, para la estimación del carbón en la biomasa aérea los valores fluctuaron entre 0.2 y 37.2 ton ha⁻¹. La elaboración del mapa digital de CO arrojó valores que fluctuaron entre 0 y 57.8 ton ha⁻¹, esto se debió al correlacionar distintas covariables de formación de suelo y climáticas. Este estudio revela que la zona árida del oriente de Aguascalientes ha sido subestimada en cuanto a su valor como servicio ecosistémico, se necesitan establecer políticas públicas para la conservación y el mantenimiento de la misma.

ABSTRACT

Soils provide essential environmental services to ensure the maintenance of biodiversity, food and hydrological regulation. The flow of carbon (C) in arid and semi-arid regions of Mexico is controlled by seasonality and annual rainfall. It is reported that small rainfall events can have consequences for soil carbon losses in semi-arid ecosystems. The objective of the present study was to evaluate carbon stores in soil and plant distributed in the arid zone of the east of Aguascalientes in its function as an ecosystem service, it was made in the municipalities of Llano, Asientos and Tepezalá, three chapters are presented; the first one was to evaluate the soil condition, the organic content was calculated in the first 30cm, in this same chapter the calculation of Carbon in the Microbial Biomass (C-MB) was carried out, in the second chapter it was they determined the emissions or removals of C and CO₂ due to changes in the vegetation incorporating the IPCC methodology, likewise an estimation map of C was created in the aerial biomass. In the third chapter, a digital map of organic carbon estimation was made in the study area with statistical software. The average content of COS for the analyzed samples was 22.7651 ton ha⁻¹. In the C-BM the values fluctuated between 121.66 and 316.86 mgC kgss⁻¹, with vegetation being an important factor for these values. It was estimated that the Forest Vegetation Subject to Forest Management (VSMF) maintained a carbon capture (-42,371 / 41,559 KtC) greater than the release of carbon, so that the net balance in the capture-emission function was -0,812 kt of C, for the estimation of the carbon in the aerial biomass the values fluctuated between 0.2 and 37.2 ton ha⁻¹. The elaboration of the digital CO map showed values that fluctuated between 0 and 57.8 ton ha⁻¹, this was due to the correlation of different covariables of soil and climatic formation. This study reveals that the arid zone of the east of Aguascalientes has been underestimated in terms of its value as a systemic ecosystem service, it is necessary to establish public policies for the conservation and maintenance of it.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 SITUACIÓN ACTUAL DE ZONAS ÁRIDAS EN EL MUNDO.

Cerca de un 47% de la superficie del planeta es considerada zona árida, aunque los límites no están bien definidos, las zonas áridas se consideran como aquellas donde la precipitación pluvial es menor a la pérdida que se da por evaporación y transpiración. El déficit de agua es el factor que más influye para catalogar una zona como árida, dando como resultado la baja productividad en este tipo de zonas, debido al periodo corto de agua, el poco intercambio de nutrientes la erosión de los suelos. Con esto no solo se afecta a la generación de suelos si no a sus pobladores, que con estas sequías son severamente afectados (FAO, 2012)

La distribución de las zonas áridas a través del mundo se encuentra entre los 20° y 35° de latitud ocupando el 47.2% de la superficie de la tierra equivalente a 6 310 000 000 ha en todos los continentes, en más de 110 países (figura 1)

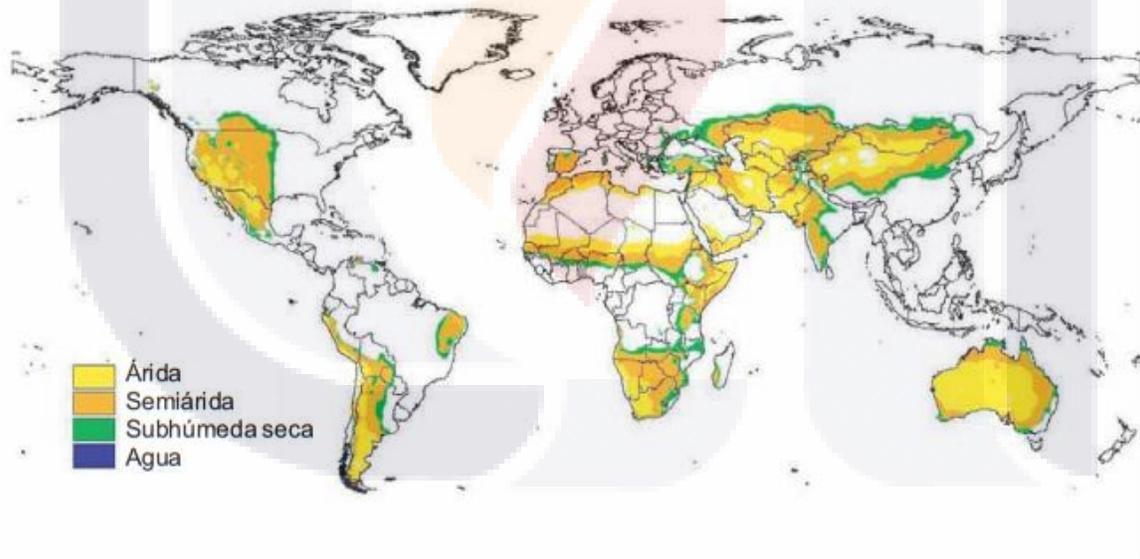


Figura 1. Distribución de las zonas áridas en el mundo.

Fuente: FAO (2002)

1.1.1 Pastizales

Los suelos de pastizal ocupan cerca del 40% de la superficie del planeta, ejercen un papel fundamental en el carbono orgánico del suelo (COS) tanto en almacenamiento como en el ciclo de nutrientes, los pastizales que desarrollan en las zonas áridas cubren gran superficie de África, Australia, Asia y Sudamérica, siendo estos ecosistemas los que gestionen el pastoreo interactuando con la producción de producción primaria de biomasa tanto en suelo como en planta (Orr & Phelps, 2013)

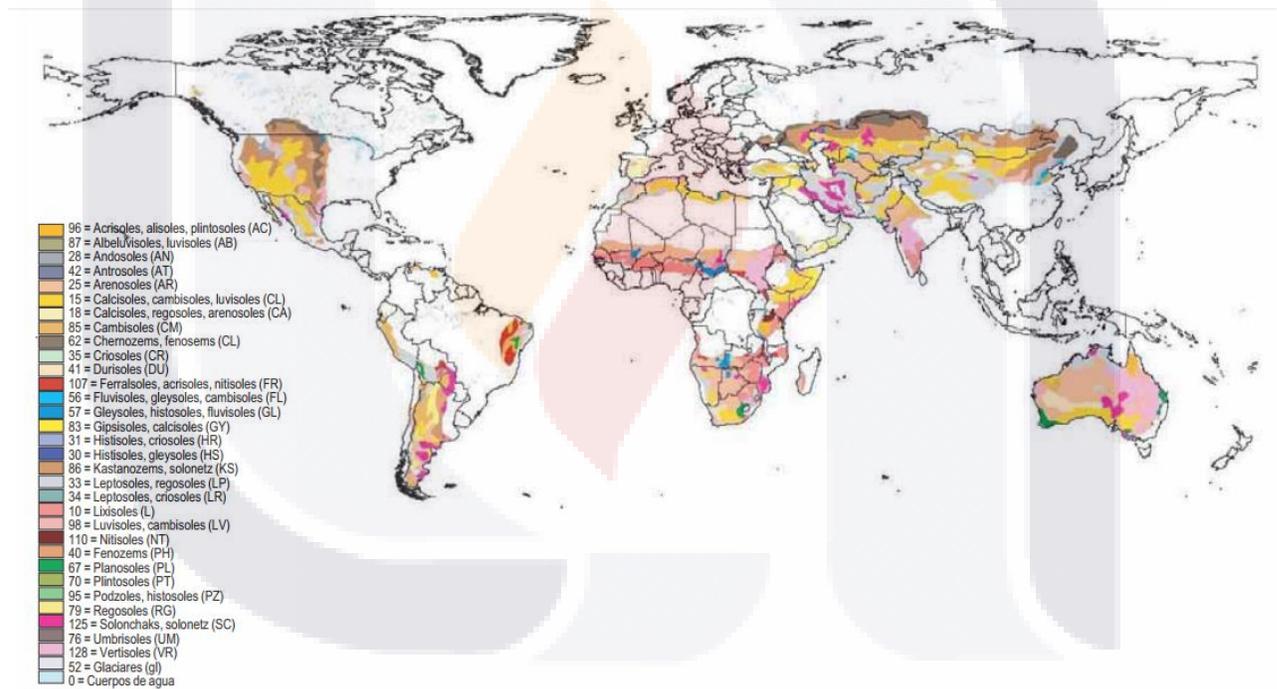


Figura 2. Principales tipos de suelos en las zonas áridas en el mundo.
Fuente: Mapa mundial de Recursos del suelo FAO/EC/ISRIC, 2003

1.1.2 Situación en México

En México se considera que un 60% de la superficie territorial son ecosistemas áridos y semiáridos (figura 3), en estos ecosistemas, la producción, la respiración del suelo y la descomposición de hojarasca están determinadas por la variabilidad de la precipitación, aunque la descomposición de la hojarasca también depende de la radiación solar y la temperatura.

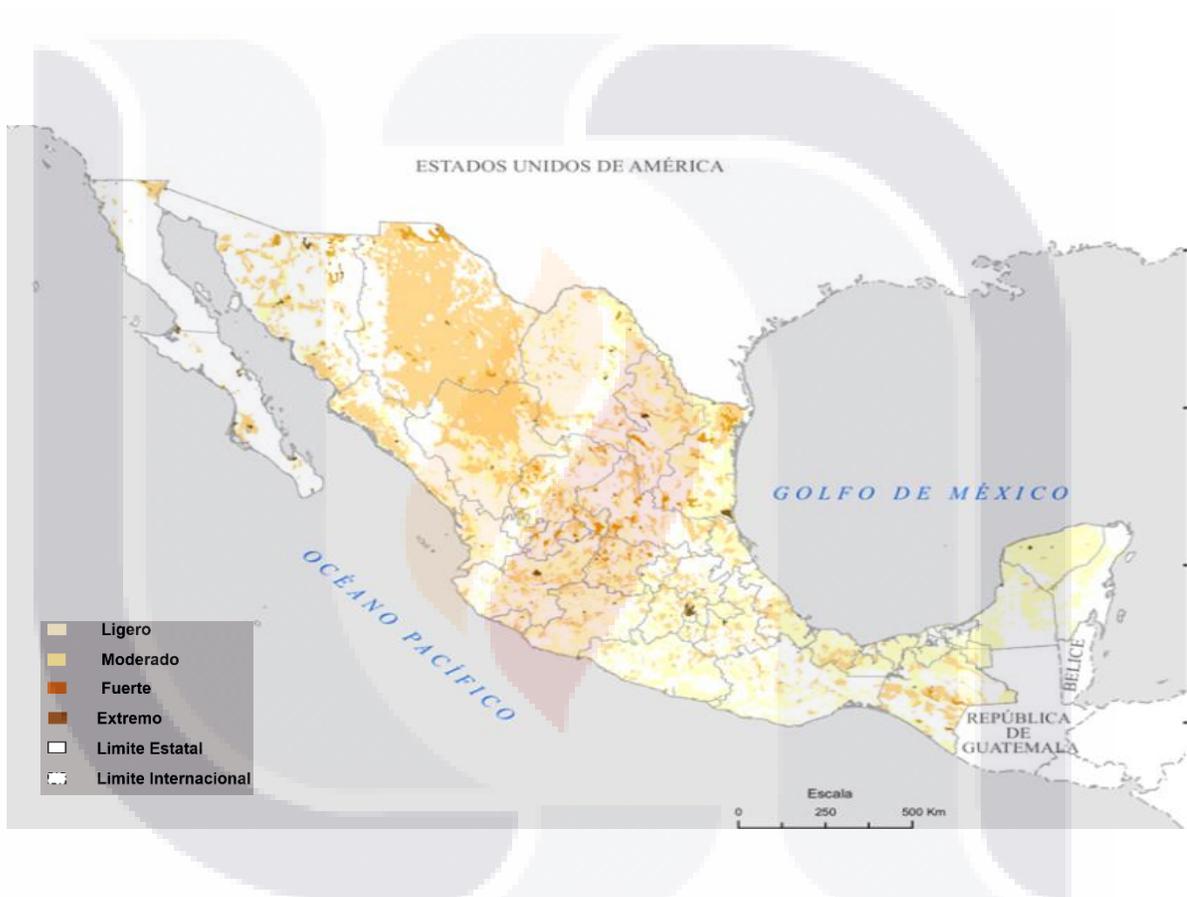


Figura 3. Degradación del suelo en la República Mexicana (Escala 1:250 000)
 Fuente: (<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>)

El incremento de intensidad de pastoreo en zonas semiáridas actúa como disminución del área basal y de la biomasa en vegetación, por tanto, la cantidad que se captura de carbono es menor a la de superficies sin alta intensidad de pastoreo (Gaitán y col., 2009) El incremento de la biomasa considera tanto la biomasa aérea como las raíces. Se podrían hacer considerables avances, sobre todo, en lo que se

refiere a las tierras de pastoreo seleccionando especies y variedades con raíces profundas, lo que, al mismo tiempo, mejoraría los espacios porosos del suelo y los agregados del mismo, y así incrementar la capacidad de retención de humedad, especialmente en los suelos de zonas áridas y semiáridas (Vela-Correa y col., 2009)

Los pastizales áridos y semiáridos del Centro-Norte de México cubren una importante superficie del territorio nacional. Estas constituyen bienes y servicios a la sociedad. Sin embargo, los humanos han ejercido una fuerte presión sobre esta área para alimento y producción de forraje. El manejo de pastizales ha estado enfocado hacia la producción ganadera. Sin embargo, esto ha conllevado la degradación de las mismas estrategias de manejo tales como sistemas de apacentamiento, resiembra y control de arbustivas no han resultado en la rehabilitación de estos sitios (Pérez-Romero y col., 2014)

1.2 TIPO Y USO DE SUELOS

Las actividades humanas para producir cantidades cada vez mayores de alimentos dejan su marca en el ambiente. El uso persistente de prácticas agrícolas convencionales con base en la labranza extensiva, especialmente cuando se combinan con el retiro o quema de los residuos del cultivo, han magnificado las pérdidas por erosión del suelo y el recurso suelo se ha degradado constantemente. Se ha estimado que la actividad humana es responsable de la pérdida de 26 mil millones de toneladas de la capa superficial del suelo por año, lo cual es 2.6 veces la tasa natural de degradación del suelo. El suelo es un recurso esencial en el intercambio de nutrientes, conservación de agentes microbiológicos y de sostén para los servicios ecosistémicos (SE). Un elemento clave en el ciclo del carbono es la captura y el almacenamiento de éste en el suelo o biomasa de los ecosistemas terrestre (García-Fajardo y col., 2014).

El suelo es considerado como una base para el bienestar del humano y no solo por los aportes de materia orgánica (MO) que provee, por la amplia variedad de servicios ecosistémicos que ofrece (Walter y col., 2002).

1.2.1 Conversión de suelo

Las repercusiones que tiene el cambio de uso de suelo en una zona forestal pueden ir desde la pérdida total o parcial de la cobertura vegetal, la disminución en la capacidad de suelo para infiltrar y almacenar agua disponible para las plantas, la pérdida tanto total como parcial de la capa de suelo superficial donde se encuentra contenida la principal reserva de carbono y nutrientes del suelo, las condiciones de deterioro de los recursos naturales y suelos de producción en zonas rurales se dan por una importante acción de cambio de uso de suelo (Álvarez-Arteaga y col., 2014)

Los cambios de uso de suelo y cobertura vegetal y el empobrecimiento del suelo como resultado de la degradación de la tierra, afectan los ecosistemas y los flujos de carbono, estos son importantes para la predicción de la dinámica del carbono para la mitigación del cambio global. Las condiciones hidrológicas del suelo se ven directamente afectadas por la pérdida de cobertura vegetal y suelos poco profundos (Rey y col., 2016)

1.2.2 Pastoreo

El pastoreo que se realiza en zonas semiáridas, en condiciones óptimas, y bajo los recursos de suelo y agua, es esencial tanto para la producción de pastizales, como para la conservación de carbono orgánico en el suelo (COS) (Pringle y col., 2014). El almacenamiento de carbono orgánico varía entre suelos con bosques plantados y pastizales, ya que se observa un incremento en suelos que fueron forestados hace 35 años en una profundidad 30-50 cm, mientras que en suelos que han sido de pastizal el carbono orgánico almacenado se encuentra en una profundidad de 50-70 cm, representa un incremento de carbono orgánico almacenado en zonas que han sido forestadas con zonas que han sido usadas para pastizales (Chen y col., 2016). Así mismo las zonas de almacenamiento de COS están sujetas a ser perturbadas por procesos naturales y por la actividad humana, lo que respecta a esta última el carbono se libera del suelo por el cambio de uso, por la utilización de maquinaria y por la erosión que se da frecuentemente con la producción agrícola (Muñoz y col., 2010)

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El ser humano obtiene numerosos beneficios de los sistemas naturales que lo rodean, así como de la biodiversidad que estos albergan. Sin embargo, muchos de estos sistemas naturales, como bosques, selvas y pastizales, han sido transformados en sistemas agropecuarios para producción intensiva de bienes y alimentos. Estos cambios modifican la capacidad que tienen los ecosistemas para brindarnos otros beneficios de lo que no siempre nos percatamos, como la regulación del clima o al control de la erosión. Así, en la búsqueda de satisfactores a nuestras necesidades hemos minado la capacidad que las poblaciones humanas obtenemos de los ecosistemas. (Millennium Ecosystem Assessment, 2005)

Por otro lado, la importancia de esos ecosistemas para la producción como servicios ecosistémicos para la producción de bienes como el almacenamiento de C en el suelo, por ser estos los principales depósitos terrestres de este elemento (tienen poco más del 70% de reserva del C orgánico terrestre) y la captura de que puedan hacer sus formaciones vegetales, representa una oportunidad para diseñar estrategias de uso y manejo que permitan identificar medidas de mitigación de los posibles efectos del cambio climático que según estudios, se espera que ocurra en las próximas décadas. En efecto, es posible retirar el CO₂ de la atmósfera, mediante su captura y su retención con acciones adecuadas y su efecto benéfico dependerá del tiempo que el CO₂ se mantenga almacenado en las plantas (Semarnat, 2004). Además, la captura de carbono puede ayudar a resolver algunos de los graves problemas ambientales que enfrentamos: el cambio climático, gases de efecto invernadero y adelgazamiento de la capa de ozono.

3. JUSTIFICACIÓN

No existen estudios detallados que indiquen el potencial que tienen las zonas áridas tanto en suelos como en vegetación, en particular a lo que refiere para proveer

servicios ecosistémicos, como la captura de carbono. La información es escasa en cuanto al conocimiento de las personas acerca del uso potencial que tienen estos ecosistemas como proveedores de servicios en el beneficio del ser humano, tanto en uso de plantas medicinales, como alimentadores y conservadores del suelo.

Dentro de los objetivos de desarrollo sostenible pactados por la “Food an Agriculture Organization” (FAO), en particular con el objetivo 15: “Gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad” existe una fuerte presión para hacer una estimación de las tendencias de la tierra y saber la superficie afectada por los procesos de degradación, es por eso que la realización de un mapa digital de carbono orgánico con un rigor de estadística multivariada, armonización y análisis de metadatos, interpolación y extrapolación de datos de suelo, brindará un panorama de la degradación de la tierra en esta zona árida del oriente.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 EL SUELO

La mayoría de los suelos están compuestos por minerales que provienen de la madre tierra, es decir, se forman a partir de la roca que se va degradando lentamente en partículas de diminuto tamaño, en esta actividad intervienen los procesos físicos, químicos y biológicos.

Los suelos se encuentran dentro de los hábitats más importantes y abundantes de especies sobre el planeta tierra, contienen una gran riqueza de organismos que sirven para el funcionamiento y desarrollo del suelo. La mayoría de esos organismos son necesarios para la diversidad funcional y resiliencia del suelo y los ecosistemas que dependen de este mismo. La biodiversidad de los suelos es un indicador de la calidad que tiene, a mayor diversidad de organismos, genera mayor estabilidad en términos de su capacidad para el desempeño de funciones claves, tal como son: reciclaje de nutrientes, aireación del suelo, absorción de desechos orgánicos y mantenimiento de la estructura del suelo.

La biodiversidad del suelo, la materia orgánica y el carbono orgánico en el suelo están fuertemente relacionados, sin embargo, son diferentes (figura 4); la biodiversidad del suelo refleja la mezcla de organismos vivos en el suelo, incluyendo bacterias, protozoarios, insectos, hongos, lombrices y otras especies de vertebrados e invertebrados. Estos interactúan unos con otros, así como las plantas y las pequeñas especies, formando la actividad biológica. Una gran variedad de especies se encuentra en pequeña y fina capa de 2 a 3 cm en la capa superior del suelo, donde hay una gran concentración de materia orgánica y raíces.

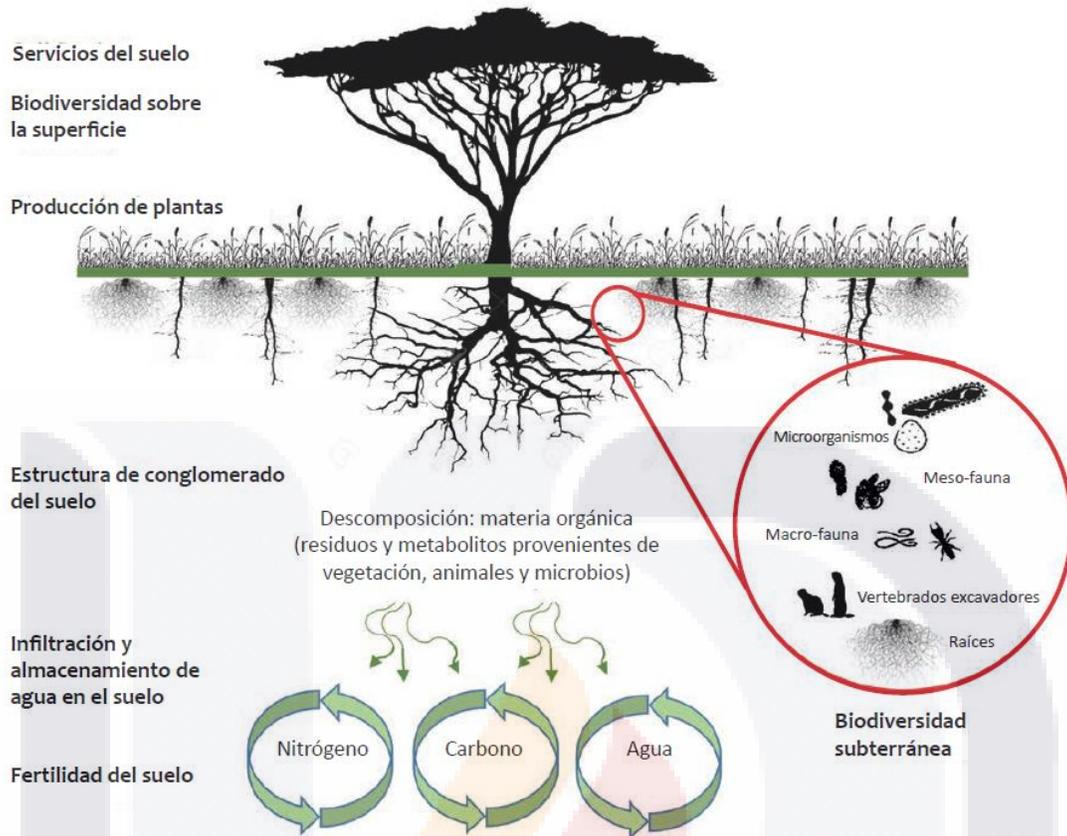


Figura 4 Biodiversidad del suelo y carbono orgánico en los suelos.

Fuente: Peter Laban, Graciela Metternicht y Jonathan Davies (2018). Biodiversidad de suelos y carbono orgánico en suelos: cómo mantener vivas las tierras áridas. UICN

La materia orgánica del suelo (MOS), contiene componentes orgánicos del suelo, incluyendo la biomasa viva (tejidos de plantas, microorganismos y pequeñas especies), raíces muertas y otros residuos de plantas y desechos de animales. El Carbono Orgánico del suelo constituye cerca del 50 a 60% de la MOS.

4.1.1 Condiciones favorables al suelo

Las condiciones climáticas del sitio son propiedades importantes que influyen en el crecimiento de las plantas y la formación de suelos. Como mínimo, se debe recolectar información sobre la temperatura promedio mensual (°C) y la

precipitación media mensual (mm), haciendo uso de datos existentes en la estación meteorológica más cercana al sitio.

Las características de cada suelo dependen de varios factores. Los más importantes son el tipo de roca que los originó, su antigüedad, el relieve, el clima, la vegetación y los animales que viven en él, además de la modificación causadas por las actividades humanas.

El tamaño de las partículas minerales que forman el suelo determina sus propiedades físicas: textura, estructura, capacidad de drenaje del agua, aireación. Los gránulos son más grandes en los suelos arenosos, estos son sueltos y se trabajan con mayor facilidad, pero los surcos se desmoronan con el agua y se infiltra rápidamente. Los suelos limosos tienen gránulos de tamaño intermedio, son pesados y con pocos nutrientes. Los suelos arcillosos están formados por partículas muy pequeñas. Son pesados, no drenan ni se desecan fácilmente y contienen buenas reservas de nutrientes. El suelo contiene materia orgánica en diferentes proporciones, éstas sirven para tener un diagnóstico de la provisión de SE tanto para el suministro de alimentos como la captura de carbono y la retención de Gases de Efecto Invernadero (GEI). (ONU, 2002).

4.1.2 Propiedades del suelo

Como organismo vivo, el suelo contiene diversidad biológica que son encargados de brindar los nutrientes a las plantas, parte de esta entidad viva la constituyen microorganismos, estos son considerados como microorganismos del suelo los que miden $<200\mu\text{m}$. Fig. 5.

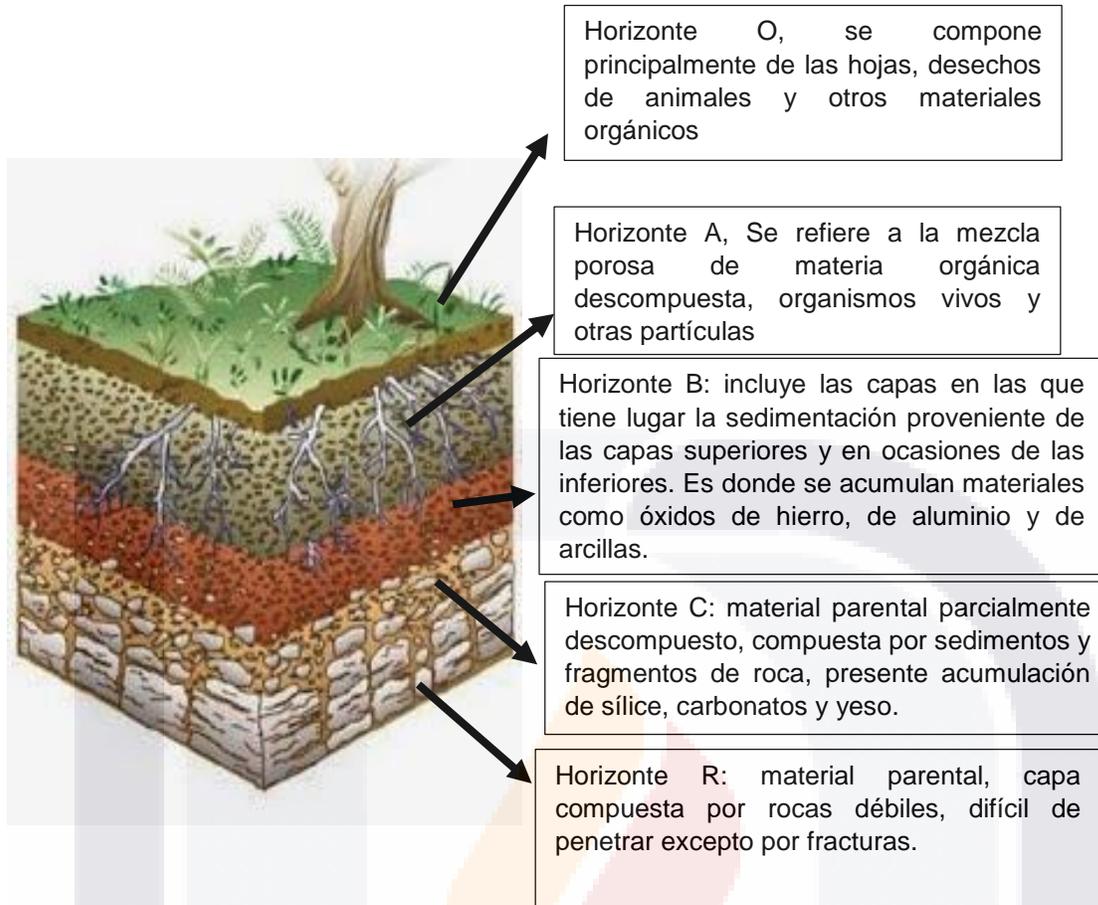


Figura 5. Esquema del perfil del suelo y sus horizontes que lo conforman
 Fuente: (<https://gestion-ambiental-biblioteca.blogspot.mx/2014/06/muestreo-de-suelo.html>)

Las propiedades físicas de un suelo tienen mucho que ver con la capacidad que el hombre les da para muchos usos. Las características físicas de un suelo en condiciones húmedas y secas para las edificaciones, la capacidad de drenaje y de almacenamiento de agua, la plasticidad, la facilidad para la penetración de las raíces, la aireación, la retención de nutrimentos de las plantas, etc. están íntimamente conectados con la condición física del suelo (Porta y col., 2003).

4.1.3 Beneficios del Carbono orgánico en los suelos

En cuanto a los beneficios que brinda el Carbono Orgánico en los suelos ha sido ampliamente descrito por varios autores; un aumento en la calidad y fertilidad del suelo, mejora la productividad, el crecimiento de vegetación y promueve una mayor acumulación de carbono en el suelo. Al aumentar la cantidad y calidad de carbono orgánico, se mejora la estabilidad de la estructura del suelo, la capacidad de retención de agua, la porosidad y la fertilidad.

4.1.4 Degradación del suelo

Las implicaciones en el cambio del uso del suelo van desde la pérdida total o parcial de la cobertura vegetal, la disminución en la capacidad del suelo para infiltrar y almacenar agua disponible para las plantas, la pérdida de la capa de suelo superficial donde está contenida la principal reserva de carbono y nutrientes del suelo (Álvarez-Arteaga y col., 2014).

En México la degradación de los suelos se ve afectada por varios factores, en los que se encuentran las degradaciones física y química, la erosión eólica y la erosión hídrica. (Figura 6), estos factores alteran la concentración de materia orgánica, microorganismos del suelo y procesos bióticos que se dan dentro de él.

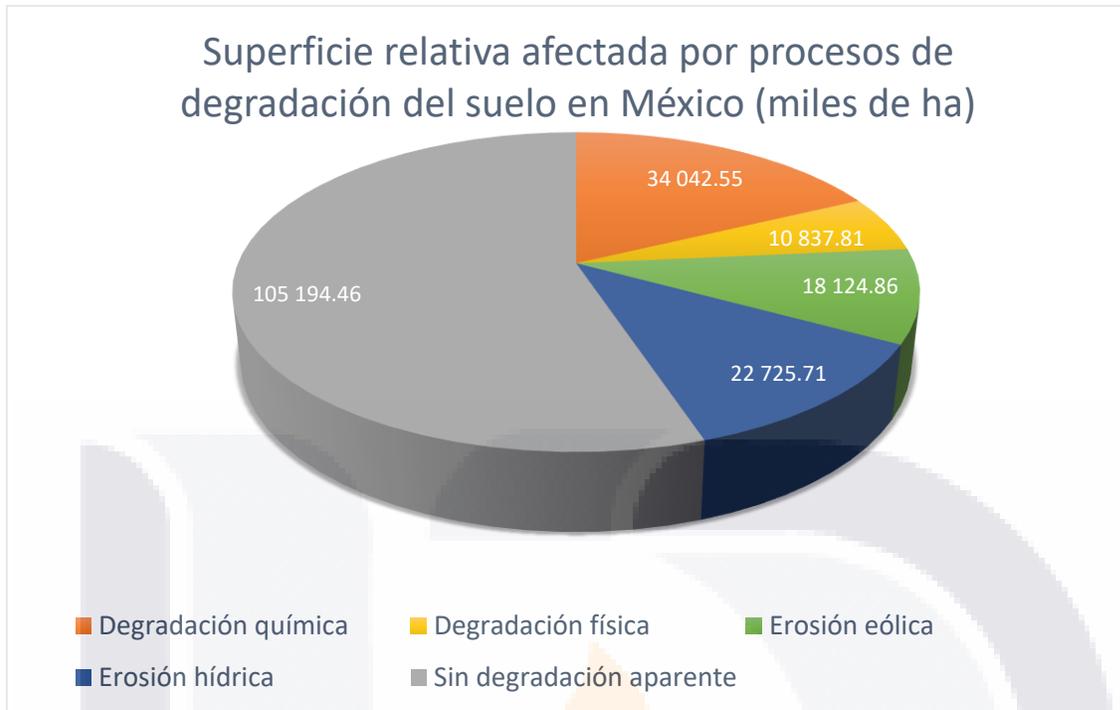


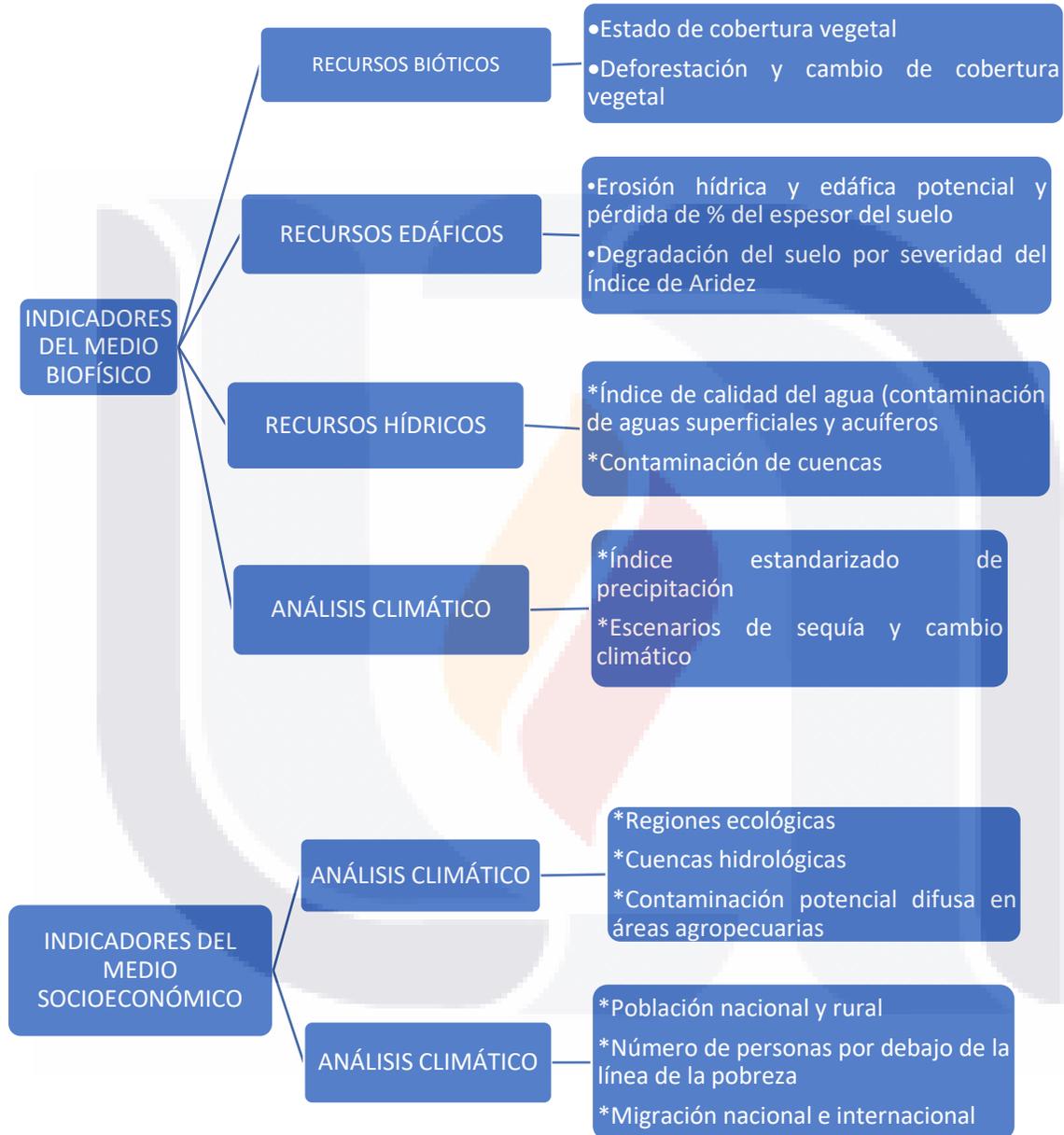
Figura 6. Superficie afectada por procesos de degradación del suelo en México.

Fuente: Inventario Nacional de Emisiones De Gases de Efecto Invernadero 1990-2010 (INECC)

La degradación se puede separar por tipos que estos a su vez integran componentes biológicos, edáficos e hídricos, todo esto con la cartografía del índice de aridez en México (fig. 7).

Los indicadores tienen su propia metodología para medir el nivel de impacto, así como las fuentes de información utilizadas para la obtención e integración de los mismos.

Figura. 7 Conjunto de indicadores para estimar Degradación de Tierras y Desertificación.



Fuente: Inventario Nacional de Emisiones De Gases de Efecto Invernadero 1990-2010 (INECC)

4.2 RECURSOS NATURALES

En el territorio nacional existe una gran variedad de recursos naturales, esta diversidad ocupa el cuarto lugar a nivel mundial, cuenta con la gran mayoría de los ecosistemas existentes. La actividad humana es la principal causa de la pérdida de hábitat, esto se da por la conversión de áreas naturales en superficies para la producción agrícola y para el desarrollo urbano (INECC, 2012).

Las alteraciones ambientales y la escasez de recursos naturales están frecuentes en la actualidad y se están viendo por el incremento de conflictos que hay en la relación que existe de la población y los países. Según Homer-Dixon y col., (1993), las alteraciones que se dan de forma huma son principalmente dadas por tres formas diferentes, la primera de ellas es por la calidad y el abastecimiento de los recursos, usando de manera excesiva sin dar oportunidad a renovar la capacidad de carga, aquí los recursos no renovables juegan un papel importante ya que al estar buscando más recursos a escala geológica alterando superficies destinadas para la provisión de Servicios Ecosistémicos, la segunda de las alteraciones viene relacionada con el incremento poblacional de forma exponencial, con este crecimiento se debe repartir tierras y agua entre más personas, lo que provoca que exista un cambio en el uso de suelo, y la tercer alteración se refiere al desigual acceso de los servicios, ya que algunas leyes solo ofertan de servicios a pocas personas así desfavoreciendo al resto de personas que integran la población (Mitchel, 1997)

4.3 SERVICIO ECOSISTÉMICO

Servicio ecosistémico se refiere a toda aquella condición ambiental que sirve para el sostén de recursos, teniendo un correcto funcionamiento para su estado de conservación.

Se han realizado estudios que demuestran que cerca de dos terceras partes de los SE que nos brinda el planeta están disminuyendo su crecimiento, esto se debe a la transformación que el hombre ha dado a estos ecosistemas. Se está entrando en un planeta donde la diversidad de la vida viene en reducción, con paisajes

simplificados, cada vez más similares los paisajes modificados por la actividad humana, que llevan a amenazar la extinción de especies (Millennium Ecosystem Assessment, 2005)

4.3.1 La clasificación de los Servicios Ecosistémicos

- A. De provisión: que son bienes producidos o proporcionados por los ecosistemas que pueden ser aprovechados directamente por los seres humanos, como son: los alimentos, el agua, el combustible, la madera, la fibra, los recursos genéticos, o las medicinas naturales.
- B. De regulación: que son los servicios derivados de la regulación de los procesos ecosistémicos como la calidad del aire, la regulación del clima, la regulación hídrica, el control de erosión, la resistencia a perturbaciones, la resiliencia, etc.
- C. Culturales: son los beneficios no materiales que enriquecen la calidad de vida, tales como los valores estéticos, los educacionales, los religiosos y espirituales, las oportunidades de generar conocimiento, inspiración, el sentido de pertenencia, la recreación y ecoturismo.
- D. Soporte: influyen en la formación del suelo, el reciclaje de nutrientes y la producción primaria.

De lo anterior surge la interrogación si estos servicios se pueden mantener positivamente, o si los efectos negativos tienen consecuencia sobre el funcionamiento del ecosistema del planeta, este acercamiento a la problemática ambiental está teniendo una creciente aceptación en cuanto a los medios académicos como gubernamentales para la construcción de sus políticas y normas para su conservación (MEA, 2010).

4.3.2 Estado de Aguascalientes como proveedor de SE

En el estado de Aguascalientes existe una amplia zona árida, altamente afectada por el uso de sus recursos que rebasa su capacidad de carga y por las condiciones erráticas del temporal y las variaciones climáticas. Es uno de los estados más pequeños de la república, al igual que otros estados, los suelos empeoran y deterioran la vegetación. Actualmente el cambio de uso de suelo de Aguascalientes se ha transformado en zonas agrícolas, industriales, urbanas, mineras y otras, quedando cerca de un 59% de vegetación sin alterar, sea primaria o secundaria (Siqueiros-Delgado y col., 2016).

Algunos autores la plantean como una solución para la recarga de mantos acuíferos pero hay muy poca evidencia de campo de su efectividad, por la dificultad que representa medir la recarga; y debido a los impactos negativos identificados a escala de cuenca, se considera un tema que se tiene que abordar de manera cuidadosa (Glendenning y col., 2012).

Los suelos cumplen con diversas funciones que posibilitan la producción de alimentos, fibras y madera; mantienen la capacidad de retención de agua, regulan los gases de efecto invernadero y alojan una gran biodiversidad, por lo que son esenciales para la sociedad. Ante el contexto del cambio climático, el mantenimiento de estas funciones a través de prácticas de conservación, es cada vez más relevante, más aún cuando con eso se aumenta el secuestro de carbono y se propicia la adaptación de la sociedad y de los ecosistemas al cambio climático (Cotler y col., 2015).

4.4 CAPTURA DE CARBONO

El CO₂ es el gas de efecto invernadero (GEI) con mayor contribución al cambio climático debido a su concentración atmosférica, entre 1970 y 2004 sus emisiones anuales han aumentado en un 80%. El incremento de CO₂ ha ido de 21 a 38 Gt (Gigatoneladas), en 2004 representaba un 77% de las emisiones totales de GEI antropogénicos.

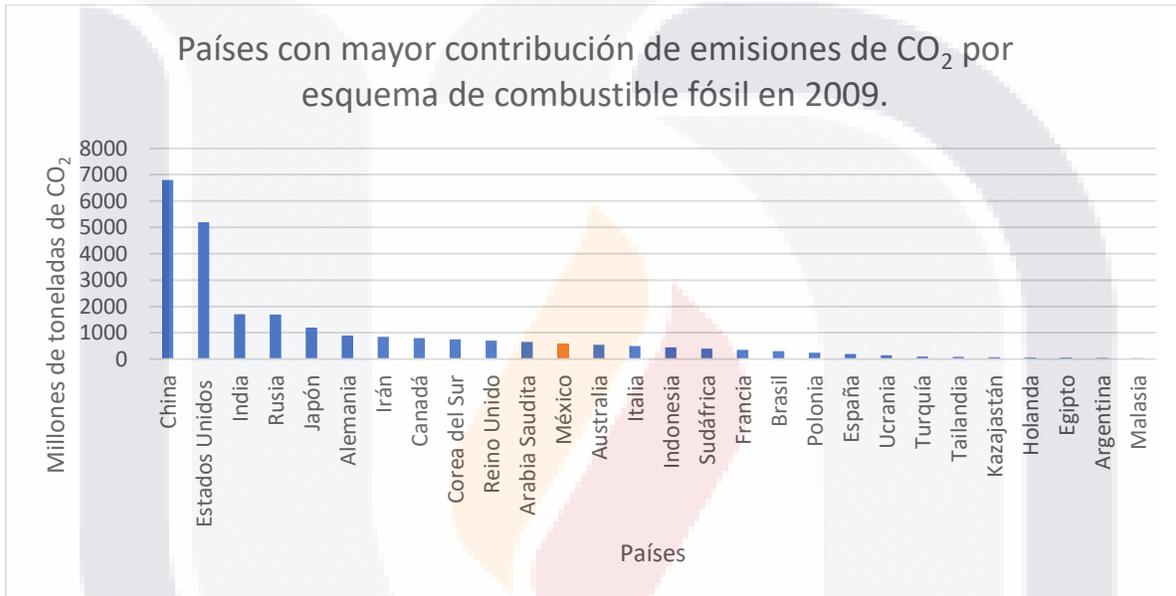


Tabla. 1 Países con mayor contribución de emisiones de CO₂ por esquema de combustible fósil en 2009.

Fuente: Inventario Nacional de Emisiones De Gases de Efecto Invernadero 1990-2010 (INECC)

Los esfuerzos se han dirigido a estimar el contenido de C en los principales reservorios de los ecosistemas y los factores que determinan su almacenamiento y dinámica, el 90% de las emisiones de carbono del 2003 al 2012 fueron causadas por combustibles fósiles y el 10% por cambio del uso de tierra (Le Quére y col., 2014)

4.4.1 Carbono Orgánico

El carbono orgánico del suelo es importante ya que como parte de la materia orgánica influye en las propiedades del suelo como la estructura, la capacidad de intercambio catiónico, la densidad aparente, la porosidad y la infiltración. Es decir, el cambio de uso de la tierra y la explotación agrícola continuada e intensiva, con aplicación de maquinarias y fertilizantes, provoca la pérdida de la materia orgánica y del carbono orgánico, que da lugar a la degradación de estas propiedades y disminuye la productividad de los suelos.

Investigaciones recientes de ecosistemas áridos y semiáridos de México se han documentado con el intercambio neto de Carbono con la atmósfera, la productividad primaria, el flujo de carbono a través de la producción de materia orgánica y su descomposición hasta el almacenamiento del C en la biomasa (aérea y subterránea) y en el suelo (Montaño y col., 2016). El flujo de C en las regiones áridas y semiáridas de México está fuertemente controlado por la estacionalidad y la cantidad de la lluvia anual. Una métrica importante para entender la respuesta de estos ecosistemas a la variabilidad climática es el intercambio neto de CO₂ entre el ecosistema y la atmósfera.

4.4.2 Emisiones de CO₂

Según el inventario nacional de emisiones en México se estimó que las emisiones totales en el uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura (USCUISS) en los años de 1990 a 2010 tuvieron un promedio de 73,872 Gg de CO₂, teniendo máximos y mínimos entre las 45,370 y las 122,372 Gg de CO₂, se estimó una disminución en las emisiones de un 55% entre los años 1990 y 2010. (Tabla 2) (INECC, 2013) .

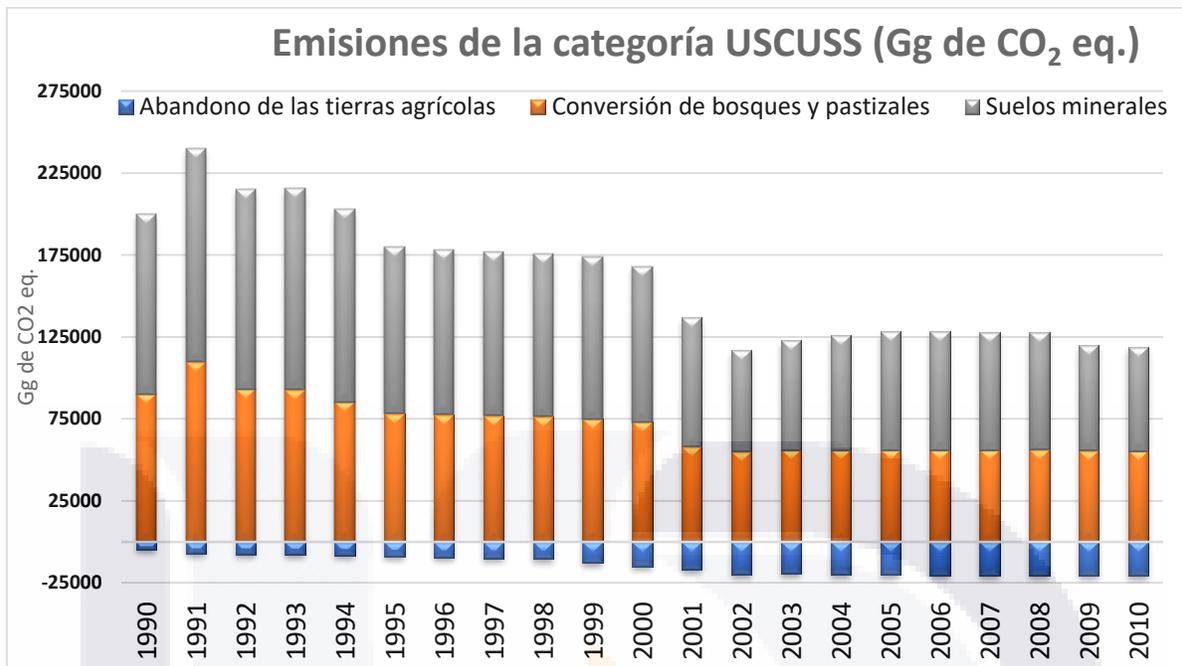


Tabla 2. Emisiones de la categoría USCUS (Gg de CO₂ eq.)
 Fuente: Inventario Nacional de Emisiones De Gases de Efecto Invernadero 1990-2010 (INECC, 2013)

Dato importante es que observa como el abandono de las tierras agrícolas están favoreciendo a la captura de C, así contrarrestando las emisiones por el cambio de uso de suelo. El contenido de C en el suelo está controlado por las condiciones ambientales, la comunidad vegetal y el uso del suelo. En matorrales y pastizales, la biomasa es un almacén importante de C, en cambio el suelo es un almacén de C que representa entre 45% y 90% del C total para estos tipos de vegetación, respectivamente. En las regiones semiáridas comparadas con las regiones áridas se cree que se tienen los mayores almacenes de C, tanto en la vegetación como en el suelo, con una alta contribución de las islas de fertilidad y de recursos. Por otro lado, el cambio de uso de suelo en la mayoría de los casos disminuye a la mitad el C orgánico almacenado en el mismo. Ante esto, las especies que forman estos ecosistemas son fundamentales para el amortiguamiento en impacto del cambio de uso de suelo sobre el almacenamiento de C. La producción de hojarasca es cinco veces menor que la reportada en ecosistemas húmedos, donde la mayor parte del

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

C está en la biomasa vegetal, lo cual significa que los suelos son el principal almacén de C en los ecosistemas áridos y semiáridos de México (Montaño y col., 2016).

Un sistema de producción agrícola puede funcionar como emisor o como almacén de carbono durante diferentes actividades del ciclo agrícola. El almacenamiento de C dependerá directa o indirectamente de la calidad y tipo de suelo (características como estructura, temperatura y humedad); de las condiciones climáticas y de las prácticas de manejo en las que se desarrolla la producción agrícola siendo el tipo de labranza, uso de fertilizantes eliminación de cobertura vegetal los factores para la producción (García-Fajardo y col., 2014).

Los bosques urbanos ofrecen diversos servicios entre ellos la regulación de microclimas, depuración de aire, entre otros. También ayudan a controlar la erosión del suelo, producir oxígeno y para almacenar y capturar carbono. Este servicio ambiental es de gran importancia ya que influye de manera directa sobre la calidad de vida de los ciudadanos, al reducir los niveles de dióxido de carbono (CO₂). El CO₂ es el gas de efecto invernadero (GEI) con mayor contribución al cambio climático debido a su concentración atmosférica, entre 1970 y 2004 sus emisiones anuales han aumentado en un 80%. El incremento de CO₂ ha ido de 21 a 38 Gt (Gigatoneladas), en 2004 representaba un 77% de las emisiones totales de GEI antropogénicos (Zelnik, y col., 2016).

4.5. MAPEO DIGITAL DEL SUELO (MDS)

Mapeo Digital del suelo (MDS) permite el mapeo espacial más precisa de las propiedades del suelo, incluyendo la cuantificación espacial del error de predicción. La calidad de tales predicciones mejora al aumentar el número de observaciones locales (por ejemplo, perfiles de suelo) disponibles para construir el modelo de predicción.

El mapeo de las reservas de carbono orgánico del suelo, es empleado para la una serie de propiedades del suelo a desarrollar para Glosis, en particular para demostrar la capacidad de los países en el mundo para poder compilar y gestionar sistema nacional de información de suelos y de utilizar y evaluar estos datos siguiendo especificaciones internacionales acordadas.

Las variables climáticas y de suelo son importantes para la generación de mapas de Carbono orgánico, usar alternativas de cartografía con herramientas SIG es un ahorro prominente tanto en tiempo como en costos a diferencia de procedimientos tradicionales y usando métodos estadísticos llegando a un nuevo enfoque denominado Pedometría o Cartografía digital de suelos (McBratney y col., 2003).

5. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

5.1 OBJETIVO GENERAL

Valorar almacenes carbono en suelo y planta distribuidos en la zona árida del oriente de Aguascalientes en su función como servicio ecosistémico.

5.1.1 Objetivos particulares

- 1.- Evaluar el contenido de carbono en el suelo, a partir de diferentes coberturas vegetales: abierta, cerrada y semiabierta.
- 2.- Determinar almacenes de carbono en biomasa de especies arbóreas.
- 3.- Crear mapas de almacenes de carbono en el suelo y planta.

5.2 HIPÓTESIS GENERAL

Los almacenes de carbono en suelo y planta no han sido suficientemente valorados en su función como servicios ecosistémicos para las zonas áridas.

5.2.1 Hipótesis particulares

- 1.- Los contenidos de carbono para los diferentes suelos y vegetación arbórea de la zona de estudio, permiten establecer Servicios Ecosistémicos enfocados a la captura de carbono.
- 2.- Con la información generada con datos de campo será posible reducir el nivel de incertidumbre en la creación de mapas digitales de carbono orgánico en la zona de estudio.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se realizó en los municipios de Asientos, localizado entre los paralelos 22° 19' y 21° 58' de latitud norte; los meridianos 101° 51' y 102° 13' de longitud oeste; altitud entre 2000 y 2600 m; El Llano, entre los paralelos 21° 47' y 22° 04' de latitud norte; los meridianos 101° 50' y 102° 11' de longitud oeste; altitud entre 2000 y 2500 m; y Tepezalá entre los paralelos 22° 08' y 22° 22' de latitud norte, los meridianos 102° 07' y 102° 17' de longitud oeste; altitud entre 2000 y 2500 m. (Fig. 7), al oriente del estado de Aguascalientes, México. (INEGI, 2010).

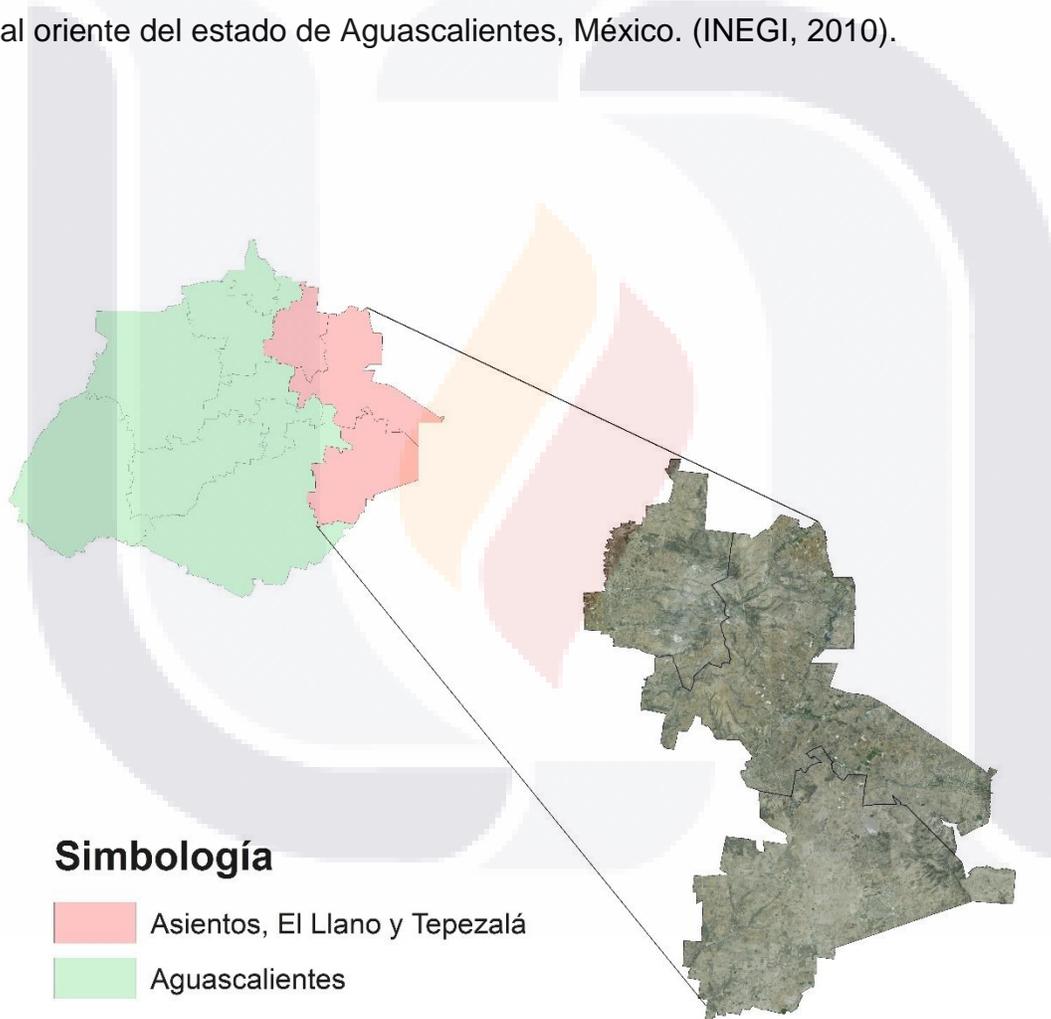


Figura 8. Localización de Asientos, El Llano y Tepezalá.

Fuente: elaboración propia a partir del marco geoestadístico, INEGI 2016.

Domina el clima semiárido, donde se concentran las precipitaciones pluviales en el verano, teniendo un rango de precipitación entre los 450 y 550 mm anuales. Las temperaturas llegan hasta los 8°C en diciembre y enero mientras que los meses más calientes son mayo y junio alcanzando temperaturas de hasta 30°C.

La vegetación que más predomina es el pastizal natural e inducido y el matorral crasicaule (Fig. 8)

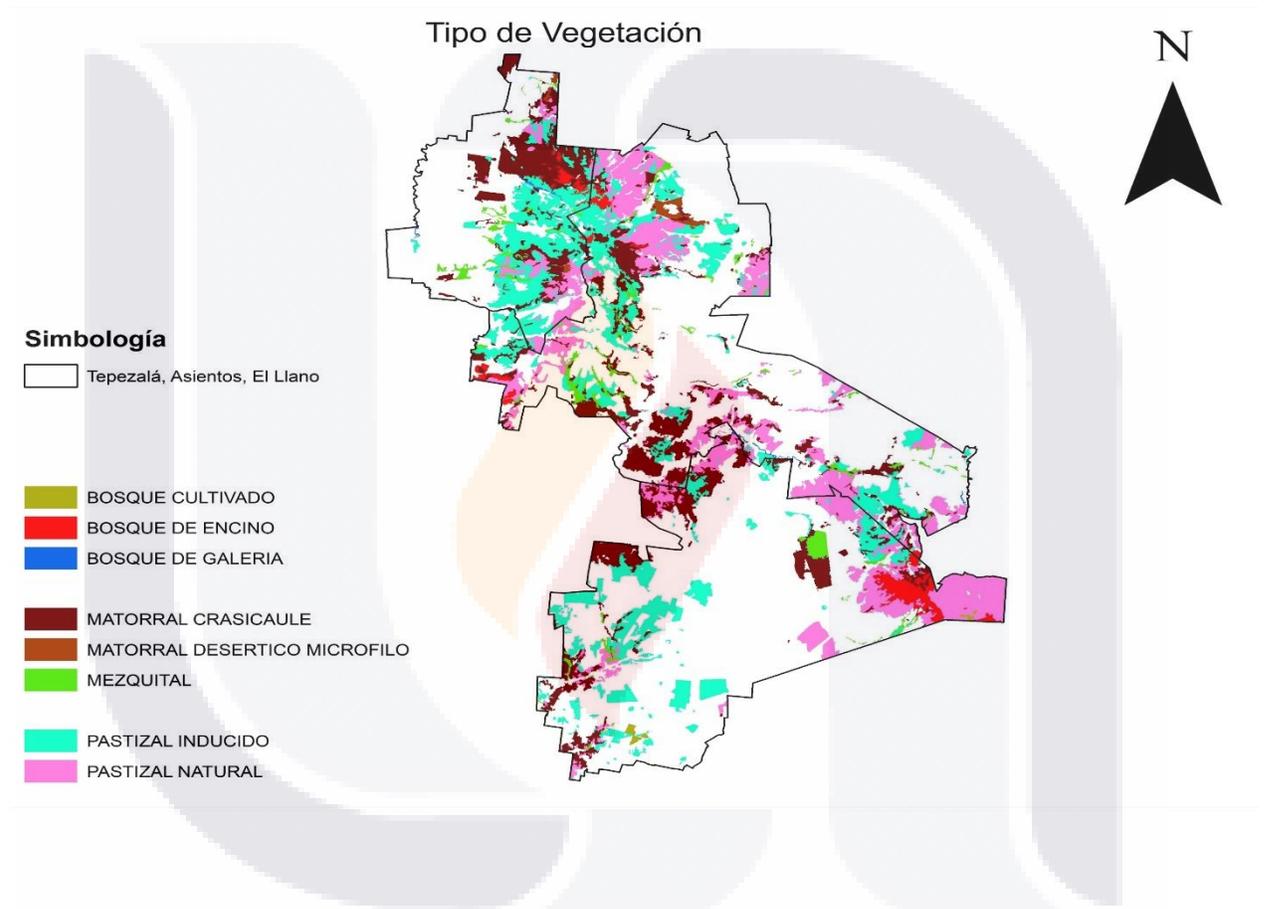


Figura 9. Tipo de vegetación en Asientos, El Llano y Tepezalá
 Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del “Inventario Estatal Forestal y de Suelos de Aguascalientes”, Secretaría del Medio Ambiente, 2012

Los suelos con de textura media franco-arcillosa, con profundidad menor a los 50cm, esta zona corresponde a diferentes tipos de suelo teniendo como dominantes los suelos: Planosol, Regosol y Phaozem, (Fig. 9).

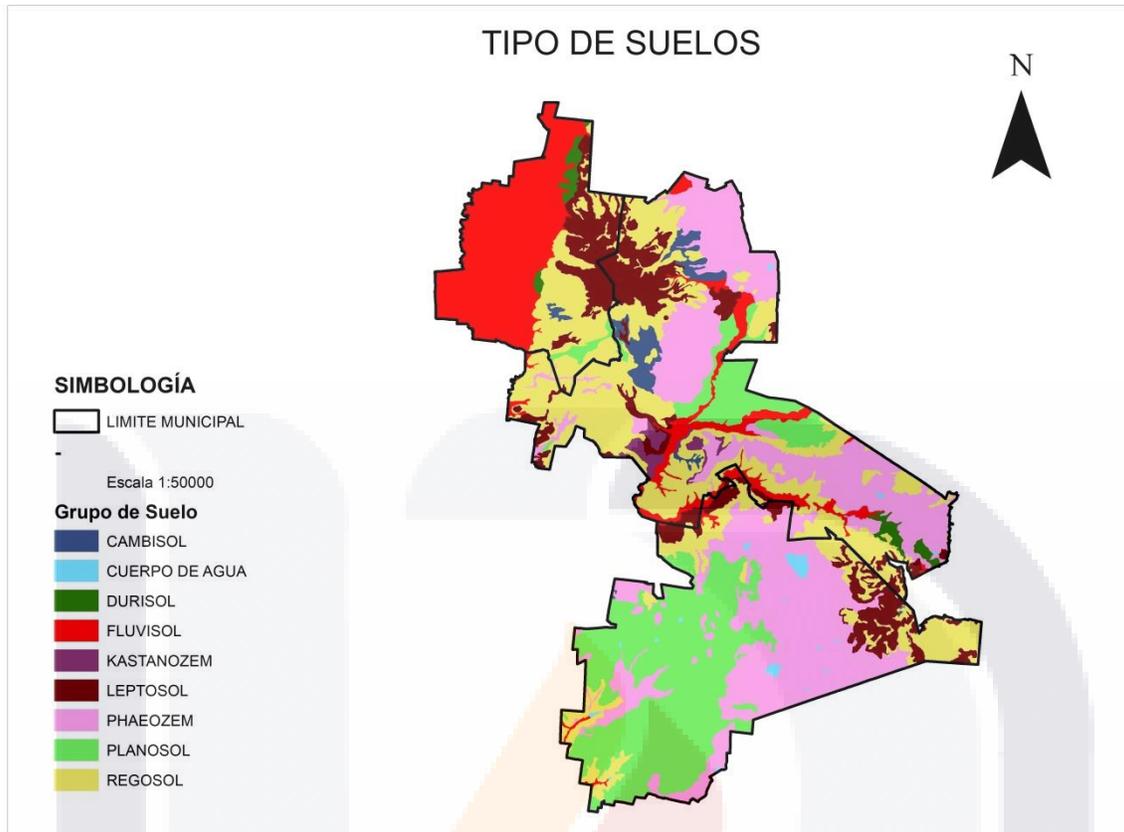


Figura 10. Suelos dominantes en Asientos, El Llano y Tepezalá
Fuente: elaboración propia con datos del "Calculo de la Erosión Real del Estado de Aguascalientes" en el 2016, SMA.

6.2 SELECCIÓN DE SITIOS DE MUESTREO

Se definieron los sitios donde se realizaron las muestras con respecto a la cobertura vegetal, para esto se definirán las zonas de cobertura en cuatro divisiones, muy abierta, extremadamente abierta, semiabierta y cerrada (Fig 10.) para hacer la correlación con las unidades de suelo de las muestras correspondientes conforme al procedimiento establecido por la Norma Oficial Mexicana (NOM-021-RECNAT-2000) (SEMARNAT, 2002).

6.3 RECORRIDO DE CAMPO Y MUESTREOS DE SUELO

Se realizaron 159 muestreos estratificados sistemáticos (Fig. 10), en relación al tipo de suelo y vegetación para los tres municipios. El procedimiento para la toma de muestra de suelo se hizo conforme a lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

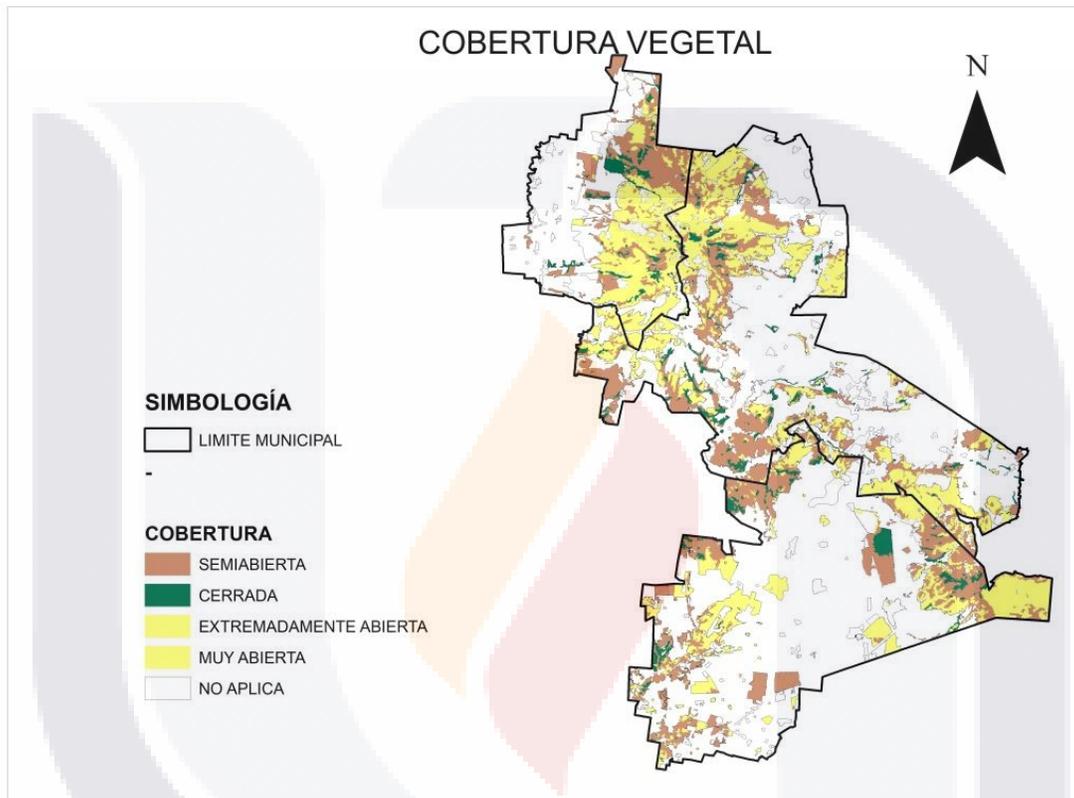


Figura. 11 Mapa de cobertura vegetal
 Fuente: elaboración propia con datos del "Calculo de la Erosión Real del Estado de Aguascalientes" en el 2016, SMA.

Cada sitio seleccionado se georreferenció (Fig. 11), en campo mediante un geoposicionador (GPS) marca Garmin® modelo "e-trex" y se recolectaron tres repeticiones para cada punto, la profundidad para obtener la muestra de suelo fue de 0-30 cm, se registró el uso dominante del suelo para cada punto muestreado.

Densidad Aparente (DA) se calculó mediante el método de probeta en el laboratorio de suelos del Centro de Ciencias Agropecuarias (CCA), consiste en pesar 40 g de suelo en una probeta, dar 30 golpes hacia abajo sobre una franela húmeda (para conseguir un golpe firme), después se mide el volumen de la probeta y se hace la anotación, el cálculo para determinar la DA es el siguiente: $DA = \frac{\text{Volumen medido}}{40}$ el resultado se registra en gr/cm^3 .

Se tomaron muestras con la barrena en cada punto seleccionado, obteniendo muestras DA de 0-30 cm de profundidad.

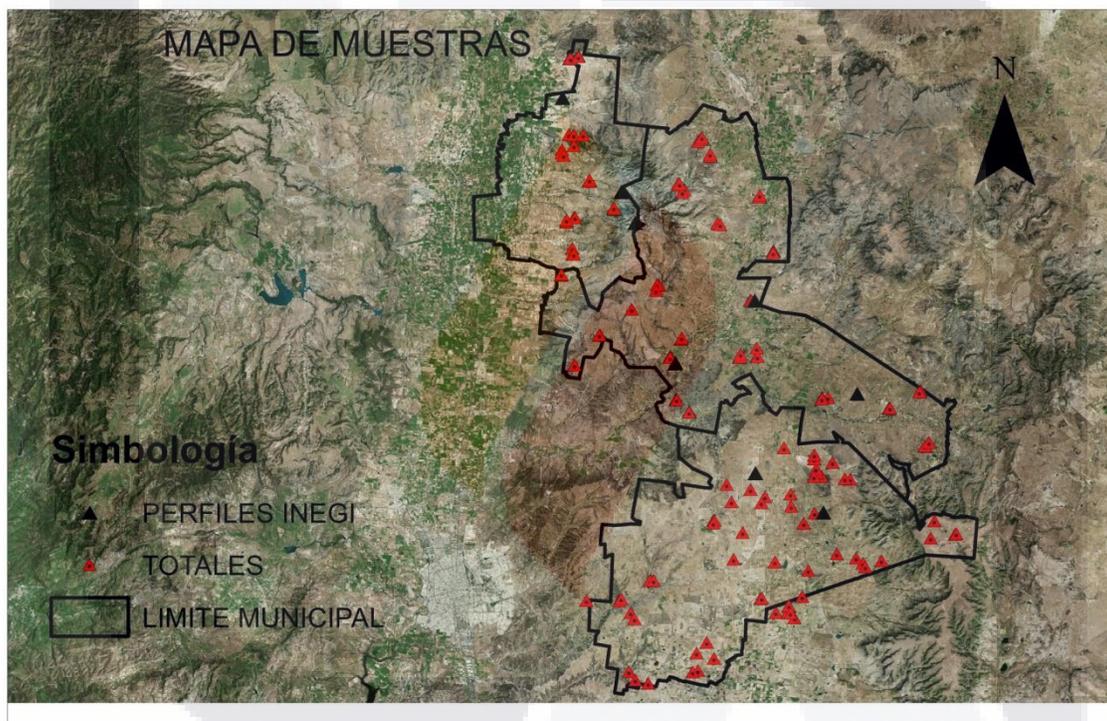


Figura. 12 Sitios de Muestras realizadas y perfiles obtenidos de la carta edafológica II de INEGI (2010)

Fuente: elaboración propia a partir del marco geoestadístico, INEGI 2016.

6.4 ANÁLISIS DE LABORATORIO

Las muestras fueron trasladadas al laboratorio de suelos del CCA, se dejaron secar a la sombra a temperatura ambiente para después tamizarse con un tamiz de malla de 2mm, después se molieron las muestras, para tomar las partículas más

pequeñas dentro del análisis de la muestra, esta molienda se realizó con un micromolino IKA mf 10 classic (fig. 12), es un molino universal de funcionamiento continuo con motor de 1000 w, con una velocidad de hasta 6500 rpm. Cuando se utilizan los cabezales de molienda, el material procesado pasa a través de un tamiz de acero inoxidable intercambiable.



Figura. 13. Molino IKA mf 10 classic.

Una vez que las muestras fueron molidas y pasadas por una criba del No. 20, se almacenaron en un sobre para su posterior identificación (fig 13), se continuó con el pesado de suelo para el análisis de C, se pesaron de 1.5 a 3 mg en una microbalanza A&D DM 22® , para seguir con el encapsulado de la muestra, a través de un vial de estaño (fig. 14)



Figura 14. Sobres de la muestra molida.

Se realizó una tabla con los pesos de todas las muestras y las cápsulas de estaño para continuar con el análisis del porcentaje de C.

Dicha tabla contiene los datos de:

- Id de la muestra
- Peso de la muestra en mg
- Fecha y hora de la pesada de muestra

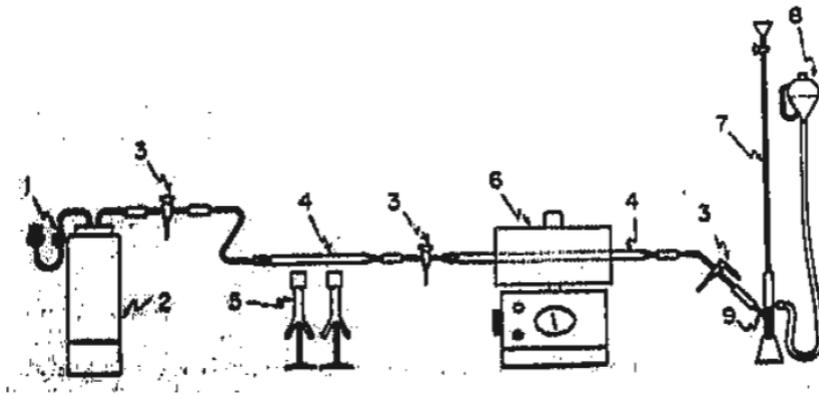
Es importante resaltar que las muestras fueron almacenadas en un horno de calefacción a 25 °C para evitar que generara humedad.



Figura 15. Pesado y encapsulado de las muestras de suelo, mediante el manual de Perkin Elmer 2400 Series II.

6.4.1 Análisis del Carbono.

El porcentaje de carbono orgánico total (COT) se obtuvo a través del equipo Analizador Elemental de Carbono, hidrogeno, oxígeno nitrógeno y azufre PE-2400 Series II, de la marca Perkin Elmer®, este equipo se basa en el método clásico de Pregl-Dumas (fig. 15), donde las muestras se queman en un ambiente de oxígeno puro, con los gases de combustión resultantes, medidos de manera automatizada, según el método la muestra se oxida con el óxido cúprico, el cual produce nitrógeno y sus óxidos. Los óxidos producidos son reducidos a nitrógeno empleando una maya de cobre caliente, después los gases resultantes son arrastrados hasta el nitrómetro donde se mide el volumen del nitrógeno generado, sobre una solución concentrada de hidróxido de potasio.



Equipo de *Dumas* para determinar nitrógeno (modificación de Shelberg):
 (1) Regulador de mercurio para controlar la presión;
 (2) Frasco Dewar con CO₂ sólido;
 (3) Llave de tres pasos;
 (4) Tubo para combustión;
 (5) Mecheros;
 (6) Horno para combustión;
 (7) Nitrómetro de Schiff;
 (8) Botella niveladora;
 (9) Cierre de mercurio y válvula de seguridad

Figura 16. Equipo de Dumas para determinar el nitrógeno, (Dumas 1830)

El sistema de 2400 Series II se compone de cuatro zonas principales:

- Zona de combustión
- Zona de control de gas
- Zona de separación
- Zona de detección

En la zona de combustión, las muestras encapsuladas en viales de estaño se insertan automáticamente desde el automuestreador integral de 60 posiciones o manualmente de muestra por muestra. En presencia de exceso de oxígeno y reactivos de combustión, las muestras se queman completamente y se reducen a los gases elementales CO₂, H₂O, N₂ y SO₂. Los productos de combustión se pasan a la zona de control de gas, donde los gases se capturan en la cámara de mezcla de la misma zona, en esta zona se mezclan de manera uniforme y acelerada y se mantienen con precisión en condiciones controladas de presión, temperatura y

volumen. Para obtener resultados más precisos se hizo una homogeneización mecánica completa de los gases, esto bajo las condiciones controladas de presión. Después de la homogeneización de los gases del producto, la cámara de mezclado se despresuriza a través de una columna en la zona de separación del instrumento, la separación se da utilizando una técnica conocida como Cromatografía Frontal (Fig 16)

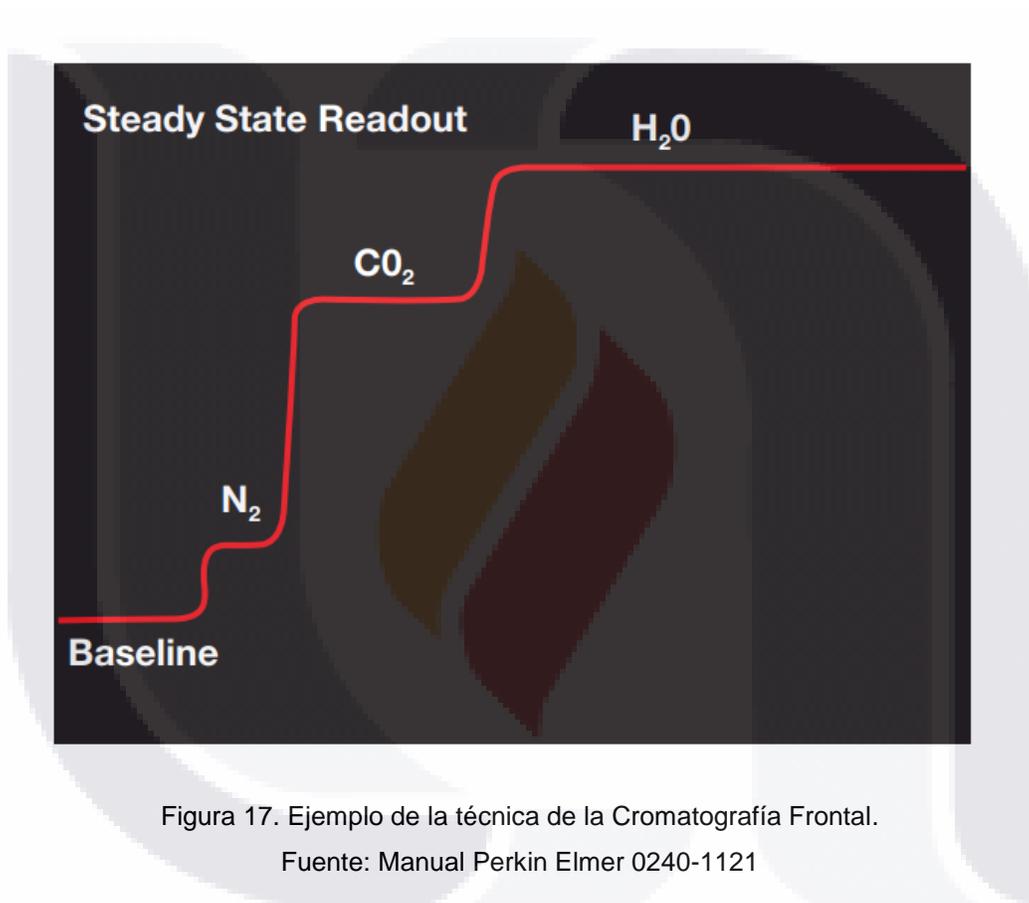


Figura 17. Ejemplo de la técnica de la Cromatografía Frontal.
 Fuente: Manual Perkin Elmer 0240-1121

Se procedió a la calibración del equipo mediante un estándar (Cisteína , Perkin Elmer 0240-1121) con pureza al 100% y tres blancos, para continuar con la muestra a analizar, a cada muestra se le asigna un número identificador (ID), el peso en mg y se colocó la muestra en la charola con 2 repeticiones, seguida de un blanco, esto para las 60 cavidades del carrusel, ya teniendo las muestras en cada una de las cavidades se procede a la obtención de cada una y la impresión del resultado, cabe mencionar que cada muestra tardó aproximadamente de 5 a 8 minutos en ser procesada, para obtener los promedios de cada valor.

El contenido de COS por unidad de superficie (Mg/ha) en cada punto se obtiene a partir del porcentaje de COS, DA y la profundidad del suelo, con la siguiente fórmula:

$$\text{COS} = \% \text{ Co} * \text{Da} * \text{P}$$

Donde:

COS= Carbono orgánico total en el suelo

Co= Porcentaje de Carbono orgánico (%)

Da= Densidad aparente (g m³)

P= profundidad de muestreo

6.4.1 Obtención de Biomasa microbiana

Esta técnica se desarrolló en el Laboratorio de Microbiología del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV), Unidad Irapuato, para determinar el contenido de biomasa microbiana. Se seleccionaron 12 muestras aleatoriamente con respecto a las tres coberturas vegetales: abierta, semiabierta y cerrada, se extrajeron 3 submuestras de cada muestra seleccionada, el procedimiento para la obtención fue el siguiente: se pesaron 40 gr de NaOH para diluir en un litro de agua destilada, a continuación, se midieron 81.01 ml de HCl para diluir en un litro de agua destilada, esto se valoró con una solución de bicarbonato de sodio.

Preincubación: las muestras se sometieron a un tratamiento de preincubación para estabilizar el metabolismo microbiano del suelo.

Se colocaron 25g de suelo por analizar en frascos, ajustando su Capacidad de Retención de Agua (CRA) a 40% usando agua destilada. Posteriormente los frascos se colocaron en cubetas de plástico, junto a dos frascos: uno de agua destilada y otro con NaOH 1M., las cubetas se cerraron e incubaron en oscuridad a 25°C durante 7 días, después de la preincubación se reajustó la humedad del suelo a 40% de la CRA.

Una vez que se hicieron las preincubaciones (figura 17), se dividieron las muestras en dos grupos: el primero incluyó muestras de suelo fumigadas. El segundo correspondió a las muestras con suelo no fumigaron.

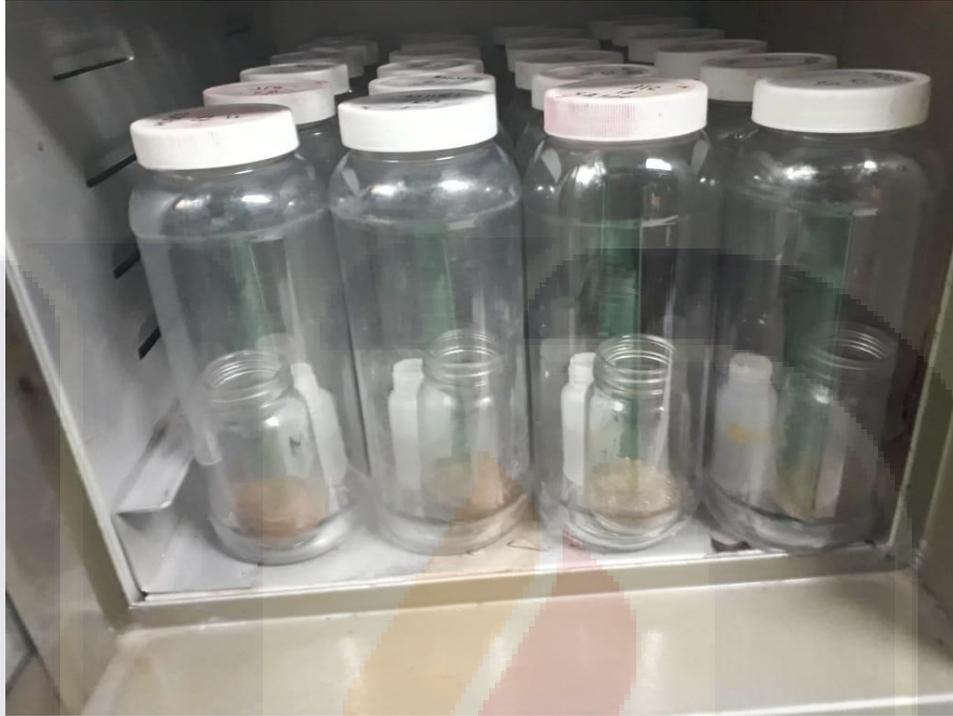


Figura 18. Pre-incubación del suelo.

Fumigación del suelo

Se colocaron las muestras a fumigar en un desecador con papel absorbente húmedo, se adicionó un frasco con 25 ml de cloroformo libre de etanol. Una vez cerrado el desecador, se conectó una bomba de vacío y se esperó a que el cloroformo entrara en ebullición durante dos minutos, se utilizaron esferas de vidrio para evitar que el líquido se proyectara hacia afuera del contenedor. Una vez cumplido el tiempo, se dejó incubar por 24 h en oscuridad a 25°C (Jenkinson y Powlson, 1976)

Después de la incubación, el cloroformo se evacuó mediante la bomba de vacío (figura 18) por intervalos de 30s; el procedimiento se repitió varias veces (aproximadamente 6-8 veces) hasta que no se detectó el olor a cloroformo. (Vance, 1987).

A ambos suelos (fumigado y no fumigado) se les reajustó la CRA al 40% y las muestras fumigadas fueron inoculadas con suelo no fumigado, aproximadamente al 5% del peso del suelo seco.

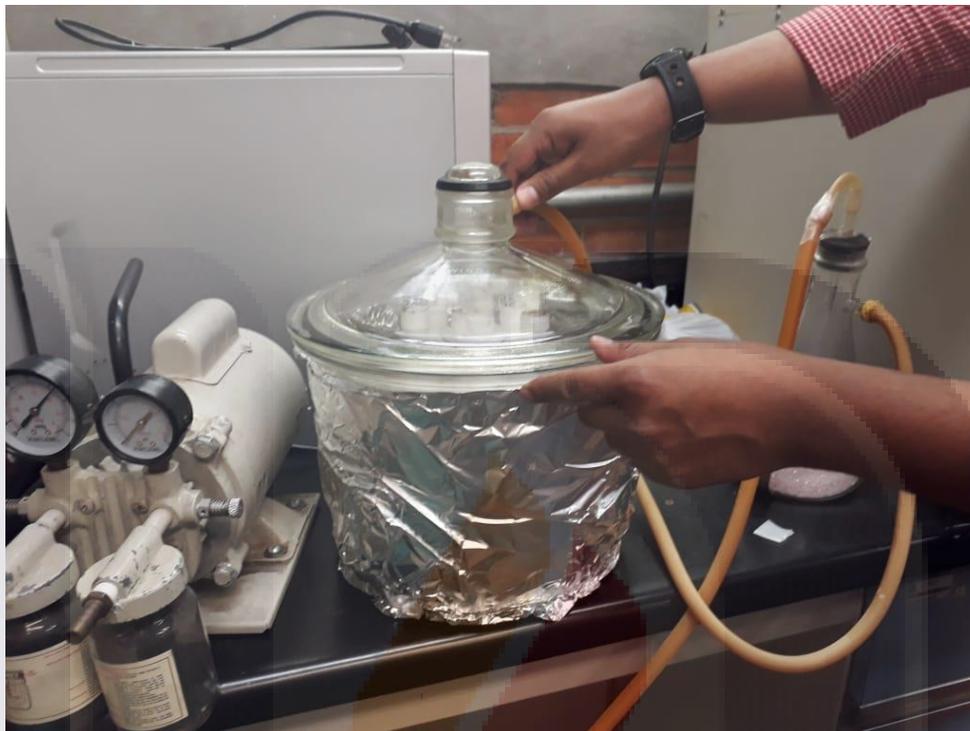


Figura 19 Método para fumigación del suelo con cloroformo libre de etanol.

Posteriormente, tanto los frascos con suelo fumigado como no fumigado, fueron transferidos a frascos de 970 mL, cada uno conteniendo un frasco con 20 mL de NaOH 1 M, además se agregaron 20 mL de H₂O en el fondo del frasco de 970 mL para estabilizar la atmosfera. Todos los frascos fueron incubados en oscuridad durante 10 días a 25°C.

Al término del periodo de 10 días de incubación, se determinó el contenido de C (reportado en mgC·Kg⁻¹ ss) por titulación del NaOH con HCl 0.1 N (Figura 19).



Figura 20 Titulación de NaOH para obtener el contenido de C. Una vez que se determinó el contenido de C en las muestras, se calculó el Carbono de la biomasa microbiana mediante la siguiente fórmula:

$$C \text{ de Biomasa Microbiana} = (C\text{-CO}_2 \text{ Fumigado}) - (C\text{-CO}_2 \text{ No Fumigado}) / K_c$$

Donde:

C-CO₂ Fumigado= Carbono del dióxido de carbono del suelo fumigado.

C – CO₂ No Fumigado = Carbono del dióxido de carbono no fumigado.

K_c = Coeficiente de extracción del Carbono de Biomasa microbiana después de la fumigación (0.45 a 25 °C) , (Jenkinson, 1988).

6.5 EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE CAPTURA DE CARBONO EN VEGETACIÓN

En la región solo se detectaron áreas con bosques en el municipio de El Llano, con una superficie total de 1,433.35 ha, en la parte alta de la serranía Juan Grande, a más de 2400 msnm. La mayor parte de la vegetación se distribuye entre pastizales y vegetación de zonas áridas, 31,648.14 ha y 16,313.9151 ha respectivamente (Tabla 4.).

ECOSISTEMA	VEGETACIÓN	SUPERFICIE (ha)
AGRICULTURA	AGRICULTURA DE RIEGO	23407.3388
AGRICULTURA	AGRICULTURA DE TEMPORAL	49969.1481
ASENTAMIENTO HUMANO	NO APLICA	3429.69
BOSQUE	BOSQUE CULTIVADO	141.9
BOSQUE	BOSQUE DE ENCINO	1871.4
CUERPO DE AGUA	NO APLICA	535.09
EROSIÓN	EROSIÓN	1743.56
MATORRAL	MATORRAL CRASICAULE	13635.5451
MATORRAL	MATORRAL DESÉRTICO MICROFILO	461.96
MATORRAL	MEZQUITAL	2216.41
PASTIZAL	PASTIZAL INDUCIDO	16425.96
PASTIZAL	PASTIZAL NATURAL	15222.18
VEGETACIÓN HIDROFILA	BOSQUE DE GALERÍA	153.24

	TOTAL	129213.422
--	-------	------------

Tabla 3. Superficie para cada tipo de vegetación y otros conceptos.

Fuente: elaboración propia a partir de datos de INEGI (Serie V y Serie VI); SMA, “Inventario Estatal Forestal y de Suelos de Aguascalientes” (2012).

Para México, con respecto a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, se reportó que las emisiones en unidades de CO₂ eq. fue de 665,304.92 Gg, para el año de 2015, de acuerdo a los cálculos realizados en Sistemas de Información Geográfica (SIG), con base en el estudio realizado por la Secretaría de Medio Ambiente (SMA) “Inventario Estatal Forestal y de Suelos de Aguascalientes” (2012); las bases de datos de las Series III, IV, V y VI de INEGI, la superficie vegetal de la zona de estudio fue de 50,128.5851 ha, representando el 39.2% del total de superficie (129,213 ha), el resto (60.8%) corresponde a usos como agricultura, cuerpos de agua, zonas urbanas, erosión, entre otros conceptos.

Componentes de la categoría

La categoría Uso del Suelo y Cambios de Uso del Suelo y Silvicultura, comprendió tres subcategorías: 1) Cambio de la biomasa en bosques y en otros tipos de vegetación leñosa; 2) Emisiones de CO₂ procedentes de la conversión de bosques y praderas; 3) Emisiones de gases traza distintos al CO₂, por quema y oxidación de biomasa;

La base general de cálculo para la estimación de la emisión (EsEm) está dada por la ecuación (Ec. 1): $EsEm = (DA)(FE)$

Donde:

- *DA* es el dato de actividad que corresponde a la superficie que ocupan los ecosistemas antes mencionados (Bosque de coníferas, Bosques secos y Pastizales), o la cantidad de biomasa extraída de los bosques para su comercialización o aprovechamiento como leña o producción de carbón, también incluye las existencias de vegetación arbórea urbana;

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- *FE*, es el factor de emisión que se divide en tasa de acumulación de biomasa o crecimiento, y acumulación de carbono para cada especie o grupo de especies. Los aspectos particulares para cada subcategoría se exponen a continuación.

6.5.1 Cambio de la vegetación en bosques y en otros tipos de vegetación leñosa

En esta parte se determinan las emisiones o remociones de C y de CO₂ debido a cambios en la vegetación que resultan de la intervención humana, sea esta periódica o continua y que afecta significativamente los almacenes de carbono, independientemente que sus fines sean comerciales o no (IPCC-D, 1996).

Para ello, se toma en consideración que, para México, la vegetación con manejo silvícola está clasificada de la siguiente manera: 1) Bosques y selvas nativos con aprovechamientos de madera industrial; 2) Bosques y selvas nativos con aprovechamiento de leña; 3) Plantaciones forestales comerciales; y 4) Plantaciones de reforestación (SEMARNAT-INE, 2009).

Es así, que los datos relacionados con el cálculo de las superficies de bosque, fueron determinados tomando como base la homologación de vegetación descrita en la Tabla 5, cuya distribución espacial asociada al clima por condición de temperatura (°C) se presenta en la Figura 20.

Tabla 4. Homologación de los grupos de vegetación para el cálculo de cambios de biomasa de bosques y otros tipos de vegetación leñosa.

IPCC, 1996	INEGEI, 2009 (Nacional)	INEGEI, 2006 (Nacional)	INEGI-	INEGI-	INEGI-	INEGI-	SMA		
			USV-Serie III	USV-Serie IV	USV- Serie V	USV- Serie VI	IEFyS (2012)		
BOSQUES TEMPLADOS	Grupo 1. Siempre verdes	Bosque de Coníferas	Bosque de Coníferas	Bosque de Pino	Bosque de Coníferas	Bosque de encino	Bosque de Encino	Bosque Cultivado	
				Bosque de Pino-Encino	Bosque Cultivado	Bosque de pino-encino		Bosque de Encino	Bosque de Encino
				Bosque de Táscate		Bosque Cultivado			Bosque de Encino
				Bosque Bajo Abierto			Bosque Cultivado	Vegetación Secundaria Arbórea de Bosque de Encino	Bosque de Galería
				Bosque de Oyamel					
	Grupo 2. Latifoliadas	Bosque de Encino Bosque Mesófilo de Montaña	Bosque Latifoliadas	Encino	Bosque de Encino	Bosque de encino	Vegetación Secundaria Arbórea de Bosque de Encino	Bosque de Galería	
				Bosque de Encino-Pino	Bosque Mesófilo				
	BOSQUES TROPICALES	Grupo 3. Húmedos	Selva Subcaducifolia	Selva Alta y Media	Selva Media Subcaducifolia	Selva Subcaducifolia	Selva Subcaducifolia	Selva Subcaducifolia	Selva Subcaducifolia
Matorral				Matorral subtropical					
Grupo 4. Estacionales		Selva Espinosa	Selva Baja	Selva Baja Espinosa	Selva Caducifolia	Selva Caducifolia	Selva Caducifolia	Selva Caducifolia	
		Selva Caducifolia	Selva Baja	Selva Baja Caducifolia					
Grupo 5. Secos		Matorral Xerófilo	Matorral	Mezquital	Matorral Xerófilo A	Matorral Submontano	Matorral Crasicaule	Vegetación Secundaria de Matorral Crasicaule	Mezquital
				Matorral Submontano		Matorral Crasicaule			Matorral Crasicaule
				Matorral Crasicaule			Matorral Desértico Microfilo	Matorral Desértico Microfilo	
				Matorral Desértico Microfilo					

				Matorral Desértico Rosetofilo				
				Matorral Sarcocaula				
				Chaparral		Matorral Sarcocaula		
			Pastizal	Vegetación Gipsófila	Matorral Xerófilo S	Mezquital Desértico	Vegetación Secundaria Arbustiva de Pastizal Natural	Matorral Desértico Microfilo
				Vegetación Halófila				
				Arenosos				
Grupo 6. Pastizal	Pastizal		Pastizal Halófilo			Pastizal Natural		
			Pastizal Natural			Pastizal Gipsófilo		
			Pastizal-Huizachal	Pastizal		Pastizal Halófilo	Pastizal Natural	Pastizal Natural
	Pecuario		Pastizal Cultivado-Agricultura de Temporal			Pradera de Alta Montaña		
			Pastizal Inducido					
	Vegetación inducida		Pastizal Inducido, Agricultura de Temporal	Vegetación Inducida 2		Pastizal Inducido	Pastizal Inducido	Pastizal Inducido
			Pastizal Inducido, Vegetación Secundaria de Selva					

Fuente: Citado de PEACC-Durango, 2012 con adaptación de datos de Serie V y VI de INEGI y del Inventario Estatal forestal y de Suelos en Aguascalientes de SMA 2012)

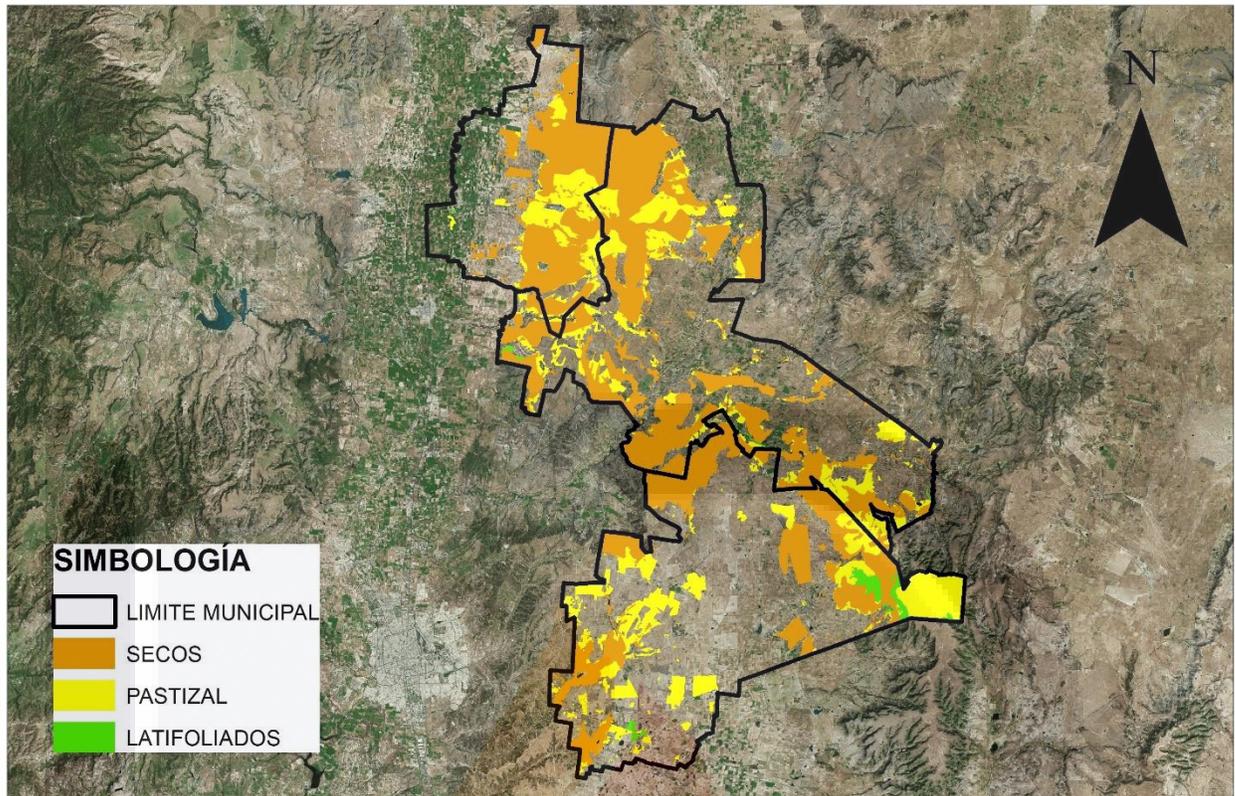


Figura 21. Mapa de homologación con diferentes coberturas.

Fuente. Elaboración propia, Distribución espacial de los grupos de vegetación homologados entre el IPCC (1996) y el INEGI-USV Serie VI (2016).

Para determinar la absorción o liberación de C se estima el incremento anual de la biomasa de bosques sujetos a manejo, talados o aprovechados, las existencias y la forma de aprovechamiento de la biomasa leñosa para clima en Zona oriente: semiárido.

Captura de carbono. - La captura de carbono está dado por el incremento anual de las reservas de carbono (ΔC), debidas a la producción de biomasa en kilotoneladas de carbono por año ($KtC \text{ año}^{-1}$), como se indica en la ecuación

(Ec 2):
$$\Delta C = \sum_{i=1} (A_i * G_i) * CF$$

Donde:

- A_i , es la superficie forestal por tipo de bosque en kilohectáreas (Kha)

- G_i , es la tasa de incremento medio anual de crecimiento de la biomasa aérea, en Kt de materia seca por año (Kt ms año^{-1}) por tipo de bosque.
- CF , es la fracción de C de ms.

Emisión de carbono. - La emisión de carbono es el resultado de la disminución anual (∇C) del almacén de carbono debido a la tala de bosques en, Kt de C año^{-1} , cuya expresión es la siguiente

$$(Ec\ 3): \nabla C = L_{comercial} + L_{leña}$$

Donde:

- $L_{comercial}$ se refiere a la pérdida anual de carbono generada por las talas comerciales, Kt C año^{-1} .
- $L_{leña}$ es la pérdida anual de carbono generada por el consumo doméstico de leña, Kt C año^{-1} .

La pérdida anual de C fue estimada a partir de la siguiente ecuación

$$(Ec\ 4): L_{industrial} = H * D * BEF_2 * FC$$

Donde, $L_{industrial}$ es la pérdida anual de carbono debida a la tala para madera industrial, Kt ms año^{-1} ; H , es volumen de madera industrial extraída anualmente en rollo, $\text{m}^3 \text{ año}^{-1}$; D , es la densidad básica de la madera en toneladas de materia seca por metro cúbico (t ms m^{-3}); BEF_2 es el factor de expansión de biomasa para convertir volumen de madera a biomasa aérea total (incluye corteza), sin unidades; y FC es la fracción de carbono de la materia seca (por defecto=0.5), Mg C (t ms) .

6.5.2 Emisiones de CO_2 procedentes de la conversión de bosque y praderas

Esta subcategoría comprende los siguientes aspectos del cálculo de emisiones de CO_2 : 1) tala de bosques, 2) quema de biomasa fuera y dentro del bosque, y 3) biomasa que se descompone en los mismos lugares donde se realizan los aprovechamientos forestales o in situ.

Para calcular la pérdida anual de biomasa se utilizó la cartografía de uso de suelo y vegetación escala 1:250,000 de las series V (2013) y VI (2016) de INEGI (Figura 21). Los mapas fueron procesados con el programa ArcGis10.2.2®, a partir de la homologación de grupos de vegetación ya citada. El valor de biomasa antes y después de la conversión por grupo de vegetación se tomó del INEGI 2002 (SEMARNAT-INE, 2002).

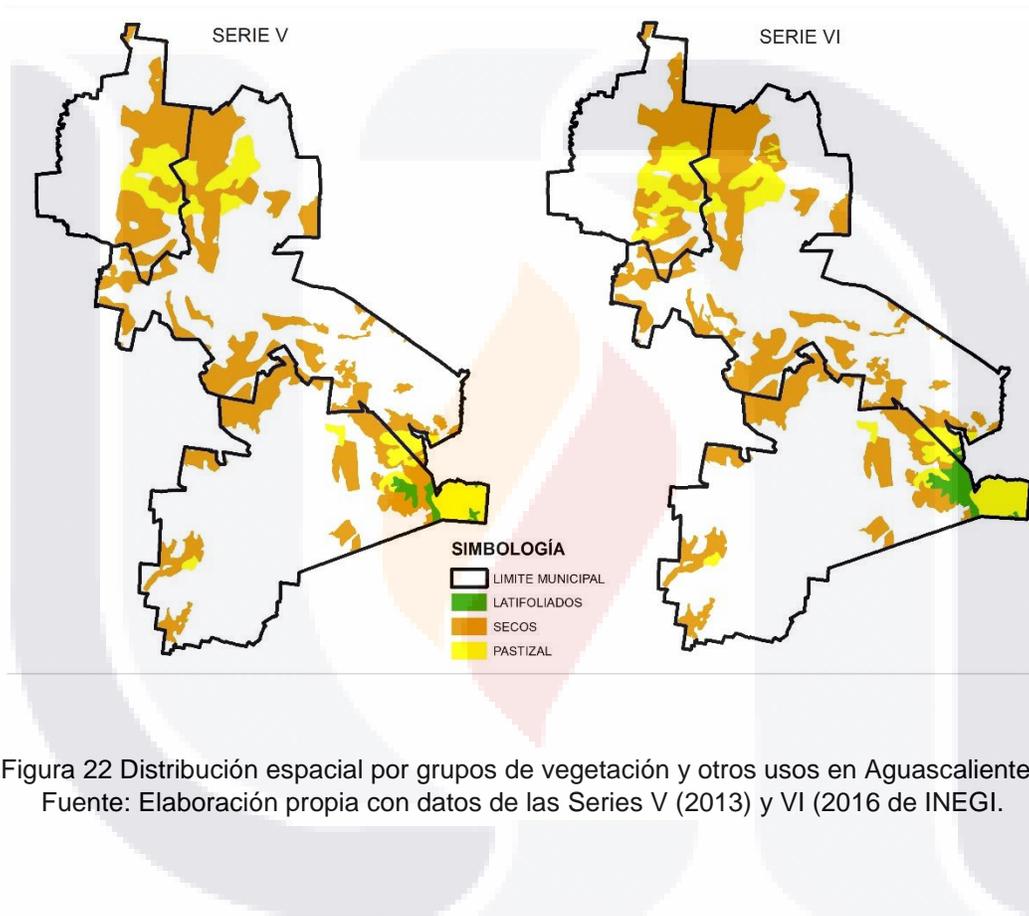


Figura 22 Distribución espacial por grupos de vegetación y otros usos en Aguascalientes
Fuente: Elaboración propia con datos de las Series V (2013) y VI (2016) de INEGI.

El contenido de biomasa para todas las clases se calculó con la siguiente fórmula

$$(Ec. 7): B_{dk} = \frac{\sum_{ij} A_{ij} * B_{ij}}{\sum_{ij} A_{ij}}$$

Donde:

- B_{dk} es la biomasa después del cambio de la clase original k (promedio ponderado de todas las clases a las cuales se ha cambiado la clase original)
- A_i es la superficie (en ha) de la clase k que cambió al uso de suelo tipo i en la ecoregión j ;
- B_i es la biomasa de la clase de uso de suelo i en ecoregión j al cual fue cambiado la superficie A_{ij} de la clase de uso de suelo k .

Para calcular el carbono liberado por la quema *in situ* y fuera del bosque, se consideraron los valores por defecto propuestos en el Libro de trabajo (IPCC-D, 1996).

6.5.3 Emisiones de gases traza distintos al CO₂, derivados de la quema in situ

El cálculo de los gases traza, distintos al CO₂, depende directamente de la estimación del flujo de carbono por concepto de quema de biomasa in situ realizado en la subcategoría de emisiones de CO₂ procedentes de la conversión de bosques y pastizales. Las emisiones de CH₄ y CO se estiman como relaciones con respecto a los flujos de carbono emitidos durante la combustión de la biomasa. El contenido total de nitrógeno se estima en base a la relación de carbono/nitrógeno. Las estimaciones de N₂O y NO_x se calculan como relaciones con respecto al nitrógeno total. Las fórmulas para calcular los gases distintos al CO₂ debido a la quema in situ son las siguientes:

$$EmisionesdeCH_4 = (Cliberado) \cdot (Relacióndeemisión) \cdot 16/12 \quad (Ec. 8)$$

$$EmisionesdeCO = (Cliberado) \cdot (Relacióndeemisión) \cdot 28/12 \quad (Ec. 9)$$

$$EmisionesdeN_2O = (Cliberado) \cdot (RelacióndeN/C) \cdot (Relacióndeemisión) \cdot 44/28 \quad (Ec. 10)$$

$$EmisionesdeNO_x = (Cliberado) \cdot (RelacióndeN/C) \cdot (Relacióndeemisión) \cdot 46/14 \quad (Ec. 11)$$

Donde, las emisiones del gas para CH₄, CO, N₂O y NO_x se expresan en Gg; C liberado es la cantidad de C en Kt proveniente de la quema biomasa; Relación de emisión corresponde a la masa de carbono liberado en la combustión como CH₄ o CO (en unidades de C), con respecto a la masa total del carbono liberado en la combustión (en unidades de C); Relación de N/C es la relación de nitrógeno liberado como N₂O y NO_x con respecto al nitrógeno contenido en el combustible (en unidades de N). Finalmente, las relaciones de los pesos moleculares, son con respecto al peso del nitrógeno y del carbono en la molécula.

6.5.4 Mapa de estimación de Carbono en biomasa aérea.

Para la creación de un mapa de estimación de C en la biomasa se compilaron cuatro bases de datos: “Inventario Estatal Forestal y de Suelos de Aguascalientes” (SMA, 2012); la Serie VI de INEGI; el “Estudio Regional Forestal de la Asociación Regional de Silvicultores del Oriente de Aguascalientes”; y el “Mapa de base de datos sobre la distribución de la biomasa aérea de la vegetación leñosa en México” (Alianza MREDD+, 2013). Este mapa constituye una primera aproximación a la distribución aérea de la vegetación leñosa en la zona de estudio, donde las tres especies más dominantes de la zona fueron, mezquite (*Prosopis laevigata*), huizache (*Acacia farnesiana* y *A. shafnerii*) y encinos (*Quercus sp.*) (Meraz y col. 2007).

Para la creación del mapa se descargaron los datos del “Mapa de base de datos sobre la distribución de la biomasa aérea de la vegetación leñosa en México”, antes mencionados, en donde se obtuvo el corte correspondiente para el estado de Aguascalientes por medio del software ArcGis10.2.2[®]; las imágenes ráster fueron cortadas y convertidas a formato Shape, para el proceso de corte de la zona de estudio; se juntaron los datos del inventario y del estudio regional forestal y se hicieron estratos de los parches de zona con mayor densidad de biomasa donde se hizo la correlación con los factores de uso de suelo y vegetación, se obtuvo el promedio de la densidad de población por ha, con lo que se calculó el valor de C en la biomasa aérea.

6.6 REALIZACIÓN DE MAPA DIGITAL DE CARBONO ORGÁNICO EN EL SUELO.

Se realizó un mapa digital de COS con los perfiles de la de la serie II edafológica de INEGI (2010), para ser comparados con otro mapa elaborado con datos obtenidos de las muestras procesadas.

Para hacer una estimación de carbono es necesario conocer algunas propiedades del suelo:

- A) Pedregosidad: se derivan los valores por defecto de los perfiles por medio de la unidad de suelo.
- B) Densidad Aparente: La cantidad de tierra fina es uno de los parámetros de estimación del COS, depende del volumen del suelo y se expresa en peso del suelo por unidad de volumen, para el caso de los perfiles edafológicos de INEGI, no se cuenta con esta información por lo que es estimada por algunos métodos basándose en el contenido de materia orgánica del suelo (MOS), (De Drew 1973, Jeffrey 1979, Grigal 1989, Adams 1973, Honeysett y Ratkowsky 1989). Cada método se deriva de un conjunto específico de suelos regionales, la selección del método apropiado es basado en las críticas y comparaciones de datos ya existentes, para el caso de México el método que mejor se adecua es el de Grigal (1989) que es representado de la siguiente manera:

$$BD = 0.669 + 0.941 * e ^{-0.06 * OM}$$

Donde:

BD: Densidad Aparente

OM: materia orgánica

- C) Análisis de carbono en el suelo: el método empleado por parte de INEGI fue el de Walkley y Black (1934), obteniendo valores en Mg ha⁻¹, para las

muestras obtenidas en campo se empleó el analizador elemental Perkin Elmer, que se basa en el método de Pregl-Dumas.

D) Profundidad: la profundidad estándar para el stock que se obtuvo de carbono fue de 0-30 cm, para los datos obtenidos por parte del INEGI se tomó con las subdivisiones que se realizaron en el perfil, es decir, que existe un top (profundidad inicial) y un bottom (profundidad final) para cada uno de los puntos muestreados y con estas profundidades se realizó la estimación para los primeros 30 cm.

6.6.1 Obtención de las covariables para el mapeo digital.

Las variables de la zona se tomaron del modelo digital de elevación de México y de estaciones meteorológicas, siendo el factor formador de suelo ($S_{c,p}$) la ecuación que se tomó en cuenta para las variables, está en función de las propiedades físicas y químicas del suelo (s), el clima del entorno (c), la actividad de los organismos (o), los atributos de relieve (r), el material parental (p), la edad geológica del sitio (a), la posición espacial del suelo (n) y el error (ϵ). Todas estas variables interactúan entre sí más el error que se tiene al tomar la muestra, quedando la fórmula siguiente:

$$S_{c,p} = f(s.c.o.r.p.a.n.) + \epsilon$$

A partir de estas variables de formación del suelo, se eligieron covariables (tabla 6) que interactuaran entre sí para correlacionarse, dichas covariables fueron procesadas por el programa Saga GIS®, las covariables generadas se muestran en la tabla 6, cada una con el factor de formación del suelo. El Mapa de pendientes (Fig. 22) y Aspecto (Fig. 23), son dos de las covariables que interactuaron con mayor precisión en correlación a las otras.

Variable	Descripción	Unidad	Factor de formación
Aspecto	Representa la orientación horizontal de una superficie	grados	r
Pendiente	Tasa de cambio que expresa la primera derivada de la elevación respecto a la superficie horizontal	%	r
Curvatura general	Tasa de cambio de la pendiente en el espacio. Indica la concavidad y convexidad del terreno	Adimensional	r
Curvatura horizontal	Tasa de cambio horizontal de la pendiente en la dirección de máxima pendiente. Determina la convergencia o divergencia del flujo	Adimensional	r
Curvatura vertical	Tasa de cambio vertical de la pendiente en la dirección de máxima pendiente. Determina la desaceleración y aceleración relativa del flujo	Adimensional	r
Índice de posición topográfica	Índice que caracteriza la topografía local (geoformas) con respecto a la posición relativa del terreno	m	r
Índice topográfico de humedad	Determina la influencia de la topografía en la concentración de humedad del suelo y su potencial para generar escorrentía	Adimensional	r
Longitud de pendiente	Distancia de máxima pendiente que recorre el	m	r

	escurrimiento superficial desde el parteaguas hasta un cauce		
Índice de potencia de flujo	Indica la capacidad que acumula una celda para producir erosión	Adimensional	r
Índice de transporte de sedimentos	Caracteriza el efecto de la topografía sobre las pérdidas de suelo	Adimensional	r
Densidad de drenaje	Define la longitud media de curso por unidad de superficie	km km ⁻²	p
Precipitación Media Anual	Distribución espacial de la lluvia media anual	mm	c
Temperatura media anual	Distribución de la temperatura media anual	°C	c

Tabla 5. Covariables empleadas para la elaboración del mapa digital de C.

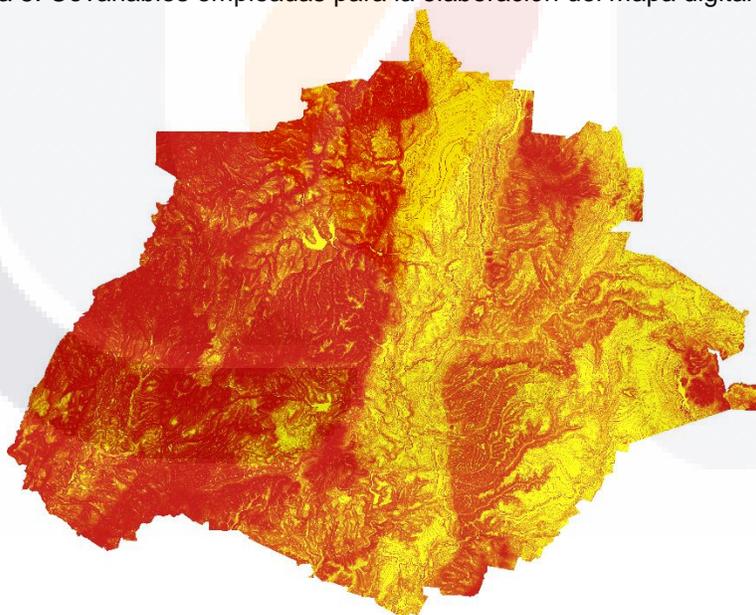


Figura 23. Mapa de pendiente de Aguascalientes corte del modelo digital de elevación.

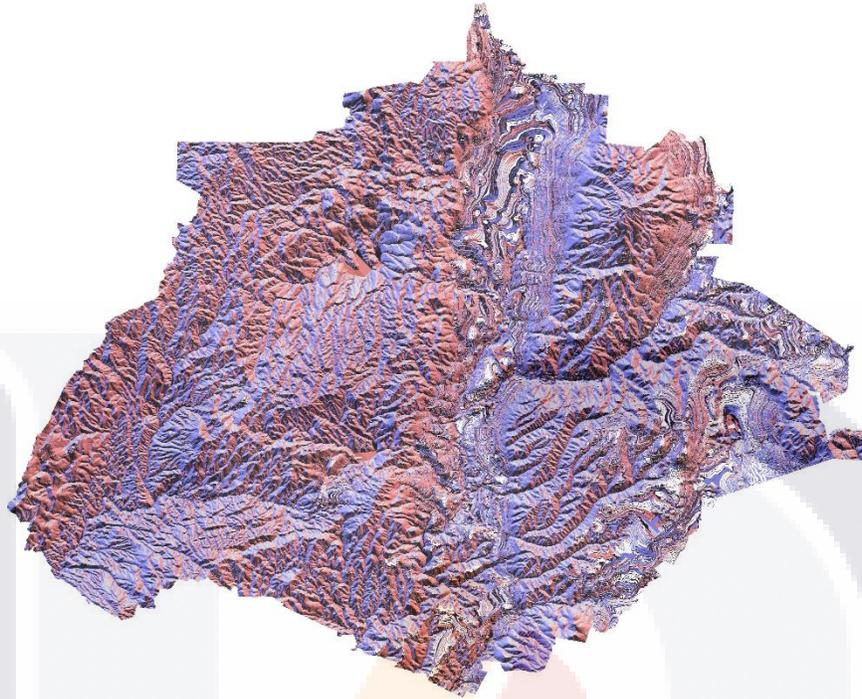


Figura 24. Mapa de aspecto de Aguascalientes, corte realizado con Saga GIS del modelo digital de elevación.

Una vez obtenidas y procesadas las covariables mediante el software de R, se prepararon los datos de partida, se realizó una tabla con el id de la muestra, las coordenadas, la profundidad del suelo, la unidad del suelo y el contenido de carbono en el sitio de muestreo.

Para la realización del mapa con los perfiles de INEGI, se integró la densidad aparente para calcular el contenido de COS, ya que dichos perfiles solo contienen el porcentaje de materia orgánica en el suelo MOS, la densidad aparente se calculó empleando el método Grigal (1989) antes mencionado, una vez calculada la densidad aparente se calculó el carbono orgánico en el suelo.

El software incorporó las covariables, se cargaron las coordenadas, tanto para el mapa del INEGI como para las muestras de suelo, se extrajeron dos tablas en

archivos CSV con todas las covariables y el contenido neto del COS a 30 cm de profundidad.

Se cargó la base de datos armonizada, cuyos valores que resultaron en N/A, fueron cambiados por CERO para posteriormente ser eliminados, ya que éstos no representan datos y pueden llegar a alterar la información obtenida.

Se hizo la transformación del stock de carbono a 30 cm mediante un logaritmo natural, que es a partir de una regresión del valor unitario del contenido de carbono. Se trabajó con el modelo Random Forest (RF) (Breiman, 1996 citado por Cutler, y col., 2012), que es una combinación de árboles de decisión, donde cada árbol depende de los valores de la correlación de las covariables, siendo independiente y teniendo la misma distribución para cada una de estas.

Se implementó este modelo, ya que se buscó reducir la varianza entre la correlación de las covariables, esto se logra mediante un proceso de construcción de nuevos datos y la selección aleatoria de los datos de entrada. Dentro de cada covariable que relaciona con la variable de CO, el modelo eligió a aquellas covariables que tienen mayor en la correlación con el CO.

Al cargar la base de datos de partida, que contiene las covariables ambientales que explicaran mejor la respuesta en la variable dependiente Carbono, se obtuvo un valor estimado de Carbono a 0-30 cm de profundidad.

6.6.2 Uso de suelo y vegetación

Además de los datos de cobertura vegetal y uso de suelo, la geología y el clima son datos vitales para el análisis estadístico, y a su vez el mapeo de las propiedades de suelo. Hay diversas fuentes de datos para la obtención de estas covariables, una de las principales es la serie V de uso de suelo y vegetación de INEGI (2008), también existen fuentes internacionales para poder obtener datos de cobertura.

Landsat GeoCover (Global), es una colección de imágenes Landsat mundial que fusiona mosaicos por medio de imágenes para un fácil manejo, los mosaicos de

GeoCover Landsat están disponibles en Universal Transversal Mercator (UTM)/Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS84).

6.6.3 Clima

WorldClim es un conjunto de capas globales climáticas (datos climáticos en cuadrícula) con una resolución espacial de aproximadamente 1 km². Estos datos pueden ser utilizados para el mapeo y modelado espacial. La versión utilizada fue la versión 2 en formato ESRI cuadrícula.



7. RESULTADOS

En este apartado se describen los resultados de cada objetivo, se produjo información de bases de datos y cortes digitales, documental y de cartografía, misma que permite realizar una clasificación gráfica de la zona de estudio (niveles de C almacenados), así como un diagnóstico de mapeo digital de los almacenes de carbono en la región.

7.1 Densidad Aparente

Un elemento importante evaluado en el suelo fue la Densidad Aparente, cuyos valores que han sido analizados no presentan variabilidad significativa y estos se encuentran fluctuando entre los 1.08 y 1.33 gr/cm^3 , siendo un indicador de porosidad de suelo entre un 50 y 60%, donde la densidad aparente con respecto a las unidades de suelo (Fig. 21). Las medias de cada una de las unidades se comportaron de manera similar, entre 1.01 y 1.27, lo que indica que los valores son aparentemente bajos (FAO, 2009), esto debido a que tienen una condición porosa. La densidad aparente es una referencia considerable para la descripción de la calidad de ese suelo y con respecto a la función que puede desarrollar en el ecosistema en que se encuentre.

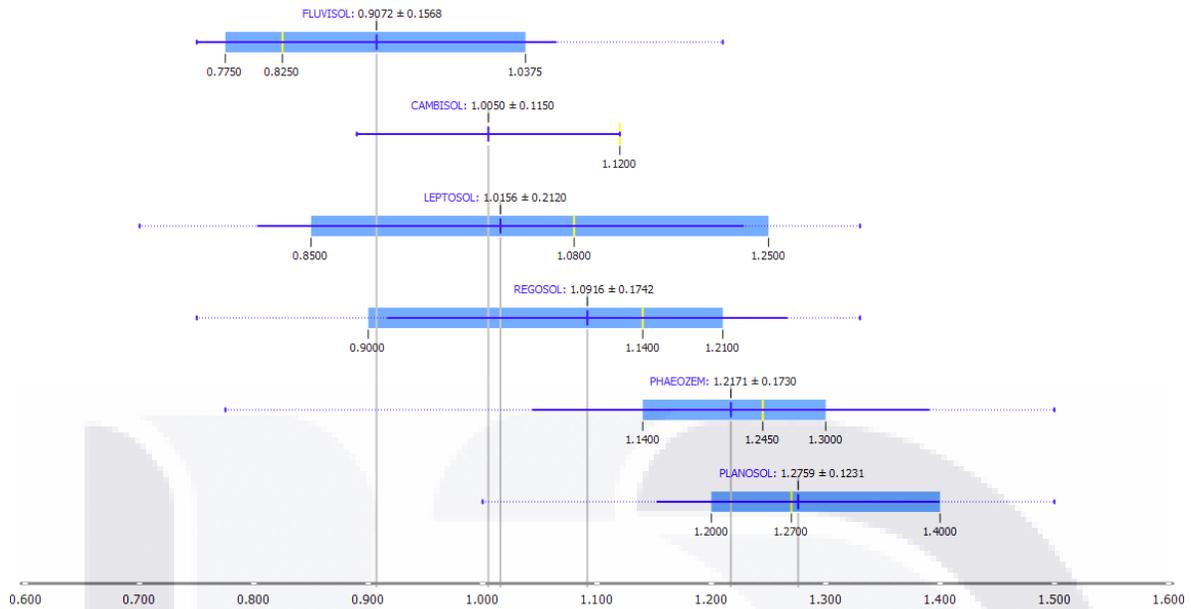


Figura 25. Diagrama de caja y brazos del comportamiento de la Densidad Aparente respecto a la Unidad de Suelo

7.2 Unidades de suelo en la zona de estudio

De acuerdo al Estado Mundial del Recurso Suelo (FAO & ITPS, 2015), la contribución principal del suelo con respecto a los tipos de principales servicios ecosistémicos (seguridad alimentaria, regulación del clima, regulación hídrica y provisiones socioculturales), se estima en una escala de cero a cinco. Las clasificaciones se basan en las características del suelo y su la calidad, puede ser medido por: idoneidad para cultivos en crecimiento; contenido de carbono orgánico; capacidad de retención de agua; y capacidad para apoyar la infraestructura y almacenar restos arqueológicos. Con base en esta escala y los diferentes tipos de suelos de la zona, se obtuvo el SE que ofrece cada uno de los tipos de suelo (Tabla 7)

SUELO	SUPERFICIE (ha)	Servicios Ecosistémicos					
		Comida	Clima	Agua	Cultural	Sumatoria	SE dominante
CAMBISOL	2,253.07	3	2	3	1	9	Seguridad Alimentaria
CUERPO DE AGUA	596.2444	-	-	-	-	-	-
DURISOL	1,341.21	1	1	1	1	4	Muy bajo
FLUVISOL	17,557.72	4	2	4	2	12	Seguridad Alimentaria
KASTANOZEM	1,009.22	3	4	2	1	10	Seguridad Alimentaria
LEPTOSOL	13,028.16	1	1	2	1	5	Escurrimiento de agua
PHAEOZEM	36,634.74	4	4	3	1	12	Seguridad Alimentaria
PLANOSOL	25,061.63	1	1	1	1	4	Muy bajo
REGOSOL	30,227.00	2	1	1	1	5	Biomasa

Tabla 6. Contribución de las unidades de suelo con los tipos de Servicios Ecosistémicos que ofrecen.

Fuente: FAO & ITPS, 2015

7.3 Contenido de Carbono en el suelo

Una vez obtenido el valor de Densidad Aparente y la profundidad de muestreo (30 cm) se estimó el contenido de CO. Para cada sitio de muestreo se describió el tipo de vegetación presente el entorno y la condición del sitio. De acuerdo a la clasificación, se observó que la vegetación que predominó con mayor frecuencia fue el matorral xerófilo, siendo un factor importante de almacenamiento de carbono en vegetación. El CO es una variable que presenta un grado de variabilidad mayor, depende directamente del contenido de MO y se estima que cerca del 58% de MO es el CO (PMC, 2013). Para las zonas áridas y semiáridas los valores de MO están

ligados a la variación climática, así como la escasa precipitación pluvial. Los valores de CO, en cuanto a las unidades de suelo presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$), reportándose los valores siguientes:

Leptosol, entre 6.35 y 57.60 tonC ha⁻¹.

Cambisol, entre 5.55 y 38.67 tonC ha⁻¹

Regosol, entre 1.14 y 50.40 tonC ha⁻¹

Phaozem, entre 3.14 y 51.87 tonC ha⁻¹

Fluvisol entre 2.12 y 32.50 tonC ha⁻¹

Planosol, entre 0.58 y 29.14 tonC ha⁻¹.

Los suelos que presentan concentraciones más altas de CO fueron los Leptosol y Regosol (Fig. 25), coincide con la capacidad de retención de esta unidad de suelo (Galicia y col., 2015), ya que la profundidad de este tipo de suelo limita el almacenamiento de COS. La mezcla de la biomasa muerta incorporada con la estabilización que operan en los suelos, hacen que éstos sean más ricos en calcio (Siebe y col., 2003)

Se utilizó el método de Bonferroni para obtener los promedios y los grupos homogéneos de las unidades de suelo (tabla 8), esto se realizó para controlar el nivel de confianza de las muestras.

Bonferroni			
Unidad de suelo	Casos	Media ton/ha	Grupos Homogéneos
PLANOSOL	22	10.7264	X
PHAEZEM	38	20.2255	XX
FLUVISOL	16	22.2806	XX
REGOSOL	20	22.872	X
CAMBISOL	10	23.115	XXX
LEPTOSOL	17	37.3712	X

Tabla 7. Medias del COS con respecto a las unidades de suelo en la zona de estudio.

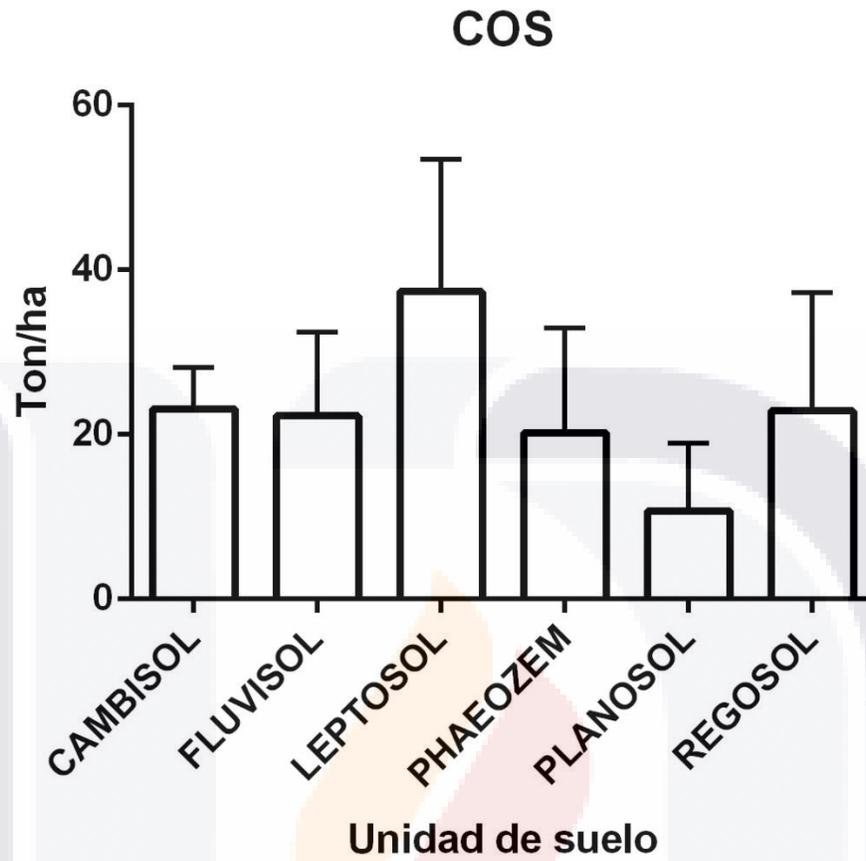


Figura 26. Promedio del almacén de Carbono Orgánico con relación a la unidad de suelo (ton ha⁻¹).

7.3 Carbono en la Biomasa Microbiana (C-BM) del suelo

El carbono C-MB se calculó para 12 muestras aleatoriamente con respecto a las tres coberturas vegetales: abierta, semi-abierta y cerrada, para cada una de las muestras se consideró la cobertura vegetal encontrada en el sitio de muestreo (tabla 9), se calculó la densidad aparente (DA), materia orgánica (MO), y el carbono en la biomasa microbiana (C-BM).

COBERTURA VEGETAL	MUESTRA
SANGRE DE GRADO, MEZQUITE, HUIZACHE	M6R3
MEZQUITE	M4R3
UÑA DE GATO, MEZQUITE, NOPAL	M37R3
PASTIZAL	M39R3
MEZQUITE, HUIZACHE, NOPAL, PASTIZAL	M17R1
NOPAL, MEZQUITE, HUIZACHE	M20R4
NOPAL, ASCLEPIAS, PASTIZAL, HUIZACHE	M11R1
PASTIZAL, HUIZACHE	M18R3
MEZQUITE, HUIZACHE, ACACIAS	M33R3
SANGRE DE GRADO, CONIFERA, PASTO	M24R2
MAGUEY, SANGRE DE GRADO, UÑA DE GATO	M25R2
HUIZACHE, NOPAL	M27R1

Tabla 8. Cobertura vegetal de los sitios de muestreo para la obtención de C-BM

La tabla 10 muestra los resultados obtenidos en la determinación del C-BM para las distintas muestras analizadas, los valores de las muestras fluctuaron en promedio entre 121.66 y 316.86 mgC kgss⁻¹.

MUESTRA	M25R2	M18R3	M17R1	M37R3	M39R3	M6R3
MOS	1.19	1.098	1.373	0.732	0.732	1.009
D.A.	0.6	0.85	0.9	0.95	0.8	0.5
CO	18.252	23.86	31.59	17.78	14.97	12.87
C-BM	200.34	236.86	316.86	199.74	153.66	190.78
MUESTRA	M33R3	M20R4	M11R1	M4R3	M24R2	M27R1
MOS	0.732	1.007	1.098	1.9	0.824	1.737
D.A.	0.7	1.2	0.85	0.89	1.14	0.8

CO	13.1	30.88	23.86	27.03	24.01	28.08
C-BM	121.66	298.3	185.02	278.46	232.12	261.82

MOS=Materia Orgánica del suelo (%), DA=Densidad aparente (gr/cm³), CO=Carbono Orgánico (ton/ha), C-BM= Carbono en Biomasa Microbiana (mgC kgss⁻¹)

Tabla 9. Biomasa microbiana en suelos de la región

Los valores más altos de C-BM se tuvieron en sitios de muestreo donde se encontró mayor densidad de especies leñosas, lo que coincide con Cadena y col., (1998), describe que las especies leñosas son importantes para la retención de materia orgánica y absorción de nutrientes. Mientras que los valores más bajos se tuvieron en sitios con pastos y algunos matorrales xerófilos. Existe una correlación respecto a las especies leñosas, tanto por su densidad, como por la presencia de materia lábil más activa, ya que la biomasa microbiana se considera una fracción lábil de la materia orgánica del suelo, así como un reservorio importante de nutrientes en el reciclaje y la mineralización de los mismos (Marumoto y col., 1982)

Al comprar los métodos de obtención de CO (WALKLEY & BLACK, 1934) y obtención de C-BM (Jenkinson & Powlson, 1976) (figura 26), se encontró correlación con la presencia de BM (mgC/kgss) y CO (tonC/ha), esto se debe a que están estrechamente ligados por las condiciones de suelo y la actividad de la MO.



Figura 27. Comparación de métodos para CO y BM

7.4 Evaluación del potencial de captura de C en la vegetación.

Cambios de biomasa en bosques y otros tipos de vegetación leñosas

Para dos de los seis grupos homologados entre IPCC y el INEGI, se encontró que las existencias de vegetación en la zona oriente (INEGI-USV-SV, 2013), para el periodo de estudio (2013-2016), mantuvo una suma promedio de 15,405 ha que representa el 11.9% del de la zona de estudio (129,215 ha). La superficie considerada en la presente contabilidad ambiental comprende solo 2,806 ha que representa el 18.2% de la superficie de vegetación leñosa sujetas a manejo forestal (VSMF) en la región, siendo los de mayor importancia los grupos de vegetación de bosque seco (G5), con 11.6 % (Tabla 11).

Grupos homologados	Serie VI	VSM	IR
IPCC-INEGI			
	Ha		%
Latifoliadas	834	83	8.6
Secos	7,722	1,633	11.6
Vegetación leñosa (VL= Secos+Latifoliados)	8,556	1,716	11.4
Pastizal	6,849	1,090	8.2
Suma (VL + Pastizal)	15,405	2,806	10.6
Otros usos	87,799.6		
Total, zona Oriente	127,708.6		

Otros usos = IAPF (Intensivo Agrícola, Pecuario, Forestal), urbano y rural, cuerpos de agua; USV-S5= Uso del suelo y vegetación de la serie VI; VSM =Vegetación sujeta a manejo reportada por la UMAFOR; IR = Importancia relativa con respecto a la superficie total del Estado de Aguascalientes; sujeta a manejo forestal.

Tabla 10. Uso del suelo Clasificado e importancia Relativa de la zona oriente de Aguascalientes
Fuente: homologación de las diferentes fuentes de datos

Conforme a la información mostrada en la tabla anterior, se estimó que de la VSMF entre el 2013 y el 2016 mantuvo una captura de carbono (↓), atribuible al incremento de la biomasa leñosa (-42.371/ 41.559 KtC) mayor que la liberación captura de

carbono (↑), por lo que el balance neto en la función captura-emisión fue de -0.812 kt de C (Figura 27)¹.

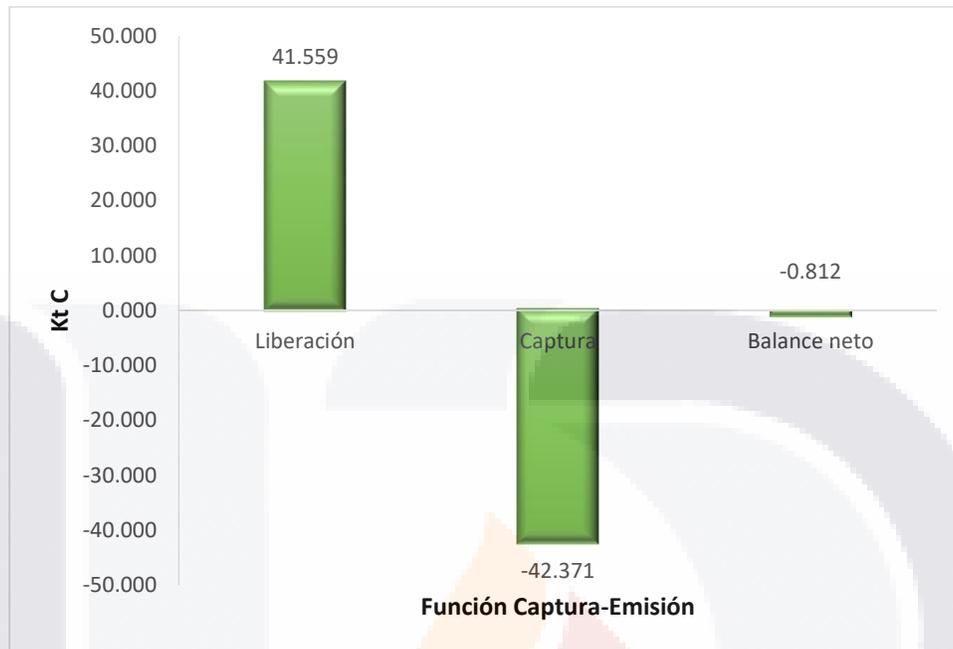


Figura 28. Balance en kilotoneladas de carbono (kt de C) para cambios de biomasa y otros tipos de vegetación leñosa para los dos grupos de vegetación clasificados de la zona oriente de Aguascalientes.

Fuente IPCC, 1996 derivado de los procesos del proyecto.

El contenido de C en la biomasa aérea tuvo un comportamiento similar con respecto a las diferentes variables, en cuanto a los estratos que se clasificaron (bosque, mezquital, matorral). El de bosques fue el que obtuvo mayores contenidos de carbono 37 tonC ha⁻¹ (Tabla 12), coincide con Avendaño y col. (2009), ya que esta relación se debe al alto volumen de biomasa de los árboles adultos y de las especies de la región que tienen una mayor cantidad de biomasa. Para esta región la abundancia de mezquital y matorral xerófilo propiciaron un almacenamiento homogéneo con respecto a otras especies encontradas (Rojas y col., 2015)

ECOSISTEMA	VEGETACIÓN	SUPERFICIE (ha)	Mínimo TonC/ha	Máximo TonC/ha	Promedio TonC/ha
BOSQUE	BOSQUE CULTIVADO	141.9	1.18	33.5	15
BOSQUE	BOSQUE DE ENCINO	1,871.40	1	37.8	22
MATORRAL	MATORRAL CRASICAULE	13,635.55	0.7	19.8	11
MATORRAL	MATORRAL DESÉRTICO MICROFILO	461.96	0.6	17.5	8
MATORRAL	MEZQUITAL	2,216.41	1.12	33.4	14
PASTIZAL	PASTIZAL INDUCIDO	16,425.96	0.6	15.8	6
PASTIZAL	PASTIZAL NATURAL	15,222.18	0.6	17.5	5
VEGETACION HIDROFILA	BOSQUE DE GALERÍA	153.24	0.4	32.1	10

Tabla 11. Contenido de C en los diferentes tipos de vegetación.

En la figura 28 se muestra el mapa de predicción de carbono en biomasa aérea, elaborado a partir de los datos de partida de las diferentes bases de datos. Estas estimaciones son en pixeles de 30 m, los valores más altos de Carbono se muestran en las zonas representadas por bosque, en la parte alta de la sierra de Juan Grande, cerca de los 2500 msnm y con la presencia de algunas *Opuntias sp* y *Quercus sp*. Las especies espinosas subinermes como el mezquital y el huizachal, se consideran como estructuras vegetales nativas, sobre todo por lo típico de la región misma, que se considera como un clima semiárido con condiciones templadas, así como en el cerro de Altamira que predomina la especie de *Prosopis laevigata*.

y

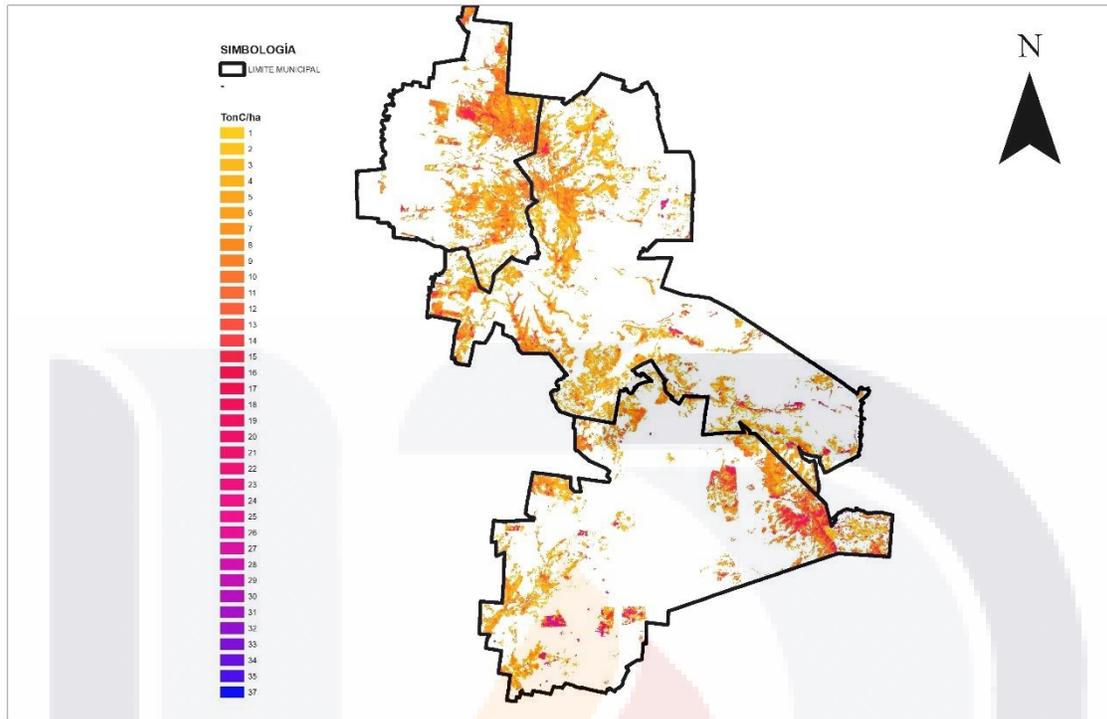


Figura 29. Contenido de Carbono en biomasa aérea para la zona de estudio.
 Fuente: elaboración propia a partir de las Series V y VI (INEGI, 2013y 2016) el IEF y SA (SMA, 2012) y del Mapa de distribución de biomasa para México (REDD+, 2013)

7.5 Realización de Mapeo Digital de Carbono Orgánico en el Suelo.

Datos de partida

Los primeros datos obtenidos de los perfiles de suelo de INEGI que se procesaron, fueron de las diferentes covariables utilizadas y que se incluyeron en el modelo, mismas que se almacenaron como capas raster, procesadas con Saga GIS ® y ARC GIS ®. Para realizar la primera base de datos se tomaron en cuenta:

- Covariables cortadas y procesadas del Modelo Digital de Elevación
- Uso de suelo correspondiente a la capa de Suelo y Uso de Suelos serie V de INEGI (2008) con escala 1:250000
- Capas de datos climáticos

Como partida para la creación de la base, los datos tuvieron una distribución normal (Fig. 29), se comprobó normalidad con el método gráfico de QQ-plot y con la prueba de Kolmogorov, donde se obtuvo un valor $p=0.032$, con algunos valores por encima de las medias normales.

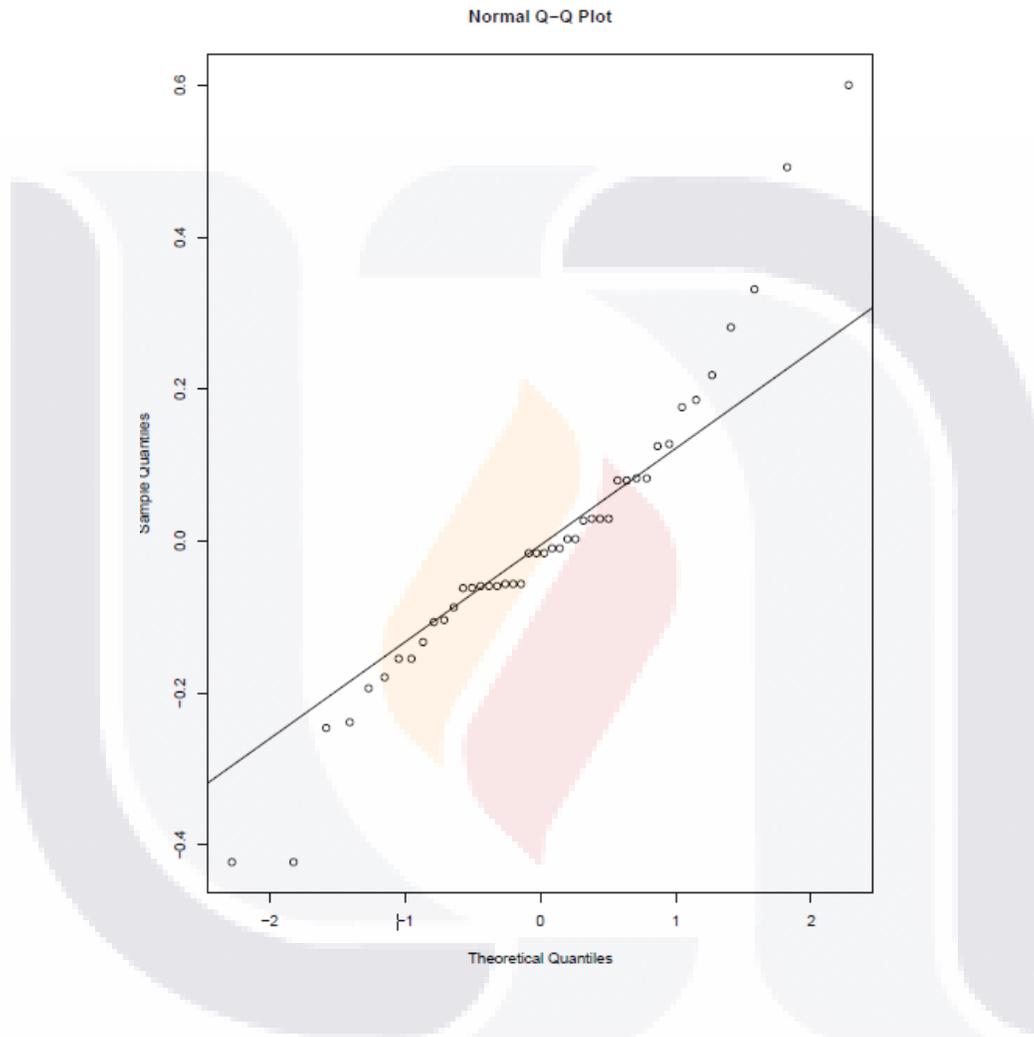


Figura 30. Distribución de los datos de Carbono Orgánico.

Algunas de las covariables fueron descartadas por el software R para la estimación del carbono, se empleó el modelo de Random Forest (RF) (Brus y col., 2017) y (Liaw & Wiener, 2002), este método consiste en utilizar numerosos árboles de decisión (500), alimentados con un subconjunto de los datos de calibración (obtenido mediante Re muestreo con reemplazamiento) y con un subconjunto de

los predictores. Esto garantiza la des-correlación de las predicciones de los distintos árboles para evitar la interferencia entre ellos. Al final, cada uno de los árboles predice el resultado en cada pixel y la predicción final se obtiene de árboles de regresión, promediando estos valores.

El modelo RF ha sido probado por varios investigadores para la cartografía digital de suelos (Wiesmeier y col., 2011), específicamente en el mapeo de carbono en el suelo, hay autores que han mostrado que posee una gran precisión en comparación con otros modelos de predicción. Se ha demostrado que realiza una predicción espacial precisa relativamente mejorada, es un mejor enfoque para tratar con el modelo de exceso de montaje de ruido y de los datos, es capaz de manejar tanto las relaciones dimensionalmente lineales como no lineales.

Blanco y col. (2014) evaluaron varios métodos para la modelación de Carbono Orgánico, siendo el modelo de RF el que mejores resultados ofreció, ya que es un método flexible basado en aprendizaje automático y ofreciendo resultados considerablemente mejores que los métodos estadísticos clásicos.

7.5.1 Realización de mapas con covariables

Se realizó el mapa de estimación de COS con la base de datos generada por el INEGI, los valores de COS fluctuaron entre 0.08 y 51.80 tonC ha⁻¹ (figura 30), a diferencia de los valores de partida y la aplicación de las covariables climáticas y topográficas, los valores incrementaron con respecto a los datos de entrada, es decir, la predicción asignó valores mayores al relacionar las variables de curvatura del perfil y el área de captura hidrológica, en correlación positiva con el modelo de predicción. Las variables descartadas por el programa fueron aquellas que tuvieron menos correlación estadística y mayor margen de error con el modelo estadístico.

Cabe señalar que el mapa de INEGI, solo tiene 8 perfiles para la zona de estudio, al tener un número reducido de muestras, se tiene un porcentaje alto de incertidumbre, como lo es la medición de del suelo, ya que la precisión y calidad de muestreo están estrechamente relacionadas con la investigación reproducible, por ejemplo, se comprueba si todos los datos tienen la misma proyección geográfica y que las unidades de medición sean consistentes.

Si bien la forma adecuada de rastrear la dispersión de la incertidumbre, es haciendo un análisis estadístico y conocer la distribución de las probabilidades, en este estudio se mostró una mayor precisión en la distribución de los píxeles.

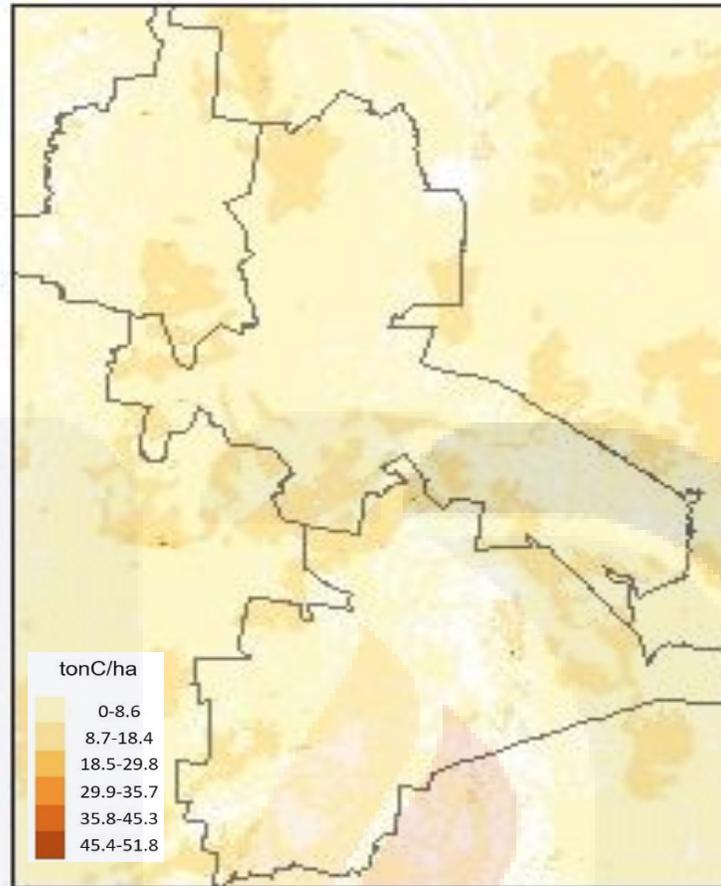


Figura 31. Mapa de Predicción de Carbono Orgánico para la zona árida de oriente de Aguascalientes

Fuente: Elaboración propia con datos de la serie II edafológica de INEGI

Mapeo de muestras procesadas

Para los datos obtenidos en campo se empleó el mismo modelo y método estadístico, dando como resultado valores que fluctuaron entre 0 y 57.8 tonC ha⁻¹ (fig. 31). A diferencia de las muestras de INEGI, las obtenidas en laboratorio ya contaron con densidad aparente, misma que se calculó para obtener directamente el valor de CO, se correlacionaron las mismas variables en el modelo RF, dando como resultado la distribución de un mayor número de muestreos, con esto los valores se comportaron de manera dispersa con relación a las muestras de INEGI.

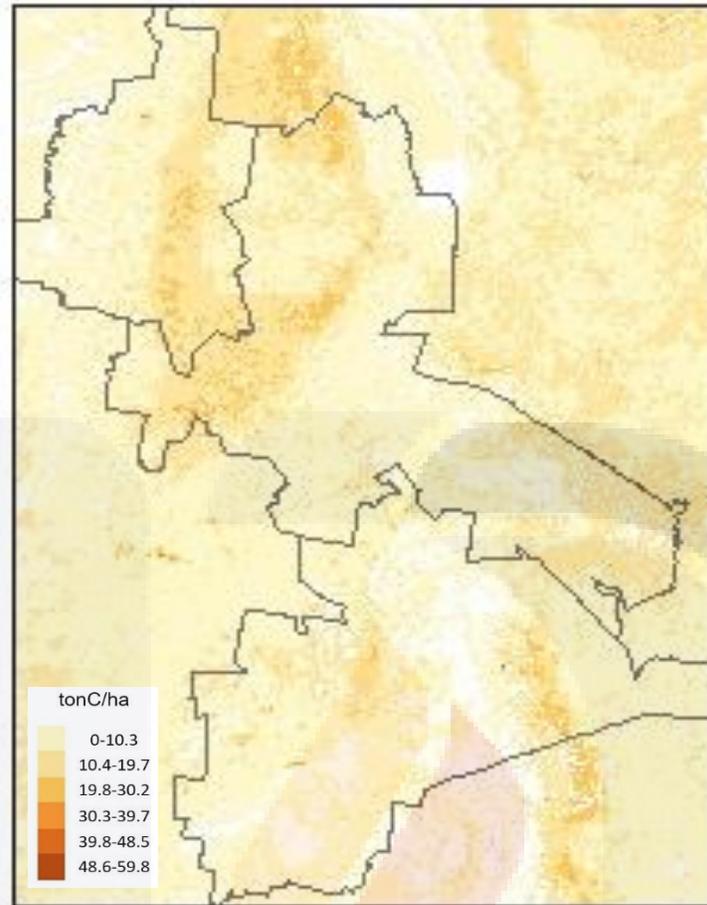


Figura 32 Mapa de Predicción de Carbono Orgánico con muestras propias para la zona árida de oriente de Aguascalientes
Fuente: Elaboración propia

La variable que influyó de manera positiva en la correlación del CO, fue la precipitación, como lo mencionan Cifuentes-Jara y col. (2004), que conforme mayor precipitación media anual hay en el ambiente, mayor será el tamaño de los depósitos de C en el suelo.

En cuanto a la relación de contenido de C y la vegetación, se encontró que en los suelos con pastizal presentan un mayor contenido de CO, en promedio 28 tonC ha⁻¹, favorecido principalmente por la biomasa subterránea (raíces) (Cespedes Flores y col., 2012; Tapia-Torres y col., 2015).

8. CONCLUSIONES

Se calculó el almacén de carbono en el suelo, donde los valores más altos se encuentran en las unidades de leptosol y regosol, lo que representa más de la mitad de la superficie de la zona estudiada, lo que se considera dentro de los niveles medios-altos en cuanto a almacenamiento de carbono en zonas áridas, las unidades de suelo con valores altos se asocian a las características edáficas y de estructura física y química.

En cuanto al contenido de carbono en la vegetación, se encontró que aquellos parches de zonas con alta densidad de especies arbóreas, concentran un mayor almacenamiento de carbono, siendo las especies de mezquite y encino aquellas que obtuvieron valores más altos de carbono.

La aplicación del software R con el mapeo digital es una alternativa con rigor estadístico para la estimación de ciertas variables, en este caso de Carbono Orgánico en el Suelo, actualmente existe una demanda creciente de información geográfica de suelos, que implica un enfoque cuantitativo, por lo que el desarrollo de herramientas y enfoques estadísticos generan un escenario potencial para brindar información de suelos más compleja, rápida y con una mayor precisión, una versatilidad de este recurso y sus propiedades.

La predicción de mapas digitales de la zona crea un panorama con mayor precisión de los resultados obtenidos, siendo la combinación de sistemas de información geográfica, con procesos estadísticos, una alternativa para la cartografía digital, el mapa digital elaborado con mayor número de muestreos, arrojó mayor exactitud en la estimación de la predicción del contenido de carbono en el suelo.

Este estudio revela que la zona árida del oriente de Aguascalientes, ha sido subestimada en cuanto a su valor como servicio eco sistémico, con respecto a zonas templadas o subhúmedas, ya que representa una superficie considerable, por lo que se necesitan establecer políticas públicas para la conservación y el mantenimiento de la zona, el diagnóstico obtenido en este trabajo, demuestra que

la zona es un área de oportunidad para crear metodologías de conservación, así como involucrar a los propietarios y ejidatarios a participar en dichos programas.



9. BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez-Arteaga, G., Mireles-Lezama, P., Ibáñez Huerta, A., García-Fajardo, B., & Orozco-Hernández, M. E. (2014). Cambios de uso de suelo y servicios ambientales en un bosque templado del Estado de México. In *PROGRAMA MEXICANO DEL CARBONO*, Síntesis Nacional 2014 (pp. 106–112).
- Breiman, L. (1996) Baggins predictors. *Machine Learning* 26(2), pp 123-140.
- Brus, D., Olmedo, G. F., Hengl, T., Heuvelink, G., Hiederer, R., Kempen, B., ... Omotu, C. T. (2017). *Soil Organic Carbon Mapping ,Cookbook*. Rome: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS.
- Cadena Saucedo, S. F., Castillo Franco, J. A., Müller-Sämman, K. M., & Madriñán M., R. (1998). Estimación de la biomasa microbina en suelos de ladera bajo diferentes sistemas de manejo. *Acta Agronómica (Colombia)*, 48(3), 48(3-4):37-42.
- Céspedes Flores, F. E., Fernández A., J., Gobbi, J. A., & Bernardis, A. C. (2012). *efecto del manejo de pastoreo en pastizales.pdf* (pp. 79–86). pp. 79–86. *Revista Fitotecnia Mexicana*.
- Chen, L.-F., He, Z.-B., Zhu, X., Du, J., Yang, J.-J., & Li, J. (2016). Impacts of afforestation on plant diversity, soil properties, and soil organic carbon storage in a semi-arid grassland of northwestern China. *Catena*, 147, 300–307. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.009>
- Cifuentes-Jara, M., Jodse, J., Watson, V., & Kauffman, B. (2004). Determinación de carbono total en suelos de diferentes tipos de uso de tierra a lo largo de una gradiente climática en Costa Rica. *Bosque*, (August), 1–12.
- Cotler, H., Cram, S., Martínez Trinidad, S., & Bunge, V. (2015). Conservation practices assessment in forest soils of Mexico: The case of the ditches . *Investigaciones Geograficas*, 2015(88), 6–18. <https://doi.org/10.14350/rig.47378>

- Cutler, A., Cutler, D. R., & Stevens, J. R. (2012). Random forests. *Ensemble Machine Learning: Methods and Applications*, 157–175.
https://doi.org/10.1007/9781441993267_5
- Galicia, L., María, A., Cáceres, G., Cram, S., Vergara, B. C., Ramírez, V. P., & Saynes, V. (2015). Almacén y dinámica del Carbono Orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, 1–29.
- García-Fajardo, B., Álvarez-Arteaga, G., Mireles-Lezema, P., Orozco-Hernández, M. E., & A., R.-Z. M. (2014). Estimación del carbono orgánico del suelo y su relación con prácticas locales de manejo en sistemas agrícolas. In *PROGRAMA MEXICANO DEL CARBONO*, Síntesis Nacional 2014, (pp. 113–120).
- Glendenning, C. J., Van Ogtrop, F. F., Mishra, A. K., & Vervoort, R. W. (2012). Balancing watershed and local scale impacts of rain water harvesting in India- A review. *Agricultural Water Management*, 107, 1–13.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.01.011>
- Jenkinson, D. S., & Powlson, D. S. (1976). The effects of biocidal treatments on metabolism in soil-I. Fumigation with chloroform. *Soil Biology and Biochemistry*, 8(3), 167–177. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(76\)90001-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(76)90001-8)
- Le Quéré, C., Peters, G. P., Andres, R. J., Andrew, R. M., Boden, T. A., Ciais, P., ... Zaehle, S. (2014). Global carbon budget 2013. *Earth Syst. Sci. Data*, 6(1), 235–263. <https://doi.org/10.5194/essd-6-235-2014>
- Liaw, A., & Wiener, M. (2002). *Classification and Regression by Random Forest*. 2(December), 18–22.
- Marumoto, T., Anderson, J. P. E., & Domsch, K. H. (1982). Mineralization of nutrients from soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 14(5), 469–475. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(82\)90106-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(82)90106-7)
- McBratney, A. B., Mendoca Santos, M. L., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117, 3–52. <https://doi.org/10.1016/S0016->

7061(03)00223-4

Mitchel, B. (1997). *LA GESTIÓN DE LOS RECURSOS Y DEL MEDIO AMBIENTE* (Mundi-Pren; D. Gomez Orea & G. Gasco Guerrero, Eds.). Waterloo, Ontario.

Montaño, N. M., Ayala, F., Bullock, S. H., Briones, O., García-Oliva, F., García-Sánchez, R., ... Tapia-Torres, Y. (2016). Almacenes y flujos de carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México: Síntesis y perspectivas. *Revista Terra Latinoamericana*, 34(1), 39–59.

Muñoz, C., Paulino, L., Monreal, C., & Zagal, E. (2010). Greenhouse Gas (CO₂ AND N₂O) Emissions from Soils: A Review. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 70(3), 485–497. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392010000300016>

Pérez-Romero, L., López-Cervantes, R., De León-González, L., Bolívar-Duarte, M., Hernández-Jalavera, I., & Dueñez-Alanis, J. (2014). Efecto del manejo del pastoreo en pastizales áridos y su potencial en el secuestro de carbono. In *PROGRAMA MEXICANO DEL CARBONO*, Síntesis Nacional 2014 (pp. 218–224).

Pringle, M. J., Allen, D. E., Phelps, D. G., Bray, S. G., Orton, T. G., & Dalal, R. C. (2014). The effect of pasture utilization rate on stocks of soil organic carbon and total nitrogen in a semi-arid tropical grassland. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 195(2014), 83–90. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.05.013>

Rey, A., Oyonarte, C., Morán-López, T., Raimundo, J., & Pegoraro, E. (2016). Changes in soil moisture predict soil carbon losses upon rewetting in a perennial semiarid steppe in SE Spain. *Geoderma*, 287, 135–146. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.06.025>

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2011. Estrategia nacional de manejo sustentable de tierras. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. ISBN: 978-607-7908-42-5. México, D. F.

- Siebe, C., Bocco, G., Sánchez-Espinoza, J., & Velazquez, A. (2003). Suelos : distribución , características y potencial de uso. *Instituto Nacional de Ecología*, 127–163.
- Siqueiros-Delgado, M. E., Rodríguez-Avalos, J. A., Martínez-Ramírez, J., & Sierra-Muñoz, J. C. (2016). Situación actual de la vegetación del estado de Aguascalientes, México. *Botanical Sciences*, 94(3), 455.
<https://doi.org/10.17129/botsci.466>
- Tapia-Torres, Y., López-Lozano, N. E., Souza, V., & García-Oliva, F. (2015). Vegetation-soil system controls soil mechanisms for nitrogen transformations in an oligotrophic Mexican desert. *Journal of Arid Environments*, 114, 62–69.
<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.11.007>
- Vela-Correa, G., Blanco-López, J., Rodríguez-Gamiño, M. de L., & Hernández-Chimal, A. (2009). *Vulnerabilidad del suelo de conservacion del distrito federal ante el cambio climático y posibles medidas de adaptación*.
- WALKLEY, A., & BLACK, I. A. (1934). AN EXAMINATION OF THE DEGTJAREFF METHOD FOR DETERMINING SOIL ORGANIC MATTER, AND A PROPOSED MODIFICATION OF THE CHROMIC ACID TITRATION METHOD. *Soil Science*, 37(1), 29–38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Wiesmeier, M., Barthold, F., Blank, B., & Kögel-knabner, I. (2011). Digital mapping of soil organic matter stocks using Random Forest modeling in a semi-arid steppe ecosystem. *Plant Soil*, 7–24. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0425->
- Zelnik, Y., Uecker, H., Feudel, U., & Meron, E. (2016). *Desertification by Front Propagation?* 418(November 2016), 1–14.
<https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2017.01.029>