UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

ESTIMACIÓN DE CARGAS CRÍTICAS DE ACIDEZ Y AZUFRE, Y SUS EXCEDENCIAS EN SUELO EN LA ISLA DEL CARMEN, CAMPECHE, MÉXICO

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA Y PROTECCIÓN AMBIENTAL

PRESENTA:

BIOL. GUADALUPE DEL CARMEN CRUZ CAMACHO

BAJO LA DIRECCION DE:

DRA.VERÓNICA ISIDRA DOMINGUEZ RODRÍGUEZ

EN CO-DIRECCION DE:

DRA. ROSA MARÍA CERÓN BRETÓN

VILLAHERMOSA, TABASCO, A: OCTUBRE 2026

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Villahermosa , el día 30 del mes septiembre del año 2026, el que suscribe Guadalupe del Carmen Cruz Camacho del Programa de Maestría en Ingeniería y Protección Ambiental con número de matrícula 132G11008, adscrito a la División Académica de Ciencias Biológicas, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autora de la Tesis presentada para la obtención del grado de Maestro y titulada **ESTIMACIÓN DE CARGAS CRÍTICAS DE ACIDEZ Y AZUFRE, Y SUS EXCEDENCIAS EN SUELO EN LA ISLA DEL CARMEN, CAMPECHE, MÉXICO** dirigida por la DRA. Verónica Isidra Domínguez Rodríguez.

DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Villahermosa, Tabasco a 30 de septiembre 2026.

Biol. Guadalupe del Carmen Cruz Camacho

Nombre y Firma del egresado

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"

2026 año de Margarita Maza

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

JULIO 30 DE 2026

C. GUADALUPE DEL CARMEN CRUZ CAMACHO
PAS. DE LA MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y PROTECCIÓN AMBIENTAL
P R E S E N T E

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis de Maestría en Ingeniería y Protección Ambiental titulado: **"ESTIMACIÓN DE CARGAS CRÍTICAS DE ACIDEZ Y AZUFRE, Y SUS EXCEDENCIAS EN SUELO EN LA ISLA DEL CARMEN, CAMPECHE, MÉXICO"**, asesorado por la Dra. Verónica Isidra Domínguez Rodríguez y Dra. Rosa María Cerón Bretón, sobre el cual sustentará su Examen de Grado, cuyo jurado está integrado por el Dr. Eduardo Javier Moguel Ordoñez, M. en C. Carlos Alberto Torres Balcázar, Dra. Verónica Isidra Domínguez Rodríguez, Dr. Randy Howard Adams Schroeder y M. en C. Marco Antonio Hernández Cobián.

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE

DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR

UJAT
DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

C.c.p.- Expediente del Alumno.
C.c.p.- Archivo

Consorcio de Universidades Mexicanas

KM. 0.5 CARR. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA
Tel. (993) 358-1500 Ext. 6400 y 6401. E.mail: dacbiol.dirección@ujat.mx

Usar papel reciclado economiza energía, evita contaminación y despilfarro de agua y ayuda a conservar los bosques

Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 18 de septiembre 2026

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como AUTORAS en la producción, creación y/o realización de la obra denominada **ESTIMACIÓN DE CARGAS CRITICAS DE ACIDEZ Y AZUFRE, Y SUS EXCEDENCIAS EN SUELO EN LA ISLA DEL CARMEN, CAMPECHE, MÉXICO.**

Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

COLABORADORES

Biol. Guadalupe del Carmen Cruz Camacho
EGRESADA,

Dra. Verónica Isidra Dominguez Rodríguez
DIRECTORA

Dra. Rosa María Cerón Breton
CODIRECTORA

TESTIGOS

M. en C. Eduardo Javier Moguel Ordoñez

M. en C. Carlos Alberto Torres Balcázar

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

UJAT
UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
"ESTUDIO EN LA DUDA, ACCIÓN EN LA FE"

2026 año de Margarita Maza

División Académica de Ciencias Biológicas
DIRECCIÓN

Villahermosa, Tabasco a 29 de julio de 2026

C. GUADALUPE DEL CARMEN CRUZ CAMACHO
EGRESADA DE LA MAESTRÍA EN
INGENIERÍA Y PROTECCIÓN AMBIENTAL
PRESENTE

En cumplimiento de los lineamientos de la Universidad, y por instrucciones de la Dirección de Posgrado, se implementó la revisión de los trabajos recepcionales (tesis), a través de la plataforma Turnitin iThenticate para evitar el plagio e incrementar la calidad en los procesos académicos y de investigación que se desarrollan en esta División Académica. Esta revisión se realizó en correspondencia con el Código de Ética de la Universidad, el Reglamento General de Estudios de Posgrado, el Código Institucional de Ética para la Investigación y con los requerimientos del plan de estudios del posgrado.

Por este conducto, hago de su conocimiento que, con el objetivo de fortalecer y enriquecer el programa de posgrado, se realizó la revisión del documento en la plataforma iThenticate, obteniendo el reporte de originalidad, el índice de similitud y se emitieron las siguientes sugerencias y recomendaciones para dar seguimiento en el documento de tesis del proyecto de investigación: ***Estimación de cargas críticas de acidez y azufre, y sus excedencias en suelo en la Isla del Carmen, Campeche, México.***

OBSERVACIONES:

1. **El índice de similitud general obtenido fue de 12%**, el cual se ubica dentro del estándar de tolerancia de acuerdo a las Políticas y Lineamientos para el uso y manejo del Software Antiplagio de la UJAT. Se demuestra el nivel de originalidad del documento y de la investigación.

2. Aun que el índice de similitud obtenido indica coincidencias con 31 fuentes de consulta (las cuales corresponden con fuentes de internet y con publicaciones), estás se detectaron en las secciones de Marco Teórico y Metodología, lo que no demerita el documento de tesis, pero se recomienda a la sustentante, y sus directoras de tesis,

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

UJAT
UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
"ESTUDIO EN LA DUDA, ACCIÓN EN LA FE"

2026 año de Margarita Maza

División Académica de Ciencias Biológicas
DIRECCIÓN

revisar las oraciones identificadas con similitud y ajustarlas a una redacción propia en la medida de lo posible, e incluir las citas y referencias bibliográficas pertinentes conforme al formato APA vigente.

3. **Se adjunta el informe de originalidad de la tesis** obtenido a través de la herramienta Turnitin iThenticate.

4. Finalmente, se le solicita a la C. Guadalupe del Carmen Cruz Camacho, integrar en la versión final de la tesis este oficio y el informe de originalidad con el porcentaje de similitud de Turnitin iThenticate de acuerdo con lo señalado en los Lineamientos institucionales para la elaboración de tesis de posgrado.

Sin otro particular al cual referirme, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"ESTUDIO EN LA DUDA, ACCIÓN EN LA FE"

DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR

UJAT
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

C.C.P. Dra. Verónica Isidra Domínguez Rodríguez - Directora de tesis.
Dra. Rosa María Cerón Bretón – Codirectora de tesis
Archivo

✓ iThenticate Página 1 de 143 - Portada Identificador de la entrega trn:oid:::3117:593218674

Guadalupe del Carmen Cruz Camacho

Estimación de cargas críticas de acidez y azufre, y sus excedencias en suelo en la Isla del Carmen, Campeche, México

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::3117:593218674

Fecha de entrega
20 may 2026, 8:43 a.m. GMT-6

Fecha de descarga
29 jul 2026, 12:10 p.m. GMT-6

Nombre del archivo
TESIS CONCLUIDA 2026 M1.pdf

Tamaño del archivo
2.4 MB

138 páginas

31.661 palabras

189.776 caracteres

✓ iThenticate Página 1 de 143 - Portada Identificador de la entrega trn:oid:::3117:593218674

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.



✓ iThenticate Página 2 de 143 - Descripción general de integridad Identificador de la entrega: trn:oid:::3117:393218674

12% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores (menos de 16 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

12% Fuentes de Internet
1% Publicaciones
0% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

✓ iThenticate Página 2 de 143 - Descripción general de integridad Identificador de la entrega: trn:oid:::3117:393218674

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Fuentes principales

12% Fuentes de Internet
1% Publicaciones
0% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet docplayer.es	2%
2	Internet carmen.indefos.gob.mx	2%
3	Internet es.scribd.com	2%
4	Internet aem.gob.mx	<1%
5	Internet vdocuments.es	<1%
6	Internet dokumen.site	<1%
7	Internet vsip.info	<1%
8	Internet extwprlegs1.fao.org	<1%
9	Internet vdocumento.com	<1%
10	Internet www.uv.mx	<1%
11	Internet www.tecnicoagricola.es	<1%

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

12	Internet doczz.es	<1%
13	Internet www.unacar.mx	<1%
14	Internet www.buenastareas.com	<1%
15	Internet bibliotecadigital.ciren.cl	<1%
16	Internet www.gob.mx	<1%
17	Internet scielo.org.bo	<1%
18	Internet lidingo.se	<1%
19	Internet www.repositoriodigital.ipn.mx	<1%
20	Internet www.slideshare.net	<1%
21	Internet repositorio.utn.edu.ec	<1%
22	Internet agrociencia-colpos.mx	<1%
23	Publicación Nayana Alves Pereira. "A restauração florestal por meio da regeneração natural e...	<1%
24	Internet repositorio.uteq.edu.ec	<1%
25	Internet elblogbrown.blogspot.com	<1%



26	Internet	
repositorio.chapingo.edu.mx:8080		<1%
27	Internet	
www.cibnor.gob.mx		<1%
28	Internet	
www.msn.com		<1%
29	Internet	
www.researchgate.net		<1%
30	Internet	
idoc.pub		<1%
31	Internet	
www.ccad.ws		<1%

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Dedicatoria

A mi padre Celestial, Concluyo mis estudios reconociendo que Todo lo puedo en Cristo que me fortalece **(**Filipenses 4:13). Este logro es un regalo de tu amor y fidelidad. Encomendé mis planes a ti y tu dirigiste mis sendas (Proverbios 3:5-6), permitiéndome terminar esta etapa. ¡A ti sea toda la gloria!

A mi madre por ser símbolo de superación

Andrea Camacho Díaz (+)

A mi padre y compañera con inmenso amor y admiración, gracias por brindarme su gran apoyo, sacrificios y esfuerzos.

Mario Gustavo Cruz Caraveo

Marielena López Rodríguez

A mis hermanos.

German, Marisol, Gustavo enrique (+), Carlos Gilberto

A mis sobrinos

Marlon, Andrés, lupita, Andrea, Karen (+)

A mi tío

Fernando Enrique Hernández Caraveo

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Agradecimientos

Al Dios todo poderoso por haberme permitido llegar a este momento y ver culminar una etapa más en mi vida profesional.

Agradezco a mi asesora Dra. Verónica Isidra Domínguez Rodríguez por el apoyo, paciencia y sugerencias en todo momento y sobre todo por su amistad.

A mi Coasesora Dra. Rosa María Cerón Breton por su apoyo, paciencia y sugerencias en todo momento y sobre todo por su amistad.

A los sinodales:

M. EN C. EDUARDO JAVIER MOGUEL ORDOÑEZ
M. EN C. CARLOS ALBERTO TORRES BALCAZAR
DRA. VERONICA ISIDRA DOMINGUEZ RODRIGUEZ
DR. RANDY HOWARD ADAMS SCHROEDER
M.EN C. MARCO ANTONIO HERNANDEZ COBIAN

Por sus revisiones, correcciones, consejos y orientación a lo largo de la preparación de este trabajo.

A todas aquellas personas que, de una u otra manera, contribuyeron con su apoyo y esfuerzo a la realización de esta tesis, les expreso mi más sincero agradecimiento por su valiosa colaboración.

GRACIAS A TODOS

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

Índice de Contenido

Declaracion de Autoria y Originalidad ii
Autorización de Impresion iii
Carta de Cesión de Derechos iv
Oficio de revisión de similitud v
Dedicatoria xii
Agradecimientos xiii
Índice de Contenido 1
Índice de Tabla 4
Índice de Figura 5
1.Titulo 7
2.Resumen 8
3.Abstract 10
5. Introducción 12
6. Marco teórico 15
6.1. Generalidades. 15
Propuestas para la Determinación de Carga Crítica. 15
Categorías de Carga Crítica 17
Efectos de los contaminantes sobre los ecosistemas terrestres. 18
6.2 Estudios en otros Países. 20
6.3 Estudios en México. 25
7. Justificación 28
8. Pregunta de investigación 30
9. Hipótesis o supuesto 31
10. Objetivo general 32
11. Objetivos específicos 32
12. Metodología 33
12.1 Área de Estudio 33
12.1.1 Clima 33
12.1.2. Hidrología 33
12.1.3. Descripción de suelos 35

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

12.1.4. Vegetación 36
12.2 Actividades de Campo: 37
12.2.1 Muestreo de suelos 37
12.2.2. Muestreo de Depósito atmosférico de S. 39
12.3 Actividades de Laboratorio 42
12.3.1. Procesamiento de muestras de suelo 42
12.3.2. Procedimiento de Extracción de Resinas (Deposito atmosférico de S) 43
12.4 Análisis de suelos y depósito atmosférico. 44
12.4.1 Determinación del % de Humedad. 44
12.4.2 Determinación del pH 45
12.4.3. Determinación de la Conductividad Eléctrica 46
12.4.4. Determinación de la densidad aparente 46
12. 4.5. Determinación de la Textura del suelo 47
12.4.6. Materia orgánica y Carbono Orgánico. 49
12.4.7. Determinación de azufre 51
12.5 Estimación de los flujos de depósito atmosférico de S 54
12.5.1. Determinación de Sulfatos 54
12.6 Estimación de Cargas Críticas 55
12.6.1 Metodologías Empíricas de sensibilidad y cargas críticas de acidez y azufre. 56
12.6.2. Metodología empírica de Skokloster 57
12.7 Elaboración de mapas 57
13. Resultados 59
13. 1 Humedad en suelos de la Isla del Carmen. 59
13.1.1 Mapeo 59
13.1.2 Grafica por temporada, sitio y uso de suelo 61
13.2 Potencial de hidrogeno (pH) en suelos de la Isla del Carmen 63
13.2.1 Mapeo 64
13.2.2 Grafica por temporada, sitio y uso de suelo 66
13.3 Conductividad Eléctrica en suelos de la Isla del Carmen 68
13.3.1 Mapeo 69
13.3.2 Grafica por temporada, sitio y uso de suelo 71
13.4 La densidad aparente en suelos de la Isla del Carmen 73

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

13.4.1 Mapeo 73
13.4.2 Grafica por temporada, sitio y uso de suelo 75
13.5 La textura de los suelos de la Isla del Carmen 77
13.6 Carbono Orgánico en los suelos de la Isla del Carmen 78
13.6.1 Mapeo 78
13.6.2 Grafica por temporada, sitio y uso de suelo 80
13.7 Materia orgánica en suelos en la Isla del Carmen 82
13.7.1 Mapeo 83
13.7.2 Grafica por temporada, sitio y uso de suelo. 85
13. 8 Azufre en suelos de la Isla del Carmen. 87
13.8.1 Grafica por temporada, sitio y uso de suelo 88
13. 9 Depósito atmosférico de azufre 90
13.9.1 Mapeo 90
13.9.2 Gráfico por temporada, sitio y uso de suelo 92
13.10. Determinación de la mineralogía dominante y clase de tamaño de partícula 95
13.11. Diagnóstico preliminar de la sensibilidad a la acidez 97
13.12 Estimación de excedencia a cargas críticas para el depósito atmosférico de azufre 108
13.13 Mapas de Categorías de sensibilidad 110
14.Discusión 113
14.1 Humedad 113
14.2 Potencial de hidrogeno 113
14.3 Conductividad eléctrica 113
14.4 Densidad aparente 114
14.5 Textura 114
14.6 Materia orgánica y Carbón Orgánico 114
14.7 Azufre 114
14.8 Sulfatos 115
14.9 Sensibilidad de los ecosistemas terrestres a la acidez 115
14.10 Sensibilidad de los ecosistemas terrestres al depósito de S 116
15. Conclusiones y recomendaciones 117
16. Referencias citadas 120
17. Anexo 130

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Índice de Tabla

Tabla 1.Resumen de cargas criticas (CL) 25
Tabla 2 Clases de suelos en la Isla del Carmen, Campeche 35
Tabla 3.Temporada de muestreo de los sitios 41
Tabla 4.Identificación de cada sitio 41
Tabla 5.Localización de los sitios de muestreo en la Isla del Carmen, Campeche. 42
Tabla 6.Concentración de las soluciones estándares para la construcción de la curva 52
Tabla 7.Datos de la curva de calibración 53
Tabla 8.Valores promedio del % de humedad de los 13 puntos analizados en la Isla 59
Tabla 9.Valores promedio de pH de los 13 puntos analizados en la Isla del Carmen 64
Tabla 10.Resultados de la Conductividad Eléctrica (µS/cm) de los 13 puntos analizados 68
Tabla 11.Resultados de la densidad aparente (g cm^{-3}) de los 13 puntos analizados en la Isla 73
Tabla 12.Tipo de textura en los 13 sitios muestreados por temporadas. 77
Tabla 13.Resultados de compuestos orgánicos de los 13 puntos analizados en la Isla 78
Tabla 14.Resultados del % de Materia Orgánica en los 13 puntos analizados 83
Tabla 15.Resultado de Azufre en los 13 puntos analizados en las 3 temporadas climáticas. 88
Tabla 16 Resultado de depósito atmosférico de Azufre de los 13 puntos analizados 90
Tabla 17.Grupos de suelo existentes en cada uno de los 13 sitios de estudio 96
Tabla 18.Resultados del diagnóstico preliminar de la sensibilidad a la acidez 99
Tabla 19.Resultados del diagnóstico preliminar de la sensibilidad a la acidez 102
Tabla 20.Resultados del diagnóstico preliminar de la sensibilidad a la acidez 105
Tabla 21.Carga crítica y excedencias en la temporada (secas) 108
Tabla 22.Carga crítica y excedencia en la temporada (lluvias) 109
Tabla 23.Carga crítica y excedencias en la temporada (Nortes) 110

Índice de Figura

Figura 1.Localizacion Geográfica de la Isla del Carmen, Campeche. Programa Google Earth. 34
Figura 2. Muestreo de suelo. 38
Figura 3. Ubicación de los 13 sitios de muestreo: Programa Google Earth Pro. 38
Figura 4. Secado de muestras de suelo en el Laboratorio. 39
Figura 5 Muestreador pasivo tipo "throughfall". 40
Figura 6. Potenciómetro y Salinometro. 45
Figura 7. Mediciones de Textura. 49
Figura 8. Materia orgánica y Carbón orgánico. 51
Figura 9. Curva de calibración. 54
Figura 10. Preparación de las soluciones estándar y curva de calibración de azufre. 54
Figura 11. Distribución espacial del porcentaje de humedad durante la temporada de lluvias. 60
Figura 12. Distribución espacial del porcentaje de humedad durante la temporada de norte. 60
Figura 13. Distribución espacial del porcentaje de humedad durante la temporada de secas. 61
Figura 14. Variación del porcentaje de humedad por temporada. 62
Figura 15. Variación del porcentaje de humedad por sitio. 62
Figura 16. Variación del porcentaje de humedad por uso de suelo. 63
Figura 17. Distribución espacial del porcentaje de potencial de hidrogeno. 65
Figura 18. Distribución espacial del porcentaje de potencial de hidrogeno. 65
Figura 19. Distribución espacial del porcentaje de potencial de hidrogeno. 66
Figura 20. Variación del porcentaje de potencial de hidrogeno por temporal. 66
Figura 21. Variación del porcentaje de potencial de hidrogeno por sitio. 67
Figura 22. Variación del porcentaje de potencial de hidrogeno por uso de suelo. 68
Figura 23. Distribución espacial del porcentaje de conductividad eléctrica. 69
Figura 24. Distribución espacial del porcentaje de conductividad eléctrica 70
Figura 25. Distribución espacial del porcentaje de conductividad eléctrica. 70
Figura 26. Variación del porcentaje de conductividad eléctrica por temporada. 71
Figura 27. Variación del porcentaje de conductividad eléctrica por sitio. 72
Figura 28. Variación del porcentaje de conductividad eléctrica por uso de suelo. 72
Figura 29. Distribución espacial del porcentaje de densidad aparente 74
Figura 30. Distribución espacial del porcentaje de densidad aparente 74
Figura 31. Distribución espacial del porcentaje de densidad aparente 75
Figura 32. Variación del porcentaje de densidad aparente por temporada. 76
Figura 33. Variación del porcentaje de densidad aparente (g cm^{-3}) por sitio. 76
Figura 34. Variación del porcentaje de densidad aparente por uso de suelo. 77
Figura 35. Distribución espacial del porcentaje de carbono orgánico 79
Figura 36. Distribución espacial del porcentaje de carbono orgánico 79
Figura 37. Distribución espacial del porcentaje de carbono orgánico 80
Figura 38. Variación del porcentaje de carbono orgánico por temporada 81
Figura 39. Variación del porcentaje de carbono orgánico por sitio. 81
Figura 40. Variación del porcentaje de carbono orgánico por uso de suelo 82
Figura 41. Distribución espacial del porcentaje de materia orgánica en la Isla del Carmen 83

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Figura 42. Distribución espacial del porcentaje de materia orgánica en Isla del Carmen 84
Figura 43. Distribución espacial del porcentaje de materia orgánica en la Isla del Carmen 84
Figura 44. Variación del porcentaje de materia orgánica por temporada. 85
Figura 45. Variación del porcentaje de materia orgánica por sitio 86
Figura 46. Variación del porcentaje de materia orgánica por uso de suelo. 87
Figura 47. Variación del porcentaje de azufre por temporada 88
Figura 48. Variación de azufre por sitio 89
Figura 49. Variación del porcentaje de azufre por usos de suelo 89
Figura 50. Patrones espaciales y temporales de los flujos de deposición tipo "throughfall" 91
Figura 51. Patrones espaciales y temporales de los flujos de deposición tipo "throughfall" 91
Figura 52. Patrones espaciales y temporales de los flujos de deposición tipo "throughfall" 92
Figura 53. Flujos de deposición atmosférica de SO_4^{2-} por temporada de muestreo. 93
Figura 54. Flujos de deposición atmosférica para SO_4^{2-} por sitio de muestreo. 94
Figura 55. Flujos de deposición atmosférica para SO_4^{2-} por usos de suelo 94
Figura 56. Mapeo de las categorías de sensibilidad para la temporada de secas. 111
Figura 57. Mapeo de las categorías de sensibilidad para la temporada de lluvias 111
Figura 58. Mapeo de las categorías de sensibilidad para la temporada de nortes. 112

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

1. Titulo

Estimación de Cargas Críticas de Acidez y Azufre, y sus Excedencias en Suelo

2. Resumen

Un enfoque que permite estimar la deposición de contaminantes atmosféricos que pueden perjudicar un ecosistema dado es la determinación de las cargas críticas, que puede definirse como la entrada de un contaminante a niveles por debajo de los cuales no se espera que ocurran efectos ecológicos perjudiciales a largo plazo. Sin embargo, en países en desarrollo no se tiene disponible este tipo de información; y existe una necesidad imperante de proponer valores de carga críticas en ecosistemas valiosos como es el caso de los ecosistemas de manglar en Isla del Carmen. Esto permitirá evaluar su vulnerabilidad e identificar áreas sensibles con potencial de superar dichas cargas críticas, evaluar variaciones estacionales y anuales, así como también, patrones de distribución espacial y temporal. Con base en ello, se pueden proponer medidas de protección y conservación, a un mediano plazo, demostrar la efectividad de las políticas ambientales orientadas en materia de reducción de emisiones. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue estimar las cargas críticas de acidez y azufre y sus excedencias en suelos de la Isla del Carmen, Campeche, realizando dos programas de muestreo simultáneos tanto en suelo como en deposición atmosférica durante el periodo 2014 – 2015, abarcando tres estaciones climáticas: Secas, Lluvias y Nortes, en los 13 sitios distribuidos en la Isla del Carmen. Se estimaron algunas propiedades del suelo como Densidad Aparente, pH, Textura, Conductividad Eléctrica, Materia Orgánica, Carbono Orgánico, y Azufre. Aplicando la metodología de Skokloster utilizada en la Comunidad Europea se asignaron categorías de sensibilidad. De los 13 sitios estudiados, durante la temporada de Secas 13 sitios obtuvieron la clase sensibilidad de 1, correspondiendo a un ecosistema sensible. De igual manera, durante la temporada de Lluvias, los 13 sitios obtuvieron una clase de sensibilidad de 1 que corresponde a ecosistema sensible, mientras que para la temporada de Nortes, 11 sitios presentaron clase de sensibilidad de 1 y solo 2 sitios clase de sensibilidad de 2, ambas categorías correspondiendo a ecosistema sensible. Para las categorías de sensibilidad 1 y 2, presentan cargas críticas para la deposición de azufre (S) en un rango de 4.0079 a 8.015 kg S ha^{-1} $año^{-1}$. Las categorías de sensibilidad evidenciaron una variación estacional, con una mayor sensibilidad durante las épocas de Secas y Nortes. Esto concuerda con el tipo de fuentes (plataformas costa afuera) que influyen sobre la zona de estudio, en función de la meteorología prevaleciente durante dichas épocas del año. Se estableció un valor de referencia para acidez (≤0.2 – 0.5 Kmol H^+ ha^{-1} $año^{-1}$), y se compararon los niveles actuales de concentración de iones hidronio en los suelos

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México

muestreados para determinar las excedencias; a partir de esto se concluye que no hubo excedencias en el caso de la acidez. Por otro lado, se cuantificaron las tasas actuales de depósito atmosférico de S (como sulfato) Utilizando colectores pasivos tipo Throughfall, los flujos de deposición de azufre (S) se encontraron en un rango de 2.08 a 31.59 kg S ha^{-1} $año^{-1}$. A partir de su comparación con las cargas críticas propuestas, se obtuvieron porcentajes de excedencia entre 11.72 y 86.89%, los cuales fueron categorizados y representados espacialmente mediante geomapas para identificar los puntos críticos de deposición de azufre en la zona estudiada. La información generada podrá ser utilizada como línea base para el establecimiento de políticas públicas a nivel local, orientadas a la protección y conservación de los ecosistemas de manglar en el área de estudio Así mismo, la información obtenida puede ser usada para generar indicadores ambientales, o servir de base para sustentar la modificación de leyes ya existentes y/o la promulgación de nuevas normatividades regionales para controlar o reducir las emisiones de contaminantes.

Palabras clave: suelo, azufre, cargas críticas, deposición atmosférica, Ciudad del Carmen.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

3. Abstract

One approach for estimating the deposition of atmospheric pollutants that may harm a given ecosystem is the determination of critical loads, which can be defined as the input of a pollutant at levels below which no long-term adverse ecological effects are expected to occur. However, this type of information is not available in developing countries; and there is a pressing need to propose critical load values for valuable ecosystems, such as the mangrove ecosystems on Isla del Carmen. This will make it possible to assess their vulnerability and identify sensitive areas with the potential to exceed these critical loads, evaluate seasonal and annual variations, as well as spatial and temporal distribution patterns. Based on this, protection and conservation measures can be proposed in the medium term to demonstrate the effectiveness of targeted environmental policies aimed at reducing emissions. Therefore, the objective of this study was to estimate the critical loads of acidity and sulfur and their exceedances in soils on Isla del Carmen, Campeche, by conducting two simultaneous sampling programs one for soil and one for atmospheric deposition during the 2014–2015 period, covering three weather stations: Dry, Rainy, and North Wind seasons, at the 13 sites distributed across Isla del Carmen. Several soil properties were estimated, including bulk density, pH, texture, electrical conductivity, organic matter, organic carbon, and sulfur. Sensitivity categories were assigned using the Skokloster methodology employed by the European Union. Of the 13 sites studied, during the Dry season, all 13 sites were assigned a sensitivity class of 1, corresponding to a sensitive ecosystem. Similarly, during the rainy season, all 13 sites were assigned a sensitivity class of 1, corresponding to a sensitive ecosystem, while during the “Nortes” season, 11 sites were assigned a sensitivity class of 1 and only 2 sites were assigned a sensitivity class of 2, with both categories corresponding to a sensitive ecosystem. For sensitivity categories 1 and 2, critical loads for sulfur (S) deposition range from 4.0079 to 8.015 kg S ha^{-1} $year^{-1}$. The sensitivity categories showed seasonal variation, with greater sensitivity during the dry and north wind seasons. This is consistent with the types of sources (offshore platforms) that influence the study area, depending on the prevailing weather conditions during those times of the year. A reference value for acidity (≤0.2–0.5 mmol H+ ha^{-1} $year^{-1}$) was established, and current hydronium ion concentration levels in the sampled soils were compared to determine exceedances; based on this, it was concluded that there were no exceedances in the case of acidity. Furthermore, current rates of atmospheric sulfur (S) deposition (as sulfate) were

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México

quantified using passive throughfall collectors; sulfur (S) deposition fluxes ranged from 2.08 to 31.59 kg S ha^{-1} $year^{-1}$. Based on a comparison with the proposed critical loads, exceedance percentages ranging from 11.72 to 86.89% were obtained; these were categorized and spatially represented using geomaps to identify critical points of sulfur deposition in the study area. The information generated can be used as a baseline for establishing local public policies aimed at the protection and conservation of mangrove ecosystems in the study area. Likewise, the information obtained can be used to develop environmental indicators or serve as a basis for amending existing laws and/or enacting new regional regulations to control or reduce pollutant emissions.

Keywords: soil, sulfur, critical loads, atmospheric deposition, Ciudad del Carmen.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

5. Introducción

La actividad humana en el último siglo ha dado lugar a un aumento significativo de las emisiones de cargas críticas y deposición atmosférica (Galloway et al. 2004). En algunas regiones, continúan incrementándose las emisiones (Nilles y Conley, 2001, Lehmann et al. 2005), la deposición ha alcanzado un nivel que ha causado o probablemente pueda causar alteraciones en muchos ecosistemas. En algunas regiones ecológicas, el impacto de deposición ha sido grave, alterando la biodiversidad.

La contribución de las deposiciones de azufre y nitrógeno al deterioro actual tanto de monumentos históricos como de especies de vegetación sensible no ha sido suficientemente estudiada en nuestro país. La deposición atmosférica ha sido reconocida como una fuente potencial de entradas a los ecosistemas terrestres y acuáticos, con sus correspondientes efectos adversos sobre los seres vivos que en ellos habitan. Las actividades humanas han conducido a un incremento significativo de emisiones de S, con su respectiva deposición atmosférica. Esta deposición de S ha alcanzado niveles que causan o podrían causar alteraciones a la estructura y función de muchos de los ecosistemas en el país.

En países como el nuestro, existe una preocupación constante en torno a los efectos de la deposición ácida sobre los ecosistemas y el patrimonio histórico. Aun cuando se sabe que los contaminantes atmosféricos pueden deteriorar los monumentos históricos y los sitios arqueológicos, pueden causar daños a la salud humana y efectos perjudiciales en especies de vegetación sensible, los estudios de la contaminación del aire en el Golfo de México son escasos. Particularmente en el Estado de Campeche, se tiene reportada una emisión anual de aproximadamente 205.64 Gg de NOx y 336.79 Gg de SO_2, que son emitidos tanto en fuentes urbanas como industriales (INE, 2009). Con base a estos resultados, se espera, por lo tanto, que en ecosistemas ubicados viento abajo de estas fuentes, la deposición de N y S sea elevada. Los bosques de manglar cubren vastas extensiones de territorio a lo largo de la costa del Golfo de México, siendo nuestro país el quinto en el mundo en términos de cobertura de manglar. En el caso del estado de Campeche, la cobertura de manglar contribuye en un 29.98% a la cobertura total de bosques de manglar del país, con una extensión aproximada de 196,552 hectáreas. Esta región en particular cuenta con importantes reservas naturales, parques nacionales, áreas naturales protegidas, monumentos históricos y sitios arqueológicos que constituyen el principal soporte de

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

la industria del eco-turismo que genera recursos económicos significativos para el Estado de Campeche. Por lo tanto, los efectos ecológicos potenciales relativos a la deposición atmosférica sobre estos ecosistemas, constituyen una de las principales preocupaciones en esta región.

Para poder evaluar el impacto real de la contaminación atmosférica sobre los ecosistemas, es necesario en primer lugar determinar los flujos totales de deposición atmosférico de S; puesto que la deposición atmosférica no es un contaminante criterio en nuestro país, no existe una norma o valores de referencia contra los cuales comparar estos flujos de depósito para realizar un diagnóstico preciso. Una aproximación que permite cuantificar la deposición de contaminantes que pueden perjudicar a los ecosistemas es la determinación de las cargas críticas (Posch, 2003; UNECE). Una carga crítica puede definirse como la entrada de un contaminante a niveles por debajo de los cuales no se espera que ocurran efectos ecológicos perjudiciales a largo plazo. Para poder establecer esta carga crítica, así como también estimar sus excedencias, se requiere de la medición de la deposición atmosférica en un sitio dado. Las excedencias a las cargas críticas pueden ser definidas como la diferencia entre la tasa de deposición actual y la carga crítica, cuando este valor es mayor a cero, esto significa que los ecosistemas son vulnerables a sufrir daños. Los modelos empíricos para la derivación de cargas criticas están basados principalmente en la observación de las respuestas de ciertos componentes del ecosistema a la deposición ácida. En el caso de los suelos, se ha sugerido un principio básico que fundamenta el termino de carga crítica, esto es, que la entrada total de iones de hidrógeno al suelo no debe de exceder la alcalinidad producida por la lixiviación de minerales del suelo (Nilsson, 1986). En el taller de 1989 llevado a cabo en Skokloster, Suecia, se concluyó que la tasa de lixiviación química es el factor más importante que controla la habilidad de los suelos para neutralizar la acidez. La aproximación mineralógica conocida como aproximación de Skokloster ha sido adoptada con algunas modificaciones para la determinación de cargas crítica en el Reino Unido (Hornung et al.1995, p.302; Nilsson y Grennfelt, 1988).

A pesar que en Estados Unidos y en los países europeos, desde hace varios años se realiza el monitoreo estandarizado y sistemático a largo plazo de la deposición, lo cual ha llevado a la obtención de valores de cargas críticas para diferentes ecosistemas sensibles; en México, los valores de cargas críticas y los efectos ecológicos potenciales derivados de la deposición ácida permanecen aún inciertos. Si bien, las cargas críticas obtenidas para ecosistemas en Estados Unidos y Europa son usadas como valores de referencia, es necesario tomar en cuenta que, en

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

países tropicales como México, los patrones de deposición y la respuesta de los ecosistemas pueden ser muy diferentes a aquellos reportados para regiones templadas en latitudes medias.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

6. Marco teórico

6.1. Generalidades.

Un método para evaluar los impactos potenciales de la contaminación atmosférica en los ecosistemas es el enfoque de carga crítica. La carga crítica se define como "la deposición de un contaminante por debajo del cual no causa un efecto ecológico negativo que sea perjudicial a largo plazo "(UBA 2004). La carga crítica es reportada como flujo (kg ha^{-1} $año^{-1}$). Las cargas críticas han sido ampliamente usadas en Europa (Posch et al., 1995, 2001) como una herramienta en el proceso de negociación de la reducción de la contaminación del aire.

Las cargas críticas han sido más ampliamente aplicadas en Canadá que en los Estados Unidos. Existen tres principales aproximaciones para estimar las cargas críticas (Pardo 2010): los modelos empíricos, el balance de masa Steady- State (UBA 2004), y el modelo dinámico (Slootweg et al., 2007).

Las cargas críticas empíricas se determinan a partir de las observaciones de las respuestas perjudiciales de un ecosistema o elemento del ecosistema observando la entrada de deposición de S (Pardo 2010). Este nivel de la deposición de S se establece como la carga crítica y se extrapola a otros ecosistemas similares. Las cargas críticas empíricas de S se basan en estudios de medidas de gradiente, experimentos de campo, u estudios de observaciones a largo plazo (Bobbink et al., 2010).

El modelo de balance de masa se basa en la estimación de la red de pérdida o acumulación de las entradas y salidas de S a largo plazo bajo el supuesto de que el ecosistema está en estado estacionario con respecto a las entradas de S.

Los modelos dinámicos también utilizan un enfoque de balance de masas, pero considera al tiempo - dependiente y requiere de conjuntos de datos detallados para la parametrización y pruebas (Belyazid et al., 2006).

Propuestas para la Determinación de Carga Crítica.

Los métodos disponibles hasta ahora para determinar las cargas críticas de acidez están categorizados en dos niveles: Método empírico y Balance de masa. En la aproximación empírica, la carga crítica es más bien estimada que calculada. Dicha estimación está basada en evidencia experimental y de campo sobre la respuesta de los componentes de los ecosistemas a la deposición ácida. Por otro lado, en la aproximación de balance de masa, se deben calcular las entradas y

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

salidas químicas de acidez por unidad de tiempo. El valor de carga crítica debe ser comparado con los flujos actuales de deposición con la finalidad de estimar los porcentajes de excedencia. Los valores obtenidos pueden ser utilizados como criterios químicos o indicadores ambientales que son elegidos para reflejar un cambio en el ecosistema que puede ser vulnerable a sufrir daños (Turchenek, et al.,1987).

Método Empírico. En el caso de los ecosistemas terrestres, esta aproximación sugiere como un principio básico fundamental que una carga crítica es la entrada total de iones hidrógeno al suelo que no tiene que exceder la alcalinidad producida por la meteorización de suelos minerales (Nilsson, 1986). En un taller llevado a cabo en Skokloster, Suecia en 1988, se concluyó que la tasa de meteorización química constituye el único factor que gobierna la habilidad de los suelos para amortiguar la acidez recibida, y por lo tanto las cargas críticas para suelos (Nilsson y Grenfeldt, 1988). Esta propuesta mineralógica de Skokloster, fue adoptada con algunas modificaciones para la determinación de carga crítica en suelos para varios tipos de vegetación en el Reino Unido que incluye praderas calcáreas semi-secas y praderas ácidas (Hornung et al., 1995). Así mismo, algunas de las propiedades del suelo como textura, drenaje, espesor del suelo y otros factores deben ser considerados en la derivación de cargas críticas.

Aproximación de Balance de Masa. Se han desarrollado numerosos modelos para evaluar la acidificación de los suelos y para derivar valores de cargas críticas. Los métodos de modelación comprenden dos categorías principales y se refieren a "modelos en estado estable o estacionario" y a "modelos dinámicos". Dentro de cada categoría, existen grados variables de sofisticación que van desde cálculos simples a construcciones matemáticas complejas cuyo algoritmo puede ser inclusive computarizado. Los modelos más complejos son modelos integrados que vinculan procesos del suelo con otros procesos tales como el crecimiento de la vegetación, la hidrología y el ciclo de nutrientes, así como la interacción entre ellos (Turchenek, et al., 1987).

Los modelos en estado estacionario calculan niveles de deposición que evitan efectos perjudiciales en ecosistemas sin considerar su variación en el tiempo (Task Force on Mapping, 1996). Los procesos tales como intercambio catiónico y adsorción de sulfato tienen una escala de tiempo finito y por lo tanto no pueden incluirse en modelos en estado estacionario. Por lo tanto, los modelos en estado estacionario son principalmente usados para el cálculo de cargas críticas durante largos períodos de tiempo. Se han desarrollado diferentes modelos en estado estacionario para derivar cargas críticas de suelos, como, por ejemplo, modelos de una sola capa o capa simple

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

(SMB) que consideran el suelo como una capa única; y el modelo multi-capa que considera condiciones químicas en diferentes capas de suelo u horizontes. El modelo SMB de una sola capa ha sido la herramienta más comúnmente aplicada para la derivación de cargas críticas de suelo en Europa (Task Force on Mapping, 1996).

Por otro lado, los modelos dinámicos constituyen una familia de modelos más complejos que usan varios cálculos para la simulación de cambios en la solución del suelo o química del agua como resultado de la deposición acida a través del tiempo. Los cálculos de las cargas críticas que utilizan estos modelos son más complejos que los realizados con los modelos en estado estacionario debido al factor tiempo; es decir, es necesario determinar la aceptabilidad o no aceptabilidad de cambios químicos en suelos o aguas en relación con un periodo especifico de tiempo. Por esta razón, se requiere de una gran cantidad de datos para correr este tipo de modelos dinámicos. Por consiguiente, hasta la fecha, sólo unos pocos modelos dinámicos con relativamente pocos datos de entrada requeridos han sido usados para examinar cargas críticas en Europa, Estados Unidos y Canadá (Turchenek, et al., 1987).

Categorías de Carga Crítica

Se han identificado tres niveles de categorías para la determinación de cargas críticas (Aherne & Watmough, 2006):

Nivel 0: Se trata de una aproximación semi-cuantitativa basada en la asignación de rangos de carga crítica para ecosistemas receptores sensibles.

Nivel I: Es una aproximación cuantitativa usando interacciones químicas en estado estacionario independientes del tiempo entre la fase sólida del suelo y solución.

Nivel II: Constituye una aproximación de modelación dinámica para evaluar el tiempo requerido para alcanzar el estado estacionario.

Las cargas críticas Nivel 0 son recomendables para aquellos sitios en donde no se tienen antecedentes ni evaluaciones preliminares, tal y como es el caso no sólo de nuestra área de estudio sino de todo el país. Por otro lado, una aproximación de nivel I se usa predominantemente para determinar y mapear cargas críticas en ecosistemas terrestres (Environment Canadá 2004) que ya han sido previamente estudiados. Las aproximaciones de nivel I están basadas en métodos de balance de masa en estado estacionario; es decir, se asume que se tiene un equilibrio en los principales procesos químicos involucrados. Así, por ejemplo, una aproximación estándar de nivel I para acidez de suelos en bosques podría identificar las fuentes de acidez y alcalinidad en el

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

sistema y determinar la máxima entrada de acidez que puede balancear al sistema con un límite crítico específico para un criterio químico seleccionado. Estos flujos de iones están usualmente basados en promedios a largo plazo, de aquí la importancia de contar con una base de datos suficiente y sólida de mediciones de deposición atmosférica de la zona estudiada. La ventaja de los métodos de nivel I es que pueden tomar en cuenta procesos que los métodos menos sofisticados no, tales como la acidez en el sistema suelo-planta resultante de la absorción neta de cationes básicos, o el efecto de la neutralización de entradas atmosféricas de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) Finalmente, las cargas críticas nivel II son recomendables, una vez que se ha pasado por evaluaciones que consideran el nivel I en estudios previos. (Aherne & Watmough, 2006).

A pesar de estas recomendaciones, no existe un criterio específico para determinar que categoría de carga crítica utilizar en un estudio determinado, a excepción de la información disponible que constituye un factor limitante. Aun cuando en países europeos, el historial que se tiene disponible de estudios de depósito atmosférico permite ya proponer cargas críticas de nivel I, en México las condiciones son completamente diferentes, ya que no se cuenta con una base de datos que permita migrar a la siguiente etapa. Es por esta razón que, en el presente estudio, puesto que no se tiene información previa o suficiente, se realizó una evaluación preliminar de la vulnerabilidad, y por lo tanto se propondrá una carga crítica nivel 0.

Efectos de los contaminantes sobre los ecosistemas terrestres.

Cultivos. Es importante indicar que algunos constituyentes químicos atmosféricos tales como el azufre y las especies del nitrógeno son nutrimentos, o elementos esenciales. Sin embargo, dependiendo de su forma molecular y la concentración (inclusive la duración de su ocurrencia en la atmósfera) pueden ser también tóxicos por ejemplo SO_2. En tanto que aquí se considera el ingreso atmosférico de las especies contaminantes de azufre, debe señalarse que el suelo también sirve como una fuente dominante de estos elementos mayores esenciales o macro elementos. Los problemas comienzan cuando el suelo proporciona los requerimientos del cultivo y la atmósfera aporta una sobrecarga de ellos (Materna, J. 1984). De este modo se dan una serie de relaciones entre el contenido de azufre del suelo como una fuente de requerimiento de azufre de la planta y respuesta de la planta al SO_2 atmosférico:

1. Suelo con deficiencia de azufre; el SO_2 atmosférico puede estimular el crecimiento de la planta, al proporcionar el azufre necesario para la planta.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

2. Suelo con contenido suficiente de azufre; el SO_2 atmosférico puede o no causar efectos negativos a la planta, dependiendo de la exposición.
3. Cantidad progresivamente excesiva de azufre en el suelo para la planta: aumento del daño por el SO_2 atmosférico, a causa del creciente nivel de saturación de azufre en la planta, el cual proviene del suelo.

Existen contaminantes secundarios en los cuales sus efectos adversos sobre cultivos son problemáticos a nivel regional, nacional e internacional. Pero para el caso del SO_2, los efectos se concentran en la vecindad de sus fuentes. Durante períodos de inversión superficial ocurren altas concentraciones de SO_2 lo que incrementa el potencial de efectos agudos en las plantas.

El SO_2 penetra en la hoja principalmente a través de las estomas aun cuando alrededor del 15% puede entrar directamente en la hoja a través de la cutícula. Este constituye un punto muy importante. En tanto que las plantas caducifolias pierden sus hojas durante el otoño, las perennes retienen su follaje y por tanto absorben SO_2 durante el invierno. El dióxido de azufre es un veneno acumulativo; en otras palabras, las plantas expuestas a contaminación crónica por SO_2 acumulan azufre en el follaje. Por tanto, las especies perennes que han acumulado azufre en invierno llegan a ser más vulnerables durante la primavera y el verano a los daños por SO_2. Esto no quiere decir que las plantas caducifolias no sean vulnerables. La sensibilidad de una planta depende de la tasa de absorción del SO_2 durante su desarrollo activo y varía de acuerdo con el género, la especie y aun a nivel de cultivo. Como se ha precisado, el azufre es un elemento esencial, por lo tanto, el cómo una planta responda a este gas depende si el requerimiento de azufre ha sido o no satisfecho (Krupa y Manning., 1988).

Bosques. La vegetación como productor primario en el bosque y en los ecosistemas forestales requiere de nutrientes para desarrollarse. En la naturaleza muchos bosques están sujetos al ingreso de SO_2 y de otros gases, a la sedimentación seca o húmeda de otros compuestos sulfurados y nitrogenados, y adiciones de muchos aniones y cationes. Las tasas de los ciclos de nutrientes varían de un bosque a otro debido a las diferencias en la fertilidad del suelo y a los requerimientos nutricionales de las diferentes especies de plantas y su abundancia (Zinke., 1980).

En algunas regiones subalpinas de Polonia, Checoslovaquia y en el Este de Alemania, se han reportado los peores casos de daño forestal a nivel mundial. Este dallo ha sido ocasionado solamente por el dióxido de azufre (SO_2) y otros aerocontaminantes primarios, por tanto, deben asociarse con la declinación del bosque clásica. Por otro lado, los registros de daño forestal en

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Suecia han mostrado que los pinabetos presentan una pérdida de acículas, principalmente en las partes sur y suroeste de Suecia, especialmente en suelos secos y sitios expuestos. Así mismo, los árboles más viejos han sido más dañados que los jóvenes. Los primeros informes hablan de una coincidencia notable entre el mapeo del daño forestal observado y los mapas de acidificación. Sin embargo, no es posible señalar a un solo factor aislado como el principal responsable de los daños, ya que se trata de un problema multifactorial que resulta del efecto sinérgico de una gran variedad de factores tales como sequías, heladas, contaminantes, diferencias nutricionales y envenenamiento por metales ocasionado por la acidificación, así como también la saturación de nitrógeno (Krupa, 1999).

6.2 Estudios en otros Países.

(Jenkins et al., 1997), describieron la aplicación de 3 niveles para el cálculo de cargas críticas para suelos y aguas superficiales que incluyo la clasificación simple (Nivel 0), modelo de equilibrio del balance de masa (Nivel 1) y modelo dinámico hidroquímico (Nivel 2). Algunos ejemplos de cada método se aplicaron a cuencas de la cabecera en Plynlimon. Las diferencias en los métodos de carga crítica para los suelos se deben a receptores biológicos. Ahora bien, las cargas críticas de aguas superficiales son generalmente similares bajo todos los métodos. Resultando que el modelo dinámico es el más apropiado, aunque requiere una gran cantidad de datos. La utilidad de otros métodos depende de mapas detallados de suelos y vegetación que está disponible a una escala apropiada.

(Kuylenstierna et al., 2001), propusieron una metodología para cuantificar el riesgo de acidificación por emisiones de azufre en ecosistemas de países en desarrollo. Se utilizaron modelos de transferencia atmosférica para calcular la transferencia y deposición de azufre (usando emisiones del año 1990 y realizando proyecciones para el año 2050). El método consistió en derivar la sensibilidad relativa de los ecosistemas terrestres a partir de valores de carga crítica preliminares asignados en función de algunas propiedades del suelo como la capacidad de intercambio catiónico y el porcentaje de saturación de bases. Los mapas obtenidos mostraron un creciente riesgo de acidificación para el año 2050, en regiones extensas del sur y el este de Asia, así como del sur de África, en comparación con el año base de 1990.

(Fenn & Poth, 2004,), determinaron la viabilidad del uso de resina de intercambio iónico (IER) para medir la deposición de N en la translocación con períodos de implementación de campo de 3 a 12 meses. Se compararon controles de deposición de nitrógeno en mayor escurrimiento

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

recogidos bajo el pino (*Pinus sp*.), marquesinas y en los claros del bosque con los colectores de solución throughfall (trampas de caída) convencional co-localizados o conocido como trampas de caída y IER throughfall colectores utilizando columnas de lecho mixto de la IER. Se recogieron datos de deposición de 1 año en un sitio de alta deposición (Camp Paivika, CP) y una relativamente baja (Barton Pisos, BF) en las montañas de San Bernardino, en el sur de California. Los valores anuales de deposición throughfall (kg ha^{-1} de NH_4^+ N $+NO_3^-$) bajo grandes pinos de (*Pinus ponderosa*) fueron 145.8 y 143.9 en el CP y el 17.0 y el 15.0 por BF de acuerdo con el método IER y los métodos convencionales, respectivamente. Valores análogos para la deposición a granel en los claros del bosque fueron 15.6 y 12.3 en el CP y 4.0 y 3.3 en BF. Se concluyó que los colectores más eficaces o viables son los de IER ya que se pueden utilizar para el control rutinario de la deposición de escurrimiento y la deposición mayor.

(Hicks et al., 2008), describieron una metodología para calcular el tiempo de los efectos de la sensibilidad de los suelos a la deposición acida en Asia bajo escenarios futuros de emisiones potenciales de azufre, nitrógeno y calcio. Los cálculos se hicieron coincidir con la disponibilidad de datos en Asia para la producción de mapas a escala regional que proporcionaran estimaciones del tiempo que tomaría para que la saturación de bases del suelo alcanzara un límite crítico de 20% en respuesta a entradas ácidas. Los resultados mostraron que los tipos de suelos sensibles en las zonas del sur, el sudeste y el este de Asia, incluyendo partes del sur de China, Birmania, Hainan, Laos, Tailandia, Vietnam, y los Ghats occidentales de la India, pueden acidificar en un grado significativo en una escala de tiempo de 0-50, en función del manejo de sitios individuales y las características bióticas y abióticas. Con las evaluaciones regionales de los suelos utilizando metodologías sencillas se pudo proporcionar una apreciación de la dimensión temporal de los impactos relacionados con la acidificación de suelos y pueden ser útiles en la planificación de estudios adicionales y, posiblemente, para la aplicación de medidas para reducir los riesgos de la acidificación.

(Reinds et al., 2008), describieron las ultimas base de datos y metodologías que utilizaron para calcular las cargas críticas de S y N para Ecosistemas Terrestres de Europa y Norte de Asia utilizando las bases de datos más recientes sobre suelos, vegetación, clima y crecimiento forestal. Las cargas críticas de acidez y nutrientes de nitrógeno para ecosistemas terrestres se calcularon con el modelo Balance de Masa Simple. Las cargas críticas resultantes coinciden con las cargas críticas de estudios empíricos globales, pero tienen una resolución espacial mucho mayor. Las

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

cargas críticas de acidez son sensibles tanto al criterio químico como al límite crítico elegido. Por lo tanto, se realizó un análisis de sensibilidad de las cargas críticas empleando diferentes criterios químicos. un límite crítico basado en una capacidad de neutralización de ácidos (CNA) resultado de cargas críticas de cero que protegen los ecosistemas contra las concentraciones tóxicas de aluminio y desfavorable relación de Al/Bc (relación cationes básicos/aluminio), lo que sugiere que la CNA podría ser una alternativa a la relación Al/Bc utilizada habitualmente. Las cargas críticas de nutrientes de nitrógeno son sensibles a la concentración crítica de nitrato especificada, especialmente en zonas con un elevado excedente de precipitaciones. Los límites de 3- 6 mg N 1^{-1} son utilizados en el Norte de Europa en lugar del ampliamente utilizado 0.2 mg N l^{-1} las cargas críticas media se duplican. En las zonas de escasas precipitaciones, el aumento es inferior al 50 %. La fuerte dependencia de la precipitación es una consecuencia del sencillo enfoque de modelización. Los modelos futuros podrían explorar otros parámetros del nitrógeno (como la disponibilidad de nitrógeno) en lugar de la lixiviación como factor que influye en la vegetación de los ecosistemas terrestres.

(Mongeon et al.,2010), estimaron las tasas de meteorización y las cargas críticas de acidez (S y N) de suelos forestales en diecinueve sitios localizados dentro de la cuenca de Georgia en el periodo del 2005 - 2006. Para las tazas de meteorización se utilizó el modelo PROFILE, y para las cargas críticas utilizaron el modelo Balance de Masa Simple (SSMB). Fue seleccionado la relación catión base/aluminio 10 como criterio químico crítico asociado a daños al ecosistema. La mayoría de los lugares (58%) presentaban bajas tasas de meteorización de cationes base ($\leq$50 meq m^{-2} y^{-1}). Por consiguiente, la estimación de la carga critica media de los sitios de estudio estuvo en el rango entre 129-168 meq m^{-2} y^{-1}. La deposición media anual total (húmeda y seca) de S y N, superó la carga crítica en cinco de nueve de los sitios de estudio (superación media = 32-46 meq m^{-2} y^{-1}). Los lugares de estudio situados a gran altitud (>1000 m) tenían suelos poco profundos, sensibles a los ácidos, con bajas tasas de meteorización; sin embargo, las cargas críticas superaron predominantemente en los lugares cercanos a Vancouver con cargas de deposición modelizadas más elevadas. El grado de excedencias es similar a otras regiones industriales del oeste y el este de Canadá.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

(Pardo et al., 2011), recopilaron las investigaciones actuales que relacionan la deposición atmosférica de N con los efectos sobre los ecosistemas terrestres y aguas superficiales, estimando las cargas críticas empíricas de N en 12 ecorregiones de Estados Unidos, identificando el receptor de interés, la respuesta de interés, el valor del umbral crítico para esa respuesta, y los criterios para establecer la carga crítica y extrapolar la carga crítica a otros lugares o regiones. Los receptores evaluados incluyeron diatomeas de agua dulce, hongos micorrícicos, hongos liquenizados, briófitos, plantas herbáceas, arbustos y árboles. La gama de cargas críticas de nutrientes de N para las aguas superficiales y humedales de agua dulce fue de 1-39 kg de N. ha^{-1}•$año^{-1}$ para las ecorregiones de Estados Unidos, para los humedales costeros, las cargas críticas se situaron entre 50-400 kg de N ha^{-1} • $año^{-1}$. Por lo tanto, se demuestra que la elevada deposición de N ha alterado la estructura y función de los ecosistemas en todo Estados Unidos. Se concluyó que el enfoque de carga crítica es una herramienta de evaluación de los ecosistemas con gran potencial para simplificar la compleja información científica y comunicarla de manera efectiva a la comunidad política y a la opinión pública. Al igual que en este trabajo de investigación se hizo un enfoque para la cuantificación de la deposición de la contaminación que sería perjudicial para los ecosistemas por medio de la determinación de "Cargas Criticas".

(Josipovic et al., 2011), Evaluaron la hipótesis de que la deposición atmosférica de contaminantes ácidos, procedentes de las zonas industriales centrales de Sudáfrica, representan una amenaza ambiental a través de una región más grande dentro de la huella de dispersión. Una red de 37 sitios de monitoreo pasivo para medir SO_2 y NO_2 fue operado a partir de agosto de 2005 a septiembre de 2007. La zona se extendió sobre todo en el interior del norte y el este de África del Sur. Las localizaciones de monitoreo fueron elegidos para evitar los impactos directos de las fuentes locales, tales como ciudades, minas y carreteras. Las tasas de deposición seca de SO_2 y NO_2 se calcularon a partir de las concentraciones medidas. Se utilizaron las concentraciones de las especies de azufre y de nitrógeno de la deposición húmeda de un estudio previo en conjunto con las medidas de lluvia para los años 2006 y 2007 para estimar la deposición húmeda sobre la región. La deposición ácida total calculada fue la base para evaluar la superación de cargas críticas en base a la sensibilidad de los suelos regionales. La sensibilidad regional del suelo se determinó mediante la combinación de dos atributos principales de suelo disponibles en el centro internacional de referencia e información de los suelos. Los resultados indican que ciertas partes de la zona central de fuentes de contaminación en el sur de África tienen el potencial de excedencia de carga crítica,

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

mientras que las áreas limitadas a favor del viento muestran niveles más bajos de superación. Áreas contra el viento y las zonas remotas o contra el viento, no muestran ninguna superación de las cargas críticas. Se determinó la sensibilidad de los ecosistemas, se establecieron cargas críticas y se compararon con valores de deposición húmeda de un trabajo previo, para ver si existían excedencias.

(Pinho et al., 2012), determinaron las cargas críticas de la deposición de nitrógeno y los niveles críticos de amoniaco atmosférico a largo plazo en un bosque seminatural de hoja perenne del Mediterráneo. Consideraron cambios en las comunidades de líquenes epífitos, una de la comunidad altamente sensible a la contaminación atmosférica. La agrupación de las especies de líquenes se basó en una clasificación de especies a la tolerancia de N en respuesta al grupo funcional, las cuales utilizaron como una herramienta para determinar las cargas críticas y los niveles, es decir, un cambio en las comunidades de líquenes puede indicar un cambio en los ecosistemas antes de que se produzca una transición crítica y posiblemente irreversible. Esto se hizo para un clima de bosque alcornoque mediterráneo, basado en la relación entre la diversidad de un liquen funcional y el modelo de deposición de cargas críticas de N y medición anual de las concentraciones de amoníaco atmosférico para los niveles críticos. Evaluando reducir la fuente(establo) Modelando una relación altamente significativa entre grupos funcionales de líquenes y la concentración anual de amoniaco atmosférico mostrando un nivel crítico por debajo de 1.9 μgm^{-3}, de acuerdo con estudios recientes en otros ecosistemas. El modelado muestra la relación altamente significativa entre los grupos funcional de liquen y la deposición de N mostrando que la carga crítica fue inferior a 26 kg (N) ha^{-1} $año^{-1}$, lo cual se encuentra dentro del rango superior a lo establecido para otros ecosistemas seminaturales. Teniendo en cuenta la alta sensibilidad de comunidades de líquenes a un exceso de N, estos valores podrían ayudar al desarrollo de políticas para proteger a los bosques del mediterráneo al efecto excesivo de N.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Tabla 1

Resumen de cargas criticas (CL) en nutrientes de N en ecorregiones de Norte América

Ecorregión	Ecosistema	CL de N Deposición (kg N ha^{-1} yr^{-1})	Fiabilidad	Respuestas
Tundra	Arbusto enano	1-3	#	Cambio e intercambio de CO_2, cubierta foliar, y en la composición de la comunidad de plantas vasculares.
Tundra	Líquenes	1-3	#	Cambios en la producción de pigmentos de los líquenes y cambios en la ultra estructura de liquen y recubrimiento de las briofitas.
Taiga	Bosques	1-3	#	Cambios en algas, briofitas y en la composición de la comunidad de liquen.
Taiga	Bosque de abeto	5-7	#	Cambios en la estructura de la comunidad de hongos ectomicorrizal.
Taiga	Matorrales	6	#	Cambios en matorrales incrementando el parasitismo.
Bosques del Norte	Madera y bosques de coníferas	>3	#	Disminución del crecimiento del pino rojo y disminución del buque de abedul amarillo y el roble de castaña escarlata.

Nota: Tomado de Pardo et al., (2011).

6.3 Estudios en México.

La evaluación cualitativa y cuantitativa de la deposición atmosférica es esencial para estimar las cargas críticas, identificar zonas sensibles con potencial de exceder dichas cargas, evaluar las tendencias anuales y demostrar la eficacia de las políticas ambientales en materia de reducción de emisiones. Hasta el año 2008, México no contaba con una red nacional para proporcionar una línea base de las principales características químicas de la deposición atmosférica de elementos traza y los pocos datos disponibles no estaban uniformemente distribuidos, de modo que no proporcionaban una base sólida para la interpretación de variaciones espaciales y temporales.

En el año 2008, en respuesta a la iniciativa del Instituto Nacional de Ecología a través del centro Nacional de Capacitación e Investigación Ambiental, en conjunto con la Universidad Autónoma del Carmen, se inició la operación en fase piloto de la Red de Deposito Atmosférico en México, la cual estuvo operando durante tres años consecutivos en los sitios: México, DF; Los Petenes; Ciudad del Carmen, Campeche; Monterrey, Nuevo león; El Chico, Hidalgo. De manera simultánea, en ese mismo periodo, a través del financiamiento recibido por el fondo sectorial Conacyt- Semarnat, la Universidad Autónoma del Carmen realizó el monitoreo del depósito

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

atmosférico en sitios impactados por centrales termoeléctricas que utilizan combustóleo: Tula, Hidalgo; Salamanca, Guanajuato; Manzanillo, Colima Tuxpan, Veracruz; y Petacalco; Guerrero (Carballo et al .,2013:Ceron et al .,2007,2008,2009,2010,2012a,2012b,2013,2014a,2014b) (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático) [INECC],2017, p.100). Desafortunadamente, la continuidad en los recursos para la operación de la red no fue posible. A nivel regional, se han realizado algunos estudios que permiten evaluar de manera preliminar cuál es el estado de algunos ecosistemas y su posible vulnerabilidad al depósito atmosférico.

Por otro lado, (García, 2016) midió los flujos de deposición de S en la región de Xicalango-Atasta. donde utilizo muestreadores pasivos basados en una columna de resina de intercambio iónico de lecho mixto (IER) para colectar muestras en trece sitios distribuidos a lo largo de esta zona en un diseño de transeptos múltiples. Los valores promedio de los flujos de deposición de S (SO_4^{2-}) estuvieron en 9.22 kg ha^{-1} $año^{-1}$. Lo que indica que la deposición fue casi 3 veces mayor que los valores propuestos para zonas sensibles en Estados Unidos y Europa, y 2 veces mayor que el valor reportado para bosques naturales en Europa, lo que sugiere que la deposición de S podría representar un peligro para los ecosistemas de manglar y la pesca en la región estudiada. Se obtuvieron mapas de deposición para la zona estudiada utilizando herramientas geo estadísticas a partir de los cuales se identificaron dos puntos clave en la región: las instalaciones de producción de gas y aceite costa afuera y las emisiones de los vehículos de la carretera federal 180 que corre a lo largo de la península.

(Sánchez, 2016) estimó los flujos de deposición de S en la región de Córdoba-Orizaba. Este trabajo utilizó colectores pasivos tipo “throughfall” constituidos por un lecho mezclado de resina de intercambio iónico dentro de una columna para colectar muestras en 10 diferentes sitios de muestreos distribuidos a lo largo de las Ciudades de Córdoba y Orizaba en el estado de Veracruz. Los flujos medios de deposición de Azufre (como SO_4^{2-}) en la región de Córdoba-Orizaba fue de 55.16 Kg ha^{-1} $año^{-1}$. superando ampliamente, esto fue 10 veces el límite del valor umbral propuesto para bosques naturales y para áreas muy sensibles; casi 5 veces lo reportado para Zoquiapan por (Pérez et al., 2008) en el Estado de México; y casi 3 veces lo reportado por (Ponette et al., 2010) en zonas rurales y agrícolas del Estado de Veracruz. Los resultados encontrados en este trabajo mostraron que la deposición del (SO_4^{2-}) tuvo su origen principalmente en fuentes regionales, siendo su contribución más alta cuando la región de Córdoba-Orizaba estuvo sujeta a la influencia de los vientos alisios según Quevedo et al.(s/f), son los elementos considerados

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

determinantes como aportes a las variables de las concentraciones de SO_2, La influencia se manifiesta tanto durante la temporada de lluvias como en los frentes fríos asociados a la temporada de Nortes, siendo más pronunciada en el período lluvioso. Es durante esta época cuando tienen lugar depresiones tropicales, tormentas y huracanes que favorecen el transporte de contaminantes desde regiones distantes viento arriba, como las plataformas costa afuera de la Sonda de Campeche.

(Tejero, 2017) realizó un diagnóstico de la sensibilidad de los ecosistemas terrestres al depósito atmosférico de Azufre durante un año considerando tres estaciones climáticas: Secas, Lluvias y Nortes, a lo largo de 13 sitios ubicados en el corredor industrial Xicalango-Atasta en el Estado de Campeche. en cuya cercanía se ubica una estación de recompresión de gas amargo y que está localizado viento abajo de las emisiones de plataformas costa afuera en la Sonda de Campeche. A partir de la estimación de las propiedades del suelo (pH, textura, mineralogía, capacidad de intercambio catiónico, iones intercambiables y % de saturación de bases), se asignaron categorías de sensibilidad de acuerdo a la metodología de Skokloster utilizada en la Comunidad Europea para realizar el mapeo del depósito atmosférico. De los 13 sitios, durante la temporada de secas, 10 sitios estuvieron comprendidos entre las clases 2 (moderadamente sensible) y 3 (sensible). Por otro lado, durante la época de lluvias, 8 sitios mostraron clase 1 (Altamente sensible) y 2 sitios (moderadamente sensible); mientras que, en la época de Nortes, 12 sitios presentaron una clase de sensibilidad 1 que corresponde a altamente sensible. A las categorías de sensibilidad entre las clases 1 y 3, corresponden cargas críticas para el depósito de S entre 4.0079 y 16.03 Kg S ha^{-1} $año^{-1}$. Las categorías de sensibilidad mostraron una tendencia estacional, evidenciando mayor sensibilidad durante la época de lluvias y de Nortes, esto está de acuerdo con el tipo de fuentes (plataformas costa afuera) que influyen sobre la zona de estudio en función de la meteorología prevaleciente en estas épocas del año. Así mismo, se cuantificaron las tasas actuales de depósito atmosférico de S (como sulfato) durante un año utilizando muestreadores pasivos tipo throughfall, los flujos de depósito estimados estuvieron entre 7 y 10.85 Kg S ha^{-1} $año^{-1}$. A partir de la comparación de los flujos de depósito actuales estimados y las cargas críticas propuestas, se obtuvieron porcentajes de excedencia entre 1.65 y 62.8%, que se categorizaron para identificar espacialmente a partir de geomapas, los puntos críticos de depósito de S en la zona estudiada.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

7. Justificación

Está claro que los cambios a los ciclos biogeoquímicos de los elementos como resultado de las actividades humanas, y particularmente como resultado de la contaminación atmosférica, están teniendo repercusiones no solo a nivel de ecosistema o región con sus respectivos efectos adversos sobre ciertas especies sensibles o patrimonio histórico que dada su antigüedad es más susceptible de sufrir daños, sino también de manera global. La información generada a partir de este estudio permitirá realizar un diagnóstico ambiental actual en suelos, que puede ser usada para generar indicadores ambientales, o servir de base para sustentar la modificación de leyes ya existentes y/o la promulgación de nuevas normatividades regionales para controlar o reducir las emisiones de contaminantes.

En este sentido, el mapeo de flujos de depósito atmosférico y de las excedencias a las cargas críticas permitió estudiar la distribución espacial y temporal del depósito atmosférico de acidez y S, identificando zonas críticas con exceso de contaminación y periodos o estaciones en las cuales el depósito de S puede ser más alto como resultado de las condiciones meteorológicas prevalecientes. La información obtenida permitirá además categorizar los sitios estudiados de acuerdo con su nivel de vulnerabilidad, evaluar el origen de la contaminación o de las excedencias a las cargas críticas y tomar decisiones preventivas y correctivas, según sea el caso. En este sentido, a partir del establecimiento de cargas críticas en su carácter de indicadores ambientales, se tendrá el potencial de convertir la información ambiental generada en herramientas importantes para la comunicación de información científica y técnica, proporcionando información representativa simplificada y cuantificable, acerca de la evolución del estado del ambiente a través del tiempo (análisis de tendencias), esto facilitará que la información llegue a los distintos grupos de usuarios y a la sociedad en su conjunto, promoviendo su transformación en acciones prácticas.

A un mediano plazo, una vez establecidas las cargas críticas como indicadores ambientales y a partir del monitoreo continuo del depósito de S, será posible observar los cambios a dichas variables (análisis de tendencias), integrar la información a programas de gestión que deriven en la generación de medidas regulatorias a nivel local encaminadas a la conservación de los ecosistemas de manglar en la Laguna de Términos, y finalmente evaluar la efectividad de las regulaciones aplicadas. Es decir, el contar con este tipo de información, permitirá en primer lugar realizar el diagnóstico actual, pero a la vez, permitirá fijar metas u objetivos ambientales que

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

constituyan la base de nuevas normatividades de carácter regional encaminadas a la protección de nuestra riqueza ecológica.

Particularmente en México no se tiene datos disponibles, a excepción de algunos valores umbral límites reportados para bosques de pino, y tampoco se tienen disponibles mapas que muestren la distribución de las tasas de depósito atmosférico de N y S, ni mapas que permitan identificar zonas vulnerables a la acidez en una escala nacional. Puesto que no se tienen valores de referencia (cargas críticas) reportados para los ecosistemas en México, usualmente, los pocos estudios que han sido realizados a este respecto, comparan los flujos actuales de depósito atmosférico de N y S con valores de carga crítica reportados para Europa y Estados Unidos. Es relevante investigar hasta qué grado las aproximaciones de carga critica pueden ser aplicadas en los países en desarrollo que tienen ecosistemas y climas muy diferentes, y donde los datos requeridos son escasos o no están disponibles (Kuylenstierna et al., 2001). Sin embargo, es necesario considerar que los patrones de deposición, la biodiversidad y la respuesta de los organismos sensibles en países tropicales como el nuestro, puede ser muy diferente a los existentes en regiones templadas en latitudes medias.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

8. Pregunta de investigación

¿Cuál es la carga de azufre que puede soportar los suelos del área de estudio sin que se produzca efectos adversos significativos en sus propiedades química y en los ecosistemas asociados?

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

9. Hipótesis o supuesto

Si bien los suelos de la Isla del Carmen (carbonatados), poseen una alta capacidad natural para neutralizar la acidez, la deposición atmosférica de azufre y compuestos ácidos, provenientes de fuentes urbanas e industriales, generan aumentos en las cargas críticas que ponen en riesgo la salud de los ecosistemas terrestres y la integridad del patrimonio histórico de la isla.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

10. Objetivo general

Evaluar la vulnerabilidad de los suelos de la Isla del Carmen, Campeche, a la acidez y depósito atmosférico de S.

11. Objetivos específicos

- Realizar el monitoreo de depósito atmosférico, de suelos y meteorología de superficie y de altura durante el periodo de estudio, para su posterior caracterización en la Isla del Carmen, Campeche.

- Estimar: flujo de depósito atmosférico de S, cargas críticas y sus excedencias, durante tres periodos climáticos (Lluvias, Secas y Nortes)

- Evaluar la distribución espacio- temporal y grado de sensibilidad de las cargas críticas en los sitios estudiados, Durante tres periodos climáticos (Lluvias, Secas y Nortes)

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

12. Metodología

12.1 Área de Estudio

Isla de Carmen es una barra arenosa de extensión media ubicada en la Parte Sur del Golfo de México, entre los meridianos 91^0 15´ y 92^0 00´ de latitud Oeste y los paralelos 18^0 15 y 19^0 00´ de longitud Norte (Solís- Weiss y Carreño, 1986) posee 37.5 km de longitud y 3 km de ancho. En sus extremos laterales se ubican dos bocas que la separan del continente, Boca del Carmen en la parte Oeste y Boca de Puerto Real en la porción Este (Figura 1).

12.1.1 Clima

Se han identificado en el municipio tres clases de climas: Cálido húmedo con abundantes lluvias en verano, que cubre 24.1% de la superficie municipal, particularmente la región Sur y Oeste del Municipio, donde colindan con Palizada y el Estado de Tabasco. Cálido subhúmedo con lluvias en verano de mayor humedad, característico en 43.6% del territorio municipal. Cálido subhúmedo con lluvias en verano de humedad relativa, que cubre 32.3% de superficie municipal (Instituto de Desarrollo y Formación Social [Indefos],2001, p.20)

12.1.2. Hidrología

En el Municipio se localiza la región hidrológica Grijalva- Usumacinta, siendo el sistema hidrológico más importante del Estado, mismo que por el carácter de las lluvias, los periodos de sequía y la topografía del terreno mantienen un régimen de corrientes poco irregulares a través del año, registrándose los mayores caudales en la época de lluvias de verano y otoño, que disminuyen en invierno y primavera. La mayoría de los ríos más importantes del Estado se localizan en esta región, estos son el Chumpán y Mamantel. Los ríos de menor importancia son: San Pedro y San Pablo, Piña de Vapor, Chivoha Chico y Chivoha Grande. Las lagunas que destacan en el Municipio son: Pom, Panlao, Balchacah, Atasta y de Términos, entre otras; siendo esta ultima la más importante, con una superficie de 160 mil hectáreas, es una laguna costera de agua salada, actualmente es un área de protección de flora y fauna denominada" Laguna de Términos". (Indefos,2001, p.19)

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

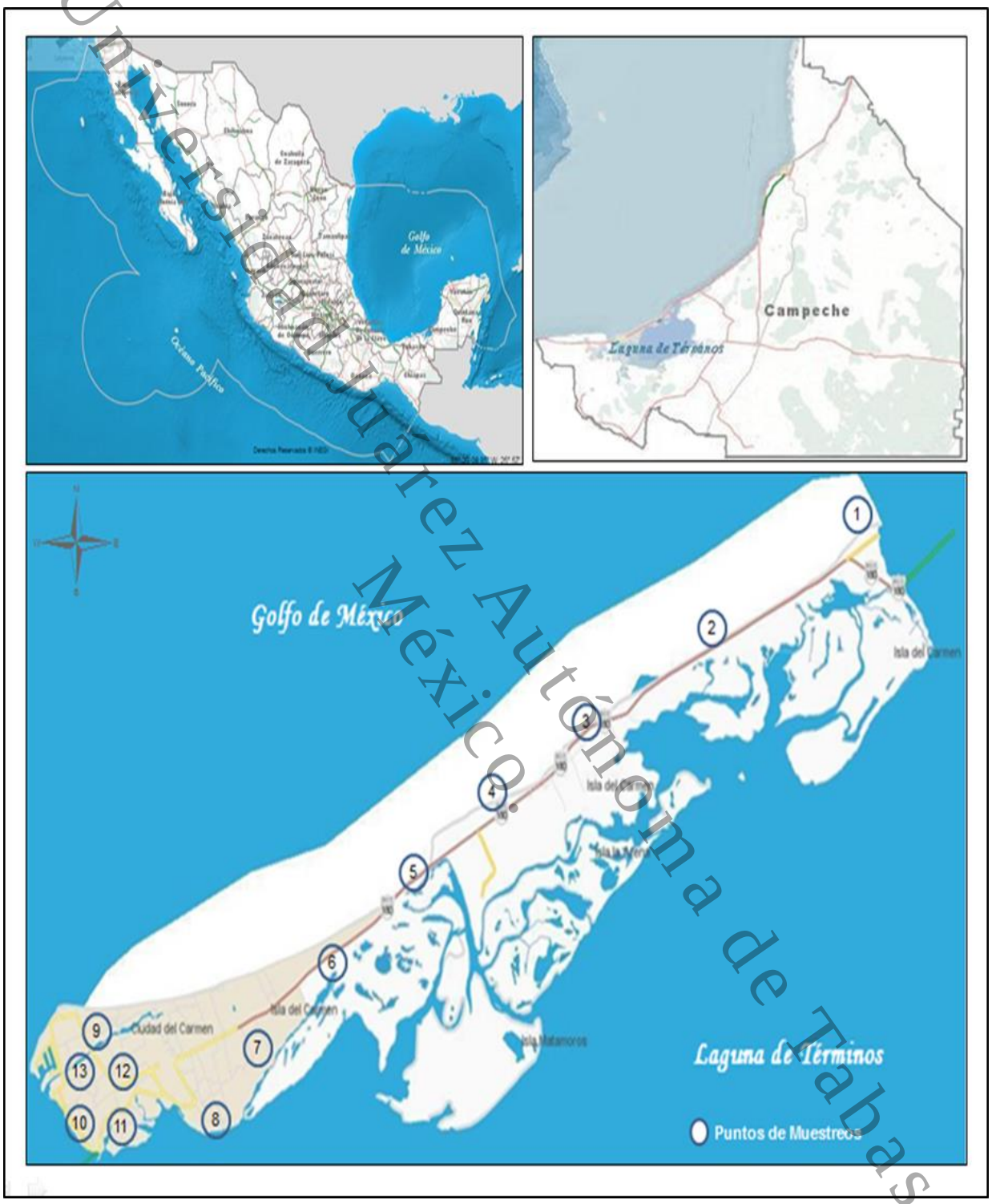


Figura 1.*Localizacion Geográfica de la Isla del Carmen, Campeche. Programa Google Earth Pro.Nota* **0** *Puntos de muestreo*

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

12.1.3. Descripción de suelos

Tabla 2

Clases de suelos en la Isla del Carmen, Campeche

Grupo de suelo	Descripción
Gleysol sálico	Esta unidad se localiza en la zona ístmica y corresponde a suelos arcillosos de textura pesada, con elevado contenido de materia orgánica, caracterizados por su alta capacidad de retención hídrica y por presentar condiciones de anegamiento. La vegetación natural asociada incluye pastizal, cañaveral y tular. Dicha unidad abarca el 26% de la superficie municipal.
Vertisol pélico	Conocido en maya como akalche, este tipo de suelo se ubica en terrenos planos, con pendiente nula o muy escasa. En el municipio, se distribuye a lo largo de una franja que atraviesa la zona central, de norte a sur. Se caracteriza por ser profundo, con una composición arcillosa y una capa orgánica bien desarrollada. Presenta una fertilidad de media a alta; sin embargo, su drenaje natural es extremadamente lento, lo que lo hace inadecuado para el cultivo de arroz, aunque sí resulta apto para la ganadería bovina. Sus tonos predominantes son el negro y el rojizo, y alberga una vegetación natural diversa. No obstante, muestra cierta vulnerabilidad a la erosión. Este suelo ocupa aproximadamente el 16 % de la superficie municipal.
Rendzinas líticas	Se localizan en los límites del municipio, en las zonas que colindan con Champotón y con la República de Guatemala. Son suelos jóvenes, de poca profundidad, pero aptos para el cultivo de frutas y hortalizas. Se les conoce localmente como tzekel plus luum. Este tipo de suelo abarca el 34 % de la extensión territorial municipal.
Luvisol gléyico	Presenta altas concentraciones de sales sódicas, rasgo típico de las marismas, los pantanos costeros y los manglares con los que suele asociarse. También muestra susceptibilidad a la erosión. Este tipo de suelo ocupa apenas una pequeña franja en el este del municipio, que representa el 4 % de su superficie total.
Regosol éutrico	Son suelos de origen marino, con alta concentración de sales sódicas, de textura arenosa y marcado carácter salino. A pesar de estas condiciones, ofrecen una base adecuada para el cultivo de coco. Ocupan el 7 % de la superficie municipal.
Litosol	Son suelos poco desarrollados, con roca dura subyacente y escasa profundidad. Abarcan el 13 % de la superficie total municipal.
Solonchak	Este tipo de suelo se distingue por presentar un horizonte subsuperficial sálico dentro de los primeros 50 cm de profundidad, condición que se confirma al registrar una conductividad eléctrica (CE) superior a 15 dS m^{-1}. Se trata de

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

	suelos salinos en los que únicamente prosperan especies halófitas, con predominio de manglares.
Phaeozem	Estos suelos se caracterizan por un horizonte superficial profundo y con elevados contenidos de materia orgánica. Son fértiles y friables, por lo que se utilizan en agricultura intensiva. Presentan, además, roca calcárea pulverulenta a menos de 50 cm de profundidad.
Arenosol	Comprenden suelos de textura arenosa, que incluyen tanto aquellos desarrollados en arenas residuales como los formados en arenas de depósito reciente, tales como dunas y terrenos de playa. Son suelos de baja fertilidad, con severos problemas de escasa retención de humedad y alta susceptibilidad a la erosión.
Leptosol	Este grupo representa la clase de suelo con mayor extensión dentro del municipio, ya que ocupa cerca del 48 % del territorio. Se caracteriza por estar limitado en profundidad por una capa de roca dura y continua, o bien por material altamente calcáreo. Presenta menos de 25 cm de profundidad efectiva, o en su defecto, muestra una alta pedregosidad en el perfil que puede alcanzar hasta los 75 cm de profundidad.

Nota: Tomado de Indefos, (2001, p.21). Palma et al., (2017)

En el uso del suelo este municipio cuenta con una superficie total de 887,815 hectáreas, de los cuales 24,277 hectáreas, son para la agricultura, 472,783 para la ganadería, 316,200 para uso forestal y 74,555 para otros usos (Indefos,2001).

12.1.4. Vegetación

El Municipio de Carmen posee una amplia diversidad de ecosistemas y una notable variedad de comunidades vegetales:

Selva alta subperennifolia: es una comunidad arbórea con un promedio de altura mayor de 30 mts. Tiene como componentes principales las siguientes especies: ramón capono (*Bosimun alicastrum*), chicozapote (*Manilkara zapota*). Caoba *(Swetenia macrophyla),* cheche blanco (*Cameraria litifolia*) y pucte (*Bucida buceras*).

Sabanas: Compuestas principalmente de gramíneas, áspera amacolladas, ciperáceas, vegetación dispersa, andropogon (*Andropogon gerardi)* y paspalum *(Paspalum notatum*) entre las más importantes.

Manglares: se localiza en zonas bajas fangosas y con aguas. La altura aproximada de sus componentes es de 25 metros, en la que crecen las cuatro especies de manglar *(Rhizophora mangle, Avicennia germinans, Laguncularia racemosa* y *Conocarpus erectus).*

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Tular: Se localiza principalmente a orillas de lagos y lagunas. Está compuesto por carrizales (*Phragmites australis*), (*Schoenoplectus acutus*), (*Typha angustifolia*).

La fauna se puede dividir en tres grandes grupos de animales: reptiles: lagartos, iguana, culebras, víboras, cocodrilos y tortugas. Mamíferos: conejos, venados, mapaches, ocelotes, armadillos, tapires y ardillas. Aves: codornices, gavilanes, palomas, chachalacas, loros, guacamayas, faisanes y lechuzas (Indefos,2001, p.20).

12.2 Actividades de Campo:

12.2.1 Muestreo de suelos

La campaña de muestreo fue realizada entre el 2014 y 2015 durante las épocas de secas, lluvias y nortes (Tabla 3**).** La colección de muestras de suelo en cada uno de los 13 sitios seleccionados (Tabla 4 y 5) para el presente estudio se realizó mediante la delimitación de transectos con dos cuadrantes separados a 1 m de distancia, cada cuadrante estuvo compuesto por 4 puntos con 0.40 m de separación entre cada uno de ellos lo que permitió obtener una muestra compuesta por cuatro muestras simples por cuadrante. El muestreo se realizó utilizando un núcleador de 193.3 cm^3 de volumen y se tomaron muestras a 0.30 m y 0.60 m de profundidad; posteriormente, fueron depositadas en bolsas transparentes de polietileno de 35 x 25 cm (1 kg); etiquetándose con el lugar y la fecha de colecta. (Figura 2).

En suelos que estaban inundados durante el muestro se usó un muestreador con válvula check que crea un vacío en el interior de la línea conforme es empujado hacia el suelo, mientras que cuando el dispositivo es retirado del suelo provoca una fuerza de succión que retiene la muestra en el interior del núcleador. Esta técnica de muestreo ha sido empleada por Grossman y Reinsch (2002) y por Bernal y Mitsch (2008) para el muestreo de suelos húmedos o inundados.

Se realizó de forma simultánea el muestreo de suelos y depósito atmosférico en cada uno de los 13 sitios seleccionados (Figura 3), los muestreos se realizaron cada dos meses a partir del 24 de septiembre 2014 al 14 de septiembre 2015 durante un año. El material colectado en cada uno de los trece sitios de muestreo se transportó al laboratorio de ciencias ambientales de la Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR) en donde se llevó a cabo su procesamiento y análisis. (Figura 4).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.



Figura 2 *Muestreo de suelo*



Figura 3 *Ubicación de los 13 sitios de muestreo: Programa Google Earth Pro*

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.



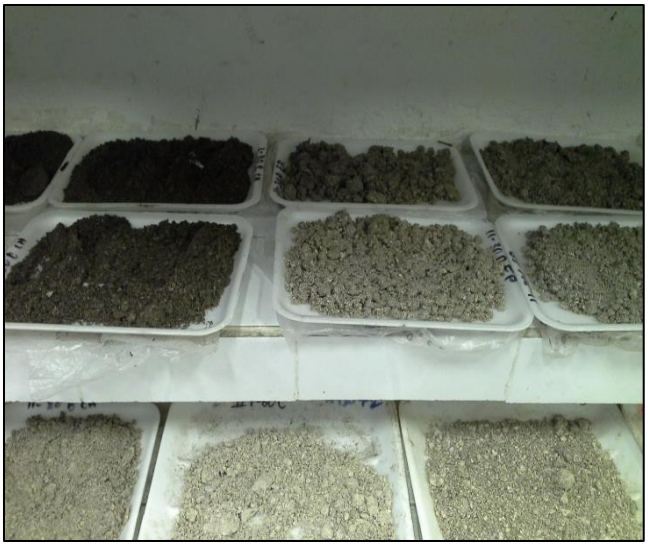


Figura 4 *Secado de muestras de suelo en el Laboratorio*

12.2.2. Muestreo de Depósito atmosférico de S.

En cada uno de los 13 sitios, se estimó el depósito atmosférico de S utilizando muestreadores pasivo tipo "througfall" o conocido como trampas de caída (Figura 5). A causa del alto costo y la dificultad en las mediciones de los flujos de deposición húmeda y seca en ecosistemas, los colectores pasivos tipo "througfall" constituyen una buena opción para obtener una estimación confiable de las entradas atmosféricas de N y S.

Puesto que los colectores automáticos son costosos y requieren de satisfacer necesidades específicas para su instalación y operación; los dispositivos de muestreo pasivo constituyen una buena alternativa ya que permiten incrementar la densidad de la malla de muestreo a un bajo costo.

Los colectores pasivos tipo "througfall" están constituidos por un lecho mezclado de resina de intercambio iónico dentro de una columna (Fenn & Poth, 2004). Al final de cada periodo de muestreo (cada 2 meses durante 1 año), los iones retenidos dentro de la columna fueron extraídos con una solución 2N de KCl para recuperar los elementos muestreados.

Las muestras se recogen con un embudo; la solución se canaliza hacia el lecho de resina mixta (TM IRN150 Amberlite) a través de la columna donde se retienen los iones. El embudo se conecta a la columna de IER (un tubo de cloruro de polivinilo de 1.27 cm x 35.6 cm [PVC]) con accesorios de PVC y tubería. Un tubo de plástico blanco de doble pared (7.1 cm de diámetro) se coloca alrededor de la columna de la IER para protegerlo de la radiación solar directa. La resina

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

utilizada para los colectores de la IER es lecho mezclado de poliestireno para el intercambio mixto de aniones y cationes (Amberlite TM IRN150). Un tamiz de malla fina se coloca en la abertura del embudo para impedir la entrada de insectos, hojas, etc. Se añaden 30 g de resina a las columnas de PVC y se lavan con agua destilada. Este volumen de resina es suficiente para colectar N y S. En la parte inferior del tubo se coloca lana de vidrio (como un soporte para la resina) y en la parte superior (como un filtro). La columna de PVC, cuenta con una válvula que debe estar abierta para permitir el paso del agua de lluvia cuando está en campo.



Figura 5 *Muestreador pasivo tipo "throughfall"*

A los extractos contenidos se les determinó el contenido de azufre como sulfato. La determinación de SO_4^{2-} se realizó por el método turbidimétrico (NMX-AA-074.1981)

La importancia de los flujos de depósito de azufre para el presente trabajo de investigación consiste en que constituyen la entrada (como flujos actuales) para ser comparados con los niveles de fondo referencia (Carga Critica) de acidez de azufre propuestos en el presente estudio y que fueron obtenidos a partir de la aplicación de la metodología empírica de Johan Kuylenstierna la cual se describe posteriormente.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Tabla 3

Temporada de muestreo de los sitios

Muestreo	Fecha de muestreo real	Periodo de muestreo		Temporada
1	24-sep-14	24- sep-14	24-nov-14	Lluvias
2	09- ene-15	25-nov-14	24-ene-15	Nortes
3	24-feb-15	25-ene-15	24-mar-15	Secas
4	12- may-15	25-mar-15	24-may-15	Secas
5	12- jul-15	25-may-15	24-jul-15	Lluvias
6	14-sep-15	25-jul-15	24-sep-15	Lluvias

Nota: “elaboración propia”

Tabla 4

Identificación de cada sitio

ID	UBICACIÓN
1	Puerto Real
2	Km. 30.8 Rebombeo SMAPAC
3	Km. 21 Rebombeo SMAPAC
4	Ensenada
5	Km. 18.8 R/a Bahamitas
6	Parque Ecoturístico El Fénix
7	Instituto de Limnología UNAM
8	Jardín Botánico UNACAR
9	Playa Norte Av. Ballena
10	La Puntilla C-17 entre 36 y 36B
11	Emiliano Zapata C-Fco. Villa
12	Campus Principal UNACAR
13	Santa Margarita C-49

Nota: “elaboración propia”

Tabla 5

Localización de los sitios de muestreo en la Isla del Carmen, Campeche.

ID	UBICACIÓN	ALTITUD	COORDENADAS GEOGRAFICAS N	O	UTM X	Y
1	Puerto Real	3	18^0 46' 40.23"	91^0 31' 51.16"	654843	2076886
2	Km. 30.8 Rebombeo SMAPAC	-5	18^0 45' 46.50"	91^0 34' 50.20"	649613	2075191
3	Km. 21 Rebombeo SMAPAC	3	18^0 42' 32.90"	91^0 41' 25.11"	638092	2069151
4	Ensenada	-1	18^0 44' 40.32"	91^0 37' 32.90"	644864	2073119
5	Km. 18.8 R/a Bahamitas	4	18^0 41' 59.47"	91^0 41' 43.93"	637548	2068119
6	Parque Ecoturístico El Fénix	5	18^0 40' 20.83"	91^0 44' 43.06"	632322	2065050
7	Instituto de Limnología UNAM	3	18^0 39' 50.92"	91^0 45' 32.99"	630866	2064120
8	Jardín Botánico UNACAR	3	18^0 38' 50.51"	91^0 46' 42.07"	628854	2062262
9	Playa Norte Av. Ballena	3	18^0 39' 35.35"	91^0 49' 46.33"	623446	2063591
10	La Puntilla C-17 entre 36 y 36B	5	18^0 38' 10.96"	91^0 49' 40.18"	623643	2060998
11	Emiliano Zapata C-Fco. Villa	4	18^0 38' 13.82"	91^0 48' 51.22"	625078	2061096
12	Campus Principal UNACAR	4	18^0 38' 47.53"	91^0 49' 10.14"	624516	2062128
13	Santa Margarita C-49	4	18^0 38' 53.53"	91^0 49' 58.75"	623091	2062303

Nota: “elaboración propia”

12.3 Actividades de Laboratorio

12.3.1. Procesamiento de muestras de suelo

Después de la colecta; las muestras fueron embolsadas y etiquetadas, posteriormente.

Secados: para evitar cambios químicos que se pudieran producir al almacenarlas húmedas durante mucho tiempo. Para el secado, las muestras se extendieron durante 15 días bajo la sombra en una superficie plana sobre bandejas y en un lugar bien ventilado para acelerar el secado; evitando así el secado brusco utilizando altas temperaturas.

Molienda y tamizado: Las muestras deben ser pasadas por un tamiz de 2 mm de acuerdo a los requerimientos en los análisis químicos: las partículas de grava, rocas, raíces y otras impurezas fueron retiradas manualmente con el fin de garantizar la pureza y uniformidad de la

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

muestra. Los agregados del suelo o terrones que no atravesaron el tamiz fueron molidos con morteros y sometidos a un nuevo tamizado.

Las muestras se guardaron en bolsas de plástico selladas adecuadamente evitando la pérdida de humedad, se identificaron con toda la información necesaria: época de muestreo, sitio de muestreo, punto de colecta, profundidad de la colecta, numero de parcela establecida, ubicación geográfica y características del sitio y se enviaron al laboratorio para ser analizadas químicamente.

12.3.2. Procedimiento de Extracción de Resinas (Deposito atmosférico de S)

Para realizar este proceso se construyó un sistema de extracción, que consto básicamente de un tubo de PVC de 5mm (DI) y 15 cm de longitud, adaptado a cada colector que contiene las resinas a extraer.

Después de retirar la tapa de la parte inferior del tubo de resina, se verifico que el agujero de drenaje no estuviera sucio, si es así, se procedió a limpiar con un pañuelo de papel humedecido.

Después que se etiqueto cada tubo con los datos de identificación de laboratorio. fue necesario, colocar cinta teflón en un extremo de la válvula de goteo y con cuidado a la válvula de rosca en el tubo de resina, para evitar rupturas. Con una pinza se desechó la lana de vidrio, y se verifico que la válvula se encontrara en la posición cerrada.

Todas las columnas se colocaron de forma vertical (para esto se utilizaron soportes universales y pinzas para soporte universal), a continuación, se colocó un vaso precipitado debajo de cada tubo de resina. Se vertieron 100 ml de agua destilada en el depósito y se esperó 20 minutos. Mientras se esperaba, se inspeccionan las uniones roscadas para evitar fugas. Si se producía una fuga, se apretaba y se limpiaba con toallas de papel. Si la fuga continuaba, se volvía a aplicar cinta teflón a las roscas. Una vez hecho esto, se abría la válvula ligeramente de modo que la velocidad de goteo fuera aproximadamente 2 gotas/segundo. Se dejó el goteo continuo de la columna durante 10 minutos para completar el drenaje. Por último, se desechaba el agua.

En seguida se debía asegurar que la válvula estuviese cerrada y se vertieron 100 ml de solución de KCl 2N en el depósito, se esperaban 20 minutos. Nuevamente se abría la válvula ligeramente de modo que la velocidad de goteo sea de 2 gotas/segundo aproximadamente. Se dejó el goteo continuo de la columna durante 10 minutos. A continuación, se abría la válvula completamente para permitir que el resto de la solución saliera de la columna. Se dejó pasar 5 minutos para completar el drenaje. El volumen total debería ser de aproximadamente 200 ml en cada botella. Las muestras se almacenaron en un congelador.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

12.4 Análisis de suelos y depósito atmosférico.

12.4.1 Determinación del % de Humedad.

Se utilizó el método gravimétrico descrito por Etchevers et al. (2005) para determinar el contenido de humedad de los suelos. Este método se basa en la cuantificación de la masa de agua, expresada en gramos, contenida en una muestra de suelo. La masa de agua se determinó por diferencia de peso entre la muestra de suelo húmedo y la muestra seca, considerando como suelo seco aquel que fue secado a temperatura ambiente y bajo sombra.

La muestra de suelo fue homogenizada manualmente con la finalidad de destruir todos los terrones o agregados, se pesó y registro el peso del plato de plástico (Pp), luego se extendió la muestra de suelo húmeda en el plato de plástico y nuevamente se anotó el peso (Pp + Ss), se colocó sobre una superficie plana y se dejó secar el suelo a temperatura ambiente bajo la sombra durante 15 días; el siguiente paso fue romper manualmente los agregados que se formaron durante el transcurso de tiempo y remover el suelo para facilitar su secado lo más rápido posible, a los 15 días se anotó el peso del suelo ya seco junto con el plato (Pp + Ss) y se depositó toda la muestra seca en una bolsa de polietileno; la cantidad de humedad de la muestra se determinó por medio de la siguiente formula:

$$\%H = \frac{(Pp + Sh) - (Pp + Ss)x\ 100}{(Pp + Ss) - P}$$

Donde:

% H contenido de humedad gravimétrica expresado en porcentaje (%).

Pp Peso del plato de plástico (g)

Sh Peso del suelo Húmedo (g)

Pp+ Sh Peso del plato más peso del suelo húmedo (g)

Pp + Ss Peso del plato más peso del suelo seco (g)

Se realizó el secado de las muestras a temperatura ambiente ya que corresponden a suelos orgánicos, que pueden tener pedidas de masa por oxidación y volatilización de componentes orgánicos si son secadas a 105 C en una estufa (Etchevers, et al., 2005).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

12.4.2 Determinación del pH

El pH de la solución del suelo varía de forma natural debido a los intercambios constantes entre el suelo y la fase líquida. Por ello, el valor de pH medido en una muestra recién tomada en campo puede diferir del que se obtiene después de secar y preparar la muestra para su análisis en laboratorio. Durante el proceso analítico, el suelo se rehumedece con agua o con soluciones salinas específicas, lo que permite establecer un rango probable de pH que refleje con mayor aproximación las condiciones naturales del suelo en el sitio de muestreo. Una porción de muestra se agita con un volumen conveniente de agua o diversas sales, y el pH de la suspensión se determinará electrométricamente con un potenciómetro, utilizando un electrodo de referencia de calomel saturado con cloruro de potasio (Rodríguez y Rodríguez, 2002)

La determinación de pH se realizó a través del método AS-02 de la NOM-021-RECNAT-2002. El análisis del pH se realizó de la siguiente manera: se pesaron en un frasco de plástico con tapa de 8 g de suelo seco previamente tamizado a 2 mm, se añadieron 16 ml de agua destilada y se agitaron manualmente obteniendo así una mezcla de suelo: 2:2 a intervalos de 5 min, durante 30 min; se dejaron reposar durante 15 minutos mientras tanto se calibro el potenciómetro con soluciones reguladoras de pH 2,4,7,10, según el suelo, enjuagando con agua destilada el electrodo antes de iniciar la lectura de la muestra, pasando el tiempo se agito nuevamente la suspensión e introdujo el electrodo y se registró la lectura del pH estabilizado, OAKTON PC 700 y salinometro MP-6P.(Ver Figura 6)



Figura 6 *Potenciómetro y Salinometro*

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

12.4.3. Determinación de la Conductividad Eléctrica

El agua es muy mala conductora de la corriente eléctrica, mientras que el agua que contiene sales disueltas como la de los suelos conduce la corriente eléctrica aproximadamente en proporción a la cantidad de sales presentes. Tomando como base este principio, las mediciones de la conductividad eléctrica de un extracto dan una indicación casi exacta de la concentración total de constituyente ionizada. La determinación de la conductividad eléctrica se llevó a cabo mediante la medición de la resistencia eléctrica existente entre dos electrodos paralelos, completamente sumergidos en la muestra (Rodríguez y Rodríguez, 2002).

La determinación de C. E se realizó a través del método AS-02 de la NOM-021-RECNAT-2002. Se pesaron en una probeta de plástico de 50 ml de capacidad 8 g de suelo seco previamente tamizado a 2 mm, se añadieron 40 ml de agua destilada y se agitaron manualmente obteniendo así una disolución de suelo: 1:5 un instante de 10 min, finalizado el tiempo se introdujo la celda de conductividad al tubo; sobre el líquido sobrenadante y se anotó la lectura observada en el conductímetro. Antes de realizar la lectura de la muestra la celda del conductímetro se calibro con una solución de KCl 001 M a 25^0 C y se enjuago.

12.4.4. Determinación de la densidad aparente

La densidad aparente (DA) se determinó siguiendo el método de la probeta descrito por Mylavarapu y Kennelley (2002). Esta técnica resulta particularmente ventajosa por su simplicidad operativa, ya que únicamente requiere el conocimiento de dos parámetros fundamentales: la masa del suelo y el volumen total que esta ocupa. Dicho volumen total comprende tanto el volumen de los sólidos como el correspondiente a los espacios porosos. La masa se obtuvo por pesada directa de la muestra, mientras que el volumen se determinó de forma indirecta mediante el uso de una probeta graduada.

La densidad aparente del suelo es la relación entre la masa y el volumen aparente o macroscópico de las partículas del suelo más los espacios porosos de una muestra y se expresa en gramos por centímetro cubico (Blake & Hartge, 1986)

La densidad aparente (DA) es un parámetro ampliamente utilizado como indicador de la calidad estructural del suelo. Por lo general, una DA baja refleja una mayor porosidad y una mejor agregación de las partículas, lo que favorece la aireación y el movimiento del agua. Un suelo de bosque sano, por ejemplo, tiende a mostrar una densidad aparente baja, lo cual está relacionado

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

con una mayor estabilidad de los agregados, menor grado de compactación y, probablemente, una mayor capacidad de retención de humedad que un suelo con una DA más alta.

Para Sepúlveda (2013) afirma que existen varios factores que influyen en la Da:

- La densidad de las partículas de suelo mineral.
- La cantidad de materia orgánica.
- La compactación del suelo.
- Las actividades de animales que excavan en la tierra, tales como lombrices y cangrejos.
- La abundancia de raíces de plantas.

La determinación de Da se realizó de la siguiente manera: se vertieron con precisión 50 gr de suelo seco previamente tamizado a 2 mm a la probeta de plástico anteriormente pesada y tarada, inmediatamente se registró el peso. La probeta se colocó sobre una base firme y su boquilla fue cubierta con una franela húmeda. Posteriormente, se aplicaron 30 golpes con un mazo de hule, siguiendo una trayectoria vertical de 20 a 30 cm. Finalmente, se registraron el volumen final ocupado por la muestra y su peso. La densidad aparente se calculó mediante la siguiente expresión:

Donde:

g = Peso de la muestra empleada (g)

V = Volumen desplazado en la probeta (cm^{-3})

La determinación de Densidad aparente se realizó a través del método AS-03 de la NOM-021-RECNAT-2002.

12. 4.5. Determinación de la Textura del suelo

La textura indica el contenido relativo de partículas de diferentes tamaños, como la arena, el limo y la arcilla, en el suelo. La textura tiene que ver con la facilidad con que se puede trabajar en el suelo, la cantidad de agua y aire que tiene y la velocidad con que el agua penetra el suelo y lo atraviesa. (Agrícola, 2014). La distribución del tamaño de las partículas del suelo constituye una de sus propiedades más estables, y guarda una estrecha relación con su comportamiento físico y químico. Dado que la mayoría de las propiedades fisicoquímicas del suelo dependen de la actividad superficial de las partículas y esta, a su vez, está determinada por su tamaño, la textura se ha consolidado como un criterio fundamental tanto para la clasificación como para la caracterización agronómica y ambiental de los suelos. (Alanís, Julio de 2015). El suelo es un sistema abierto, dinámico y trifásico, compuesto por fases sólida, líquida y gaseosa. En condiciones de equilibrio estructural, la fase sólida integrada por partículas minerales y materia orgánica ocupa cerca del 50

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

% del volumen total, mientras que el espacio poroso restante se reparte entre aire y agua, completando así el otro 50 %. (Determinaciones De La Textura Del Suelo Por El Método Del Hidrómetro De Bouyoucos Gratis Ensayos, s/f).

El método del hidrómetro de Bouyoucos es el más utilizado, y consiste en dos principios: la dispersión y la sedimentación. La primera consiste en separar las partículas del suelo, esto se logra por medios químicos (El hexametafosfato de sodio, por ser un agente dispersante muy efectivo, es el que se emplea generalmente en los análisis de rutina.) y mecánicos la agitación mecánica es efectiva para dispersar agregados grandes, pero no para separar agregados pequeños formados principalmente por arcillas mientras que en la segunda, la velocidad de sedimentación de las partículas es medible, y depende del tamaño de estas: las partículas de mayor diámetro sedimentan a mayor velocidad que las de menor tamaño, como consecuencia de su reducida área superficial específica. (Alanís, Julio de 2015).

Para determinar la textura se pesaron 50 gr de suelo, previamente secado y pasado por un tamiz de 2 mm de diámetro de apertura, enseguida se colocó la muestra en un vaso de precipitado de 1 L, se le agrego agua destilada aproximadamente hasta la mitad de la capacidad y se le adicionaron 5 mL de hexametafosfato de sodio 1 N, se agito durante 10 minutos con un agitador mecánico. Se transfirió la mezcla agitada a una probeta de 1000 mL aforado con agua destilada, enseguida se agita vigorosamente por 2 minutos y se introdujo inmediatamente con mucho cuidado el hidrómetro y el termómetro para determinar la temperatura de la suspensión, se tomó la primera lectura a los 40 s y por cada grado por encima de 18 ^{0} C se adiciono 0.25 a la lectura del hidrómetro (Robsan Bouyoucos GL a 20 ^{0} C); por cada grado debajo de 18 ^{o} C se restan 0.25 a la lectura del hidrómetro exactamente a las 2 hrs.(Ver Figura 7)

Los gramos y los porcentajes de arena, limo y arcilla, se calcularon con las siguientes expresiones

Gramos de arena:

Gramos de arena= (peso del suelo-lectura del hidrómetro a 40 s).

Gramo de arcilla:

Gramo de arcilla =lectura del hidrómetro corregida alas 2hrs.

Gramo de limo:

Gramo de limo= (peso del suelo - (g de arena + g de arcilla)).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Porcentaje de arena:

$$\% \, arena = \left[\frac{g \, de \, arena}{peso \, del \, suelo}\right] x \, 100$$

Porcentaje de limo:

$$\% \, de \, limo = \left[\frac{g \, de \, limo}{peso \, del \, suelo}\right] x \, 100$$

Porcentaje de arcilla.

$$\% \, de \, arcilla = \left[\frac{g \, de \, arcilla}{peso \, del \, suelo}\right] x \, 100$$

Al finalizar el análisis granulométrico, se determinó la textura para los suelos muestreados (13 sitios) con el esquema triangular de las clases texturales (USDA, 2010)



Figura 7. *Mediciones de Textura*

12.4.6. Materia orgánica y Carbono Orgánico.

La determinación de la materia orgánica del suelo resulta fundamental en diversos campos como la ecología, la edafología y el estudio del cambio global. Uno de los roles clave de los suelos es la regulación del CO_2 atmosférico, ya que albergan grandes reservas de materia orgánica (M.O.),

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

las cuales constituyen una parte significativa de las existencias globales de carbono. Conocer su contenido no solo es esencial para estimar el potencial de almacenamiento de carbono, sino también para evaluar y mejorar la productividad agrícola y forestal de los suelos. (La manna et al., 2007).

En este trabajo, se determinó el carbono orgánico mediante el método de pérdidas por ignición "LOI", (por sus siglas en inglés *loss on ignition*), ya que constituye una alternativa económica al no requerir reactivos químicos y demandar escasas horas-hombre para su ejecución. (Rosell et al., 2001), Además, este método resulta especialmente adecuado para materiales como turbas, lodos orgánicos y suelos que contienen restos vegetales en estado de descomposición incipiente, así como para materiales frescos de origen vegetal como madera, raíces o pasto e incluso para sustancias carbonáceas como lignito o carbón. Su aplicación permite determinar la oxidación cuantitativa de la materia orgánica presente en dichos sustratos, ofreciendo una estimación válida y razonablemente precisa del contenido orgánico total. (Agencia Espacial Mexicana[aem], s./f.).

Para la determinación de carbono orgánico se utilizaron 5 g de muestra tamizada a 2 mm en un crisol de porcelana (a peso constante), posteriormente se colocó en una estufa a 105 ^{0}C durante 12 h esto se repitió 2 veces más para obtener un peso constante, luego de pesada fue colocada en una mufla a 550 ^{0}C durante 4 h para quemar la materia orgánica contenida en ella, se dejó enfriar y se pesó nuevamente (Previamente a las pesadas, las muestras se colocaron en un desecador con sílica gel hasta que alcanzaron la temperatura ambiente, con el fin de evitar la absorción de humedad). (Heiri et al., 2001). (Ver Figura 8).

$$LOI_{550} = \left(\frac{(DW105_{105} - DW_{550})}{DW_{105}} X\ 100 \right)$$

Donde:

LOI $_{550}$ Representa las pérdidas de Carbón por ignición a 550 ^{0}C (como un porcentaje).

DW $_{105}$ El peso de la muestra antes de la combustión a 105 ^{0}C (g)

DW$_{550}$ El peso seco de la muestra después de someterla a 550 ^{0}C (g).

La pérdida de peso registrada es proporcional al contenido de materia orgánica presente en la muestra. Para calcular el carbono orgánico total en las muestras de suelo, se multiplica el valor

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

de materia orgánica por un factor de conversión de 0,4, lo que equivale a considerar que el 40 % de dicha materia orgánica corresponde a carbono orgánico. (aem, s.f.).

La determinación de carbono almacenado (C.A.) se llevó a cabo por la siguiente formula (Moreno et al., 2002);

C.A. (Kg Cm^{-2}) = (peso del suelo) *(% CO) Peso del suelo (t ha^{-1}) = (Pr)* (Da)

Donde:

C.A. Carbono almacenado.

% CO Porcentaje de carbono en el suelo,

Da= Densidad aparente (tm^{-3})

Pr= Profundidad (m).



Figura 8. *Materia orgánica y Carbón orgánico*

12.4.7. Determinación de azufre

La determinación del azufre disponible en los suelos presenta ciertas dificultades, derivadas tanto de la diversidad de fuentes que aportan formas asimilables de este elemento, como de la gran variabilidad en sus concentraciones en relación con los requerimientos nutricionales de los cultivos (Bazan, 1996). El azufre es un elemento importante en la biogeoquímica de los ecosistemas forestales, debido a su papel como un nutriente vegetal esencial (Duke y Reisenauer 1986).

La determinación de azufre consistió en agitar 20 g de suelo, tamizado por una malla de 2 mm con 15 mL de la solución extractora por 30 minutos, posteriormente se le adiciono 0.5 g de

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

carbón activado y luego se agito, por 3 minutos y finalmente se filtró la suspensión usando papel filtro Whatman No. 42. Todas las extracciones fueron hechas por triplicado. Se usó un blanco de referencia con una celda de 5 cm. (Bazan, 1996).

La determinación de azufre se realizó a través de la técnica turbidimetría. Se determinó la concentración de azufre en la curva de calibración previamente preparada. Se midió a una longitud de onda de 420 nm. Para la curva de calibración, se preparó una solución estándar de azufre (100 mg de S/L).

- La solución extractora se prepara disolviendo 39 gramos de acetato de amonio en un volumen final de 1000 mL de ácido acético 0,25 N, asegurando una completa homogenización.
- Lavar el carbón activado con la solución extractora hasta eliminar completamente los sulfatos.
- La solución de semilla ácida se prepara disolviendo la cantidad necesaria de K_2SO_4 en HCl 6 N, de modo que la concentración final de azufre sea de 20 mg/L (equivalente a 20 ppm).
- Cloruro de bario. $BaCl_2$. 2 H_2O, en cristales de 20 a 60 malla.
- Para obtener el estándar de 100 ppm de S, pesar 0,5434 g de K_2SO_4, transferir a un matraz aforado de 1000 mL, disolver y enrasar con la solución extractora, homogenizando cuidadosamente.

Tabla 6

Concentración de las soluciones estándares para la construcción de la curva de calibración de S.

Stock 100 mL	Sol. Extractora/ mL	Vol. Final mL	Concentración mg S/L(ppm S)
0	25	25	0
1.25	23.75	25	5
2.50	22.50	25	10
5.00	20.00	25	20
7.50	17.50	25	30
10.0	15.00	25	40

Para la curva de calibración se realizaron los siguientes pasos:

- Tomar alícuotas de 10 mL de cada extractante y 10 mL de cada uno de los estándares de la curva patrón, y transferirlas a tubos de ensayo.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

- Adicionar 1 mL de la solución semilla ácida a cada tubo y agitar para homogeneizar.
- Agregar 0,5 g de cloruro de bario dihidratado ($BaCl_2 \cdot 2H_2O$) en cristales (20–60 malla).
- Dejar en reposo durante 1 minuto y, posteriormente, agitar vigorosamente hasta la disolución completa de los cristales.
- Transcurridos de 8 a 10 minutos después de la disolución de los cristales, medir la transmitancia a 420 nm de longitud de onda.

Curva de calibración para la determinación de azufre

Las concentraciones de azufre se obtuvieron a partir de una curva de calibración. Esta se construyó utilizando concentraciones conocidas de los datos obtenidos se sometieron a un análisis Estadístico aplicando una regresión lineal, utilizando el paquete de computo Microsoft Excel. Los resultados se presentan a continuación:

Tabla 7

Datos de la curva de calibración

Concentración mg S/1(ppm S)	Absorbancias	Coeficiente de correlación	Longitud de Onda
0	0.06	0.9986	420 nm
5	0.19		
10	0.35		
20	0.67		
30	1.04		
40	1.35		

Nota: “elaboración propia”

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

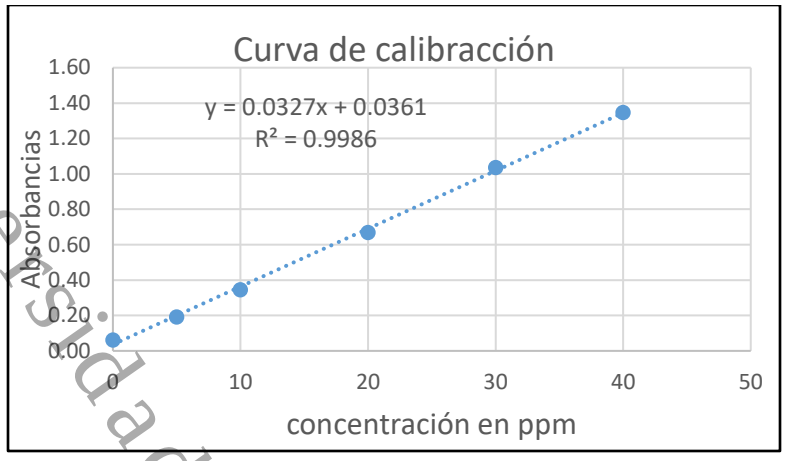


Figura 9. *Curva de calibración*

La ecuación de la curva de calibración es y= 0.0327 x + 0.0361 de la cual se despeja X y la ecuación que nos da en la que Y representa las absorbancias obtenidas en los diferentes muestreos

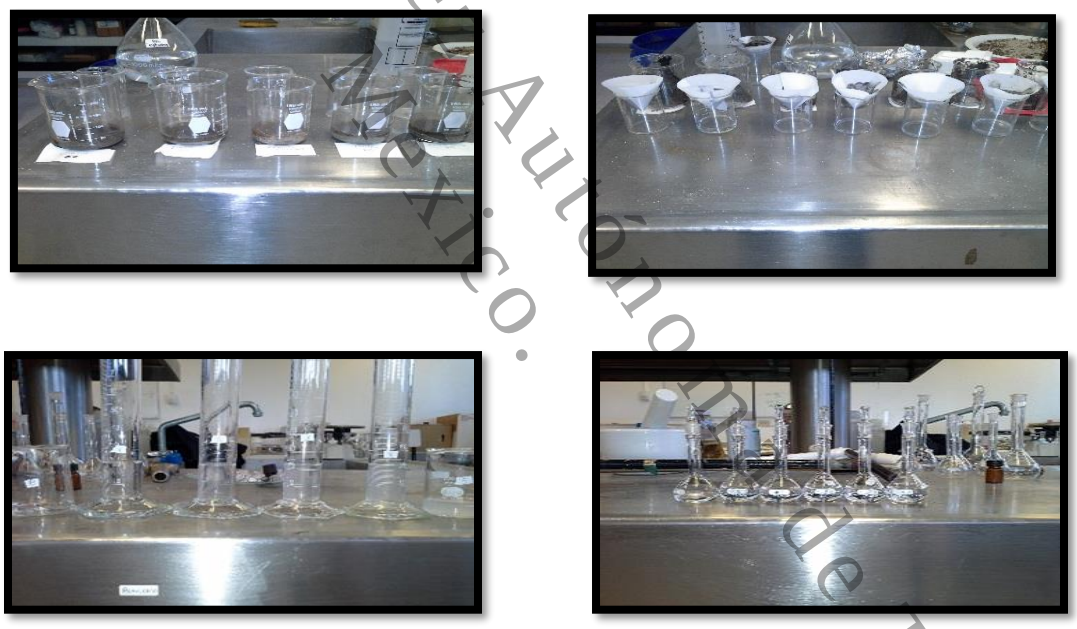


Figura 10. *Preparación de las soluciones estándar y curva de calibración del análisis de azufre*

12.5 Estimación de los flujos de depósito atmosférico de S

12.5.1. Determinación de Sulfatos

Este método es aplicable para determinar los iones de sulfatos en aguas naturales y residuales con ámbito de aplicación de 10 a 60 mg/L. En medio ácido (HCl), el ion sulfato precipita

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

cuantitativamente al agregar cloruro de bario, dando lugar a la formación de cristales uniformes de sulfato de bario ($BaSO_4$). La medición de la absorción espectral de la suspensión de sulfato de bario se realiza mediante nefelometría o fotometría de transmisión. A partir de la lectura registrada, se calcula la concentración de sulfatos comparándola con una curva patrón (NMX-AA-074-1981 análisis de agua – determinación del ion sulfato).

a) Procedimiento de preparación de los reactivos.

Reactivo Acondicionador:

En un recipiente adecuado, mezclar 50 mL de glicerol con una solución preparada previamente con 30 mL de ácido clorhídrico concentrado, 300 mL de agua, 100 mL de alcohol etílico o isopropílico al 95 % y 75 g de cloruro de sodio.

Solución de sulfato:

Disolver 147,9 mg de sulfato de sodio anhidro en aproximadamente 800 mL de agua. Agitar hasta disolución total y completar el volumen hasta 1000 cm^3 con agua.

Cloruro de bario ($BaCl_2$) en cristales.

Para la formación de la turbidimetría de sulfato de bario se transfirió a un matraz Erlenmeyer de 250 mL, 10 mL de muestra interés, Posteriormente se añadió exactamente 500 µL del reactivo acondicionador y se mezcló en la parrilla agitadora, mientras las soluciones se encontraban agitando, se añadió los cristales de ($BaCl_2$) con una cucharilla posteriormente se empezó a medir el tiempo, dejándose agitar durante un minuto a una velocidad constante.

La velocidad de agitación no es un parámetro crítico; sin embargo, debe mantenerse constante para todas las muestras y patrones dentro de una misma serie analítica. Se recomienda ajustarla a un valor cercano al máximo permitido por el equipo. pero sin ocasionar salpicaduras. Después de terminar el periodo de agitación, se vertió 10 mL de solución a la celda de absorción del espectrofotómetro UV y se midió la turbidimetría; por último, para estimar la concentración de sulfato en la muestra, se midió su absorbancia (turbidez) y se interpoló en la curva de calibración construida con soluciones patrón de concentración conocida.

12.6 Estimación de Cargas Críticas

El presente estudio tomo los datos de acuerdo con (Tejero,2017) sobre cargas críticas. Es importante mencionar que la metodología utilizada no fue implementada como parte del presente estudio, sin embargo, puesto que las cargas criticas obtenidos para la región de Xicalango- Atasta son necesarios para la evaluación de la vulnerabilidad de los ecosistemas terrestres de la Isla del

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Carmen a la acidificación, se consideró necesario retomar la información generada en este estudio previo. A continuación, se describe brevemente la metodología empleada.

12.6.1 Metodologías Empíricas para la categorización inicial de la sensibilidad de los ecosistemas y estimación de cargas críticas de acidez y de azufre.

La vulnerabilidad representa el grado de sensibilidad (o debilidad) del ecosistema frente a la agresión de los agentes contaminantes. (Factores Influyentes en la Contaminación: s.f.). Para evaluar la vulnerabilidad de los ecosistemas terrestres respecto a la acidez y a la deposición atmosférica de azufre se consideraron dos metodologías empíricas; a partir de las cuales fue posible obtener categorías de sensibilidad preliminares y valores de cargas críticas para los ecosistemas terrestres de la región. Dichas metodologías se refieren a continuación.

Se utilizaron 2 metodologías empíricas la primera es para determinar las cargas críticas con respecto al pH que es la metodología de Skokloster para esta es necesario considerar la mineralogía dominante, así como la clase de tamaño de partícula, la segunda metodología empírica es para la determinación de cargas críticas de azufre utilizada por Johan Kuylenstierna (azufre) y en esta se considera CIC (capacidad de intercambio catiónico) así como él % de saturación de bases.

La sensibilidad a la acidificación del suelo se refiere a la facilidad con la que los suelos pueden ser afectados o influenciados por sustancias ácidas y sustancias formadoras de ácidos Turchenek et al., (1987). Esquemas de clasificación de sensibilidad del suelo han sido desarrollados a los efectos de la agrupación de tipos de suelo y sus áreas geográficas asociadas a clases de sensibilidad para predecir el impacto de entradas de ácido a las propiedades químicas del suelo, tales como el pH y la saturación de cationes básicos del complejo de intercambio catiónico. Efectos sobre otras propiedades del suelo tales como la dinámica de la materia orgánica y nutriente no son considerados en estos sistemas de clasificación de la sensibilidad del suelo porque no existe suficiente información para apoyar el desarrollo de criterios. Inicialmente, la acidificación del suelo puede conducir a una disminución en el pH del suelo, la lixiviación de cationes básicos, y el aumento de solubilidad de cationes ácidos tóxicos tales como aluminio (Al) Turchenek et al., (1987). En los sistemas de clasificación de sensibilidad, los suelos se clasificaron como alta, media o baja ausencia de sensibilidad en función de criterios de selección; estos criterios varían de acuerdo con el enfoque de clasificación de sensibilidad.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Es importante mencionar que el uso de estas metodologías empíricas se debe a que este trabajo de investigación se trata de la primera aproximación de carga crítica en México, y no se tienen antecedentes ni información suficiente como para poder usar algún otro método más avanzado como sería el caso de métodos de balance de masa de capa simple en estado estable o bien, el uso de modelos dinámicos.

12.6.2. Metodología empírica de Skokloster

El método empírico Skokloster (UN/ECE, 1996) inicia con la asignación de un suelo a una sensibilidad en particular y la clase de carga critica basada en los minerales dominantes del suelo (Ver Anexo A.1). Adicionalmente se considera también la textura (Anexo A.2), esto para modificar las clases basadas únicamente en la mineralogía. Y finalmente una vez obtenidos los valores de carga crítica y las clases de sensibilidad de acuerdo a la (Anexo A.3), es posible categorizar los sitios como; muy sensible, sensible, moderadamente sensible y baja sensibilidad.

Para la aplicación de esta categorización fue necesario establecer la mineralogía dominante y la clase de tamaño de partícula para cada uno de los sitios de muestreo.

Esta metodología también se aplicó para evaluar si existían excedencias de los flujos de iones hidronio (H^+) obtenidos a partir de los valores de pH de los sitios muestreados sobre los valores de carga critica obtenidos.

12.7 Elaboración de mapas

De acuerdo a la investigación de Cerón et al., (2017). Los mapas temáticos de suelo solo pueden obtenerse directamente a partir de estas mediciones cuando la red de muestreo presenta una densidad suficiente para resolver las variaciones espaciales y temporales. Este puede ser el caso de las redes que miden compuestos con poca variabilidad espacial o para mediciones de deposición en áreas con terreno simple como es el caso de la Isla del Carmen, Campeche. Los datos provenientes de mediciones puntuales o de redes deben ser interpolados utilizando Kriging, método que posibilita la inclusión de valores de estaciones cercanas para su extrapolación a nivel nacional. En función de las propiedades de los datos y de los resultados esperados, se han aplicado distintas variantes de esta técnica a las redes de monitoreo de deposición atmosférica.

Para la elaboración de los mapas temáticos de suelo en la Isla del Carmen, se empleó un procedimiento geoestadístico basado en Kriging, con el fin de transformar las mediciones de campo en una superficie espacialmente continua. Este método estadístico proporciona estimaciones insesgadas de mínima varianza para variables que presentan autocorrelación espacial

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

en la región de estudio. El proceso inició con el análisis de la estadística descriptiva de los datos primarios valores medios, máximos, mínimos y distribución de frecuencias con el propósito de evaluar la necesidad de una transformación previa, dado que la confiabilidad de las estimaciones por Kriging mejora cuando los datos se aproximan a una distribución normal. Posteriormente, la interpolación permitió generar una variable continua mediante el trazado de isolíneas, lo que incrementó la densidad de puntos en la malla de muestreo. La definición de umbrales límite resultó fundamental para delimitar estas líneas imaginarias que representan la continuidad espacial de las variables estudiadas, considerando tanto su comportamiento en función de la distancia como la variabilidad entre puntos de muestreo.

Los valores estimados se obtuvieron mediante una combinación lineal de los puntos originales con datos conocidos. Como resultado, se estimaron áreas más extensas y compactas alrededor de los valores máximos de la variable. Una vez generados los puntos adicionales y las isolíneas, se procedió al mapeo de los principales atributos del suelo con el fin de evaluar su distribución espacial y temporal a lo largo de la isla.

La variabilidad del suelo constituye un factor limitante para predecir con exactitud su comportamiento en cualquier posición del paisaje. Por ello, se recomienda priorizar variables de carácter permanente como las morfológicas y físicas, las cuales son menos cambiantes que las de naturaleza dinámica, como las químicas. (Ovalle, et al., 1999).

Con base en los 8 parámetros obtenidos de la caracterización de las propiedades distintivas de los 13 sitios agrupados, se elaboraron mapas vectoriales utilizando interpolación Kriging a través del software SURFER 9.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

13. Resultados

13. 1 Humedad en suelos de la Isla del Carmen.

Los valores del porcentaje de humedad del suelo registrados durante todo el estudio fluctuaron entre 2.91% y 64.49%, ambos registrados en la época de seca. Durante la época de norte y lluvias los valores máximos registrados fueron de 23.66 y 17.48%, respectivamente.

Tabla 8

Valores promedio del % de humedad de los 13 puntos analizados en la Isla del Carmen

Sitio / Muestreo	Lluvias % de humedad	Nortes % de humedad	Secas % de humedad
1.Puerto real	10.99	8.58	5.21
2.Km. 30.8 Rebombeo	17.48	22.70	21.77
3.Km.21RebombeoSMAPAC	15.86	13.27	23.11
4.Ensenada	6.75	6.86	2.91
5.Km. 18.8 Ra Bahamitas	16.75	14.56	64.49
6.Parque Ecoturístico. Fénix	8.56	8.23	6.66
7.Instituto de Limnología	10.52	12.87	5.62
8.Jardín Botánico UNACAR	11.80	11.87	9.00
9.Playa Norte Av. Ballena	12.13	17.09	24.67
10.La Puntilla C 17, 36 y 36 B	13.68	23.66	13.09
11.Emiliano Zapata C- Fco. Villa	7.64	7.84	7.97
12.Campus Principal UNACAR	11.31	14.83	16.33
13.Santa Margarita C – 49	10.63	17.06	13.57

13.1.1 Mapeo

En cuanto a la distribución espacial por temporadas, tal y como puede observarse en las Figuras 11,12 y 13, el % de humedad fue incrementando conforme progresó la estación lluviosa (11.85%) y de norte (13.80%), alcanzando los niveles de humedad más altos al inicio de la estación secas (16.49%).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

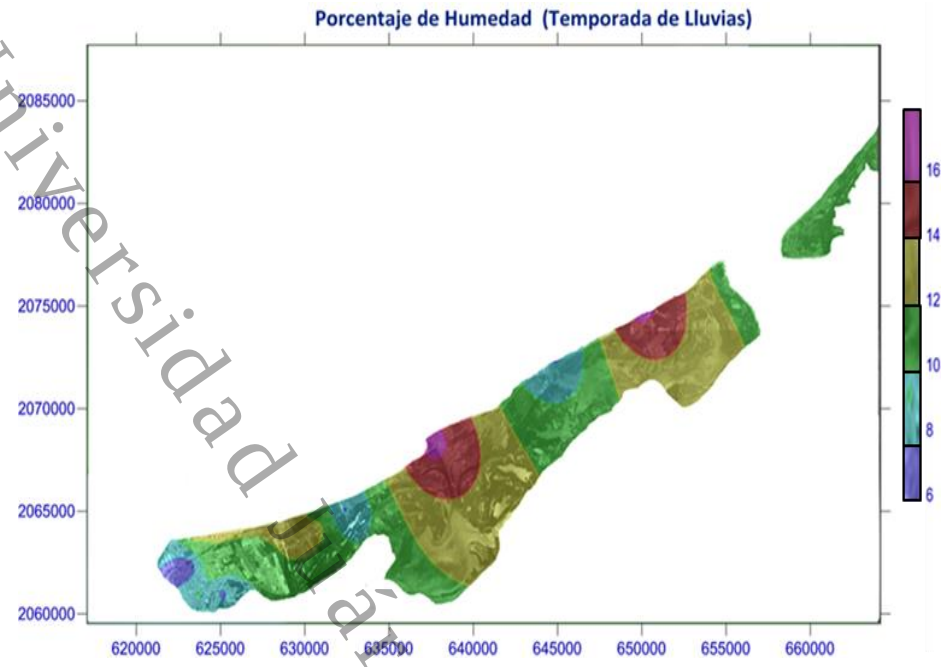


Figura 11. *Distribución espacial del porcentaje de humedad durante la temporada de lluvias.*

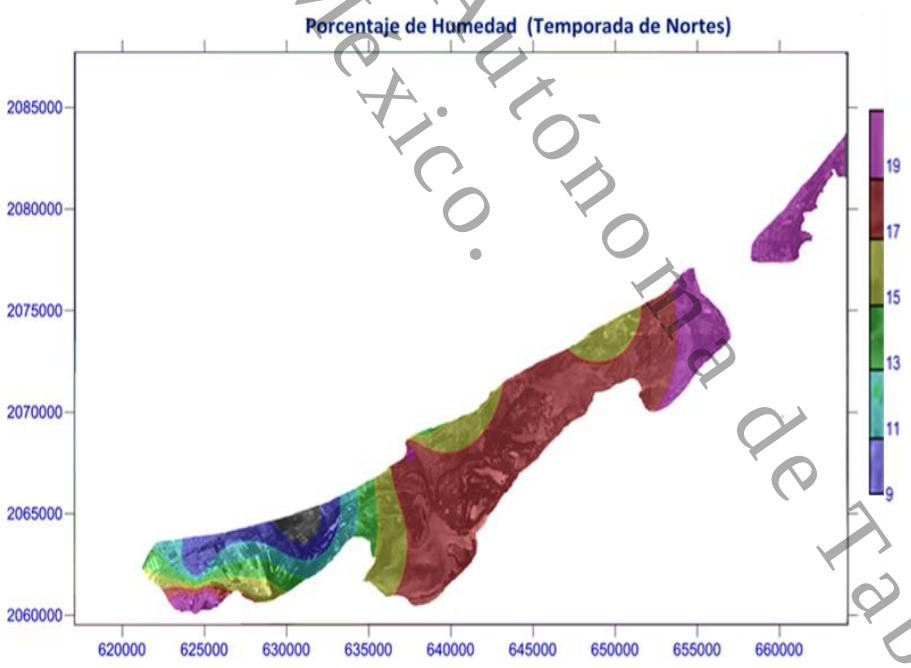


Figura 12. *Distribución espacial del porcentaje de humedad durante la temporada de norte.*

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

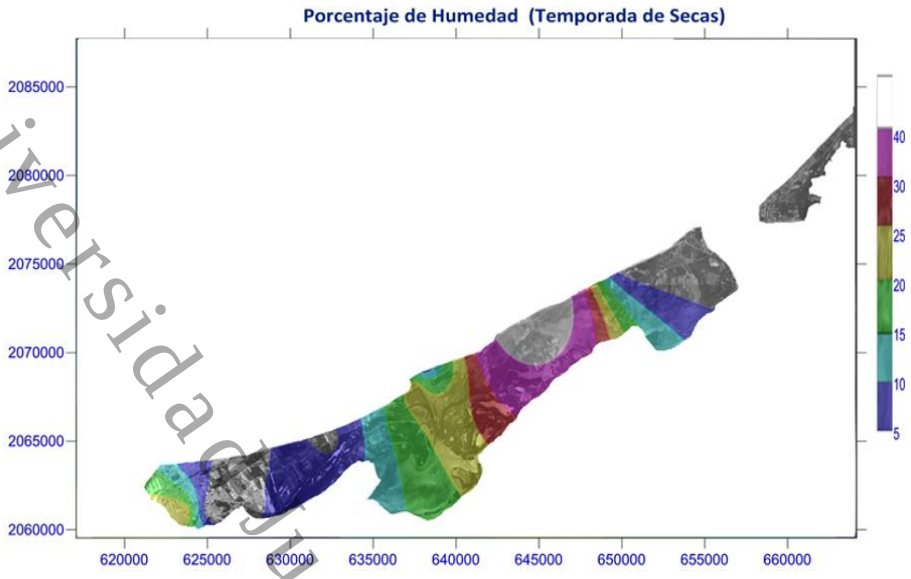


Figura 13. *Distribución espacial del porcentaje de humedad durante la temporada de secas.*

13.1.2 Grafica por temporada, sitio y uso de suelo

Como puede observarse a partir de la Figura 14, el % de humedad varió ligeramente entre temporadas, siendo los valores promedio más altos en la época de secas (16.49%). En lo que se refiere a su variación espacial, puede observarse a partir de la Figura 15, que él % de humedad fue más alto en los puntos de muestreo 2(20.65%), 3(17.41),9(17.96%) y 10(16.81%), correspondientes a las estaciones de muestreo de Rebombeo km 30.8 y km 21, Playa Norte y Puntilla; observándose valores extremos de humedad en el punto No. 5 (31.93%) que se encuentra ubicado en Bahamita. La influencia de mareas fue evidente en estos sitios en el momento de la colección de las muestras.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

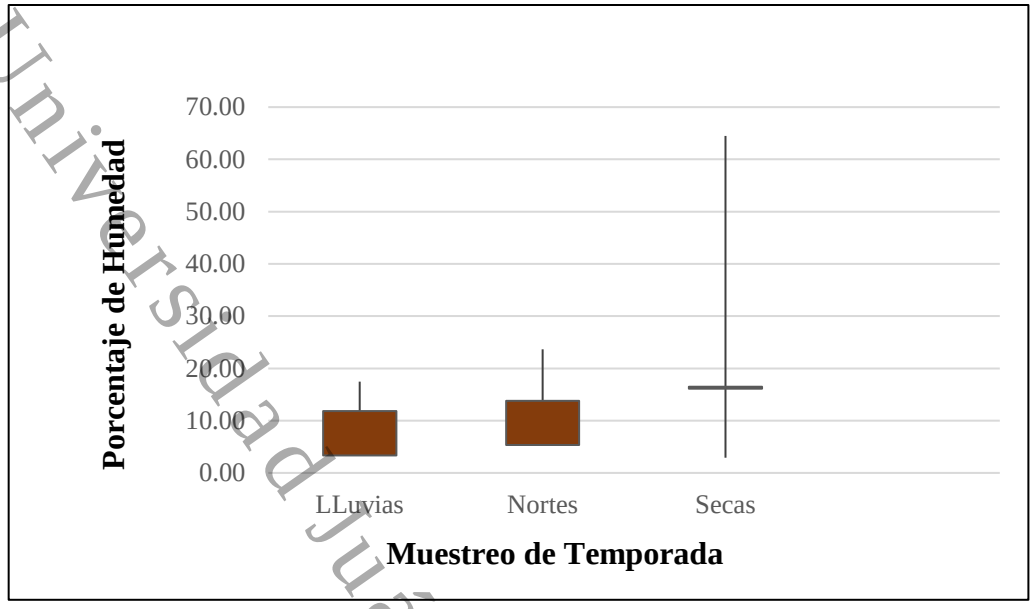


Figura 14. *Variación del porcentaje de humedad por temporada.*

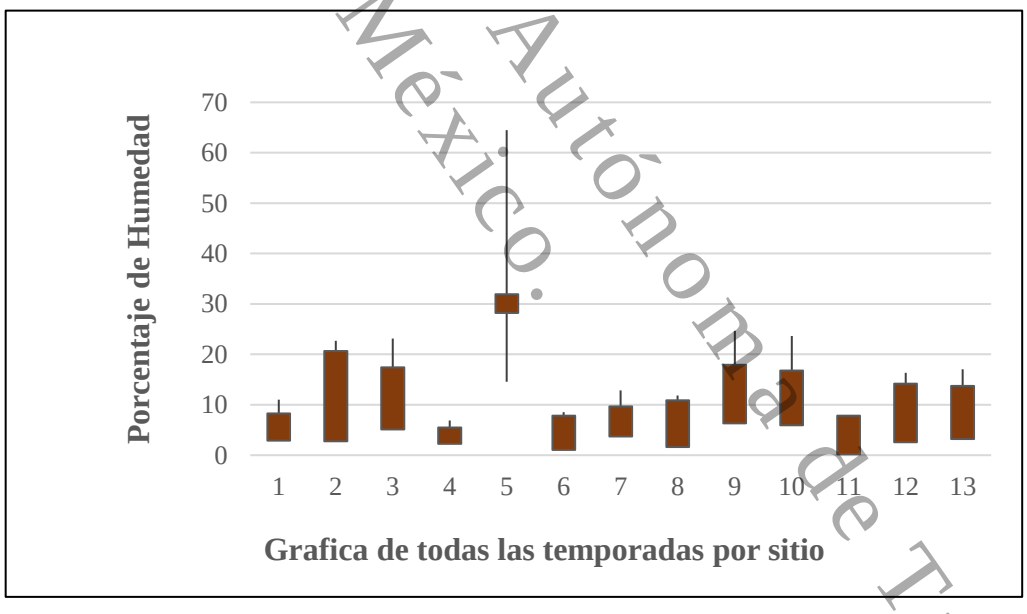


Figura 15. *Variación del porcentaje de humedad por sitio.*

Los sitios de muestreo fueron agrupados en tres zonas, considerando el uso de suelo a lo largo de la isla. Las zonas identificadas fueron las siguientes: Zona Industrial (puntos de muestreo 1, 2, 3 y 4) localizados en el extremo Este de la isla, Zona con mayor cobertura de manglar (puntos

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

de muestreo 5, 6, 7 y 8) localizados en la parte media de Isla del Carmen, locales y Zona Urbana (puntos de muestreo 9, 10, 11, 12 y 13) localizados en el extremo Oeste de la isla.

Como puede observarse en la Figura. 16 el (15.08%) de humedad fue ligeramente mayor en la zona de manglar, este hecho está relacionado al uso de suelo, ya que son zonas predominantemente inundables y sujetas a la influencia de mareas.

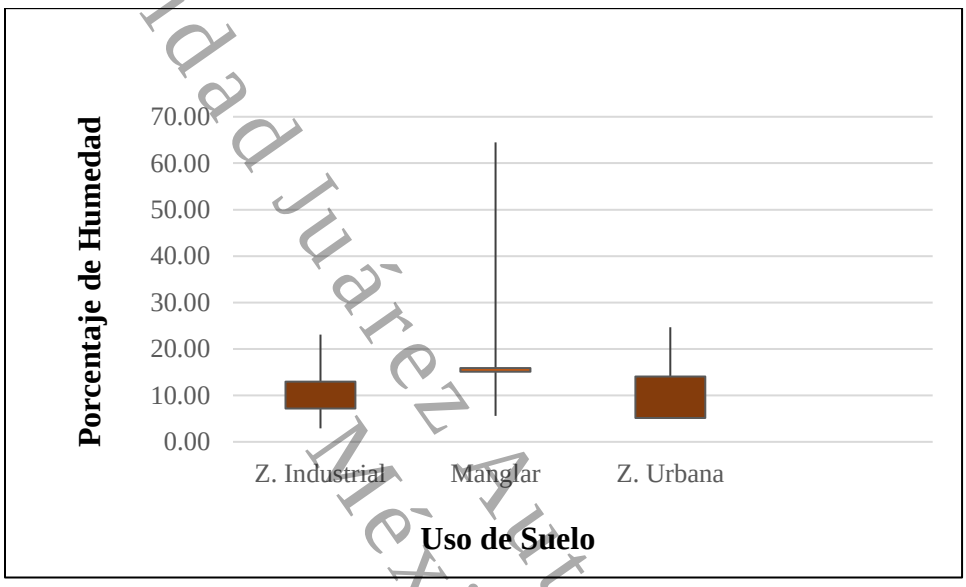


Figura 16. *Variación del porcentaje de humedad por uso de suelo*

13.2 Potencial de hidrogeno (pH) en suelos de la Isla del Carmen

Los valores de pH del suelo durante todo el estudio fluctuaron entre 7.21 y 8.51, estos valores de pH corresponden a suelos neutros y medianamente alcalinos.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Tabla 9

Valores promedio de pH de los 13 puntos analizados en la Isla del Carmen

Sitio/Muestreo	LLuvias	Nortes	Secas
1.Puerto real	8.09	8.23	7.84
2. Km.30.8 Rebombeo SMA	8.01	7.86	7.85
3.Km. 21 Rebombeo SMA	7.99	7.91	7.86
4.Ensenada	8.16	7.83	8.17
5.Km. 18.8 Ra Bahamitas	8.08	7.98	7.80
6.Parque Ecoturístico.	7.76	7.74	7.68
7.Instituto de Limnología	8.27	7.21	8.12
8.Jardín Botánico UNACAR	8.27	7.69	7.74
9.Playa Norte Av. Ballena	8.07	8.17	8.51
10.La Puntilla C 17 36 y 36 B	8.38	7.75	8.33
11.Emiliano Zapata C- Fco.	8.26	7.73	8.17
12.Campus Principal.	8.08	7.57	8.33
13.Santa Margarita C. 49	8.02	7.54	8.00

13.2.1 Mapeo

Los valores de pH encontrados estuvieron entre 6.32 y 8.37, con un valor promedio de 7.90, lo cual demuestra que los suelos en la Isla son predominantemente alcalinos debido a su naturaleza sedimentaria. Como puede observarse a partir de los resultados de interpolación de Kriging en las Figuras 17,18,19 los valores de pH (8.11) fueron ligeramente más altos en la época de lluvias, disminuyendo progresivamente conforme los niveles de humedad del suelo fueron incrementando, como resultado del efecto de dilución.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

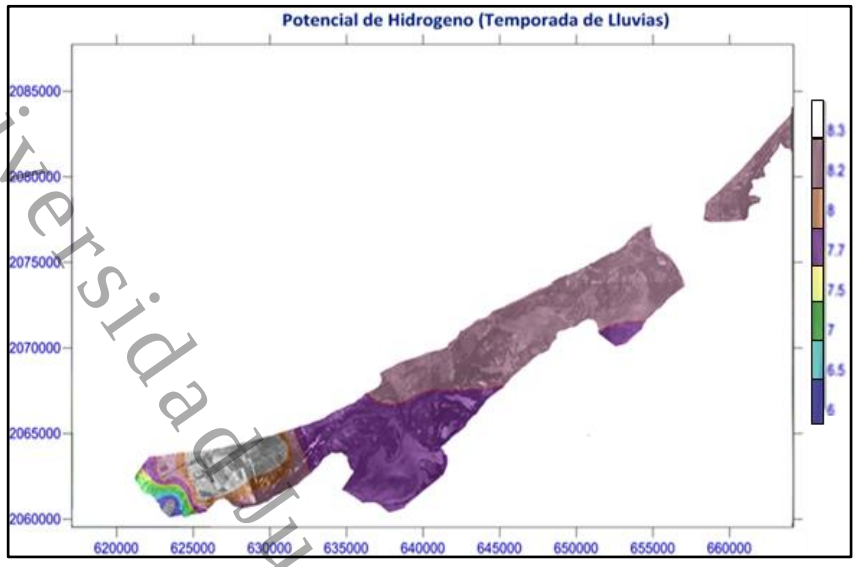


Figura 17.*Distribución espacial del porcentaje de potencial de hidrogeno durante la temporada de lluvias.*

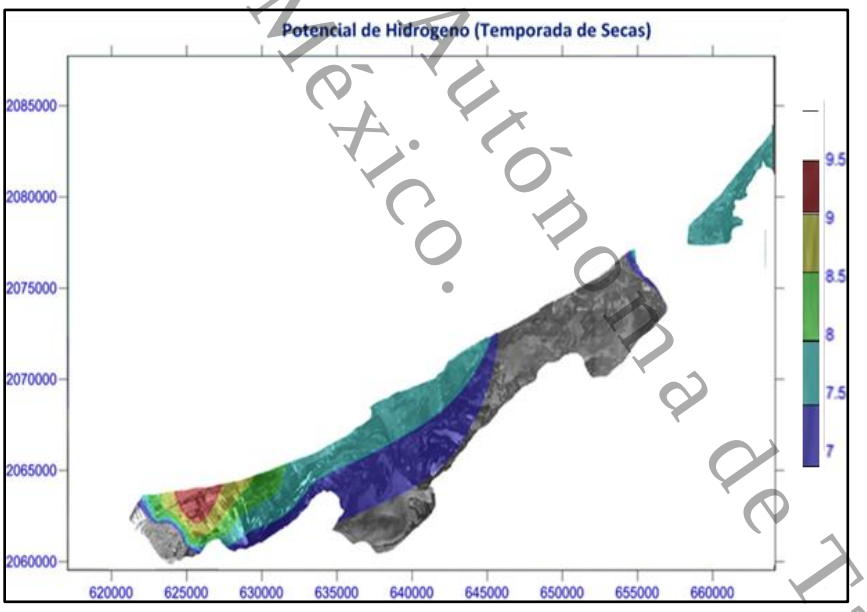


Figura 18.*Distribución espacial del porcentaje de potencial de hidrogeno durante la temporada de norte.*

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

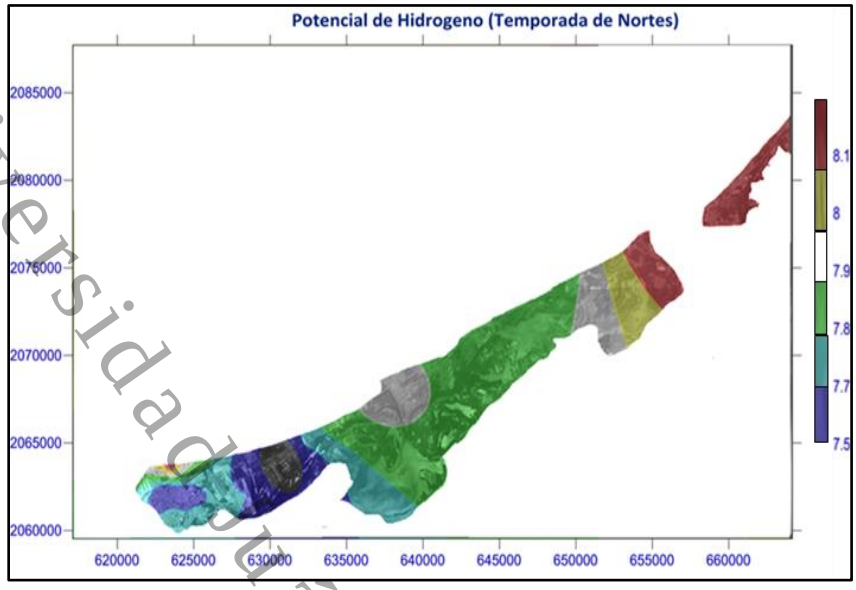


Figura 19.*Distribución espacial del porcentaje de potencial de hidrogeno durante la temporada de secas.*

13.2.2 Grafica por temporada, sitio y uso de suelo

A partir de la Figura 20, se observa que no hubo una variación significativa en los niveles de pH del suelo entre temporadas

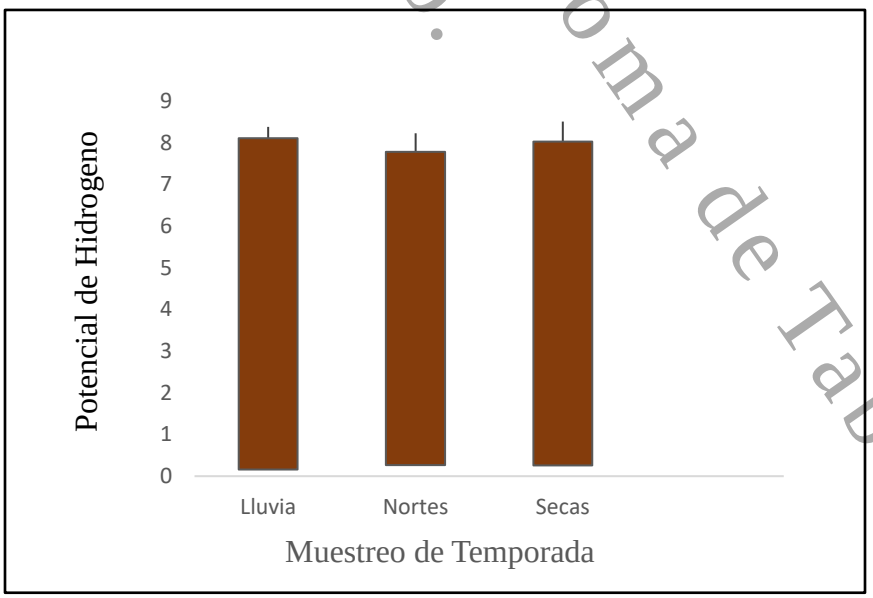


Figura 20. *Variación del porcentaje de potencial de hidrogeno por temporal*

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

De acuerdo a la Figura 21, se puede observar que tampoco hubo una variación significativa en los valores de pH por estación de muestreo, conservándose valores uniformes tanto a escala espacial como temporal.

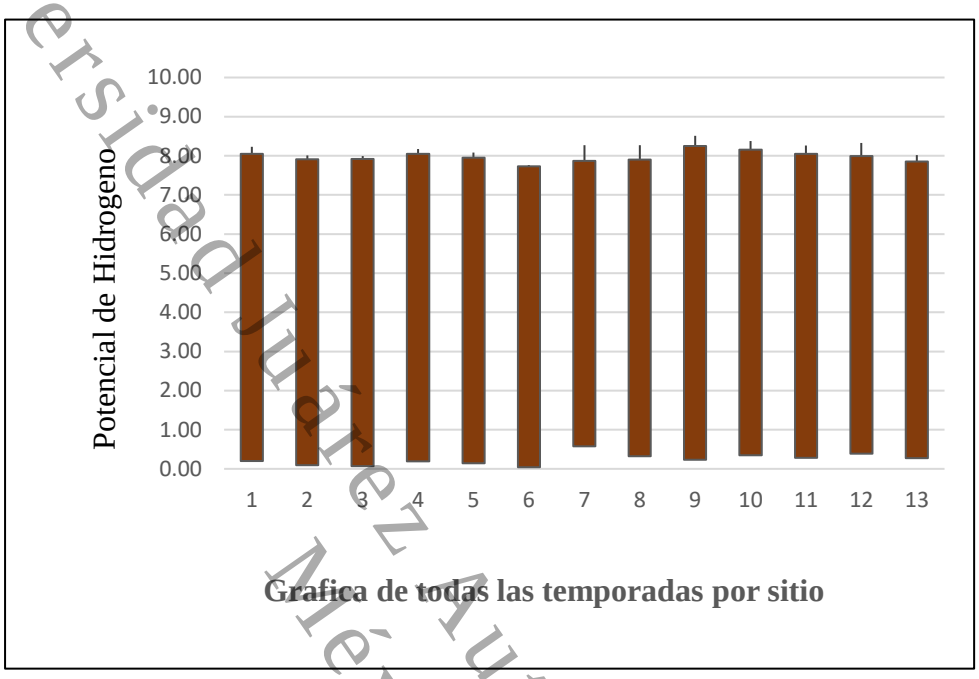


Figura 21. *Variación del porcentaje de potencial de hidrogeno por sitio.*

En cuanto al tipo de uso de suelo Figura 22, éste tampoco mostró variaciones, por lo que puede afirmarse que los niveles de pH en los suelos de la Isla se mantienen estables independientemente del sitio y fecha de muestreo, como resultado de la capacidad buffer del sitio atribuida principalmente a su naturaleza carbonatada.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

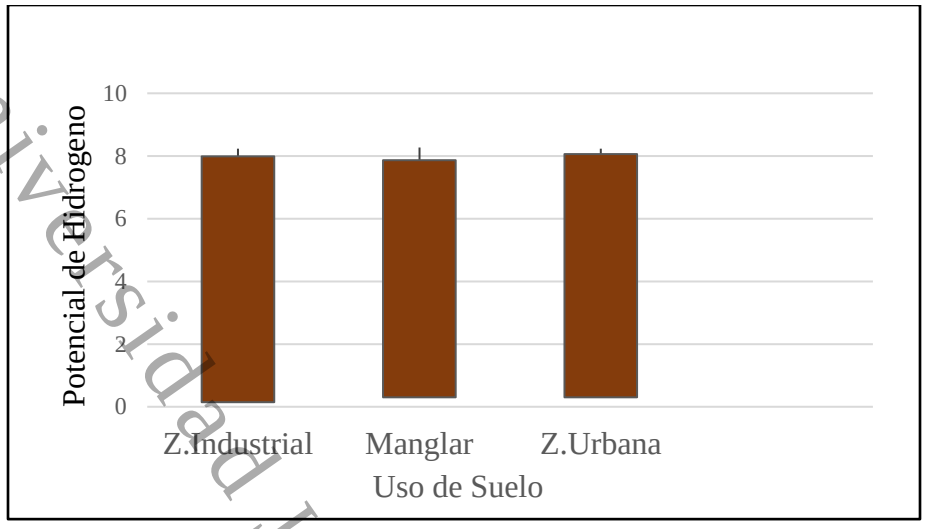


Figura 22.*Variación del porcentaje de potencial de hidrogeno por uso de suelo.*

13.3 Conductividad Eléctrica en suelos de la Isla del Carmen

Los valores de la conductividad eléctrica registrados durante todo el estudio fluctuaron entre 69.60 µS/cm y 4507 µS/cm, ambos registrados en la época seca. Durante la época de nortes y lluvias los valores máximos registrados fueron de 3348.02 µS/cm y 970.19 µS/cm, respectivamente.

Tabla 10

Resultados de la Conductividad Eléctrica (µS/cm) de los 13 puntos analizados

Sitio/Muestreo	Lluvias µS/cm	Nortes µS/cm	Secas µS/cm
1.Puerto real	202.66	704.30	246.80
2.Km. 30.8 Rebombeo SMA	970.19	270.59	258.59
3.Km. 21 Rebombeo SMA	525.63	422.13	206.50
4.Ensenada	176.13	289.37	95.40
5.Km. 18.8 Ra Bahamitas	810.18	334.80	4507
6.Parque Ecoturístico.	215.08	166.25	171.15
7.Instituto de Limnología	277.18	192.07	145.55
8.Jardín Botánico UNACAR	154.42	143.34	243.75
9.Playa Norte Av. Ballena	389.93	337.67	387.95
10.La Puntilla C 17, 36 y 36 B	219.57	238.77	69.60
11.Emiliano Zapata C- Fco.	129.26	302.89	131.73
12.Campus Principal	145.07	202.20	190.45
13.Santa Margarita C. 49	183.62	168.31	128.35

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

13.3.1 Mapeo

La conductividad eléctrica varió entre 101.98µS/cm y 5540.77µS/cm, con un valor medio de 430.77µS/cm. A partir de las Figuras 23,24,25 se puede observar que la conductividad eléctrica guardó una estrecha relación con los niveles de humedad que van incrementando conforme progresa la estación lluviosa y de norte, y que alcanzan sus máximos niveles de humedad justo al término de estas dos temporadas, disminuyendo progresivamente en la estación seca. En cuanto a la distribución espacial, puede observarse que los niveles más altos de conductividad eléctrica se tienen en la parte media de la Isla (zona predominantemente de manglar) y en el extremo Este (zonas inundables), mientras que los valores más bajos se tienen en el extremo Oeste de la Isla que corresponde a la zona urbana.

.

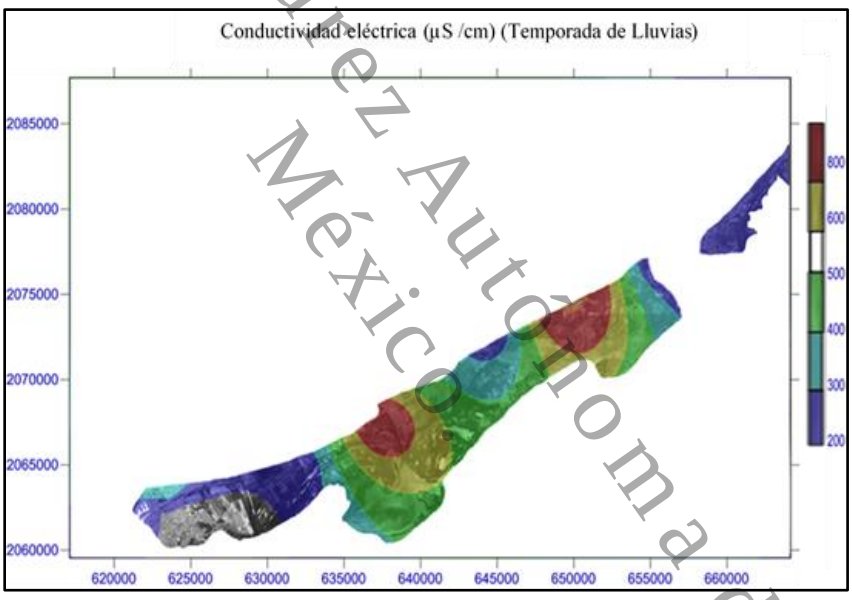


Figura 23. *Distribución espacial del porcentaje de conductividad eléctrica durante la temporada de lluvias*

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

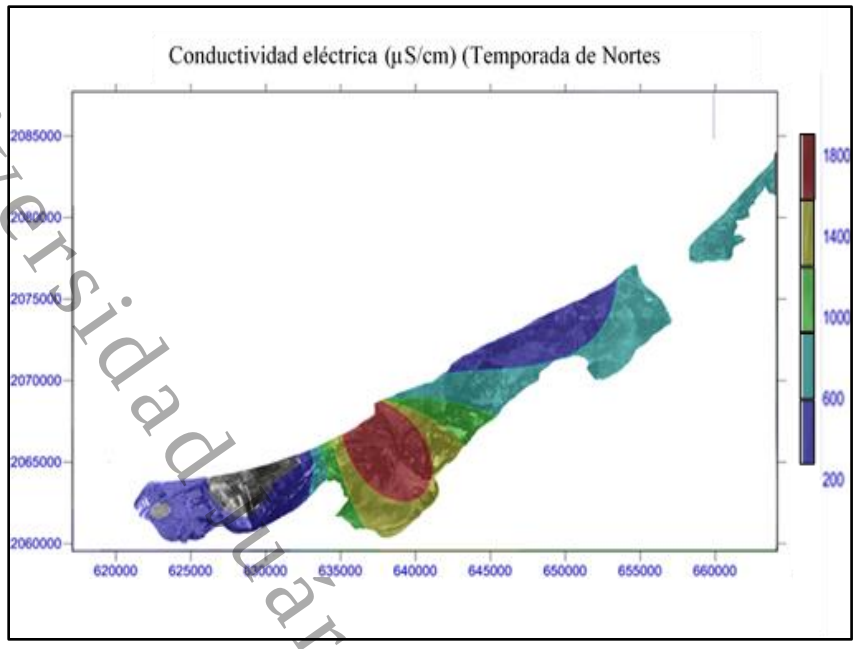


Figura 24. *Distribución espacial del porcentaje de conductividad eléctrica durante la temporada de norte.*

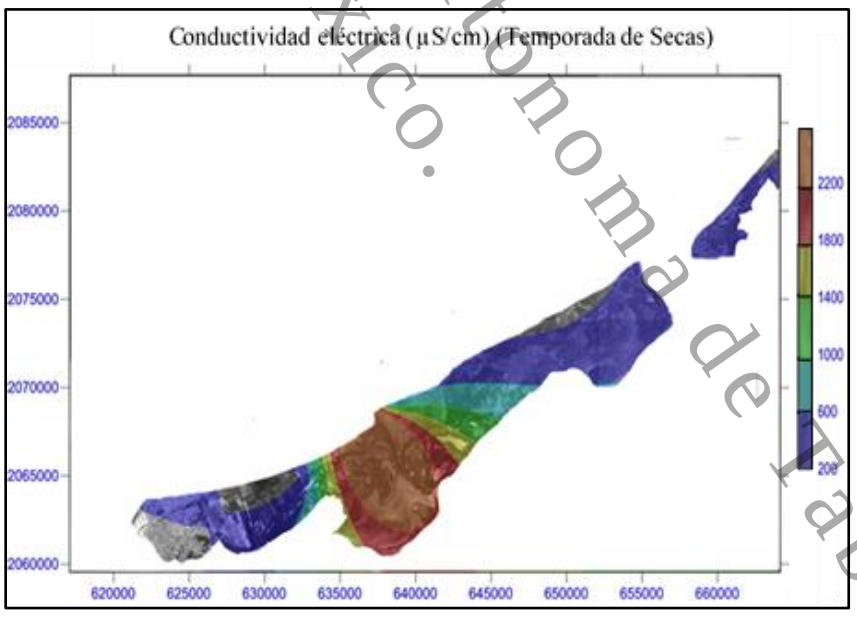


Figura 25. *Distribución espacial del porcentaje de conductividad eléctrica durante la temporada de secas.*

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

13.3.2 Grafica por temporada, sitio y uso de suelo

A partir de la Figura 26, se observa que los valores ligeramente más altos de conductividad eléctrica se obtuvieron en la época de nortes (521.99µS/cm), encontrándose un marcado patrón estacional en este parámetro. En cuanto a la variación espacial por sitio de muestreo, a partir de la Figura 25, se puede observar que el patrón obtenido fue el mismo que para él porcentaje de humedad, encontrándose valores más altos de conductividad eléctrica en las estaciones de muestreo 1,2, 3 ,5 y 9, con valores extremos en el sitio 5. Estas estaciones de muestreo se encuentran ubicadas en Puerto real, Rebombeo km 30.8, Rebombeo km 21, Bahamitas, y Playa norte respectivamente. Adicionalmente, se puede observar que conforme las zonas se van volviendo más urbanas, la conductividad eléctrica disminuye drásticamente, lo cual demuestra que el grado de perturbación afecta la salinidad y, por lo tanto, el contenido de nutrientes en los suelos.

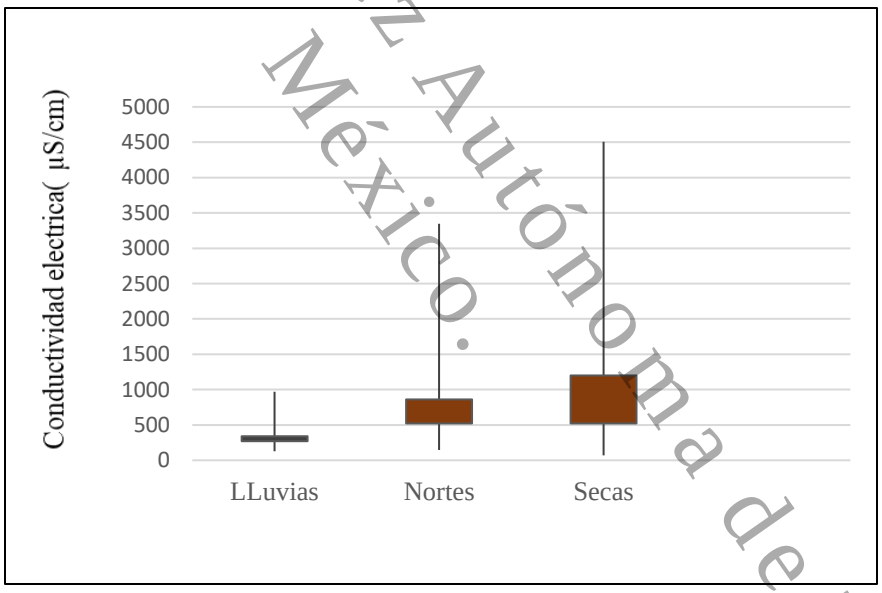


Figura 26. *Variación del porcentaje de conductividad eléctrica por temporada.*

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

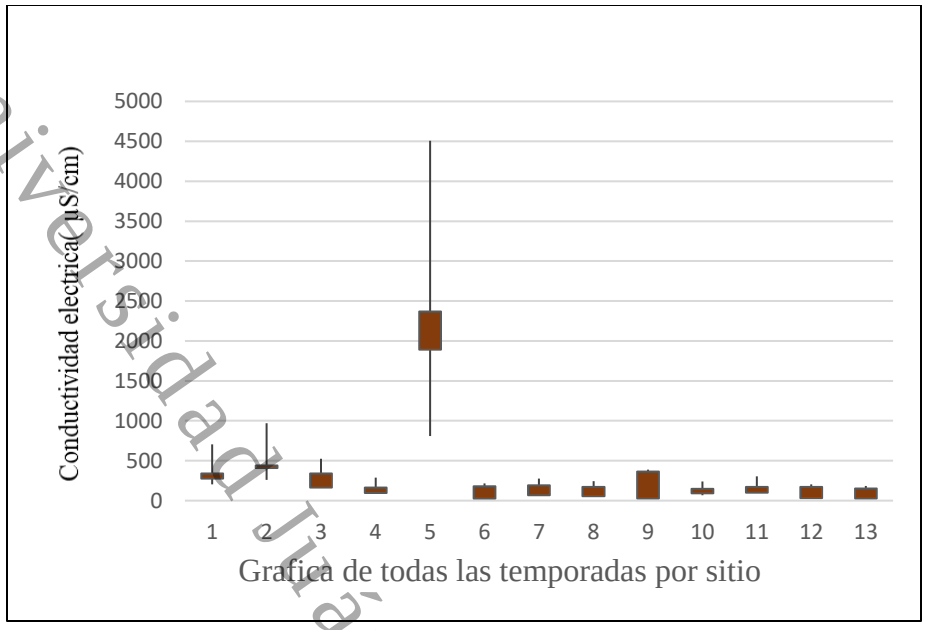


Figura 27. *Variación del porcentaje de conductividad eléctrica por sitio.*

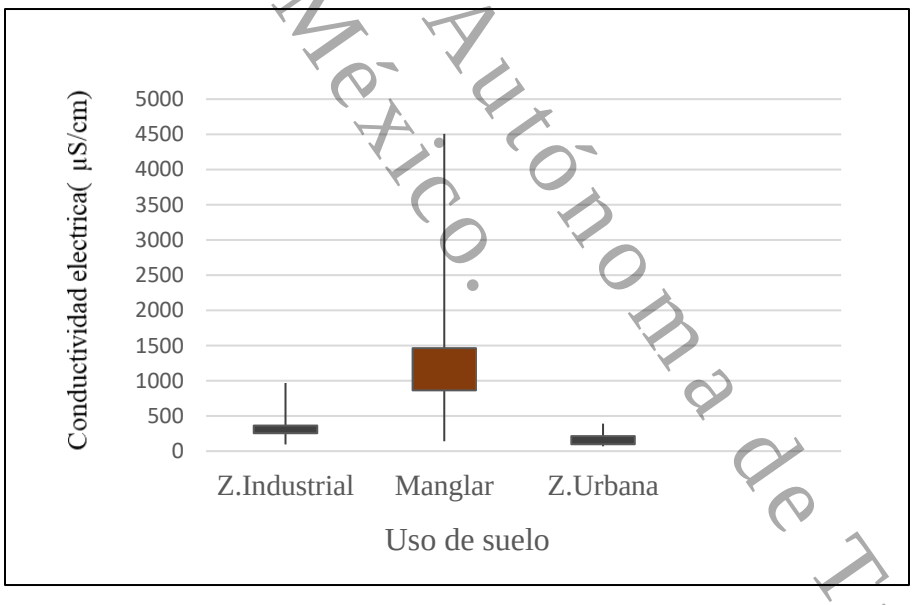


Figura 28. *Variación del porcentaje de conductividad eléctrica por uso de suelo.*

En lo que se refiere al tipo de uso de suelo, a pesar que se encontraron los valores más altos de conductividad eléctrica en el tipo denominado como zona de manglar (864.50 µS/cm), Figura 28, este fenómeno estuvo más relacionado al hecho de que todas las estaciones de muestreo que

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

corresponden a esta categoría se encuentran ubicadas en zonas altamente inundables que permanecen además inundadas casi todo el tiempo, independientemente de la estación climática, y que además se encuentran sujetas a la influencia de mareas.

13.4 La densidad aparente en suelos de la Isla del Carmen

Los valores de densidad aparente del suelo durante todo el estudio fluctuaron entre 1.17(g cm $^{-3}$) y 2.25(g cm^{-3}), ambos registrados en la época de secas. Durante la época de lluvias y norte los valores máximos registrados fueron de 1.59 y 1.60(g cm^{-3}) respectivamente.

Tabla 11.

Resultados de la densidad aparente (g cm^{-3}) de los 13 puntos analizados en la Isla del Carmen

Sitio/Muestreo	LLuvias g cm^{-3}	Nortes g cm^{-3}	Secas g cm^{-3}
1.Puerto real	1.56	1.60	1.70
2.Km. 30.8 Rebombeo SMA	1.24	1.27	2.25
3.Km. 21 Rebombeo SMA	1.31	1.37	1.37
4.Ensenada	1.49	1.35	1.79
5.Km. 18.8 Ra Bahamitas	1.50	1.49	1.17
6.Parque Ecoturístico. FENIX	1.41	1.39	1.47
7.Instituto de Limnología.	1.59	1.54	1.70
8.Jardín Botánico UNACAR	1.38	1.37	1.50
9.Playa Norte Av. Ballena	1.42	1.43	1.52
10.La Puntilla C 17, 36 y 36 B	1.42	1.47	1.42
11.Emiliano Zapata C- Fco.	1.55	1.53	1.67
12.Campus Principal	1.43	1.40	1.34
13.Santa Margarita C. 49	1.54	1.53	1.50

13.4.1 Mapeo

La densidad aparente varió entre 1.20 g cm^{-3} y 1.76 g cm^{-3}, con un valor medio de 1.46 g cm^{-3}.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

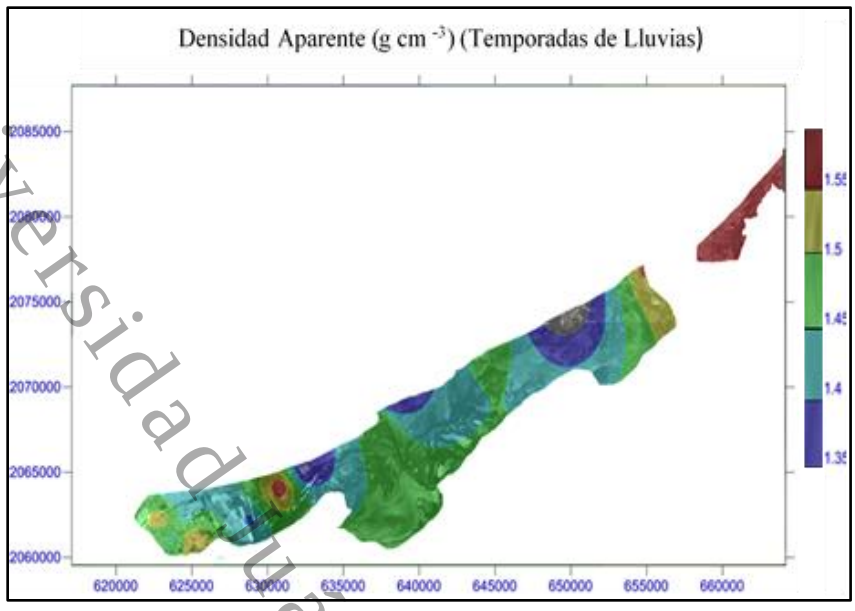


Figura 29. *Distribución espacial del porcentaje de densidad aparente durante la temporada de lluvias.*

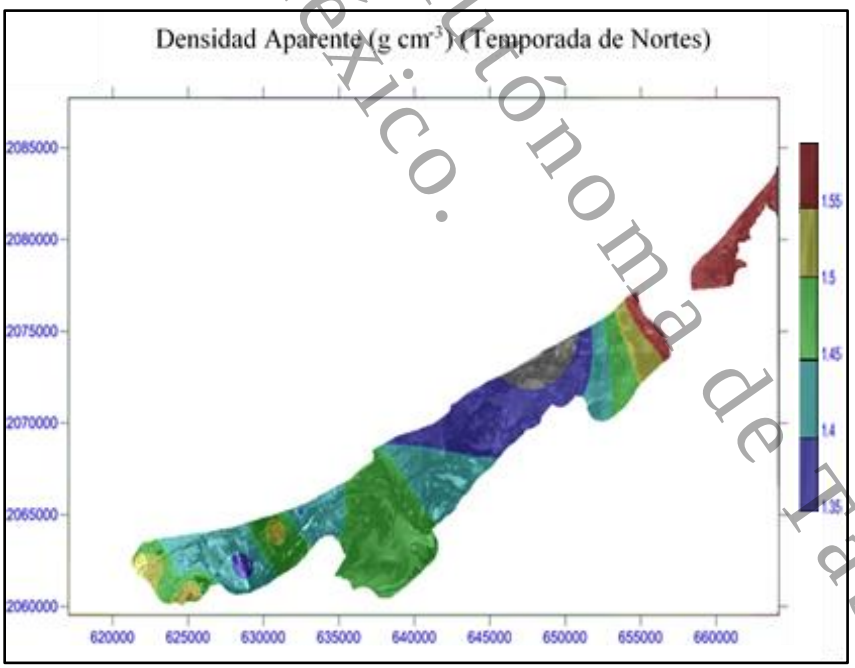


Figura 30. *Distribución espacial del porcentaje de densidad aparente durante la temporada de norte.*

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

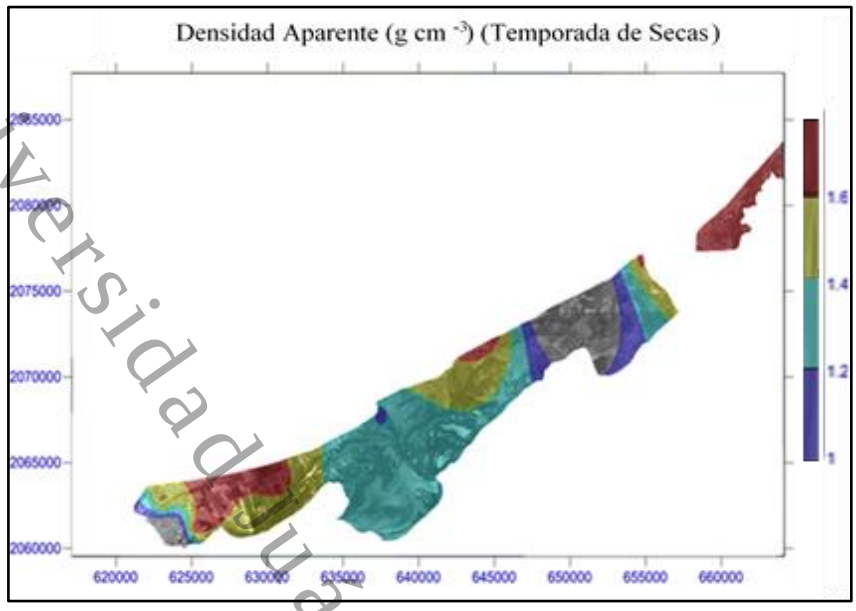


Figura 31. *Distribución espacial del porcentaje de densidad aparente durante la temporada de secas.*

Se puede observar a partir de las interpolaciones de Kriging obtenidas en las Figuras 29,30 y 31, que la densidad aparente no mostró un patrón estacional evidente, a excepción de ser ligeramente más elevado durante la época de secas (1.57 g cm^{-3}).

En cuanto a su distribución espacial, tampoco se encontró una tendencia o patrón que indicara que este parámetro fuera diferente en alguno de los sitios de muestreo considerados.

13.4.2 Grafica por temporada, sitio y uso de suelo

A partir de la Figura 32, puede observarse que los niveles promedio de la densidad aparente fueron ligeramente más altos durante la época de secas (1.57 g cm^{-3}), sin embargo, esta diferencia no fue significativa.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

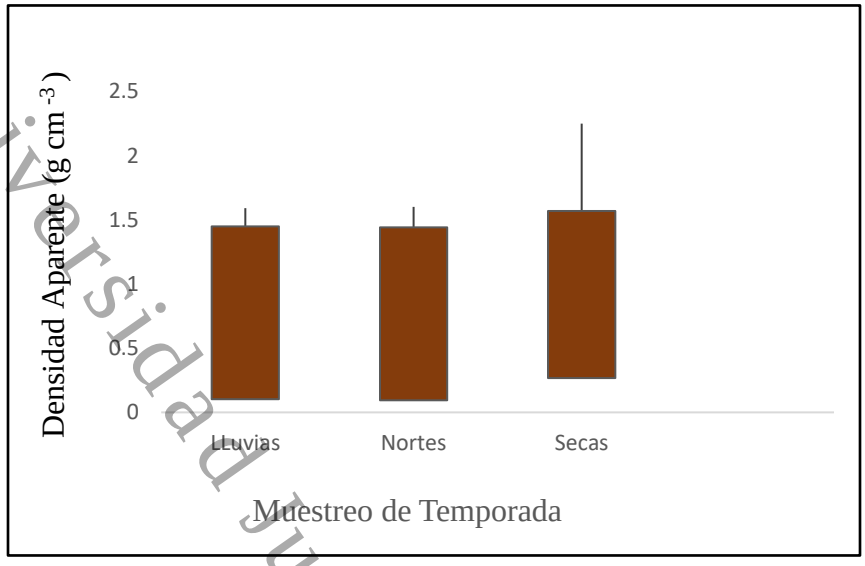


Figura 32. *Variación del porcentaje de densidad aparente por temporada.*

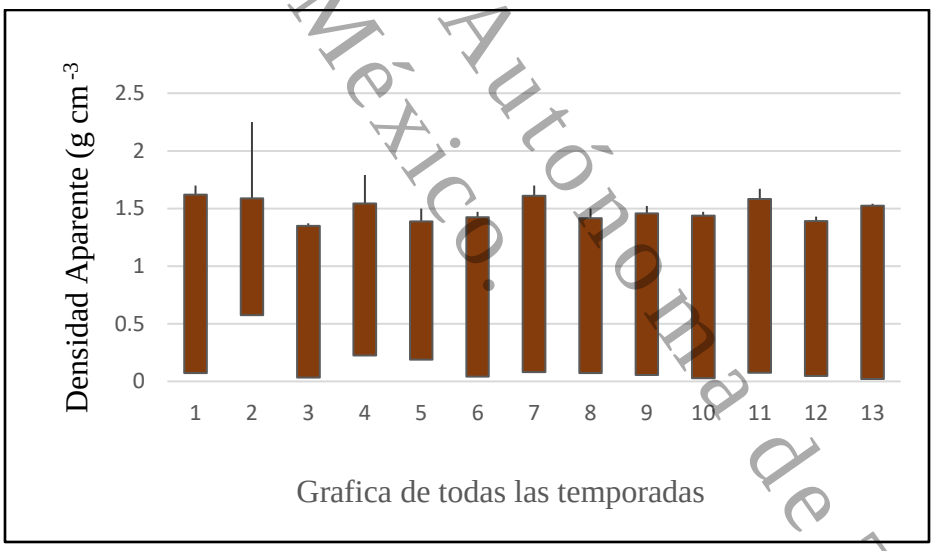


Figura 33. *Variación del porcentaje de densidad aparente (g cm^{-3}) por sitio.*

En cuanto a la variabilidad entre sitios, a partir de la Figura 33, se puede observar que se tuvieron valores ligeramente más elevados en los sitios de muestreo 1(1.62g cm^{-3}), 2(1.59g cm^{-3}), 4(1.54 g cm^{-3}, y 7(1.61 g cm^{-3}), que corresponden a zonas inundables y bajo la influencia de mareas.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco México.

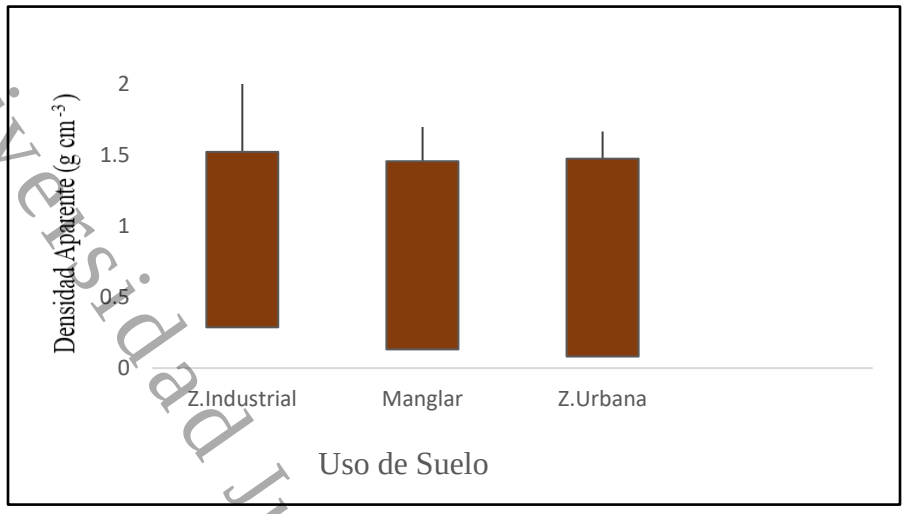


Figura 34. *Variación del porcentaje de densidad aparente por uso de suelo.*

Como puede observarse en la Figura 34, el uso de suelo no tuvo influencia alguna en la variabilidad de este parámetro.

13.5 La textura de los suelos de la Isla del Carmen

Tal y como puede observarse en la Tabla 12, independientemente de la ubicación de los 13 sitios de muestreo, la clase textural predominante de los suelos en la Isla es Arenoso/Franco Arenoso, lo cual está de acuerdo con su origen sedimentario y su naturaleza carbonatada.

Tabla 12.

Tipo de textura en los 13 sitios muestreados por temporadas.

Sitio/Muestreo	Lluvias	Nortes	Secas
1.Puerto real	Arena	Arena	Arena
2.Km. 30.8 Rebombeo SMAPAC	Arena Franca	Arena Franca	Arena
3.Km. 21 Rebombeo SMAPAC	Arena Franca	Arena Franca	Arena Franca
4.Ensenada	Arena	Arena Franca	Arena Franca
5.Km. 18.8 Ra Bahamitas	Arena	Arena	Arena/Arena Franca
6.Parque Ecoturístico. El Fénix	Areno Franca	Areno Franca	Areno Franca
7.Instituto de Limnología UNAM	Arena	Arena	Arena
8.Jardín Botánico UNACAR	Arena	Arena Franca	Arena Franca
9.Playa Norte Av. Ballena	Arena	Arena	Arena
10. Puntilla C 17 entre 36 y 36 B	Arena Franca	Arena Franca	Arena/Arena Franca
11.Emiliano Zapata C- Fco. Villa	Arena	Arena	Arena
12.Campus Principal UNACAR	Arena	Arena	Arena
13.Santa Margarita C 49	Arena	Arena	Arena

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

13.6 Carbono Orgánico en los suelos de la Isla del Carmen

Los valores del carbón orgánico del suelo registrados durante todo el estudio fluctuaron entre 0.26% y 1.72%. Durante la época de norte y lluvias los valores máximos registrados fueron de 1.72 % y 1.40 %.

Tabla 13.

Resultados de compuestos orgánicos de los 13 puntos analizados en la Isla del Carmen.

Sitio/Muestreo	LLuvias %	Nortes %	Secas %
1.Puerto real	0.98	0.83	0.42
2.Km. 30.8 Rebombeo SMAPAC	1.39	0.62	0.63
3.Km. 21 Rebombeo SMAPAC	1.50	0.81	1.07
4.Ensenada	0.76	1.32	0.69
5.Km. 18.8 Ra Bahamitas	0.80	0.87	0.78
6.Parque Ecoturístico. El Fénix	1.72	1.25	0.96
7.Instituto de Limnología UNAM	0.49	0.45	0.44
8.Jardín Botánico UNACAR	0.67	0.77	0.51
9.Playa Norte Av. Ballena	1.00	0.82	0.89
10.La Puntilla C.17 entre 36 y 36	0.89	0.91	0.91
11.Emiliano Zapata C- Fco. Villa	0.66	0.50	0.26
12.Campus Principal UNACAR	1.04	1.40	0.61
13.Santa Margarita C 49	0.32	0.37	0.37

13.6.1 Mapeo

Como puede observarse a partir de las interpolaciones de Kriging realizadas en las Figuras 35, 36 y 37; el % de carbono orgánico fue más alto en la temporada de lluvias, disminuyendo progresivamente en la temporada de nortes y de secas, respectivamente.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

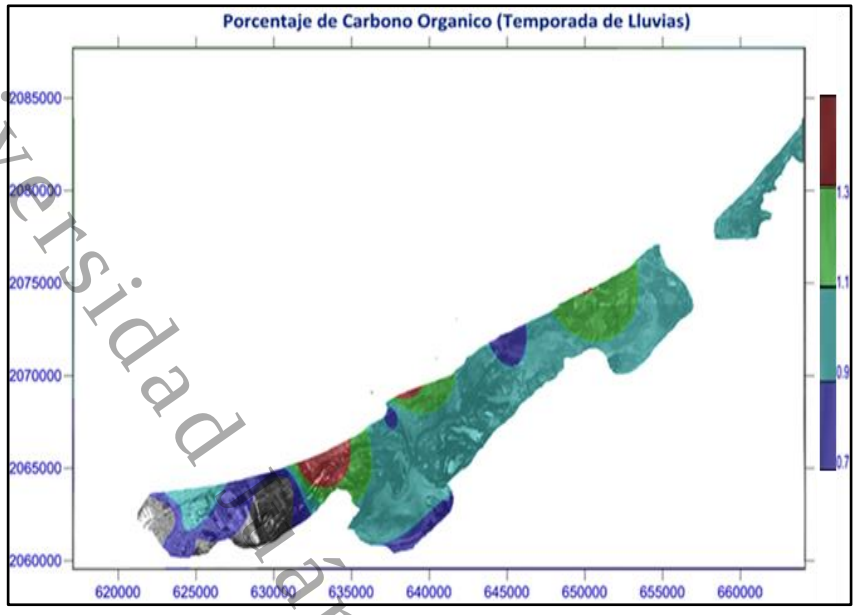


Figura 35. *Distribución espacial del porcentaje de carbono orgánico durante la temporada de lluvia.*

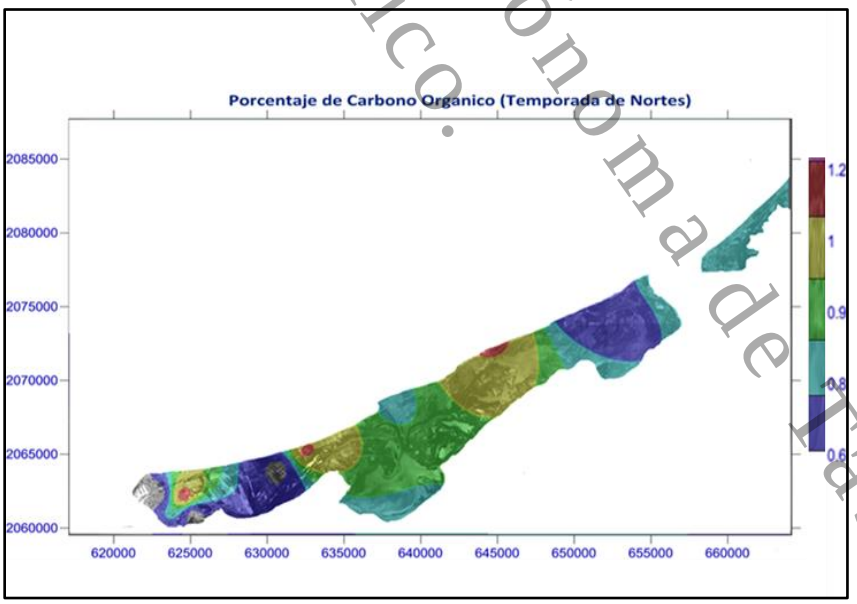


Figura 36. *Distribución espacial del porcentaje de carbono orgánico durante la temporada de nortes.*

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

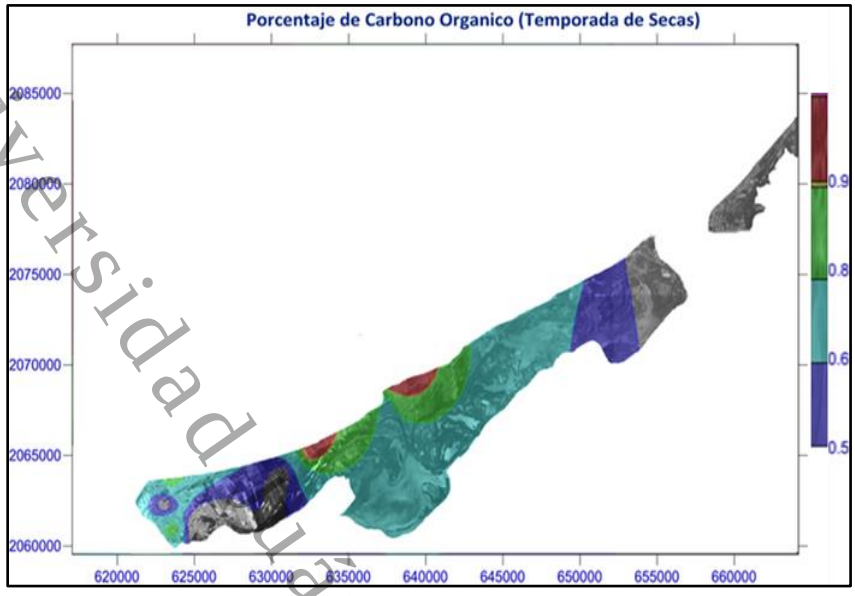


Figura 37. *Distribución espacial del porcentaje de carbono orgánico durante la temporada de secas.*

El % de carbono orgánico varió entre 1.20 % y 1.76%, con un valor promedio de 1.46%. En cuanto a la distribución espacial, los niveles de % de carbono orgánico fueron más elevados en la porción central y extremo Este de la isla, donde predominan las zonas inundables y los bosques de manglar.

13.6.2 Grafica por temporada, sitio y uso de suelo

A partir de la Figura 38, puede observarse que él % de carbono orgánico mostró un evidente patrón estacional, con los valores más altos en la época de lluvias (0.94%), y valores más bajo en la temporada de secas (0.66%). En la Figura 39, puede observarse que los porcentajes de carbono orgánico fueron más elevados en los sitios 2 (0.88%) 3 (1.13%) y 6 (1.31%), que corresponden a zonas de manglar que permanecen inundadas la mayor parte del tiempo.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

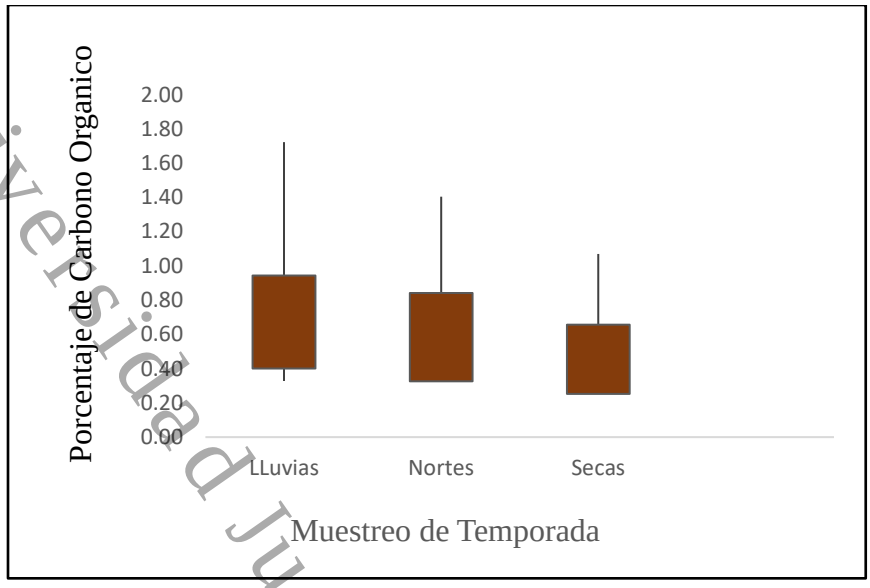


Figura 38. *Variación del porcentaje de carbono orgánico por temporada*

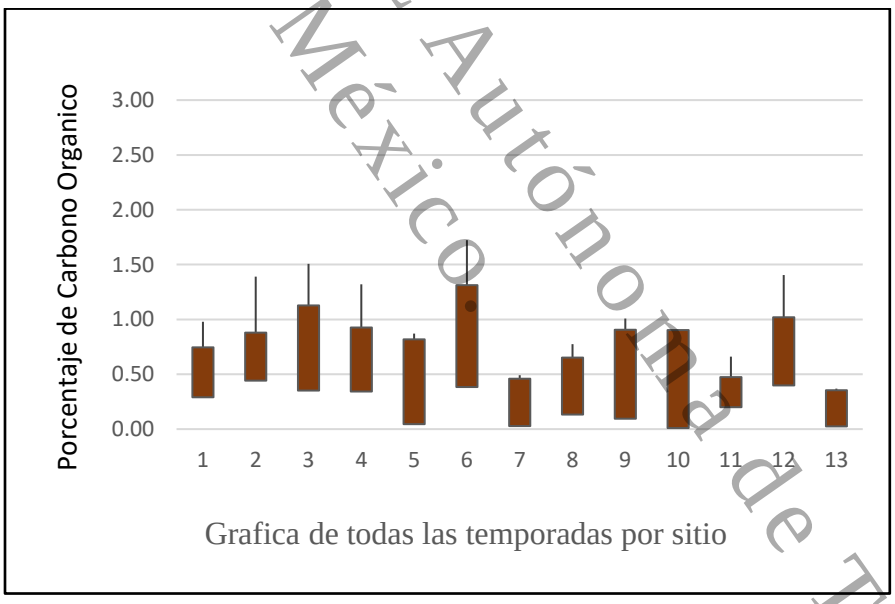


Figura 39. *Variación del porcentaje de carbono orgánico por sitio.*

En cuanto al tipo de uso de suelo, de acuerdo a la Figura 38, puede observarse que los porcentajes de carbono orgánico fueron más elevados en la zona de manglar (0.81%) y en la zona denominada industrial (0.92 %), esta última asentada en suelos inundados la mayor parte del tiempo ubicados en el extremo Este de la isla.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

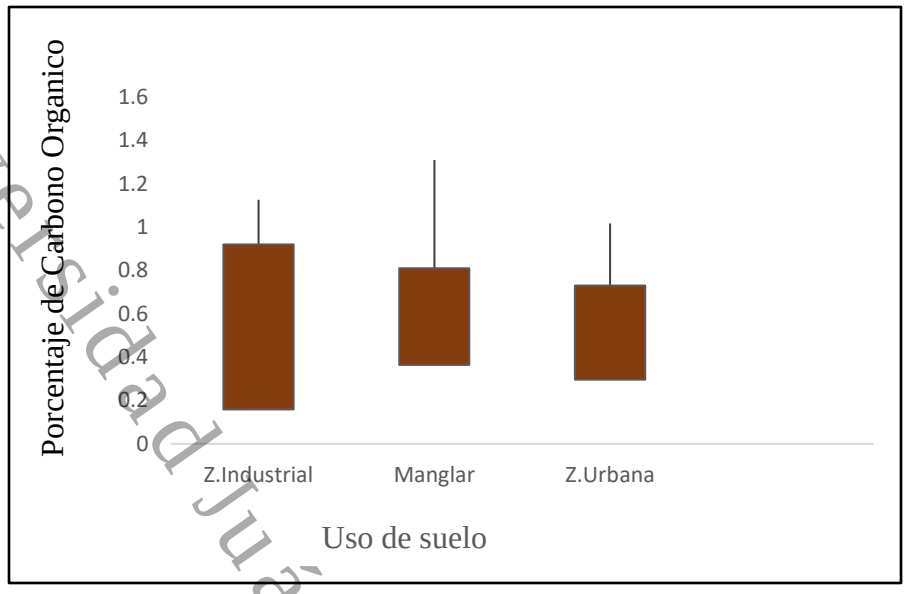


Figura 40. *Variación del porcentaje de carbono orgánico por uso de suelo*

Como resultado de lluvias intensas que tuvieron lugar durante la época de lluvias y de nortes, puede observarse que el patrón estacional identificado puede ser atribuido a un efecto de dilución, ya que conforme las lluvias progresaron, los niveles de % de carbono orgánico fueron disminuyendo. Durante la temporada de lluvias y de nortes, además de las lluvias intensas, los largos periodos de marea inundaron los suelos muestreados manteniendo las condiciones anóxicas hasta por debajo de los 10 cm de profundidad, resultando en elevados niveles materia orgánica y carbono orgánico en la capa superficial del suelo.

13.7 Materia orgánica en suelos en la Isla del Carmen

Los valores del % de Materia Orgánica del suelo registrados durante todo el estudio fluctuaron entre 0.44 y 4.31 %. Durante la época de nortes y lluvias los valores máximos registrados fueron de 1.68 y 4.31 %, respectivamente.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Tabla 14.

Resultados del % de Materia Orgánica en los 13 puntos analizados en las 3 temporadas climáticas.

Sitio / Muestreo	LLuvias %	Nortes %	Secas %
1.Puerto Real	2.27	0.70	1.06
2.Km. 30.8 Rebombeo SMAPAC	3.42	1.50	1.55
3.Km. 21 Rebombeo SMAPAC	3.60	1.18	2.67
4.Ensenada	1.91	1.40	1.72
5.Km. 18.8 R/a Bahamita	2.01	0.51	1.94
6.Parque Ecoturístico El Fénix	4.31	1.68	2.40
7.Instituto de Limnología UNAM	1.23	0.44	1.10
8.Jardín Botánico UNACAR	1.67	0.50	1.29
9.Playa Norte Av. Ballena	2.51	0.75	2.23
10.La Puntilla C-17 entre 36 y 36B	1.98	1.52	1.52
11.Emiliano Zapata C-Fco. Villa	1.65	0.60	0.64
12.Campus Principal UNACAR	2.62	0.75	1.52
13.Santa Margarita C-49	1.04	1.00	0.94

13.7.1 Mapeo

El contenido de Materia Orgánica varió entre 0.44 y 4.30, con un valor promedio de 1.57.

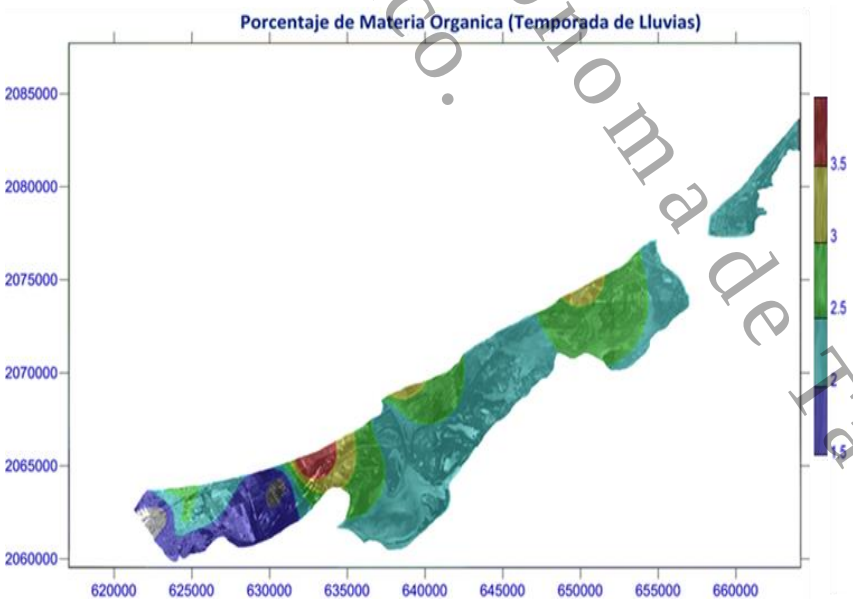


Figura 41. *Distribución espacial del porcentaje de materia orgánica en la Isla del Carmen durante la temporada de lluvias.*

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

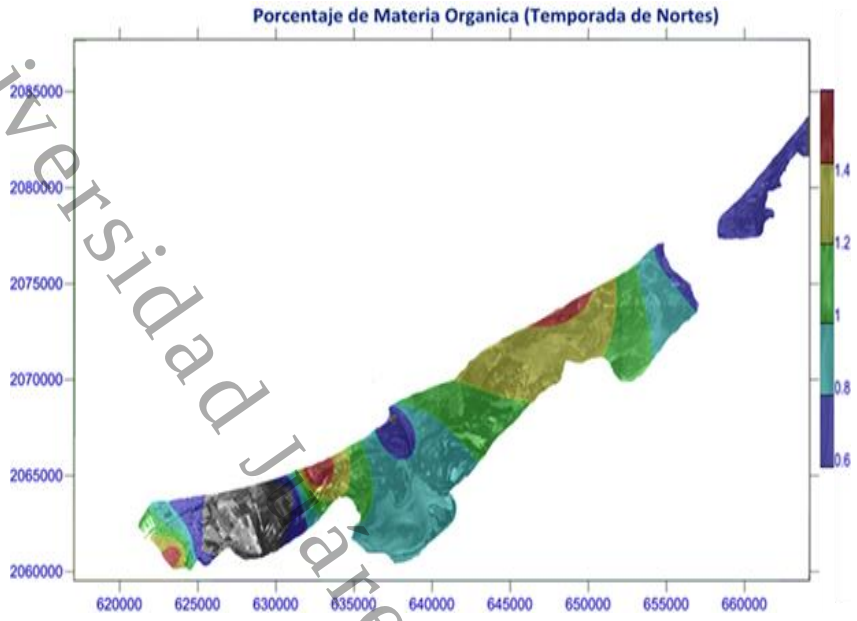


Figura 42 .*Distribución espacial del porcentaje de materia orgánica en Isla del Carmen durante la temporada de nortes.*

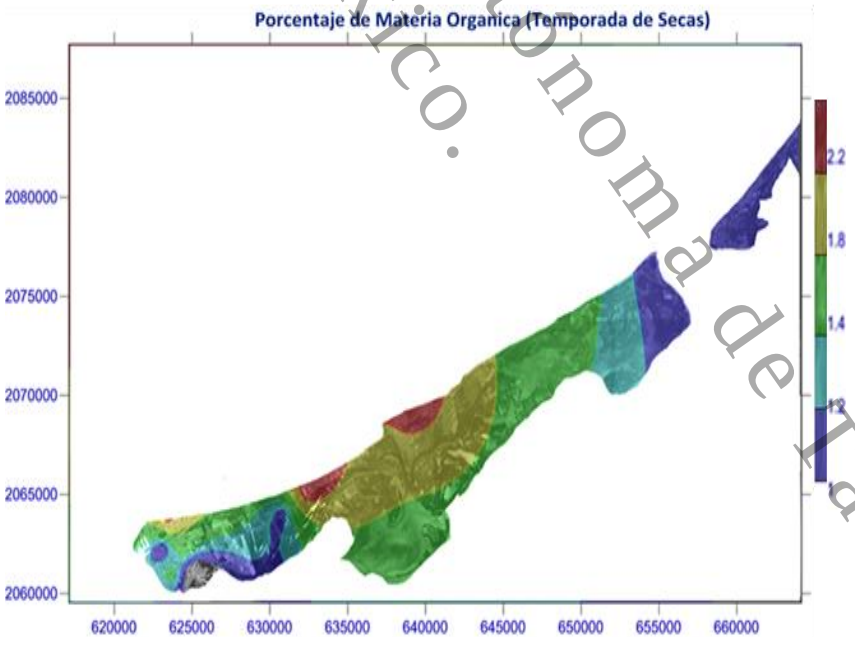


Figura 43. *Distribución espacial del porcentaje de materia orgánica en la Isla del Carmen durante la temporada de secas.*

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

A partir de los mapas 41,42 y 43 se puede observar que el contenido de materia orgánica presentó un patrón estacional, con valores más elevados durante la época de lluvias, con un efecto evidente de dilución que resultó con valores más bajos durante la época de nortes. Durante la temporada de secas, incrementa la tasa de evapotranspiración concentrando las sales y la materia orgánica, siendo transportados verticalmente con el agua de percolación. El proceso de acumulación de materia orgánica es favorecido en sitios con abundantes lluvias, sujetos a la influencia de mareas y con un deficiente drenaje.

13.7.2 Grafica por temporada, sitio y uso de suelo.

A partir de la Figura 44, puede observarse que el contenido de materia orgánica fue más alto durante la época de lluvias (2.32%).

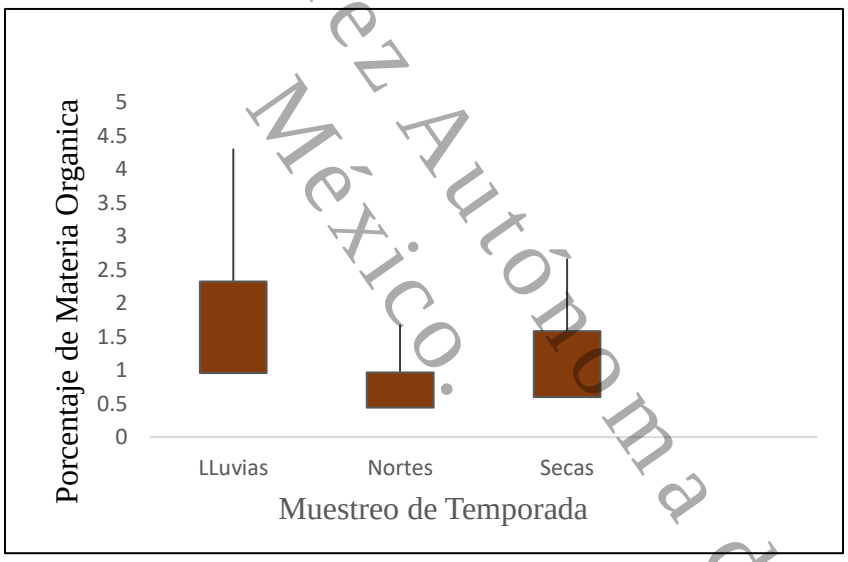


Figura 44. *Variación del porcentaje de materia orgánica por temporada.*

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

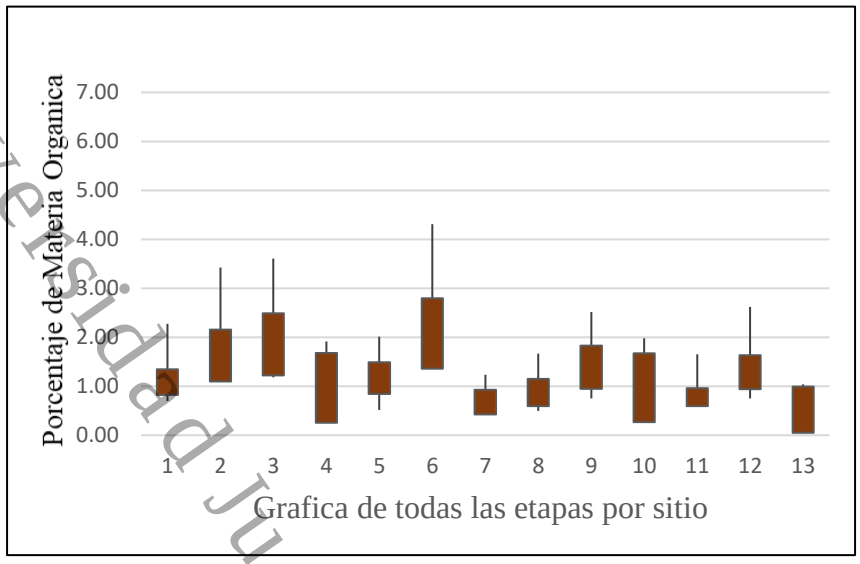


Figura 45. *Variación del porcentaje de materia orgánica por sitio*

Por otro lado, en cuanto a la variabilidad espacial, Figura 45 puede observarse que el contenido de materia orgánica presentó un patrón similar al % de carbono orgánico, con los niveles más altos en los sitios 2 (2.16%), 3(2.48%), y 6 (2.80%), que corresponden a las zonas de rebombeo y El Fénix. Cabe destacar, que específicamente los dos puntos (2 y 3) ubicados en el sitio de rebombeo estuvieron inundados todo el tiempo, y que el punto 6 se encuentra inmerso en una zona de manglar. A causa de las intensas lluvias que prevalecieron durante la estación lluviosa, estos sitios permanecieron inundados, y ha sido reportado que los humedales inundados proporcionan las condiciones óptimas para la acreción de materia orgánica (Cerón et al, 2011).

Durante la estación seca, el carbono orgánico y la materia orgánica se concentran como resultado de un incremento en la evaporación, mientras que, durante la temporada de nortes, las aguas de poro son diluidas con la lluvia y la escorrentía, resultando en valores más bajos de carbono orgánico, materia orgánica, salinidades y densidades. Esto puede explicar el patrón estacional encontrado, con valores altos durante la estación lluviosa, con valores visiblemente disminuidos durante la temporada de nortes e incrementados en la época de secas, siendo evidente el efecto de dilución.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

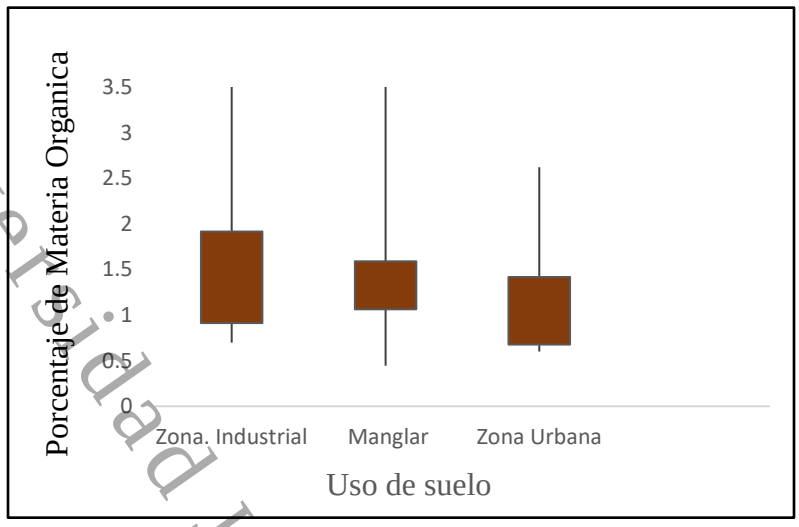


***Figura 46**. Variación del porcentaje de materia orgánica por uso de suelo.*

A partir de la Figura 46, puede observarse que los niveles más altos correspondieron a las zonas inundables y de manglar, categorizadas con un uso de suelo industrial (1.92%) y de bosque de manglar (1.59%).

13. 8 Azufre en suelos de la Isla del Carmen.

Los valores de Azufre del suelo registrados durante todo el estudio fluctuaron entre 0.01 mg/mL y 0.34 mg/mL, siendo la temporada se secas con mayor incremento (0.34 mg/mL), durante la época de nortes y lluvias los valores máximos registrados fueron de 0.08 mg/mL y 0.09 mg/mL, respectivamente.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Tabla 15.

Resultado de Azufre en los 13 puntos analizados en las 3 temporadas climáticas.

Sitio/muestreo	lluvias mg/mL	Nortes mg/mL	Secas mg/mL
1.Puerto real	0.04	0.02	0.05
2.km. 30.8 Rebombeo	0.04	0.08	0.05
3.km. 21 Rebombeo	0.05	0.01	0.01
4.Ensenada	0.04	0.02	0.01
5.km.18.8. R/a Bahamita	0.09	0.04	0.34
6.P. Ecoturístico	0.04	0.01	0.03
7.Ins. limnología	0.02	0.04	0.02
8.J. Botánico	0.03	0.02	0.04
9.Playa norte Av. Ballena	0.05	0.01	0.02
10.Puntilla calle 17	0.04	0.02	0.04
11.Emiliano zapata	0.03	0.03	0.03
12.Campus Principal	0.04	0.03	0.02
13.S. margarita. C- 49	0.03	0.01	0.04

13.8.1 Grafica por temporada, sitio y uso de suelo

Como puede observarse a partir de la Figura 47. El porcentaje de azufre fue más alto en la época de secas (0.34 mg/mL).

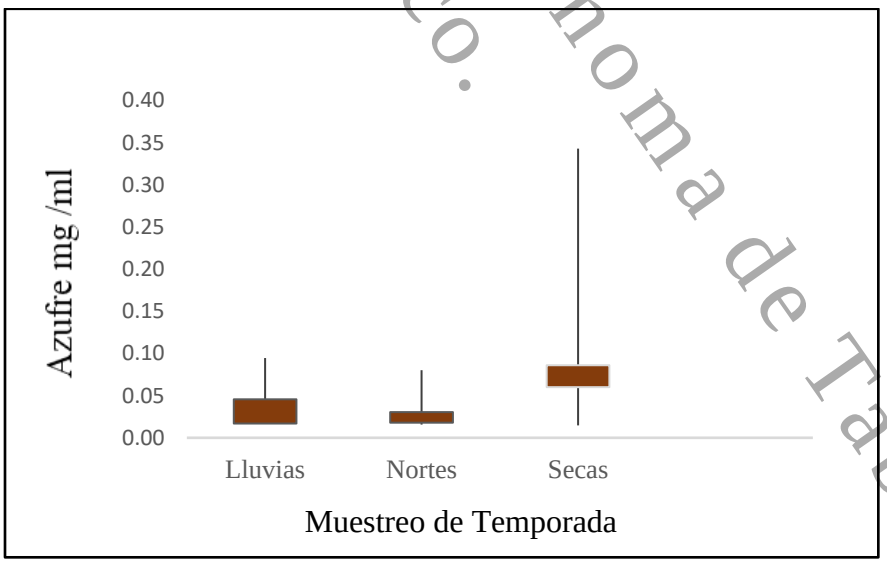


Figura 47*. Variación del porcentaje de azufre por temporada*

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

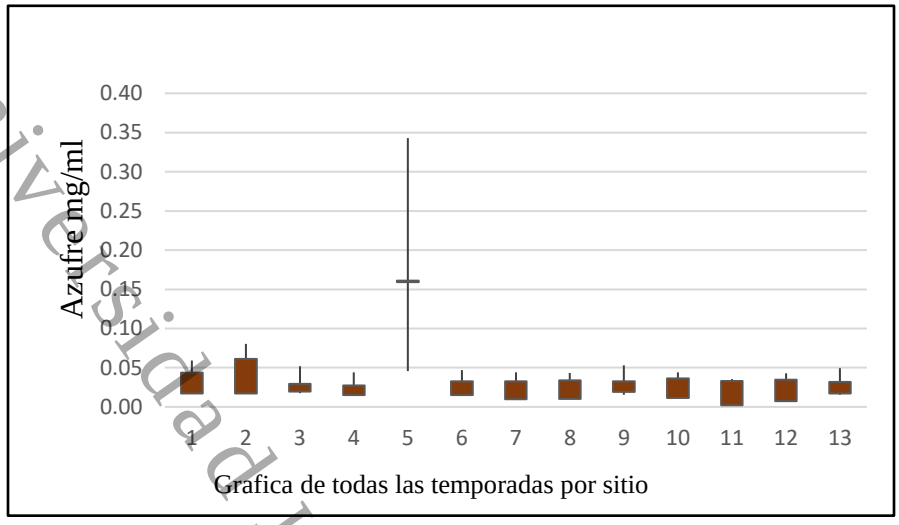


Figura 48.*Variación de azufre por sitio*

A partir de la Figura 48. se puede observar que los niveles de azufre fueron relativamente uniformes, siendo ligeramente más alto en los sitios 1(0.04 mg/mL) y 2(0.06 mg/mL), y extremadamente altos en el sitio 5(0.16 mg/mL).

Los sitios de muestreo fueron agrupados de acuerdo al uso de suelo prevaleciente en cada una de las estaciones de muestreo**,** y se puede observar de acuerdo a la Figura 49, que los niveles de azufre fueron más elevados en los sitios de manglar (0.07 mg/mL).

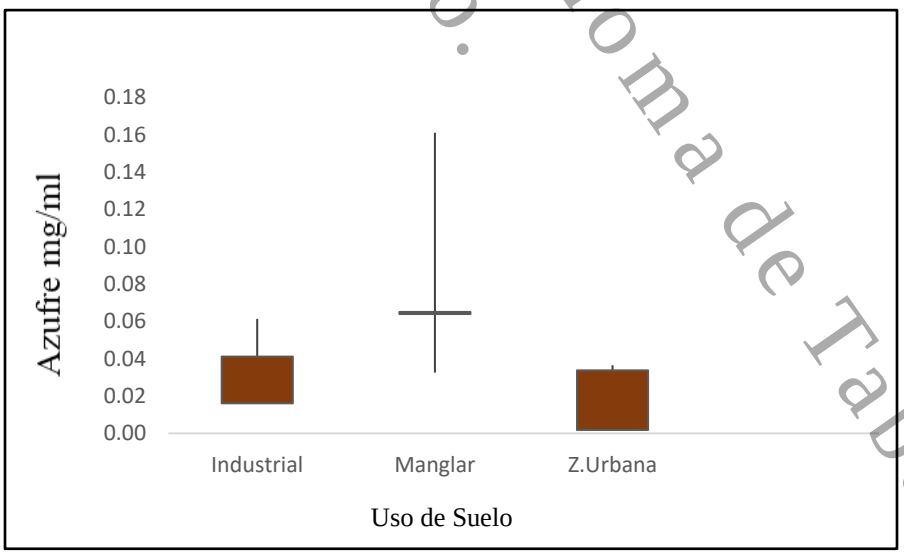


Figura 49*.Variación del porcentaje de azufre por usos de suelo*

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

13. 9 Depósito atmosférico de azufre

Los valores de depósito atmosférico de azufre del suelo registrados durante todo el estudio fluctuaron entre 2.08 y 31.59 Kg ha -^{1}yr -^{1}, obteniéndose un flujo medio de deposición de 4.7 Kg ha $^{-1}$yr $^{-1}$, siendo la temporada de nortes (31.59 Kg ha $^{-1}$yr $^{-1}$) con mayor incremento, durante la época de secas y lluvias los valores máximos registrados fueron de 11.99 y 8.47 Kg ha $^{-1}$yr $^{-1}$, respectivamente.

Tabla 16

Resultado de depósito atmosférico de Azufre de los 13 puntos analizados de la Isla del Carmen.

Sitio/Muestreo	LLuvias Kg ha^{-1} yr	Nortes Kg ha^{-1} yr^{-1}	Secas Kg ha^{-1} yr^{-1}
1.Puerto real	4.22	4.71	3.51
2.Km.30.8 Rebombeo	8.47	31.59	11.99
3.Km.21 Rebombeo	3.59	7.76	3.78
4.Ensenada	3.84	7.97	2.73
5.Km.18.8 Ra Bahamita	3.43	4.07	2.46
6.Parque Ecoturístico	2.84	5.11	2.08
7.Instituto de Limnología	3.00	3.99	3.51
8.Jardín Botánico	2.83	3.43	2.25
9.Playa norte Av. Ballena	2.42	3.63	3.38
10. puntilla C.17 % 36 y 36B	2.85	2.42	2.89
11.Emiliano Zapata	4.65	6.31	2.39
12.Campus Principal	2.68	4.04	3.13
13.Santa Margarita C-49	2.72	2.81	2.18

13.9.1 Mapeo

Puesto que el monitoreo de la química de la precipitación en la Isla del Carmen es limitado y los datos provenientes de diversas fuentes presentan una alta dispersión temporal, en este trabajo se utilizaron todas las concentraciones disponibles para generar contornos continuos que permitieran el análisis espacial. A partir de los valores promedio anuales obtenidos en cada sitio, se realizó una interpolación para elaborar las Isopletas de cargas de azufre. (Cerón et al.,2017). (Figuras 50-52).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

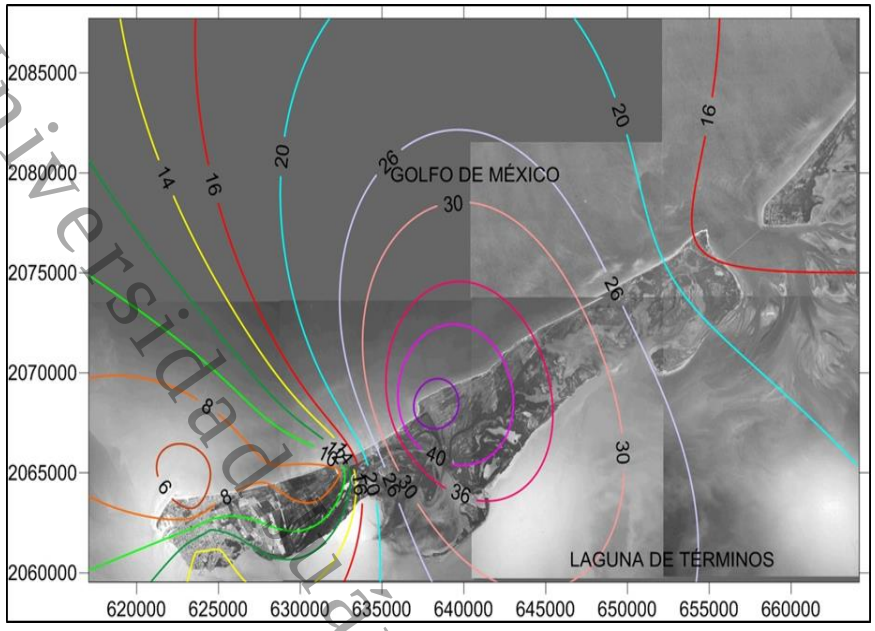


***Figura 50**.Patrones espaciales y temporales de los flujos de deposición tipo "throughfall" de SO_4^{2-} (Kg ha $^{-1}$yr^{-1}) en Isla del Carmen: LLuvias 2013.*

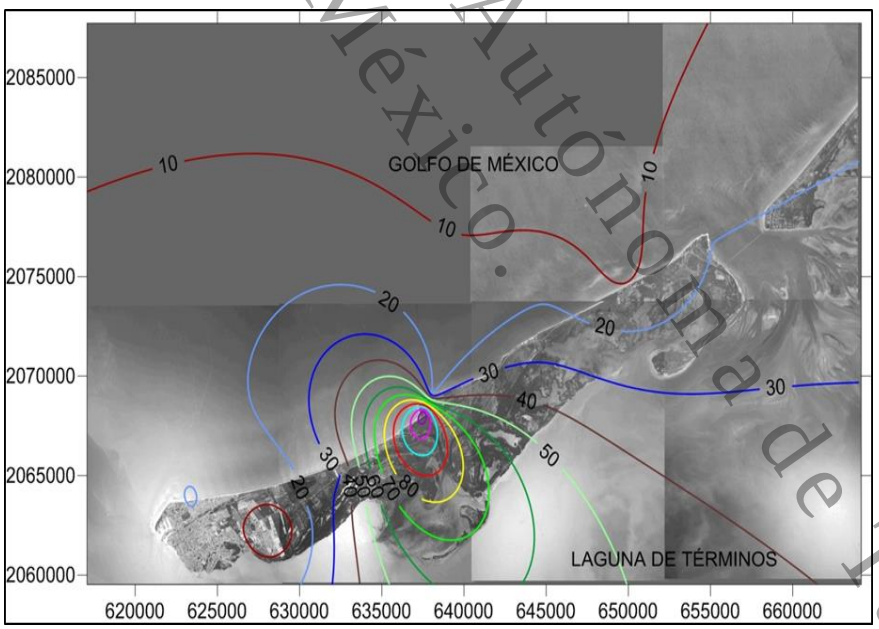


***Figura 51.**Patrones espaciales y temporales de los flujos de deposición tipo "throughfall" de SO_4^{2-} (Kg ha $^{-1}$yr $^{-1}$) en la Isla del Carmen: Nortes 2013.*

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

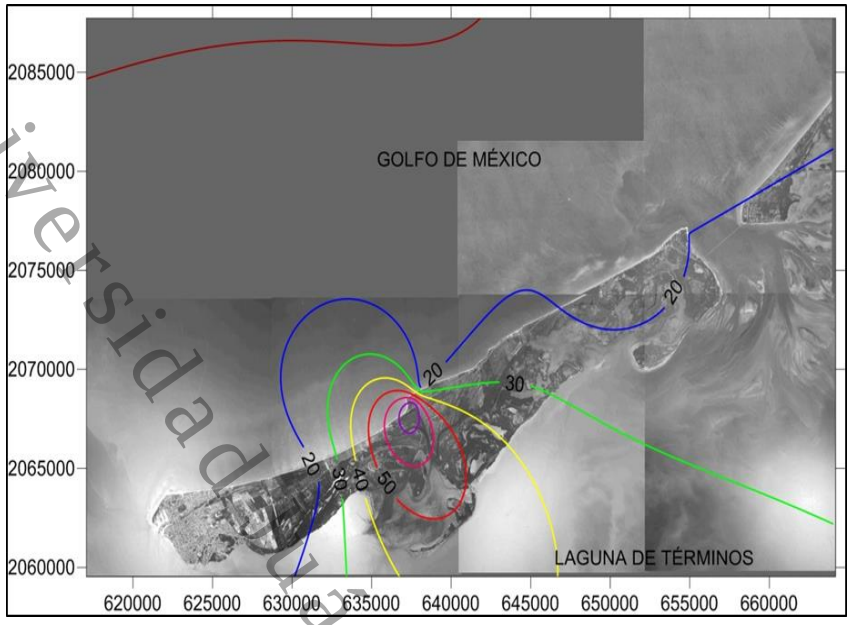


Figura 52.*Patrones espaciales y temporales de los flujos de deposición tipo "throughfall" de* SO_4^{2-} *(Kg ha* $^{-1}$ *yr*$^{-1}$*) en Isla del Carmen: secas 2014.*

13.9.2 Gráfico por temporada, sitio y uso de suelo

Por otro lado, el SO_4^{2-} tuvo un comportamiento con los niveles más altos ocurriendo durante la plenitud de la estación lluviosa y al inicio de la estación de frentes fríos o Nortes (Figura 53). Esto está de acuerdo con el carácter regional de las emisiones de SO_2 que están más conectadas con la deposición húmeda.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

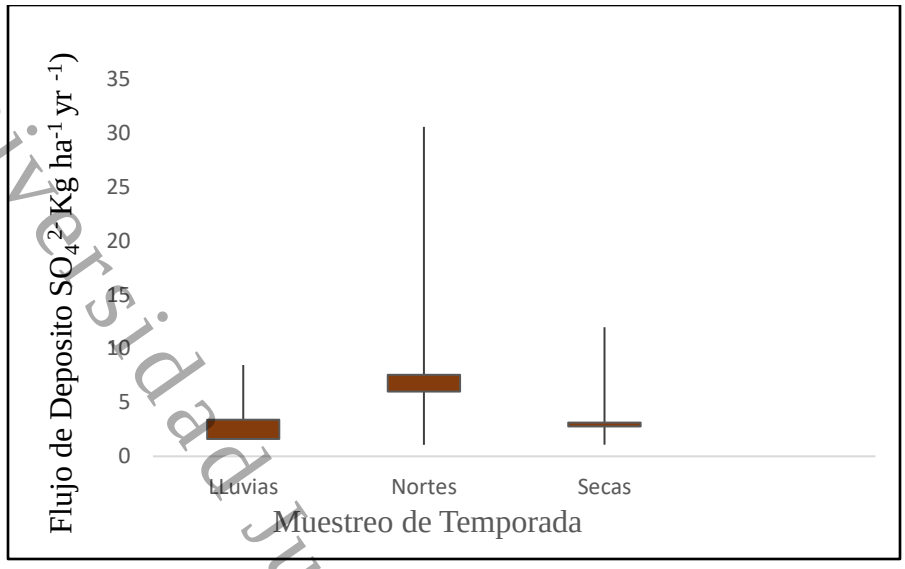


Figura 53*.Flujos de deposición atmosférica de SO_4^{2-} por temporada de muestreo.*

En el caso de los flujos de deposición de SO_4^{2-}, fueron más altos en el extremo Este de la Isla, y los valores pico estuvieron centrados en los puntos 1, 2, 3 y 4. Se observa una tendencia espacial clara, con los valores más altos en el extremo Este de la Isla, disminuyendo progresivamente hacia el oeste. Se identificó un patrón estacional evidente puesto que los flujos de deposición fueron más altos durante la estación de nortes; esto sugiere que los niveles de sulfato pudieron estar mejorados por el transporte a gran escala de emisiones desde las plataformas costa afuera en la Sonda de Campeche, demostrando su carácter regional.

Los flujos medios de deposición throughfall para SO_4^{2-} fue más altos para el sitio de muestreo etiquetados como 2 (17.34 kg ha^{-1} yr^{-1}) Figura 54. Los puntos de muestreo 7 y 8 están ubicados en el límite de la zona urbana; ambos puntos están dentro de un área compleja en la zona de transición entre la zona urbana y el bosque de manglar.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

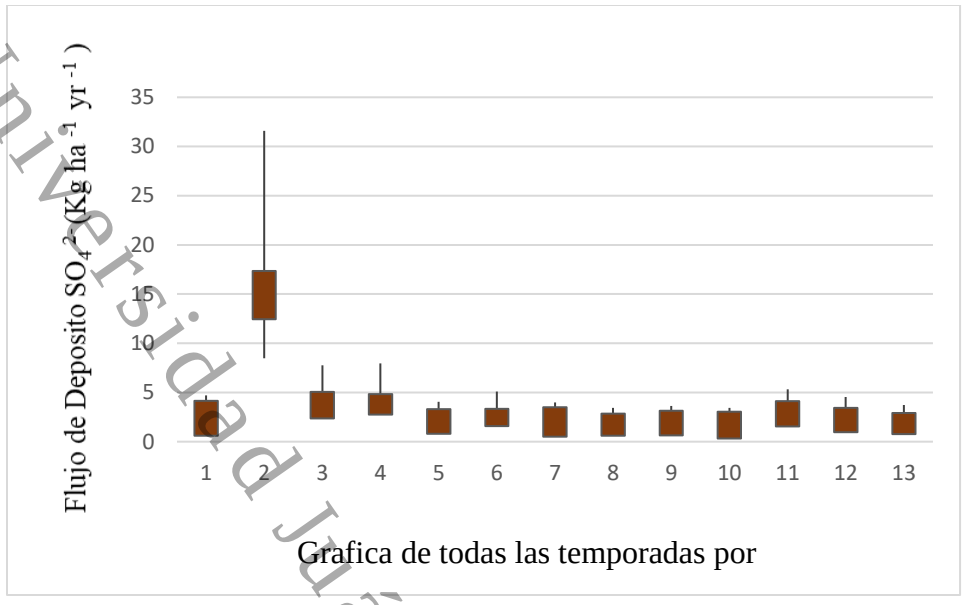


Figura 54.*Flujos de deposición atmosférica para SO_4^{2-} por sitio de muestreo.*

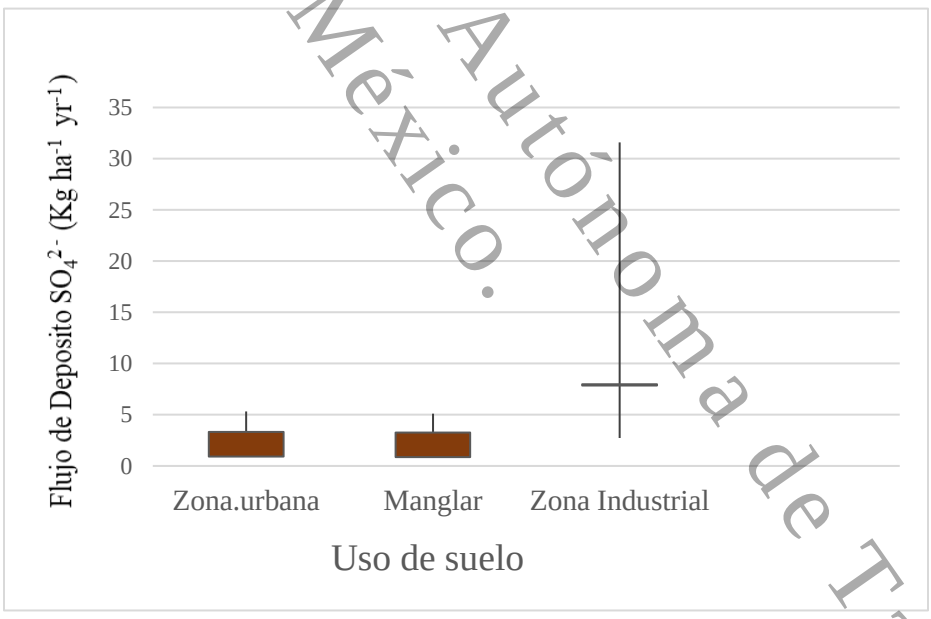


Figura 55*.Flujos de deposición atmosférica para SO_4^{2-} por usos de suelo*

La Figura 55, ilustra que la deposición más alta de SO_4^{2-} fue en la zona industrial de la Isla (7.01 kg ha^{-1} yr $^{-1}$). Por otro lado, los flujos medios de deposición “throughfall” para SO_4^{2-} fueron más altos en los puntos de muestreo 2. Es importante mencionar que los puntos 1, 2 y 3 están localizados en los límites con el bosque de manglar.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Estos puntos están ubicados en el extremo Este de la Isla, donde algunas instalaciones industriales pudieron contribuir a la deposición local de SO_4^{2-}. Puesto que los puntos de muestreo 2 y 3 estuvieron ubicados a lo largo de la Carretera Federal 180.

En adición, los niveles de sulfato en la deposición "throughfall" colectada en la Isla del Carmen pudieron ser mejoradas por el transporte a gran escala de las emisiones de SO_2 desde plataforma costa afuera en la Sonda de Campeche, donde el gas amargo es quemado en quemadores elevados. Estas emisiones de SO_2 pudieron experimentar wash-out (lavado) durante las estaciones lluviosas y de frentes fríos.

13.10. Determinación de la mineralogía dominante y clase de tamaño de partícula

La obtención de la mineralogía dominante para los sitios de muestreo de la Isla del Carmen se obtuvo a partir de la clasificación de cada uno de los sitios en grupos de suelos. Los grupos de suelo se asignaron a partir de un SIG (Sistema de Información Geográfica) obtenido de la base de datos de la INEGI (Mapa Digital de México; gaia.inegi.org.mx/mdm6/) (Ver Tabla 17**).**

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Tabla 17

Grupos de suelo existentes en cada uno de los 13 sitios de estudio

Sitio	Grupo de Suelo
1	Arenosol
2	Solonchak
3	Arenosol
4	Arenosol
5	Solonchak
6	Solonchak
7	Solonchak/arenosol
8	Solonchak
9	Solonchak
10 *	Solonchak
11 *	Solonchak
12 *	Solonchak
13 *	Solonchak

Fuente: Mapa Digital de México (Gaia. inegi.org.mx/mdm6/)

Una vez que se obtuvieron los grupos de suelo se procedió a la determinación de los minerales dominantes para cada sitio, para ello fue necesario consultar las bases de datos de la (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, [FAO],1976). A través de la cual, y según el grupo de suelo, se establecieron los minerales dominantes correspondientes.

La clase de tamaño de partículas se determinó a través de bases de datos geográficos del INEGI (Diccionario de datos edafológico), considerando también los grupos de suelo; según el diccionario de datos edafológicos a cada grupo de suelo le corresponde un tipo de textura (Gruesa, Media y Fina), que a su vez le corresponde un porcentaje de arcilla y arena;

Arenosol: son suelos de textura gruesa a los cuales les corresponde menos del 18% de arcilla y más del 65% de arena.

Solonchak: son suelos de textura media a los cuales les corresponde menos del 35% de arcilla y menos del 65 % de arena.

Después de determinar los porcentajes de arcilla y arena, se procede a clasificar el suelo utilizando el diagrama triangular de clases texturales, el cual se basa en el tamaño de las partículas del suelo., de acuerdo con el (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

[USDA], 2010). (Ver Anexo B); se asignaron a cada uno de los sitios las clases de tamaño de partículas correspondientes.

13.11. Diagnóstico preliminar de la sensibilidad a la acidez para la temporada de Secas Lluvias y Nortes

Se presentan los resultados obtenidos para las clases de sensibilidad y cargas críticas de acidez para la temporada de secas, lluvias y nortes en la Tabla 18,19 y 20 en las cuales pueden observarse los valores de pH, flujo de iones hidronio (Kmol H^+/ha año), grupo de suelo, minerales dominantes, clase de tamaño de partícula, la carga critica (Kmol H^+/ha año) y las clases de sensibilidad obtenidas.

A partir de la mineralogía dominante de la sección Anexo (A.1) en cada uno de los 13 sitios de la zona de estudio, y considerando los criterios establecidos, se puede observar que las cargas críticas obtenidas para cada uno de los sitios correspondieron a un rango de (≤ 0.2- 0.5 Kmol H^+/ha año), por lo tanto, se propone que este sea el valor de carga crítica para acidez, con una clase de sensibilidad de 2. Así mismo, considerando la textura de los suelos muestreados en cada uno de los sitios, y tomando los criterios establecidos en (A.2), se encontró una clase de sensibilidad de 2. Unificando ambos criterios, se llegó a la conclusión de que ambas categorías corresponden a una clase de sensibilidad categorizada como "sensible" de acuerdo a Turchenek & Abboud (2001) (A.3).

Una vez establecido el valor de referencia (≤0.2 – 0.5 Kmol H^+/ha año), de carga crítica para la acidez, se procedió a comparar los niveles actuales de concentración de iones hidronio en los suelos muestreados en cada uno de los 13 sitios estudiados para estimar los porcentajes de excedencia.

Sin embargo, como puede observarse en la Tabla 18,19 y 20 dichos valores no excedieron las cargas críticas propuestas. Esto es de esperarse puesto que se sabe que el pH no es un buen indicador de los efectos ecológicos potenciales derivados de la deposición ácida, ya que no constituye un trazador conservativo, a diferencia del ión sulfato que permanece estable en la atmósfera por un tiempo suficiente para realizar este tipo de evaluación. Cabe mencionar que esta información no fue mapeada para ninguna de las tres temporadas consideradas en el presente estudio. Así mismo, cabe destacar la naturaleza carbonatada de los suelos en el sitio de estudio, que resulta en valores de pH (entre 7.2 y 8.5). De acuerdo a la norma NOM-021- RECNAT-2000.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Estos valores de pH corresponden a suelos neutros y medianamente alcalinos. Esta alcalinidad sugiere que los suelos de la Isla del Carmen poseen una capacidad de amortiguación suficiente que conlleva a la neutralización de la acidez, sin embargo, esto no quiere decir que los suelos no sean vulnerables al depósito atmosférico, ya que, si bien el pH resultante de las reacciones de neutralización es alcalino, el depósito de azufre puede alterar no solo el ecosistema sino también los ciclos biogeoquímicos.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Tabla 18

Resultados del diagnóstico preliminar de la sensibilidad a la acidez para la temporada de secas.

sitio	pH	Kmol H^{+}/ (ha año)	Grupo de suelo	Minerales dominantes	Clase de tamaño de partículas	Carga critica K moles H/(ha año)	Clase de sensibilidad
1	7.84	0.15	Arenosol	Cuarzos, feldespastos, piroxenos, anfíboles. olivizas, zirconio, gamet, turmalina, ilmenita, magnetita, rulita.	Arena	≤0.2	1
2	7.85	0.14	Solonchak	Vermiculita, clorita, montmorillonita, hidrómica, calcita, gypsum, anhidrita,halita,mirabilita	Arena	≤0.2	1
3	7.86	0.14	Arenosol	Cuarzos, feldespastos, piroxenos, anfíboles. olivizas, zirconio, gamet, turmalina, ilmenita, magnetita, rulita.	Arena/franco	≤0.2	1
4	8.17	0.07	Arenosol	Cuarzos, feldespastos, piroxenos, anfíboles. olivizas, zirconio, gamet, turmalina, ilmenita, magnetita, rulita.	Arena/franco	≤0.2	1
5	7.80	0.16	Solonchak	Vermiculita, clorita, montmorillonita, hidrómica,	Arena/franco	≤0.2	1

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

				calcita, gypsum, anhidrita,halita,mirabilita			
6	7.68	0.20	Solonchak	Vermiculita, clorita, montmorillonita, hidrómica, calcita, gypsum, anhidrita,halita,mirabilita	Arena	≤0.2	1
7	8.12	0.08	Solonchak/Arenosol	Vermiculita, clorita, montmorillonita, hidrómica, calcita, gypsum, anhidrita,halita,mirabilita	Arena/franco	≤0.2	1
8	7.74	0.18	Solonchak	Vermiculita, clorita, montmorillonita, hidrómica, calcita, gypsum, anhidrita,halita,mirabilita	Arena	≤0.2	1
9	8.51	0.03	Solonchak	Vermiculita, clorita, montmorillonita, hidrómica, calcita, gypsum, anhidrita,halita,mirabilita	Arena	≤0.2	1
10	8.33	0.05	Solonchak	Vermiculita, clorita, montmorillonita, hidrómica, calcita, gypsum, anhidrita,halita,mirabilita	Arena/franco	≤0.2	1
11	8.17	0.07	Solonchak	Vermiculita, clorita, montmorillonita, hidrómica, calcita, gypsum, anhidrita,halita,mirabilita	Arena	≤0.2	1
12	8.33	0.05	Solonchak	Vermiculita, clorita, montmorillonita, hidrómica,	Arena	≤0.2	1

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

				calcita, gypsum, anhidrita,halita,mirabilita			
13	8.00	0.1	Solonchak	Vermiculita, clorita, montmorillonita, hidrómica, calcita, gypsum, anhidrita,halita,mirabilita	Arena	≤0.2	1

Nota: “elaboración propia”

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Tabla 19

Resultados del diagnóstico preliminar de la sensibilidad a la acidez para la temporada de lluvias.

sitio	pH	Kmol $H^{+/}$ (ha año)	Grupo de suelo	Minerales dominantes	Clase de tamaño de partículas	Carga critica K moles H/(ha año)	Clase de sensibilidad
1	8.09	0.08	Arenosol	Cuarzos, feldespastos, piroxenos, anfíboles. olivizas, zirconio, gamet, turmalina, ilmenita, magnetita, rulita.	Arena	≤0.2	1
2	8.01	0.09	Solonchak	Vermiculita, clorita, montmorillonita, hidrómica, calcita, gypsum, anhidrita,halita,mirabilita	Arena	≤0.2	1
3	7.99	0.10	Arenosol	Cuarzos, feldespastos, piroxenos, anfíboles. olivizas, zirconio, gamet, turmalina, ilmenita, magnetita, rulita.	Arena/franco	≤0.2	1
4	8.16	0.06	Arenosol	Cuarzos, feldespastos, piroxenos, anfíboles. olivizas, zirconio, gamet, turmalina, ilmenita, magnetita, rulita.	Arena/franco	≤0.2	1
5	8.08	0.08	Solonchak	Vermiculita, clorita, montmorillonita, hidrómica,	Arena/franco	≤0.2	1

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

				calcita, gypsum, anhidrita,halita,mirabilita			
6	7.76	0.17	Solonchak	Vermiculita, clorita, montmorillonita, hidrómica, calcita, gypsum, anhidrita,halita,mirabilita	Arena	≤0.2	1
7	8.27	0.05	Solonchak/Arenosol	Vermiculita, clorita, montmorillonita, hidrómica, calcita, gypsum, anhidrita,halita,mirabilita	Arena/franco	≤0.2	1
8	8.27	0.05	Solonchak	Vermiculita, clorita, montmorillonita, hidrómica, calcita, gypsum, anhidrita,halita,mirabilita	Arena	≤0.2	1
9	8.07	0.08	Solonchak	Vermiculita, clorita, montmorillonita, hidrómica, calcita, gypsum, anhidrita,halita,mirabilita	Arena	<0.2	1
10	8.38	0.04	Solonchak	Vermiculita, clorita, montmorillonita, hidrómica, calcita, gypsum, anhidrita,halita,mirabilita	Arena/franco	≤0.2	1
11	8.26	0.05	Solonchak	Vermiculita, clorita, montmorillonita, hidrómica, calcita, gypsum, anhidrita,halita,mirabilita	Arena	≤0.2	1
12	8.08	0.08	Solonchak	Vermiculita, clorita, montmorillonita, hidrómica,	Arena	≤0.2	1

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

				calcita, gypsum, anhidrita,halita,mirabilita			
13	8.02	0.09	Solonchak	Vermiculita, clorita, montmorillonita, hidrómica, calcita, gypsum, anhidrita,halita,mirabilita	Arena	≤0.2	1

Nota: “elaboración propia”

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Tabla 20

Resultados del diagnóstico preliminar de la sensibilidad a la acidez para la temporada de Nortes

sitio	pH	Kmol H^{+}/ (ha año)	Grupo de suelo	Minerales dominantes	Clase de tamaño de partículas	Carga critica K moles H/(ha año)	Clase de sensibilidad
1	8.23	0.05	Arenosol	Cuarzos, feldespastos, piroxenos, anfíboles. olivizas, zirconio, gamet, turmalina, ilmenita, magnetita, rulita.	Arena	≤0.2	1
2	7.86	0.13	Solonchak	Vermiculita, clorita, montmorillonita, hidrómica, calcita, gypsum, anhidrita,halita,mirabilita	Arena	≤0.2	1
3	7.91	0.12	Arenosol	Cuarzos, feldespastos, piroxenos, anfíboles. olivizas, zirconio, gamet, turmalina, ilmenita, magnetita, rulita.	Arena/franco	≤0.2	1
4	7.83	0.14	Arenosol	Cuarzos, feldespastos, piroxenos, anfíboles. olivizas, zirconio, gamet, turmalina, ilmenita, magnetita, rulita.	Arena/franco	≤0.2	1
5	7.98	0.10	Solonchak	Vermiculita, clorita, montmorillonita, hidrómica,	Arena/franco	≤0.2	1

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

				calcita, gypsum, anhidrita,halita,mirabilita			
6	7.74	0.01	Solonchak	Vermiculita, clorita, montmorillonita, hidrómica, calcita, gypsum, anhidrita,halita,mirabilita	Arena	≤0.2	1
7	7.21	0.06	Solonchak/Arenosol	Vermiculita, clorita, montmorillonita, hidrómica, calcita, gypsum, anhidrita,halita,mirabilita	Arena/franco	≤0.2	1
8	7.69	0.02	Solonchak	Vermiculita, clorita, montmorillonita, hidrómica, calcita, gypsum, anhidrita,halita,mirabilita	Arena	≤0.2	1
9	8.17	0.06	Solonchak	Vermiculita, clorita, montmorillonita, hidrómica, calcita, gypsum, anhidrita,halita,mirabilita	Arena	≤0.2	1
10	7.75	0.17	Solonchak	Vermiculita, clorita, montmorillonita, hidrómica, calcita, gypsum, anhidrita,halita,mirabilita	Arena/franco	≤0.2	1
11	7.73	0.18	Solonchak	Vermiculita, clorita, montmorillonita, hidrómica, calcita, gypsum, anhidrita,halita,mirabilita	Arena	≤0.2	1
12	7.57	0.26	Solonchak	Vermiculita, clorita, montmorillonita, hidrómica,	Arena	0.2-0.5	2

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

				calcita, gypsum, anhidrita,halita,mirabilita			
13	7.54	0.28	Solonchak	Vermiculita, clorita, montmorillonita, hidrómica, calcita, gypsum, anhidrita,halita,mirabilita	Arena	0.2-0.5	2

Nota: “elaboración propia”

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

13.12 Estimación de los porcentajes de excedencia a las cargas críticas para el depósito atmosférico de azufre

A partir de las clases de sensibilidad obtenidas para cada uno de los sitios y respectivas temporadas climáticas se obtuvieron las cargas criticas (Kg/ha año) de acuerdo a la metodología empírica de Johan Kuylenstierna, que se obtuvieron en un trabajo previo de investigación realizado por (Tejero Campos,2017) en la región de Xicalango- Atasta, estas carga críticas fueron comparadas con los flujos actuales de depósito de azufre (Kg/ha año), esto con el objetivo de obtener los porcentajes de excedencia.

Se pueden observar las categorías de sensibilidad, las cargas críticas, los flujos de depósito de S y las respectivas excedencias para la temporada de seca. Los resultados muestran que, de los 13 sitios considerados, solo 1 presento excedencias, el sitio 2 (Km 30.8 Rebombeo) con 66.57 % (Tabla 21), esto quiere decir que tomando en cuenta las propiedades físico químicas que presentan los suelos de la zona de estudio durante la temporada de secas, presentan un riesgo potencial de sufrir efectos adversos como resultado del depósito atmosférico de azufre.

Tabla 21

Carga crítica y excedencias en la temporada (secas)

Sitio	Clase de sensibilidad	Carga critica (Kg/ha año)	Flujo de depósito de S (Kg/ha año)	% de excedencia
1	1	0-4.0075	3.51	0
2	1	0-4.0075	11.99	66.57
3	1	0-4.0075	1.78	0
4	1	0-4.0075	1.73	0
5	1	0-4.0075	2.36	0
6	1	0-4.0075	1.08	0
7	1	0-4.0075	3.51	0
8	1	0-4.0075	2.25	0
9	1	0-4.0075	3.38	0
10	1	0-4.0075	2.89	0
11	1	0-4.0075	2.30	0
12	1	0-4.0075	3.02	0
13	1	0-4.0075	1.07	0

Nota: “elaboración propia”

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

Se pueden observar las categorías de sensibilidad, las cargas críticas, los flujos de depósito de S y las respectivas excedencias para la temporada de lluvias. Los resultados muestran que, de los 13 sitios considerados, 2 presentaron excedencias el sitio 2 (Km 30.8 Rebombeo) con 52.68 % y el sitio 11 (Emiliano Zapata C.49) con 11.92%, sin embargo, son menores en comparación con las temporadas de secas (Tabla 22).

Tabla 22

Carga crítica y excedencia en la temporada (lluvias)

Sitio	Clase de sensibilidad	Carga crítica (Kg/ha año)	Flujo de depósito de S (Kg/ha año)	% de excedencia
1	1	0-4.0075	3.22	0
2	1	0-4.0075	8.47	52.68
3	1	0-4.0075	2.59	0
4	1	0-4.0075	2.84	0
5	1	0-4.0075	3.43	0
6	1	0-4.0075	2.80	0
7	1	0-4.0075	3.00	0
8	1	0-4.0075	2.83	0
9	1	0-4.0075	2.42	0
10	1	0-4.0075	2.85	0
11	1	0-4.0075	4.55	11.92
12	1	0-4.0075	2.67	0
13	1	0-4.0075	2.71	0

Nota: “elaboración propia”

Durante la temporada de nortes, 7 sitios de los 13 presentaron excedencias altas estos son los sitios 1(Puerto Real) 14.91%, 2 (Km. 30.8 Rebombeo SMAPAC) 86.89%, 3 (Km. 21 Rebombeo SMAPAC) 40.71%, 4 (Ensenada) 32.87%, 6 (Parque Ecoturístico EL Fénix 21.57%, 11(Emiliano Zapata C.49) 24.52%,12 (Campus Principal UNACAR) 76.54%. comparando los % de excedencia encontrados para la época de secas y lluvias, los % de excedencias obtenidos para la estación de Nortes, fueron incrementando progresivamente.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Tabla 23

Carga crítica y excedencias en la temporada (Nortes)

Sitio	Clase de sensibilidad	Carga critica (Kg/ha año)	Flujo de depósito de S (Kg/ha año)	% de excedencia
1	1	0-4.0075	4.71	14.91
2	1	0-4.0075	30.59	86.89
3	1	0-4.0075	6.76	40.71
4	1	0-4.0075	5.97	32.87
5	1	0-4.0075	1.07	0
6	1	0-4.0075	5.11	21.57
7	1	0-4.0075	3.99	0
8	1	0-4.0075	2.43	0
9	1	0-4.0075	3.63	0
10	1	0-4.0075	2.42	0
11	1	0-4.0075	5.31	24.52
12	2	4.0075-8.015	4.54	76.54
13	2	4.0075-8.015	1.81	0

Nota: “elaboración propia”

13.13 Mapas de Categorías de sensibilidad

Una vez obtenidas las categorías de sensibilidad, se procedió a utilizar el Programa Google Earth Pro para obtener los mapas que permitan identificar tendencias espaciales y zonas críticas con alta vulnerabilidad.

Se presentan el mapeo de las categorías de sensibilidad al depósito de azufre para la zona de estudio durante la temporada de secas. (Figura 56). Se observa una compleja uniformidad, teniéndose en categorías de sensibilidad 1 en todo el territorio.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México



Figura 56.*Mapeo de las categorías de sensibilidad para la temporada de secas.*

En la Figura 57 se presenta el mapeo de las categorías de sensibilidad al depósito de azufre para la zona de estudio durante la temporada lluvias. Es posible observar que la sensibilidad mostro, una total uniformidad en todo el territorio estudiado teniéndose categoría de sensibilidad de 1.



Figura 57. *Mapeo de las categorías de sensibilidad para la temporada de lluvias*

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

En la Figura 58 se observa una compleja uniformidad, teniéndose en su mayoría categorías de sensibilidad 1 en casi todo el territorio estudiado a excepción del sitio 12 Campus Principal UNACAR y sitio 13 Santa Margarita C-49 que presentaron categoría de sensibilidad 2, ambos ubicados en la Zona urbana.

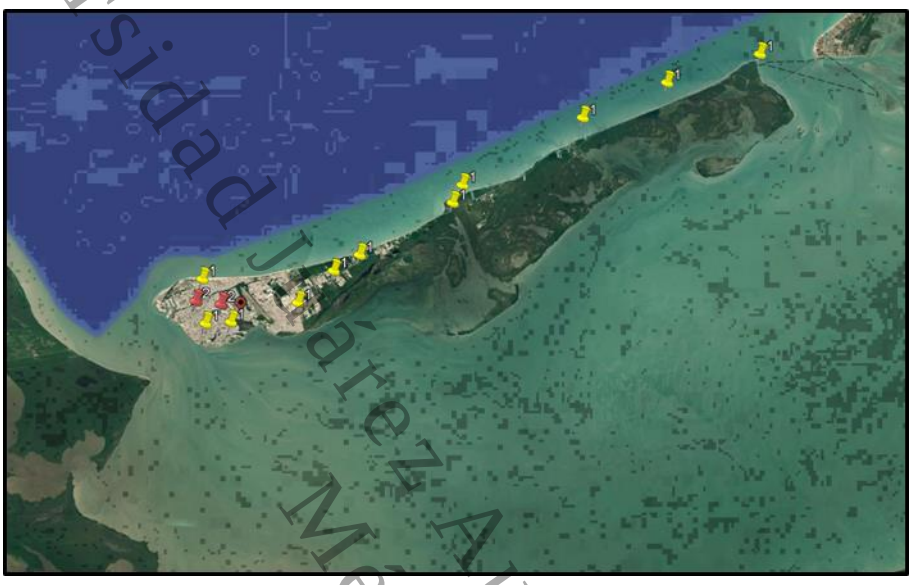


Figura 58. *Mapeo de las categorías de sensibilidad para la temporada de nortes.*

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

14.Discusión

14.1 Humedad

En cuanto a la distribución temporal, el porcentaje de humedad fue incrementando conforme progreso la estación lluviosa y de nortes, alcanzando los niveles de humedad más altos al inicio de la estación seca; mientras que, en el caso de la distribución espacial, los porcentajes de humedad fueron ligeramente más elevados en la zona de manglar y en el extremo Este de la Isla, donde predominan las zonas inundables y sujetas a la influencia de mareas (Rebombeo, Playa Norte, Puntilla y Bahamita). Finalmente, como resultado de la ocurrencia de lluvias intensas durante la estación lluviosa y la temporada de norte, se tuvo como resultado una acumulación de humedad en los suelos que se pone de manifiesto al final de la temporada de norte e inicio de la estación seca que fue cuando se tomaron las muestras correspondientes a esta estación, favoreciendo las condiciones anóxicas durante esta temporada, esto podría explicar los niveles de % de humedad más elevados que se observaron al final de la época de norte e inicio de la temporada de secas en las zonas inundables y de manglar de la isla.

14.2 Potencial de hidrogeno

Los suelos en la Isla fueron predominantemente alcalinos lo cual está de acuerdo con su naturaleza sedimentaria y composición carbonatada. Se observó un evidente efecto de dilución, ya que los valores de pH fueron ligeramente más altos en la época de lluvias, disminuyendo progresivamente conforme la acumulación de humedad en el suelo fue incrementando. No hubo una variación significativa en los niveles de pH del suelo entre temporadas ni tampoco entre puntos de muestreo, ya que los valores de pH se mantuvieron estables por lo que no se observaron patrones espaciales o estacionales en este parámetro.

14.3 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica guardó una estrecha relación con los niveles de humedad que van incrementando conforme progresa la estación lluviosa y de nortes, y que alcanzan sus máximos niveles de humedad justo al término de estas dos temporadas, disminuyendo progresivamente en la estación seca. En cuanto a la distribución espacial, puede observarse que los niveles más altos de conductividad eléctrica se tienen en la parte media de la Isla (zona predominantemente de manglar) y en el extremo Este (zonas inundables), mientras que los valores más bajos se tienen en el extremo Oeste de la Isla que corresponde a la zona urbana. Se obtuvo evidente patrón de

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

comportamiento en el que se pudo observar que conforme las zonas fueron volviendo más urbanas, la conductividad eléctrica disminuyó drásticamente, lo cual demuestra que el grado de perturbación afecta la salinidad y por lo tanto el contenido de nutrientes en los suelos.

14.4 Densidad aparente

la densidad aparente no mostró un patrón estacional evidente, a excepción de ser ligeramente más elevado durante la época de secas. En cuanto a su distribución espacial, tampoco se encontró una tendencia o patrón que indicara que este parámetro fuera diferente en alguno de los sitios de muestreo considerados.

14.5 Textura

Independientemente de la ubicación de los sitios de muestreo, la clase textural predominante de los suelos en la Isla es Arenoso/Franco Arenoso, lo cual está de acuerdo con su origen sedimentario y su naturaleza carbonatada.

14.6 Materia orgánica y Carbón Orgánico

El contenido de materia orgánica presentó un patrón estacional, con valores más elevados durante la época de lluvias, con un efecto evidente de dilución que resultó con valores más bajos durante la época de nortes. Durante la temporada de lluvias y de nortes, las lluvias intensas y los largos periodos de marea inundaron los suelos muestreados manteniendo las condiciones anóxicas hasta por debajo de los 10 cm de profundidad, resultando en elevados niveles de materia orgánica y carbono orgánico en la capa superficial del suelo al inicio de la temporada seca que actuando en sinergia con el incremento en la tasa de evaporación, dio como resultado una mayor concentración de sales y la materia orgánica, siendo transportados verticalmente con el agua de percolación. El proceso de acumulación de materia orgánica fue favorecido en sitios con abundantes lluvias, sujetos a la influencia de mareas y con un deficiente drenaje.

14.7 Azufre

El contenido de Azufre presento un patrón estacional, con valores más elevados en la temporada de secas disminuyendo progresivamente en la época de lluvias y nortes.

En cuanto a la distribución espacial, puede observarse que los niveles más altos de azufre se tienen en la parte media, zona predominantemente de manglar (Puerto real y km 30.8 Rebombeo) mientras que los valores más bajos se tienen en la zona urbana, lo cual demuestra el grado de deficiencia de azufre en el suelo de la isla debido a la naturaleza sedimentaria (arenosol), este tipo de suele tiene contenidos de sales y carbonatos, especialmente de calcio que se acumula a lo largo

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

de su perfil formando una capa impermeable que incrementan los valores de pH del suelo en promedio es alcalino (7.90), además del contenido en materia orgánica es pobre.

14.8 Sulfatos

En cuanto al SO_4^{2-}, su deposición tuvo origen tanto en fuentes locales como regionales, siendo su contribución más alta cuando la isla estuvo sujeta a la influencia de "nortes". Fue completamente evidente que además de las fuentes locales industriales en Isla del Carmen, los niveles de fondo fueron mejorados por el transporte a gran escala de las emisiones de SO_2 de plataformas costa afuera en la Sonda de Campeche durante la estación de "nortes" cuando los vientos prevalecientes vinieron del NE.

La excedencia en las cargas críticas representa un indicador de riesgo potencial de acidificación y sus impactos sobre los ecosistemas; por lo tanto, para evaluar la vulnerabilidad de los ecosistemas de manglar en Isla del Carmen, es necesario establecer las cargas críticas y estimar sus excedencias. Sólo entonces, será posible desarrollar programas de control de emisiones y proponer políticas de prevención y regulaciones locales enfocadas a proteger estos ecosistemas.

La interpolación de mediciones de campo es uno de los métodos más convincentes para explorar el balance de S, aun cuando la exactitud está limitada por las características de los datos medidos y las incertidumbres asociadas con la técnica de interpolación. Este trabajo de investigación constituyó el primer paso para cuantificar el estado actual de la deposición de S. En los próximos años, una red de monitoreo a gran escala será establecida en México para estimar los flujos de deposición de S, así como su distribución espacial. Una serie de estaciones de monitoreo deberá ser fijada para conservar la uniformidad en los datos medidos, permitiendo la comparabilidad y considerando no solo sitios urbanos e industrializados, sino también sitios rurales y remotos.

14.9 Sensibilidad de los ecosistemas terrestres a la acidez

A partir de la evaluación de la sensibilidad de los ecosistemas terrestres a la acidez como concentración de iones hidronio se llegó a la conclusión de que el pH no es un buen indicador de los efectos ecológicos potenciales derivados de la deposición ácida, ya que no constituye un trazador conservativo, a diferencia del ion sulfato que permanece estable en la atmósfera por un tiempo suficiente para realizar este tipo de evaluación. A partir de los valores de pH de suelos que prevalecen en la zona y que corresponden a moderadamente alcalinos, es importante destacar que la naturaleza carbonatada de los suelos no sea vulnerable al depósito atmosferico, ya que, si bien

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

el pH resultante de las reacciones de neutralización es alcalino, el depósito de azufre puede alterar no solo el ecosistema y sus funciones sino también a los ciclos biogeoquímicos.

14.10 Evaluación de la sensibilidad de los ecosistemas terrestres al depósito de S durante la temporada de secas, lluvias y nortes.

Temporada de secas:

En los 13 sitios estudiados se identificó una clase de sensibilidad de 1, correspondiente a la categoría "Sensible". Al comparar los porcentajes de excedencia, solo un sitio presentó un valor relevante: el sitio 2, ubicado en el km 30.8, Rebombeo, en la zona industrial, con un porcentaje de excedencia del 66.57%. La alta sensibilidad encontrada en todos los sitios puede considerarse inherente al grado de perturbación de los suelos debido al depósito atmosférico.

Temporada de lluvias:

En los 13 sitios estudiados se presentó igual una clase de sensibilidad de 1 que corresponde a “Sensible”. Comparando los % de excedencias encontradas en la temporada de secas, el sitio 2 km.30.8 Rebombeo (66.57 %) de excedencias y que se encuentra en la zona Industrial, los % de excedencias obtenidos para la estación de lluvias y que corresponde al mismo sitio 2 (km.30.8) Rebombeo (52.68 %) y sitio el 11 que es Emiliano zapata C. Fco. Villa (11.92 %) y que se encuentra en la zona Urbana fueron respectivamente más altos.

Temporada de norte:

De los 13 sitios estudiados, 11 presentaron una clase de sensibilidad de 1, correspondiente a la categoría "Sensible", mientras que 2 sitios presentaron una clase de sensibilidad de 2, que de igual manera corresponde a "Sensible". Al comparar los porcentajes de excedencia obtenidos en las temporadas de secas, lluvias y norte, estos fueron incrementándose progresivamente, ya que en 7 sitios se registraron porcentajes de excedencia en la zona industrial: sitio 1 (14.91 %), sitio 2 (86.89 %), sitio 3 (40.71 %) y sitio 4 (32.87 %); así como el sitio 6, Parque Ecoturístico Fénix (21.57 %), ubicado en la zona de manglar. En la zona urbana, los sitios 11 (24.52 %) y 12 (76.54 %) también presentaron valores relevantes, observándose un marcado porcentaje de excedencia en las tres zonas de muestreo durante la temporada de norte. El aumento de los porcentajes de excedencia en los sitios se debe a los temporales de norte, que provocan el arrastre de estas cargas, lo que se refleja en un marcado porcentaje en las tres zonas de muestreo.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

15. Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo a los resultados obtenidos y los objetivos planteados en el presente trabajo se llega a la siguiente conclusión.

Los suelos de la Isla del Carmen presentan una marcada homogeneidad física y química, determinada en gran medida por su origen sedimentario carbonatado y su textura predominantemente granulosa (arenosa/franco arenoso), que les confiere alta porosidad y baja retención de agua. La densidad aparente refleja una estabilidad estacional casi total, alterada únicamente por un ligero aumento en la época seca debido a la pérdida de humedad, mientras que la naturaleza carbonatada del suelo otorga una fuerte estabilidad alcalina que impide variaciones significativas de pH entre sitios y temporadas, evidenciando solo un leve efecto de dilución por la acumulación de humedad que no altera la homogeneidad general del parámetro.

El régimen hídrico regula de forma determinante la dinámica de la materia orgánica y la conductividad eléctrica en la isla. Existe un efecto acumulativo por la precipitación de las épocas de lluvias y nortes, lo que provoca que el pico máximo de humedad en el suelo no ocurra a mitad de las lluvias, sino al final de la temporada de nortes e inicio de la estación seca. Las zonas del extremo este de la isla y los ecosistemas de manglar (Rebombeo, Playa Norte, Puntilla y Bahamita) registran los niveles de humedad más elevados debido a su topografía inundable y a la influencia directa de las mareas. La saturación prolongada tras las lluvias intensas y los nortes reduce la presencia de oxígeno en el suelo al comienzo de la época seca, afectando temporalmente la biogeoquímica. En este contexto, las inundaciones por lluvias y mareas generan ambientes anóxicos que ralentizan la descomposición de la materia orgánica, provocando un pico de acumulación superficial al inicio de la época seca, potenciado por la evaporación y la dinámica de percolación vertical. Asimismo, la conductividad eléctrica está regulada de forma natural por la acumulación de humedad y el flujo de mareas en la zona de manglar e inundables, pero se ve gravemente alterada por la urbanización en el extremo oeste, cuya perturbación reduce drásticamente la salinidad y perturba el contenido de nutrientes del suelo.

En cuanto al azufre, su dinámica en la isla está regulada por la evaporación estacional en secas y por la dinámica del manglar en la zona media, pero se encuentra estructuralmente limitada por la naturaleza arenosa del suelo, la falta de materia orgánica y la presencia de capas impermeables de carbonato de calcio que caracterizan a estos suelos alcalinos. La deposición de

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

sulfato en la Isla del Carmen está fuertemente impulsada por el transporte estacional de emisiones marinas provenientes de la Sonda de Campeche. Si bien la capacidad de amortiguamiento (alcalinidad) del suelo evita que el pH caiga drásticamente, esta no neutraliza los impactos ecológicos de fondo que genera la deposición continua de azufre. Por ello, la protección de sus ecosistemas de manglar requiere evaluar con precisión las cargas críticas mediante redes de monitoreo regionales estandarizadas que guíen la regulación local.

Finalmente, los ecosistemas evaluados presentan una fragilidad ecológica crítica de manera persistente a lo largo del año, alcanzando su punto más vulnerable durante la temporada de nortes, donde el deterioro por la actividad humana en el entorno circundante amenaza con acelerar su degradación futura. Se puede concluir que, en las tres temporadas, los suelos presentan un riesgo potencial alto de sufrir efectos adversos como resultado del depósito atmosférico de azufre, y que presentan una mayor vulnerabilidad, tal como se confirma con la clase de sensibilidad obtenida (1, "Sensible").

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Recomendación

De acuerdo al estudio realizado se recomienda que, aunque la acidificación del suelo no es actualmente un problema generalizado para los suelos en la Isla del Carmen, Campeche, puede presentar problemas de acidificación en un corto plazo, dependiendo de la gestión, manejo y conservación de cada lugar y de las características abióticas y bióticas, por lo tanto. se necesita una evaluación más profunda del riesgo, así como datos específicos del lugar para la deposición (especialmente de cationes básicos). También se recomienda hacer estudios multianuales que consideren un mayor número de puntos de muestreo como parcelas con otro tipo de vegetación con el fin de explorar el papel que juega la vegetación endémica, no solamente manglar que pueden mostrar la atenuación de los efectos de acidificación en esta región.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

16. Referencias citadas

Alanís, M.J. (Julio de 2015). Practica 10. Análisis de textura del suelo. Manual de practicas de ecología, manejo y aprovechamiento de los recursos naturales. https://www.uv.mx/pozarica/cba/files/2017/09/13-Manual-de-practicas-de-ecologia-manejo-y-aprovechamiento-de-los-recursos-naturales.pdf

Agencia Espacial Mexicana (s./f.) Observatorio Mexicano del Clima y la Composición Atmosférica,*aem.gob.mx.*https://www.aem.gob.mx/transparencia.aem/apertura-gub/transparenciaproactiva/investigacioncientifica/4.1_OMECCA_T4_firmado.pdf

Agrícola, T. (2014, marzo 12). www.tecnicoagricola.es. Tecnicoagricola.es; Técnico Agrícola. https://www.tecnicoagricola.es/author/admin/page/6/.

Aherne, J., & Watmough, S. A. (2006). Calculating Critical Loads of Acid Deposition for Forest Soils in Manitoba and Saskatchewan (MANISASK). Canadian Council of Ministers of the Environment.

Bazan, T. R. (1996). Determinación del azufre disponible en suelos. *Manual para Análisis Químico de Suelos, Plantas y Aguas.* https://es.scribd.com /doc/121876082/.

Balsano, J. M., Soret, A., Guevara, M., Martínez, F., & Gassó, S. (2014). Integrated assessment of air pollution using observations and modelling in Santa Cruz de Tenerife (Canary Islands). The Science of the total environment, 473-474, 576–588. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.12.062

Bernal, B., Mitsch, W.J., 2008. A comparison of soil carbon pools and profiles in wetlands in Costa Rica and Ohio. Ecológical Enginering 34, 311-323.

Belyazid, S., O. Westling, and H. Sverdrup. 2006. Modelling changes in forest soil chemistry at 16 Swedish coniferous forest sites following deposition reduction. Environmental Pollution 144:596–609.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Blake, GR & KH Hartge. 1986. Bulk Density. In: A Klute (ed). Methods of soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. Pp. 363-375. Am. Soc. Agron. and Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wisconsin, USA.

Bobbink, R., D. Boxman, E. Fremsted, G. Heil, A. Houdijk, and J. Roelofs. 1992. Critical loads for nitrogen eutrophication of terrestrial and wetland ecosystems based upon changes in vegetation and fauna. Pages 111–159 in Grennfelt and Thornelo¨ f, editors. Critical loads for nitrogen. Nord 41. Nordic Council of ministers, Copenhagen, Denmark.

Bobbink, R., Ashmore, M., Braun, S., Flückiger, W., & van den Wyngaert, I. J. J. (2003). Empirical nitrogen critical loads for natural and semi-natural ecosystems: 2002 update. In B. Achermann & R. Bobbink (Eds.), Empirical critical loads for nitrogen (pp. 43–170). Berne: Swiss Agency for Environment, Forest and Landscape SAEF

Bobbink, R., Hicks, K., Galloway, J., Spranger, T., Alkemade, R., Ashmore, M., Bustamante, M., Cinderby, S., Davidson, E., Dentener, F., Emmett, B., Erisman, J. W., Fenn, M., Gilliam, F., Nordin, A., Pardo, L., & De Vries, W. (2010). Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: A synthesis. Ecological Applications, 20, 30–59

Cerón-Breton, R.M; Cerón- Bretón, J. G; Muriel-Garcia, M; Rangel-Marron, M; Lara-Severino, R y Lopez-Jiménez. (Agosto de 2017). [*distribución espacio- temporal del deposito atmosferico de N y S en el valle de Orizaba*]. Coloquio de Investigación Multidiciplinaria. Revista CIM 2017 especial pdf. https://es.scribd.com/document/389423695/Revista-CIM-2017especial

Carballo, C; Cerón, R; Cerón, J; Bolón, S; García, A. Evaluación de la deposición atmosférica seca en Ciudad del Carmen, Campeche. Revista de Investigación del Instituto Tecnológico de Orizaba. Vol. 1. No. 1. octubre 2013. Pp.103-108.

Cerón, J.G. Cerón-Bretón; J. J. Guerra-Santos; y M. Muriel, Deposición atmosférica de metales traza en dos sitios costeros en Campeche, México. Revista Tecnociencia-UNACAR. Julio-diciembre 2007.

Cerón, J.G. Cerón, M. Muriel, and B. Cárdenas. Identification of ion sources in rainwater of a coastal site impacted by the gas and oil industry in the southeast of Mexico R.M. Global Nest the Int. Journal. Volumen 10. No. 1. 2008. pp. 92-100. Grecia.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

R. M. Cerón, J. G. Cerón, J. J. Guerra, E. López, E. Endañu, M. Ramírez, M. García, R. Sánchez & S. Mendoza. Effects of simulated acid rain on tropical trees of the coastal zone of Campeche, Mexico. WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol 126, © 2009 WIT Press, pp 259-270. doi:10.2495/CP090191.

R.M. Cerón, J.G. Cerón; J. Guerra; E. Núñez and M. Muriel. Measurement of trace elements in atmospheric precipitation in two coastal sites in Campeche, México. International Journal of Sustainable Developments & Planning Vol 5, No. 3 (2010) pp 282-298.

Cerón, B. J. G., Cerón, B. R. M., Rangel, M. M., Muriel., M., Cordova, Atl., y Estrella, C.A. (2011) Determination of carbon sequestrations rate in soil of a mangrove forest in Campeche, Mexico. WSEAS Transactions on Environment and Development. 7.54-64.

Cerón-Breton, J. G; Cerón-Breton, R. M; Cardenas-Gonzalez, B; Ortinez- Álvarez J. A.; Cruz-Chavez, E; Diaz-Morales, B; Carballo-Pat, C. G; Perez-Lopez, T; Reyes-Trujeque, J; Muriel-Garcia, M, and Guerra-Santos, J, J. On the dry deposition of ionic species at two National Parks located in the vicinity of power plants in Mexico. PP. 31-38. International Journal of Energy and Environment. Vol. 6. No. 1. 2012.

Cerón, R; Cerón, J; Aguilar, C; Montalvo, C; Carballo, C; Cárdenas, B; Ortinez, A; Cocom, M; Carrillo, J. Atmospheric dry deposition in the proximity of oil-fired power plants at Mexican Pacific Coast. Pp. 1228-1237. Journal of Environmental Protection. Vol. 3. 2012.

Cerón, R.M; Cerón, J.G; Carballo, C.G; Aguilar, C; Montalvo, C; Benítez, J; Villareal, Y; and Gómez, M. Chemical composition, fluxes and seasonal variation of acid Deposition in Carmen island, Campeche, Mexico. Journal of Environmental Protection. Volumen 4. No. 8A1. August 2013. Pp. 50-56. Scientific Research.

Cerón-Bretón R.M, Cerón-Bretón J.G, Aguilar-Ucán C, Ramírez-Lara E, Ortínez-Álvarez J. A, Montalvo-Romero C, and Carballo-Pat C.G. Wet Deposition Fluxes and related atmospheric chemistry at three sites in Mexico. Open Journal of Air Pollution. Vol 3. No. 1. Marzo 2014. Scientific Research Publishing.

J.G. Cerón-Bretón, R.M. Cerón-Bretón, M. Rangel-Marrón, C.G. Carballo-Pat, G.X. Villarreal-Sánchez and A.Y. Uresti-Gómez. Diurnal variation of BTX levels in ambient air of one urban site located at the southwest of Mexico City during two seasons in 2013. International Journal of Energy and Environment, NAUN Journals. Febrero 2014.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Determinaciones De La Textura Del Suelo Por El Método Del Hidrómetro De Bouyoucos Gratis *Ensayos*. (s/f). Buenastareas.com. Recuperado el 28 de junio de 2026, de https://www.buenastareas.com/materias/determinaciones-de-la-textura-del-suelo-por-el-metodo-del-hidrometro-de-bouyoucos/0

DOF. (2002b). Norma Oficial Mexicana NOM- 021- RECNAT- 2000. Diario Oficial de la Federación 31 de diciembre, México, D.F.

Duke, S.H. and Reisenaue, H.M. (1986) Roles and Requirements of Sulfur in Plant Nutrition. In: Tabatabai, M.A., Ed., Sulfur in Agriculture, Agronomy Series No. 27, American Society of Agronomy, Madison, 124-168.

Environment Canada 2004. Canadian Acid Deposition: Science Assessment. Environment Canada Meteorological Service of Canada. Issued on CD-ROM, 479pp.

Etchevers, J., Monreal, C, M., Hidalgo, C., Acosta, M., Padilla, J., López, R.M., 2005. Manual para la determinación de Carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción en laderas. Colegio de Postgraduados, México. 29 p.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (1976) Unidades de suelo. Mapa *mundial de suelos.* (Vol.1) 11-46. file:///C:/Users/Administrador/Desktop/FAO.pdf

Factores Influyentes en la Contaminación: (s.f.). Contaminación del suelo. https://elblogbrown.blogspot.com/2010/06/factores-influyentes-en-la.html

Fenn, M.E; and Poth, M.A. 2004. Monitoring nitrogen Deposition in throughfall using ion Exchange resin columns: A Field test in the San Bernardino Mountains. J. Environ. Qual, 33. pp. 2007-2014.

Galloway, J. N.; Dentener, F. J.; Capone, D. G.; Boyer, E. W.; Howarth, R. W.; Seitzinger, S. P.; Asner, G. P.; Cleveland, C. C.; Green, P. A.; Holland, E. A. et al. Nitrogen cycles: Past, present, and future. Biogeochemistry 2004, 70, 153–226.

García Montero, A. (2016), *Estimación del depósito atmosferico de nitrógeno y azufre en la región de Xicalango - Atasta usando muestreadores pasivos. México* [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma del Carmen]

Google Earth. (2020). Google Maps/Google Earth. Retrieved from https://www.google.com/earth/download/ge/agree.html

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Grossman, R.B., Reinsch, T.G., 2002. The solid phase: bulk density and linear extensibility. In: Methods of soil analysis, Part 4- Physical methods. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin. 201-228.

GOBIERNO DEL ESTADO DE CAMPECHE, Monografía del Municipio de Carmen, Primera edición 2001. Campeche, México, Secretaría de Desarrollo Social de Campeche, 57 p.

Heiri, O., Lotter, A. F. & Lemcke, G., 2001. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. Journal of paleolimnology, Volumen 25, pp. 101-110.

Hicks, W. K., Kuylenstierna, J. C. I., Owen, A., Dentener, F., Seip, H.-M., & Rodhe, H. (2008). Soil Sensitivity to Acidification in Asia: Status and Prospects. Ambio, 37(4), 295–303. http://www.jstor.org/stable/25547901.

Hornung M; K.R. Bull; M. Cresser; J Hall; S.J. Logan; P. Loveland; and C. Smith. 1995. An empirical map of critical loands of acidity for soils in Great Britain. Environ. Pollution. 90:301-310.

INEGI (Mapa Digital de México; gaia.inegi.org.mx/mdm6/) Instituto Nacional de Estadistica y Geografia. *Compendio de información geográfica municipal 2010.Carmen, Campeche.https://www.inegi.org.mx*

INE, National emissions inventory 2009, First Edition. SEMARNAT. México, D.F.

Instituto Nacional de Ecologia y Cambio Climatico. (diciembre de 2017) Estudios Elaborados por la Universidad Autónoma del Carmen, Campeche. *Analisis del estado del arte sobre deposito atmosferico en Mexico y su relación con el cambio climatico,*100-153.*https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/410254/INFORME_FINAL_EADAM_V3_INECC.pdf*

Jarecki, Marek & Lal, Rattan. (2005). Soil Organic Carbon Sequestration Rates in Two Long-Term No-Till Experiments in Ohio. Soil Science. 170(4): 280-291.

Jenkins, A., Coric, S., Reynolds, B., Curtis, C., and Renshaw, M.: Critical loads for soils and freshwaters; a comparison method at the Plynlimon catchments, Hydrol. Earth Syst. Sci., 1,729-741, doi: 10.5194/hess-1-729-1997, 1997.

Josipovic M, Annegarn HJ, Kneen MA, Pienaar JJ, Piketh SJ. Atmospheric dry and wet deposition of sulphur and nitrogen species and assessment of critical loads of acidic deposition exceedance in South Africa. S Afr J Sci. 2011; 107 (3/4), Art. #478, 10 pages.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Johan C. I. Kuylenstierna, Rodhe, H., Steve Cinderby, & Kevin Hicks. (2001). Acidification in Developing Countries: Ecosystem Sensitivity and the Critical Load Approach on a Global Scale. Ambio, 30(1), 20–28. http://www.jstor.org/stable/4315096

Khoder, M. I. (2002) Atmospheric Conversion of Sulfur Dioxide to Particulate Sulfate and Nitrogen Dioxide to Particulate Nitrate and Gaseous Nitric Acid in an Urban Area. Chemosphere, 49, 675-684. https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00391-0

Krupa, S. V., and Manning, W. j. 1988. Atmospheric ozone: Formation and effects on vegetation. Environ. Pollut. 50:101-137.

Krupa, S. V. (1999). Polución, Población y Plantas. México: The American Phytopathological Society.

La Manna, L; V Alonso; C Buduba; M Davel; C Puentes & J Irisarri. 2006. Contenido de materia orgánica del suelo en la Región Andino Patagónica: comparación entre métodos analíticos. Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta y Jujuy, Argentina. file:///C:/Users/Administrador/Desktop/MO_25_2_la_manna_179_188.pdf.

Lehmann, C. M. B., V. C. Bowersox, and S. M. Larson. 2005. Spatial and temporal trends of precipitation chemistry in the United States, 1985–2002. Environmental Pollution 135: 347– 361.

Materna, J. 1984. Impact of atmospheric pollution on natural ecosystems. Pages 397-416 in: Air Pollution and Plant Life. M. Treshow, ed. John Wiley & Sons, New York.

Mylavarapu, R. S. & Kennelley, D. E., 2002. Extension soil testing laboratory; Analytical procedures and training manual. Institute of food and agricultural Sciences, p. 28.

Mongeon. A.; Aherene, J. and Shaun A. Watmough: Impacts of sulphur and nitrogen deposition in western Canada. Steady-state critical loads of acidity for forest soils in the Georgia Basin, British Columbia, J. Limnol., 69(Suppl. 1): 193-200, 2010 - DOI: 10.32

Moreno, E., Guerrero, A., Gutiérrez, M. D., Ortiz, C. A., & Palma, D. J. (2002). Los manglares de Tabasco, una reserva natural de carbono. Madera y Bosques, 8(1), 115-128.

Nilsson, S.L. 1986. Critical deposition limits for forest soils. In. J. Nilsson, ed; Critical loands for sulphur and nitrogen. Report form a Nordic Working Group. Copenhagen: Nordic Council.151 p.

Nilsson, S.l; and Grennfelt P. (Eds). 1988. Critical loands for sulphur and nitrogen. NORD 1988/97. Nordic Council of Ministers. Denmark. 418 p.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Nilles, M. A., and B. E. Conley. 2001. Changes in the chemistry of precipitation in the United States, 1981–1998. Water, Air and Soil Pollution 130:409–414.

Norma Mexicana NMX-AA-74-1981. analisis de agua determinación del ion sulfato. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166149/nmx-aa-074-scfi-2014.pdf

Norma Oficial Mexicana-NOM-021-RENACT-2002, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreos y análisis.

Ovalle, C., Aronson, J., Del Pozo, A. & Avendaño, J., 1999. Restoration and rehabilitación of mixed espinales in central Chile: 10- Year report and appraisal. Instituto de Investigation Agropecuarias, Volumen 13, pp. 369-381.

Palma-López, D.J; Zavala-Cruz, J; Bautista-Zúñiga, F; Morales-Garduza, M.A; López-Castañeda, A; Shirma-Torres, E.D; Sánchez-Hernández, R., Peña-Peña, A.J. y Tinal-Ortiz, S. (diciembre de 2017). Clasificación y Cartografía de Suelos del Estado de Campeche, México. Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. Cárdenas, Tabasco. México 10(12) pp:71-78. AGROPRODUCTIVIDAD_10-12- 2017.pdf

Pardo, L. H. 2010. Aproaches for estimating critical loads of N and S deposition for forest ecosystems on U.S. Federal lands. General Technical Report NRS- 71. USDA Forest Service, Northern Research Station, Newtown Square, Pennsylvania, USA.

Pardo, L., Fenn, M. E., Goodale, C. L., Geiser, L. H., Driscoll, C. T., Allen, E. B., Baron, J. S., Bobbink, R., Bowman, W. D., Clark, C. M., Emmet, B., Gillian, F. S., Greaver, T. L., Hall, S. J., Lileskov, E. A., Liu, L., Lynch, J. A., Nadelhoffer, K. J., Perakis, S. S., Robin-Abbot, M. J., Stoddard, J. L., Weather, K. C., Dennis, R. L., 2011, Effects of nitrogen deposition and empirical nitrogen critical loads for ecoregions of the United States. Ecological Applications, Vol. 21, pp. 3049-3082.

Pérez-Suárez, M., Fenn, M. E., Cetina-Alcalá, V. M. y Alderete, A. (2008). The effects of canopy cover on throughfall and soil chemistry in two forest sites in the Mexico City air basin. Atmósfera, Vol. 21, pp. 83- 100.

Ponette, G., Torres, A.G., Weathers K.C., Curran L.M. 2010. Tropical land-cover change alters biogeochemical inputs to ecosystems in a Mexican montane landscape. Ecol. Applic. 20: 1820-1837. DOI:10.1890/09-1125.1. 96

Posch M, Hettelingh J-P, De Smet PAM (2001) Characterization of critical load exceedances in Europe. Water, Air and Soil Pollution 130: 1139-1144.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Posch, I; J.P. Hettelingh and J. Slotted (Eds). 2003. Manual for dynamic modeling of soil resources to atmospheric acid deposition. Report 259101012/2003. ICP M&M. Coordination Center for Effects. Netherlands Environmental Assessment Agency. Bilthoven, The Netherlands. 163 pp.

Posch, M., P.A.M. de Smet, J. – P. Hettelingh, and R.J. Downing, editors. 1995. Calculation and mapping of critical thresholds in Europe. Status Report 1995. RIVM Report Number 259101004. Coordination Center for Effects, National Institute for Public Health and the Environment, Bilthoven, The Netherlands. Hhttp://www.mnp.nl/cce/publ/.

Pinho, P., Thebald, M.R., Dias, T., Tang, Y.S., Cruz, C., Martins- Loucao, M. A., & Branquinho, C. (2012). Critical loads of nitrogen deposition and critical levels of atmospheric ammonia for semi- natural Mediterranean evergreen woodlands. Biogeosciences, 9(3), 1205-1215.

Quevedo, O., Sc, M., & Calderón, F. (2017). Distribución espacial del azufre en la atmósfera del estuario interior del Golfo de Guayaquil, a partir de muestreadores pasivos (Fenn y Poth. Org.bo. Recuperado el 27 de junio de 2026, de http://scielo.org.bo/pdf/ran/v8n3/v8n3_a12.pdf

Rodríguez, H.F. y Rodríguez, J.A. /2002). Métodos de análisis de suelo y plantas: criterio de interpretación. 1ª ed., Trillas. México, D.F. 196 p.

Reinds, G. J., Posch, M., De Vries, W., Slootweg, J., & Hettelingh, J. P. (2008). Critical loads of sulphur and nitrogen for terrestrial ecosystems in Europe and Northern Asia using different soil chemical criteria. Water, air, and soil pollution, 193(1-4), 269-287.

Rosell, R.A. & Gasparoni, J.C. & Lal, J.M.K.R. & Follett, Ronald & Stewart, B.A. (2001). Assessment Methods for Soil Carbon. Assessment Methods for Soil Carbon. 311-322. https://www.researchgate.net/publication/284089330_Assessment_Methods_for_Soil_Carbon.

Sánchez, V. (2016). Evaluación del depósito atmosférico de nitrógeno y azufre en la región de Córdoba-Orizaba. [Tesis]. Universidad Autónoma del Carmen.

Sepúlveda, C. (junio 2013). Acogida para Suelos Degradados Mediante Evaluación Multicriterio. Trilogía, Ciencia, Tecnología - Sociedad, 25(35): 87 – 103. https://bibliotecadigital.ciren.cl/server/api/core/bitstreams/917d38bc-527f-4885-96b3-e6494af9ce4d/content

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Sverdrup, H. & Warfvinge, P. (1988). Weathering of primary minerals in the natural soil environment in relation to a chemical weathering model. Water, Air Soil Pollut., 38, 387-408.

Smith, S. L., Holland, D.A. & Longley, P. A., 2005. Quantifying Analysis, 37 (2), pp.200-224.

Slootweg, J., M. Posch, and J.-P. Hettelingh, editors. 2007. Critical loands of nitrogen and dynamic modelling: CCE Progress Report 2007. MNP Report 500090001. Coordination Centre for Effects, National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), Bilthoven, The Netherlands.

Solís-Weiss, V., & Carreño, S. (1986). Estudio prospectivo de la macrofauna béntica asociada a las praderas de Thalassia testudinum en la Laguna de Términos, Campeche, México. In Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México (Vol. 13, pp. 201-216).

Task force on Mapping. 1996. Manual on mapping critical levels/loads and geographical areas where they are exceeded. UN/ECE Convention on Long- Range Transboundary Air Pollution. Federal Environment Agency.

Tejero Campos, B. (2017) *Diagnostico preliminar de la sensibilidad de los ecosistemas terrestres de Xicalango- Atasta a la acidez y al Deposito Atmosferico de Azufre.* [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma del Carmen].

Turchenek, L. W., Abboud, S., Tomas, C., Fessenden, R., & Holowaychuk., a. N. (1987). Effects of acid deposition on soils in alberta. Prepared for the Acid Deposition Research Program by the Alberta Research Council, Edmonton. (ADRP-B-05-87), 202.

Turchenek, L., & Abboud, S. (2001). Site-specific critical loads of acid deposition on soils in the Provost-Esther area, Alberta. Calgary, Alberta: Prep. for Science and Technology Branch, Environmental Sciences Division, Alberta Environment.

UBA (UmweltBundesAmt). 2004. Manual on methodologies and criteria for mapping critical levels/loands and geographical areas where they are exceeded. Federal Environmental Agency(UmweltBundesAmt),Berlin,Germany.http:/www.rivm.nl/en/themasites/icpmm/manual – and-downloads/manual-English/index.htmli.

UN/ECE. (1996). Manual on methodologies and criteria for mapping critical levels/loads and geographical areas where they are exceded. UN/ECE Convention on long-range

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

transboundary air pollution. Federal Environmental Agency (Umweltbundesamt). Texte 71/96. Berlín.

USDA. (2010). Soil Texture Calculator. United States Departament of Agriculture. (Disponible en http://soils.usda.gov/technical/aids/investigations/texture/. Consultado el: 18 de enero de 2010).

Zinke, P.J. 1980. Influence of chronic air pollution on mineral cycling in forests. Pages 88-99 in: Proc. Symp. Eff. Air Pollut. Mediterr. Temperate For. Ecosyst. U.S. Dep. Agric. For. Serv. Gen. Tech. Rep. PSW-43.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

17. Anexo

Clasificación mineralógica y cargas críticas de suelos de acuerdo a la clasificación de *Skokloster*

clase de sensibilidad	minerales dominantes	carga critica (kmol H^+ ha^{-1} $año^{-1}$)
1	*Cuarzo, rutilo, anatasa, caolinita, Gibbsite, ortoclasa*	<0.2
2	*Moscovita, plagioclasa, illita*	0.2-0.5
3	*Anfibol, clorita, biotita, epidota y glaucofana*	0.5-1.0
4	*Olivino, granatos, piroxenos, epidota*	1.0-2.0
5	*Carbonatos*	>2.0

Nilsson & Grennfelt (1988), Svedrup & Warfvinge (1988).

Asignación de Skokloster para la clase de material basado en la textura

clase de tamaño de partícula	clase de material de suelo
Arena, arena arcillosa, franco arenoso, (arena) franco limoso.	Clase 2
Margen de arcilla, franco arcilloso arenoso, franco limoso.	Clase 3
Arcilla, arcilla limosa, arcilla arenosa.	Clase 4

Hornung et al. (1995).

Clasificación final de las clases de sensibilidad

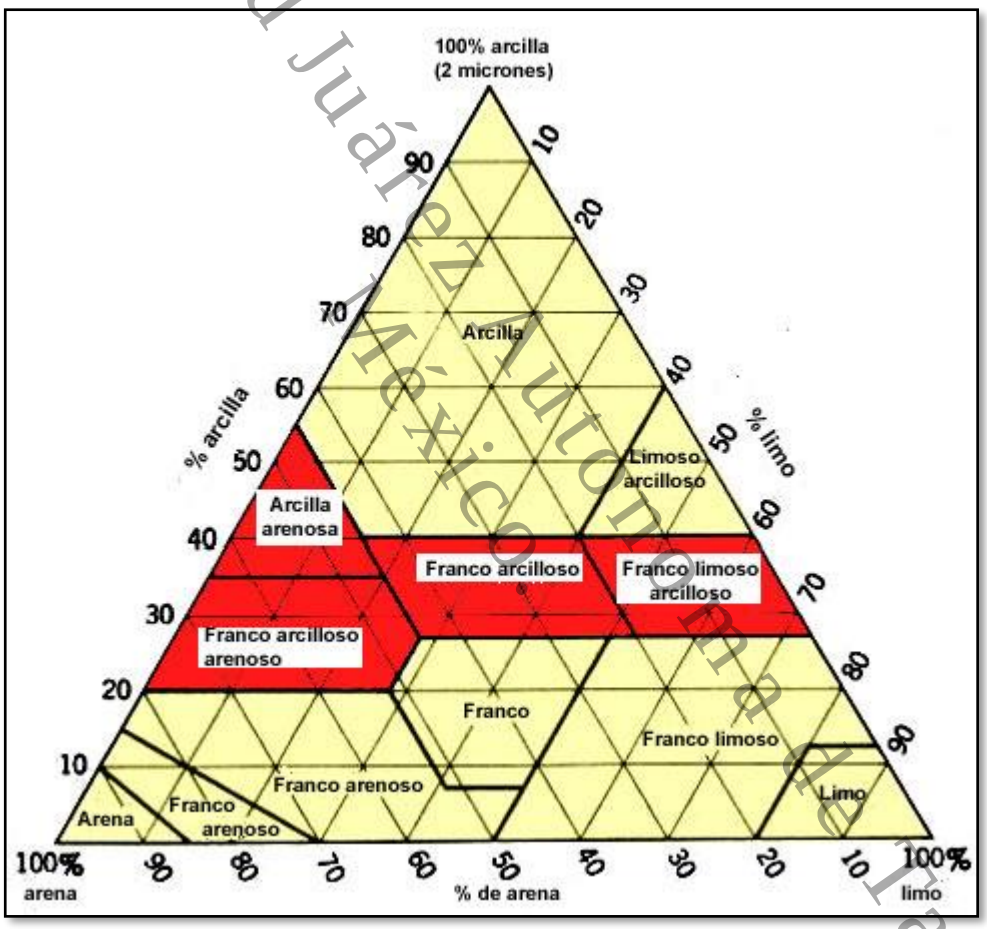
carga critica (kmol $ha^{-1}$$año^{-1}$)	clase de sensibilidad
$\leq$ 0.2	sensible
0.2-0.5	sensible
0.5-1	moderadamente sensible
>1.0	baja sensibilidad

(Turchenek & abbout, 2001).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Diagrama triangular de las clases texturales básicas del suelo según el tamaño de las partículas, de acuerdo con el USDA



Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Título de Tesis:	**ESTIMACIÓN DE CARGAS CRITICAS DE ACIDEZ Y AZUFRE, Y SUS EXCEDENCIAS EN SUELO EN LA ISLA DEL CARMEN, CAMPECHE, MÉXICO.**
Autora de la Tesis:	Biol. Guadalupe del Carmen Cruz Camacho
ORCID:	0009-0001-4229-9296
Resumen de la Tesis:	Un enfoque que permite estimar la deposición de contaminantes atmosféricos que pueden perjudicar un ecosistema dado es la determinación de las cargas críticas, que puede definirse como la entrada de un contaminante a niveles por debajo de los cuales no se espera que ocurran efectos ecológicos perjudiciales a largo plazo. Sin embargo, en países en desarrollo no se tiene disponible este tipo de información; y existe una necesidad imperante de proponer valores de carga críticas en ecosistemas valiosos como es el caso de los ecosistemas de manglar en Isla del Carmen. Esto permitirá evaluar su vulnerabilidad e identificar áreas sensibles con potencial de superar dichas cargas críticas, evaluar variaciones estacionales y anuales, así como también, patrones de distribución espacial y temporal. Con base en ello, se pueden proponer medidas de protección y conservación, a un mediano plazo, demostrar la efectividad de las políticas ambientales orientadas en materia de reducción de emisiones. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue estimar las cargas críticas de acidez y azufre y sus excedencias en suelos de la Isla del Carmen, Campeche, realizando dos programas de muestreo simultáneos tanto en suelo como en deposición atmosférica durante el periodo 2014 – 2015, abarcando tres estaciones climáticas: Secas, Lluvias y Nortes, en los 13 sitios distribuidos en la Isla del Carmen. Se estimaron algunas propiedades

	del suelo como Densidad Aparente, pH, Textura, Conductividad Eléctrica, Materia Orgánica, Carbono Orgánico, y Azufre. Aplicando la metodología de Skokloster utilizada en la Comunidad Europea se asignaron categorías de sensibilidad. De los 13 sitios estudiados, durante la temporada de Secas 13 sitios obtuvieron la clase sensibilidad de 1, correspondiendo a un ecosistema sensible. De igual manera, durante la temporada de Lluvias, los 13 sitios obtuvieron una clase de sensibilidad de 1 que corresponde a ecosistema sensible, mientras que para la temporada de Nortes, 11 sitios presentaron clase de sensibilidad de 1 y solo 2 sitios clase de sensibilidad de 2, ambas categorías correspondiendo a ecosistema sensible. Para las categorías de sensibilidad 1 y 2, presentan cargas críticas para la deposición de azufre (S) en un rango de 4.0079 a 8.015 kg S ha^{-1} $año^{-1}$. Las categorías de sensibilidad evidenciaron una variación estacional, con una mayor sensibilidad durante las épocas de Secas y Nortes. Esto concuerda con el tipo de fuentes (plataformas costa afuera) que influyen sobre la zona de estudio, en función de la meteorología prevaleciente durante dichas épocas del año. Se estableció un valor de referencia para acidez (≤0.2 – 0.5 Kmol H+ ha^{-1} $año^{-1}$), y se compararon los niveles actuales de concentración de iones hidronio en los suelos muestreados para determinar las excedencias; a partir de esto se concluye que no hubo excedencias en el caso de la acidez. Por otro lado, se cuantificaron las tasas actuales de depósito atmosférico de S (como sulfato) Utilizando colectores pasivos tipo Throughfall, los flujos de deposición de azufre (S) se encontraron en un rango de 2.08 a 31.59 kg S ha^{-1} $año^{-1}$. A partir de su comparación con las cargas críticas propuestas, se obtuvieron porcentajes de excedencia entre 11.72 y 86.89%, los cuales fueron categorizados y representados espacialmente mediante geomapas para identificar los puntos críticos de deposición de azufre en la zona estudiada. La información generada podrá ser utilizada como línea base para el

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

	establecimiento de políticas públicas a nivel local, orientadas a la protección y conservación de los ecosistemas de manglar en el área de estudio Así mismo, la información obtenida puede ser usada para generar indicadores ambientales, o servir de base para sustentar la modificación de leyes ya existentes y/o la promulgación de nuevas normatividades regionales para controlar o reducir las emisiones de contaminantes.
Palabras claves de la Tesis:	suelo, azufre, cargas críticas, deposición atmosférica, Ciudad del Carmen.
Referencias citadas:	El listado de las referencias de esta tesis, se encuentran de las páginas 120 a 129.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.