



CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS  
DEL NOROESTE, S.C.

---

Programa de Estudios de Posgrado

**ANÁLISIS ESPECTRALES DE INDICADORES DE  
ACUÍFEROS ASOCIADOS A ECOSISTEMAS DE  
ZONAS ÁRIDAS EN EL NOROESTE DE MÉXICO.**

**TESIS**

Que para obtener el grado de

**Doctor en Ciencias**

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

P r e s e n t a

**OMAR LLANES CÁRDENAS**

La Paz, Baja California Sur, Enero de 2012

## ACTA DE LIBERACION DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B. C. S., siendo las 13:00 horas del día 16 del Mes de Enero del 2012, se procedió por los abajo firmantes, miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

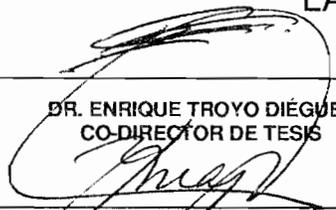
**"ANÁLISIS ESPECTRALES DE INDICADORES DE ACUÍFEROS ASOCIADOS A ECOSISTEMAS DE ZONAS ÁRIDAS EN EL NOROESTE DE MÉXICO."**

Presentada por el alumno: **Omar Llanes Cárdenas**

Aspirante al Grado de DOCTOR EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACION DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACION EN **AGRICULTURA SUSTENTABLE**

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

### LA COMISION REVISORA



DR. ENRIQUE TROYO DIÉGUEZ  
CO-DIRECTOR DE TESIS



DR. MARIANO NORZAGARAY CAMPOS  
CO-DIRECTOR DE TESIS

DR. YOLANDA MAYA DELGADO  
CO-TUTOR



DR. BERNARDO MURILLO AMADOR  
CO-TUTOR



DR. ALFREDO BELTRÁN MORALES  
CO-TUTOR

DR. ELISA JEFFERSON ZARAGOZA,  
DIRECTORA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

## **Análisis espectrales de indicadores de acuíferos asociados a ecosistemas de zonas áridas en el Noroeste de México.**

### **RESUMEN**

En el presente trabajo se estudiaron los indicadores ponderantes de la desertificación del Valle de Guasave o comúnmente conocido como “Corazón Agrícola de México”. El Valle es inminentemente agrícola, consta de una superficie aproximada de 3600 km<sup>2</sup> y se ubica en la región del Noroeste de México. La Cuenca a la que pertenece es a la Región Hidrológica RH10-SINALOA; colinda al Norte con la Sierra Madre Occidental y al Sur con el Golfo de California. El afluente y acuífero principales son el Río Sinaloa y el acuífero de Sinaloa. En el acuífero de Sinaloa descargan tres cuerpos hídricos: arroyo de Cabrera (20 a 25 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>), arroyo de Ocoroni (25 a 35 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) y arroyo San Rafael (15.2 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>). Existe la sobreexplotación de los recursos naturales (agua y suelo), por tal, es vulnerable a la desertificación, ante este escenario los objetivos fueron: 1) Aplicar y validar un método que defina las variables físicas del suelo y agua; y de mayor ponderación en los procesos que integran la desertificación en suelos, y sus aplicaciones agrícolas en una zona semiárida, 2) Establecer y aplicar una metodología que defina las condiciones de interrelación entre el suelo, agua, ambiente geográfico y la desertificación, e identificar la potencia de parámetros que la propicien y la disminuyan y 3) Utilizar los resultados obtenidos para definir las interrelaciones entre variables en función del comportamiento específico del fenómeno de desertificación y proponer metodologías de remediación y prevención. Mediante una colecta de 198 muestras de suelo y 198 mediciones del Campo Magnético Terrestre (CMT) se obtuvieron indicadores de suelo tales como: textura, materia orgánica, pH, profundidad del basamento geológico, densidad aparente, densidad real, porosidad, erosionabilidad (K) y Longitud y Grado de la pendiente del terreno (LS). Con datos climatológicos históricos del período 1964-2009 se obtuvieron los indicadores ambientales tales como: Precipitación pluvial promedio anual (P), Temperatura media (T), Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), Evapotranspiración Potencial (ETP), Erosividad de la lluvia (R), Ordenación de los cultivos (C), Erosión Hídrica Potencial (EHP), Erosión

eólica (EE), Índice de Aridez (IA) y Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero (V). Mediante 20 encuestas aplicadas a expertos y datos en la bibliografía se obtuvieron datos de Suelo, Ambiente y aspectos socioeconómicos. Se obtuvo la integración de los indicadores del suelo (ISD), del Ambiente (IAD) y Socioeconómicos (ISED) para la desertificación, toda la información se clasificó e integró para aplicar el análisis espectral y conocer la desertificación ocasionada por todos los indicadores en conjunto (mapa de integración de ISD, IAD y ISED). Los resultados demuestran que el Valle es vulnerable a la desertificación, ya que los suelos presentan una textura con características arcillo-arenosas con una escasa materia orgánica (0.66 % en promedio) y una Erosión Hídrica Potencial que varía de 10 a 50 ton ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> misma que se presenta en el 14.01 % del área preferentemente en la parte serrana y central del Valle, debido principalmente al retribajamiento agrícola. La problemática se incentiva por lo somero de las aguas subterráneas (0.1 a 9.2 m), altos valores de evapotranspiración potencial promedio anual 779.86 mm año<sup>-1</sup> ocasionada por la alta temperatura máxima promedio anual (37.06 °C) y la no balanceada precipitación promedio anual (481.38 mm año<sup>-1</sup>), poniendo en entredicho la sustentabilidad agrícola del Valle. El ISED fue ponderante a la desertificación con un valor promedio de 420.3 unidades siguiendo el IAD con 412 unidades y el ISD fue el menos ponderante a dicho proceso con 125.36 unidades. Los resultados del Grado de Desertificación (GD) producto del análisis espectral muestran que éste varió de 1 a 5. Los resultados de mayor Grado de Desertificación se presentaron en la parte costera con un GD de 5 y 4 con una intensidad muy alta y alta respectivamente correspondientes a 64 celdas y un 42.66 % del área total aproximadamente, en la parte central se manifiesta un GD de 3 y 2 con una intensidad media baja y media alta respectivamente con 53 celdas y un 35.33 % del área y la parte serrana localizada al norte de la zona de estudio es la que se ve menos afectada por este proceso con un GD de 1 con una intensidad baja correspondiente a 33 celdas y un 22 % del área. La importancia de este trabajo radica en plantear una metodología alternativa para el cálculo del fenómeno de desertificación aplicable a cualquier región del mundo.

Palabras clave: Desertificación, análisis espectral, ponderante.

## **Spectral analysis of indicators of aquifers associated to ecosystems of arid zones in the Northwest of Mexico.**

### **ABSTRACT**

In the present work they studied the weighted indicators of the desertification of the Valley of Guasave or commonly known like “Agricultural Heart Mexico”. The Valley is imminently agricultural, consists of an approximated surface of 3600 km<sup>2</sup> and it is located in the region of the Northwest of Mexico. The River basin to which it belongs is to Hydrologic Region RH10-SINALOA; it is contiguous to North with the Mountain range and to the South with the Gulf of California. The main affluent and aquifer is the River of Sinaloa and the aquifer of Sinaloa. In the aquifer of Sinaloa they unload three hydric bodies: stream of Cabrera (20 to 25 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>), stream of Ocoroni (25 to 35 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>) and stream San Rafael (15.2 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>). The over-exploitation exists of the natural resources (water and soil), by so, is vulnerable to desertification, by so, the objectives were: 1) To apply and to validate a method that defines the physical variables of the soil and water; and of greater consideration in the processes that integrate the desertification in soils, and their agricultural applications in a semi-arid zone, 2) To establish and to apply a methodology that defines the conditions of interrelation between the ground, water, geographic atmosphere and the desertification, and to identify the power of parameters cause that it and diminish and 3) To use the obtained results to define the interrelations between variables based on the specific behavior of the desertification phenomenon and to propose methodologies of remediación and prevention. By means of a collection of 198 samples of soil and 198 measurements of the Earth's magnetic field (CMT) soil indicators were obtained such as: texture, organic matter, pH, depth of the geologic plinth, apparent density, real density, porosity, erosionability (k) and Length and Degree of the slope of the land (LS). With historical climatologic data of period 1964-2009 the environmental indicators were obtained such as: Pluvial precipitation annual average (p), average Temperature (t), Evapotranspiration of reference (ET<sub>o</sub>), Potential Evapotranspiration (ETP), Erosivity of rain (r), Arrangement of the cultures (c), Potential Hydric Erosion (EHP), Aeolian Erosion

(EE), Index of Aridez (IA) and Vulnerability to the contamination of aquifer (v). By means of 20 applied surveys to experts and data in the bibliography were obtained, data of soils Atmosphere and socioeconomic aspects. The integration of the indicators of the soil was obtained (ISD), of Atmosphere (IAD) and Socioeconomics (ISED) for the desertification, all the information was classified and integrated to apply the spectral analysis and to altogether know the desertification caused by all the indicators (map of integration of ISD, IAD and ISED). The results demonstrate that the Valley is vulnerable to the desertification, since the soils present a texture with clay-sandy characteristics with a little organic matter (0.66% in average) and Potential Hydric Erosion that varies from 10 to 50 ton  $\text{ha}^{-1} \text{year}^{-1}$  that appears in 14.01% of the area preferably in the mountain and central part of the Valley, which had mainly to the agricultural over-exploitation. The problematic one is stimulated by the little deep of underground waters (0.1 to 9.2 ms), high values of potential evapotranspiration annual average 779,86 mm  $\text{year}^{-1}$  caused by the high temperature maximum annual average (37.06 °C) and not balanced precipitation annual average (481.38 mm  $\text{year}^{-1}$ ), putting in prohibition the agricultural sustainable of the Valley. The ISED was weighted to desertification with a value average of 420.3 units following the IAD with 412 units and the ISD was less weighted to this process with 125.36 units. The results of the Degree of Desertificación (GD) product of the spectral analysis show that this one varied from 1 to 5. The results of greater Degree of desertification appeared in the coastal part with a GD of 5 and 4 with a very highly and high intensity respectively corresponding to 64 cells and a 42.66 % of the total area approximately, in the central part a GD of 3 is pronounced and 2 with an intensity average discharge and average low respectively with 53 cells and a 35.33 % of the area and the mountain part located to the north of the zone of study is the one that is seen less affected by this process with a GD of 1 with a low intensity corresponding to 33 cells and a 22 % of the area. The importance of this work is in raising an alternative methodology for the calculation of the phenomenon of desertification applicable to any region of the world.

Key words: desertification, spectral analysis, weighted.

## **DEDICATORIA**

**DEDICO ESTA TESIS A MIS PADRES, FAMILIA Y AL TODO PODEROSO.**

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente doy gracias a Dios, que me llevó hasta este momento tan gratificante. A él, que me dio la tenacidad, la esperanza, la constancia y la sapiencia requerida en los momentos difíciles, y lograr así culminar tan importante tarea en mi vida.

No podría faltar el profundo agradecimiento a mis padres: Rigoberto Llanes Valdez y Bertha Alicia Cárdenas Borbóa, que me proporcionaron la confianza necesaria en los momentos difíciles, consejos en situaciones agobiantes y por supuesto determinación y perseverancia en instantes de flaqueza.

De igual manera agradezco a mis hermanos: Rigoberto Llanes Cárdenas, Karla Guadalupe Llanes Cárdenas y Efrén Llanes Cárdenas, ya que sus consejos constantes tomaron especial cauce en la meta trazada, así como también, sus sinceras palabras de aliento provocaron en mí un gran sentido de bienestar y superación.

Doy un profundo y sincero agradecimiento al Dr. Mariano Norzagaray Campos y al Dr. Enrique Troyo Diéguez, por haberme guiado con sus amplios conocimientos, debo a ellos agradecer también por compartir momentos inolvidables en su trabajo, intimidad y más actividades; que me permitieron adquirir gran experiencia en todos los sentidos, todo esto pues, no tiene precio; no me queda mas que decir: muchas gracias.

También agradezco al CIBNOR por haberme abierto las puertas para llevar a cabo este trabajo de investigación y al CIIDIR-IPN-SINALOA, por haberme proporcionado las mejores condiciones para realizar esta tesis y por haber prestado las instalaciones donde se llevaron a cabo las investigaciones de laboratorio de suelos y prácticas de campo.

De igual manera estoy muy agradecido con el Consejo de Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por haber brindado el apoyo económico por concepto de beca con número (CVU/becario): 237503/213323 para poder subsidiar mis gastos en el tiempo de estudios de mi doctorado.

No podrían faltar mis agradecimientos a los maestros del CIBNOR y en especial a mis hermanos: Efrén Llanes Cárdenas y Rigoberto Llanes Cárdenas quienes formaron parte fundamental en el monitoreo de suelos en el Valle de Guasave, Sinaloa.

A mis amigos y compañeros de estudios, por su inapreciable y desinteresada compañía, así como también, por haber tenido la confianza y buena intención de ayuda al momento de incertidumbre y errores y así obtener pues el mejoramiento tanto académico como moral.

A todos aquellos que dejo de mencionar y que sin embargo tuvieron algo que ver en la realización de esta tesis; muchas gracias.

Gracias a todos!!!!!!!!!!!!!!

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>RESUMEN.....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>v</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO.....</b>	<b>vii</b>
<b>GLOSARIO DE ABREVIATURAS.....</b>	<b>xii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>xiv</b>
<b>LISTA DE GRÁFICAS.....</b>	<b>xvii</b>
<b>LISTA DE TABLAS.....</b>	<b>xviii</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. ANTECEDENTES.....</b>	<b>4</b>
<b>3. JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>10</b>
<b>4. OBJETIVOS.....</b>	<b>12</b>
4.1 GENERAL.....	12
4.2 ESPECÍFICOS.....	12
<b>5. HIPÓTESIS.....</b>	<b>12</b>
<b>6. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>13</b>
6.1 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	13
6.2 INDICADORES DE SUELOS.....	14
6.2.1 DETERMINACIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE TOTAL (CMT).....	14
6.2.2 PROFUNDIDAD DEL BASAMENTO GEOLÓGICO.....	15
6.2.3 DENSIDAD APARENTE ( $\rho_a$ ).....	16
6.2.4 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD REAL ( $\rho_r$ ) DE LOS SUELOS.....	16
6.2.5 DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD ( $\emptyset$ ) EN EL SUELO.....	17

6.2.6	DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DEL IÓN HIDRÓGENO (pH).....	17
6.2.7	DETERMINACIÓN DE LA TEXTURA (T).....	18
6.2.8	DETERMINACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA (M.O.) EN EL SUELO.....	20
6.2.9	FACTOR DE EROSIONABILIDAD DEL SUELO (K)....	20
6.2.10	FACTOR DE LONGITUD Y GRADO DE PENDIENTE DEL TERRENO (LS).....	20
6.3	INDICADORES AMBIENTALES.....	21
6.3.1	PRECIPITACIÓN PLUVIAL PROMEDIO ANUAL (P)..	21
6.3.2	TEMPERATURA MEDIA (T).....	22
6.3.3	EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ET <sub>o</sub> ) (MÉTODO DE BLANEY-CRIDDLEY, 1950).....	22
6.3.4	EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ET <sub>o</sub> ) (MÉTODO DE HARGREAVES Y SAMANI, 1985).....	23
6.3.5	EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL PROMEDIO ANUAL (ETP).....	23
6.3.6	FACTOR DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA (R).....	24
6.3.7	FACTOR DE ORDENACIÓN DE LOS CULTIVOS (C)...	25
6.3.8	EROSIÓN HÍDRICA POTENCIAL (EHP).....	25
6.3.9	EROSIÓN EÓLICA (EE).....	26
6.3.10	ÍNDICE DE ARIDEZ DE MARTONNE.....	26
6.3.11	ÍNDICE DE ARIDEZ DE J. DANTIN CERECEDA Y A. REVENGA CARBONELL.....	27
6.3.12	ÍNDICE DE HUMEDAD PROMEDIO ANUAL DEL SUELO (H <sub>o</sub> ).....	28
6.3.13	VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO.....	29
6.4	INDICADORES SOCIOECONÓMICOS.....	30

6.4.1	DETERMINACIÓN DE INDICADORES SOCIOECONÓMICOS.....	30
6.5	CONSTRUCCIÓN DEL ESCENARIO EXPLORATORIO DEFINIDO POR $\eta$ -VARIABLES.....	31
6.6	INTEGRACIÓN DE LOS INDICADORES DEL SUELO (IDS), AMBIENTE (IDA) Y SOCIOECONOMÍA PARA LA DESERTIFICACIÓN (IDS).....	32
6.7	ANÁLISIS ESPECTRAL.....	33
6.8	GRADO DE DESERTIFICACIÓN (GD).....	37
6.9	PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	38
<b>7</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>39</b>
7.1	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL MONITOREO DE SUELOS... ..	39
7.2	INDICADORES DEL SUELO.....	39
7.2.1	VARIACIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE.....	39
7.2.2	REDUCCIÓN AL POLO DEL CMT.....	40
7.2.3	PROFUNDIDAD DEL BASAMENTO GEOLÓGICO....	41
7.2.4	DENSIDAD APARENTE DEL SUELO ( $\rho_a$ ).....	43
7.2.5	POROSIDAD ( $\emptyset$ ).....	43
7.2.6	POTENCIAL DEL IÓN HIDRÓGENO (pH).....	44
7.2.7	TEXTURA (T).....	45
7.2.8	MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO (M.O).....	47
7.2.9	FACTOR DE EROSIONABILIDAD DEL SUELO (K).....	47
7.2.10	FACTOR DE LONGITUD Y GRADO DE LA PENDIENTE (LS).....	49
7.2.11	INTEGRACIÓN DE LOS INDICADORES DEL SUELO PARA LA DESERTIFICACIÓN (ISD).....	50
7.3	INDICADORES AMBIENTALES.....	51
7.3.1	PRECIPITACIÓN PLUVIAL PROMEDIO (P).....	51
7.3.2	TEMPERATURA MEDIA (T).....	52
7.3.3	EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA	

	(MÉTODO DE BLANEY-CRIDDLEY, 1950).....	54
7.3.4	EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (MÉTODO DE HARGREAVES Y SAMANI, 1985).....	56
7.3.5	EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL PROMEDIO ANUAL (ETP).....	58
7.3.6	FACTOR DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA (R).....	60
7.3.7	FACTOR DE ORDENACIÓN DE LOS CULTIVOS (C)...	61
7.3.8	EROSIÓN HÍDRICA POTENCIAL (EHP).....	63
7.3.9	EROSIÓN EÓLICA (EE).....	64
7.3.10	ÍNDICE DE ARIDEZ DE MARTONNE.....	65
7.3.11	ÍNDICE DE ARIDEZ DE DANTIN CERECEDA.....	66
7.3.12	ÍNDICE DE HUMEDAD PROMEDIO ANUAL DEL SUELO.....	67
7.3.13	CARGA HIDRÁULICA (H) Y VARIACIONES DEL NIVEL FREÁTICO (Nf).....	68
7.3.14	VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO.....	69
7.3.15	INTEGRACIÓN DE LOS INDICADORES AMBIENTALES PARA LA DESERTIFICACIÓN (IAD).....	71
7.4	INDICADORES SOCIOECONÓMICOS.....	72
7.4.1	DETERMINACIÓN DE LOS INDICADORES SOCIOECONÓMICOS.....	72
7.4.2	INTEGRACIÓN DE LOS INDICADORES SOCIOECONÓMICOS PARA LA DESERTIFICACIÓN (ISED).....	73
7.5	INTEGRACIÓN DE LOS INDICADORES DEL SUELO (ISD), AMBIENTE (IAD) Y SOCIOECONOMÍA (ISED) PARA LA DESERTIFICACIÓN.....	74
7.6	SENSIBILIDAD A LA DESERTIFICACIÓN.....	75
7.7	ANÁLISIS ESPECTRAL.....	77

7.8	GRADO DE DESERTIFICACIÓN.....	78
7.9	PROPUESTAS DE MITIGACIÓN Y REMEDIACIÓN.....	79
7.9.1	SUELOS Y AGUA SUBTERRANEA.....	79
7.9.1.1	SEPARACIÓN DE CONTAMINANTES.....	80
7.9.1.2	CONTENCIÓN.....	80
7.9.1.3	TRATAMIENTO.....	81
7.9.2	AMBIENTE.....	82
7.9.3	SOCIOECONOMÍA.....	82
7.9.4	IMPORTANCIA DE LOS ANÁLISIS ESPECTRALES EN EL VALLE DE GUASAVE.....	83
<b>8</b>	<b>DISCUSIÓN.....</b>	<b>84</b>
<b>9</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>90</b>
<b>10</b>	<b>LITERATURA CITADA.....</b>	<b>91</b>
<b>11</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>103</b>

## GLOSARIO DE ABREVIATURAS

DELPHIS.- Herramienta que sirve para determinar la desertificación y vulnerabilidad, pues pondera las variables y las ordena según su afectación ambiental en el sistema.

CMT.- Campo magnético terrestre

$\rho_a$ .- Densidad aparente del suelo

$\rho_r$ .- Densidad real del suelo

$\phi$ .- Porosidad del suelo

pH.- Potencial del ión hidrógeno

T.- Textura del suelo

M.O.- Materia orgánica del suelo

K.- Erosionabilidad del suelo

LS.- Longitud y grado de la pendiente

C.- Cobertura del suelo

P.- Precipitación promedio anual

T.- Temperatura media

ET<sub>o</sub>.- Evapotranspiración de referencia

ETP.- Evapotranspiración potencial

EHP.- Erosión hídrica potencial

EE.- Erosión eólica

Ho.- Índice de humedad promedio anual del suelo

ID.- Índice DRASTIC

P.- Peso relativo

D.- Nivel freático

R.- Recarga neta

A.- Material del acuífero

S.- Tipo de suelo

T.- Pendiente del terreno

I.- Impacto de la zona no saturada

C.- Conductividad hidráulica

DpDi, RpRi, ApAi, SpSi, TpTi, IpIi y CpCi = Productos del peso relativo por el Impacto ocasionado en el acuífero a causa de los factores D, R, A, S, T, I, C.

SIG.- Sistema de información geográfica

h.- Cota de la superficie del terreno

H.- Carga hidráulica

Vi.- Vulnerabilidad insignificante

Vmb.- Vulnerabilidad muy baja

Vb.- Vulnerabilidad baja

Vm.- Vulnerabilidad moderada

Va.- Vulnerabilidad alta

Vma.- Vulnerabilidad muy alta

Ve.- Vulnerabilidad extrema

H (r,  $\theta$ ).- Espectro de potencia

H (r).- Espectro radial

ISD- Indicadores de suelos para la desertificación

IAD- Indicadores ambientales para la desertificación

ISED- Indicadores socioeconómicos para la desertificación

UTM.- Universal transversal mercator

nt.- Nano tesla

IGRF.- International geomagnetic reference field

Nf.- Nivel freático

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.- Localización de la zona de estudio (Norzagaray 2004).....	13
Figura 2.- Levantamiento magnético en el área de estudio.....	15
Figura 3. Diagrama de flujo para la determinación del parámetro de textura del suelo por el método de Bouyoucos (1936).....	18
Figura 4. Triángulo de texturas (U.S.D.A, 1981).....	19
Figura 5.- Localización de las estaciones meteorológicas en el área de estudio (UTM).....	21
Figura 6.- Representación espacial del muestreo de suelos en el Valle de Guasave, Sinaloa, México (UTM).....	39
Figura 7.- Representación espacial del campo magnético terrestre total sin reducción al polo en el Valle de Guasave, Sinaloa, México (nt).....	40
Figura 8.- Geoposición del nodo para correr el software de reducción al polo en el Valle de Guasave, Sinaloa, México (UTM).....	41
Figura 9 (A y B).- CMT a 2-D y 3-D respectivamente con su respectiva reducción al polo para el valle de Guasave, Sinaloa (nt).....	42
Figura 10.- Variación espacial de la densidad aparente en el Valle de Guasave, Sinaloa, México ( $\text{gr cm}^{-3}$ ).....	43
Figura 11.- Porosidad en suelos del Valle de Guasave, Sinaloa, México (%)...	44
Figura 12.- Distribución espacial del pH en suelos del Valle de Guasave, Sinaloa, México (Adimensional).....	45
Figura 13. Variación espacial de la textura con técnica de Bouyoucos para el Valle de Guasave, Sinaloa, México (Adimensional). 1) arcilla, 2) arcilla arenosa, 3) arcilla limosa, 4) migajon arcillo-arenoso, 5) migajon arcilloso, 6) migajon arcillo-limoso, 7) migajon arenoso, 8) franco, 9) migajon limoso, 10) limo y 11) arena.....	46
Figura 14.- Materia orgánica en suelos del Valle de Guasave, Sinaloa, México (%).....	47
Figura 15.- Erosionabilidad del suelo en el Valle de Guasave (Adimensional)..	48

Figura 16.- Factor de longitud y grado de pendiente (Adimensional).....	49
Figura 17.- Integración de los indicadores del suelo para la desertificación (IDS) (Adimensional).....	50
Figura 18.- Precipitación promedio anual en el período 1964-2009 en el Valle de Guasave (mm) (CONAGUA, 2009).....	52
Figura 19.- Temperatura promedio anual en el período 1964-2009 en el Valle de Guasave (°C) (CONAGUA, 2009).....	54
Figura 20.- Evapotranspiración de referencia promedio anual por el método de Blanney-Criddle, 1950 en el período 1964-2009 (mm día <sup>-1</sup> ).....	56
Figura 21.- Evapotranspiración de referencia promedio anual en el período 1964-2009 en el Valle de Guasave (mm día <sup>-1</sup> ) (CONAGUA, 1964- 2009).....	58
Figura 22.- Evapotranspiración potencial promedio en el Valle de Guasave (mm mes <sup>-1</sup> ) (CONAGUA, 1964-2009).....	60
Figura 23.- Erosividad de la lluvia en el Valle de Guasave (cm <sup>2</sup> h <sup>-1</sup> ).....	61
Figura 24.- Factor de ordenación de los cultivos (Adimensional).....	62
Figura 25.- Erosión hídrica potencial (t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ).....	63
Figura 26.- Erosión eólica para el Valle de Guasave (t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ).....	64
Figura 27.- Índice de aridez de Martonne para el Valle de Guasave (Adimensional).....	65
Figura 28.- Índice de aridez de Dantin Cereceda (Adimensional).....	66
Figura 29.- Índice de humedad promedio anual del suelo (Adimensional)...	67
Figura 30. Porcentaje de intervalos de variación del nivel freático (Nf), la altura del terreno (h) y la carga hidráulica (H) (A) y comparativos morfológicos entre la altura de la superficie del terreno (msnm), profundidad del nivel freático (m) y la carga hidráulica (B) (msnm) del acuífero del Río Sinaloa (Norzagaray, 2009). ....	68
Figura 31. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero del Río Sinaloa (Llanes, 2009) (adimensional).....	70

Figura 32. Variación del índice DRASTIC (A) (adimensional) y dirección del flujo subterráneo (B) (Norzagaray, 2009).....	71
Figura 33. Integración de los Indicadores Ambientales para la desertificación (IAD) (Adimensional).....	72
Figura 34.- Integración de todos los indicadores (ISD, IDA y ISED) para la desertificación en el Valle de Guasave (Adimensional).....	75
Figura 35.- Sensibilidad a la desertificación en el Valle de Guasave (Adimensional).....	76
Figura 36.- Espectros de potencia y radiales donde intervienen: Continuidad (C), Resolución (R), Amplitud (A) y el grado de certificación en el Valle (GD).....	77
Figura 37.- Grado de Desertificación del Valle de Guasave (Adimensional).	78

**LISTA DE GRÁFICAS**

Gráfica 1.- Precipitación pluvial promedio mensual en el período 1964-2009 (mm). .....	51
Gráfica 2.- Temperatura promedio mensual en el período de 1964-2009 (°C)..	53
Gráfica 3.- Evapotranspiración de referencia promedio mensual (mm día <sup>-1</sup> )...	55
Gráfica 4.- Evapotranspiración de referencia promedio (mm día <sup>-1</sup> ).....	57
Gráfica 5.- Evapotranspiración potencial promedio anual (mm año <sup>-1</sup> ) (CONAGUA, 1964-2009).....	59

**LISTA DE TABLAS**

Tabla I.- Índice de aridez de Martonne.....	27
Tabla II.- Índice de aridez de Dantin Cereceda.....	28
Tabla III.- Sensibilidad a la desertificación en el Valle de Guasave.....	33
Tabla IV.- Valores de los factores R, K, LS, C y EHP.....	64
Tabla V.- Resultados de las encuestas para aplicar el método DELPHIS para IDS, IDA y IDSE.....	73
Tabla VI.- Clasificación del Grado de la Desertificación.....	79

## 1 INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas ha cambiado la percepción sobre los recursos naturales, la antigua percepción de la abundancia ha sido reemplazada por las pruebas de su escasez, y se nota especialmente en regiones áridas que están sufriendo innumerables procesos de degradación. Los impactos económicos de estas tendencias se observan en las zonas más pobladas del mundo, donde los habitantes han sido expulsados de sus territorios debido a la baja productividad de los suelos, porque impide la obtención de la alimentación en un futuro inmediato. Lo anterior, acompañado en ciertos casos por cuadros de contaminación, sobreexplotación de las fuentes de agua y/o pérdida de recursos vivos animales y vegetales (Santibañez, 1999).

Los primeros síntomas de la degradación de los ecosistemas se relacionan con el decremento de sus funciones ambientales, y es así como comienzan a bajar los rendimientos de la obtención de agua limpia, la continuidad de las cadenas tróficas, la integridad del paisaje y la capacidad de respirar aire puro, indicador que constituye un síntoma temprano de perturbaciones asociadas a la degradación. Los efectos se pueden percibir a veces a gran distancia y evaluar estos cambios, así como dimensionar los impactos de estas perturbaciones en la actividad humana son tareas extremadamente difíciles (Santibañez y De La Fuente, 1998). Muchos de los cambios o indicadores se pueden medir con métodos numéricos, que describen la intensidad o la gravedad de tales fenómenos y la amenaza que representan ante la integridad de los sistemas naturales y humanos. A pesar de estas dificultades es indudable la necesidad de ayudar a establecer la verdadera dimensión de la degradación de la tierra o desertificación y traducir el problema de una manera comprensible en el que las autoridades y gobiernos tomen cartas en el asunto y estén informados de la verdadera situación que aqueja a nuestro planeta (Santibañez *et al.*, 1999).

Los suelos susceptibles de ser afectados por la desertificación comprenden las regiones áridas, semiáridas y subhúmedas secas, más no las regiones polares e hiperáridas (UNCCD/PNUMA, 1995). Por ello, es importante identificar su problemática en cuanto a su sustentabilidad a la desertificación. Este problema es causado por la variabilidad climática como las sequías recurrentes y las sobreexplotaciones causadas por

actividades humanas: prácticas agrícolas inadecuadas, el sobrepastoreo, los procesos de urbanización (cambio de uso de suelo), la expansión de la frontera agropecuaria, el mal manejo del recurso hídrico que favorece la acumulación del agua/lluvia y la intrusión salina en el caso de aguas subterráneas y la salinización de los suelos. Esta desertificación ocurre porque los ecosistemas de tierras secas son sumamente vulnerables a la sobreexplotación y el aprovechamiento inadecuado de la tierra y el agua. Según Vogel y Smith (2002), la degradación en tierras secas, es debido a la pobreza, la inestabilidad política, la deforestación, el pastoreo excesivo y las prácticas deficientes de riego que reducen la productividad de la tierra y contribuyen al aumento de la pobreza.

Las tierras secas se extienden por más de un tercio de la superficie de la Tierra. Alrededor del 70 % de los 5, 200 millones de hectáreas de tierras secas utilizadas para la agricultura están empobrecidas. Por lo que algunas de estas extensiones de tierra se encuentran dañadas por el proceso de desertificación (Abraham, 2003).

México, Perú, Brasil y Argentina son los puntos rojos del avance de la desertificación en América Latina, generando pérdidas en el continente por varios miles de millones de dólares año<sup>-1</sup>. Exclusivamente en México, entre el 50 y el 70 % de su territorio está sufriendo los procesos de degradación, debido a la deforestación, sequía y falta de agua, y el 60 % de su población está siendo afectada de una u otra manera por éste fenómeno.

En la región del Golfo de California, las actividades agropecuarias son importantes, no sólo por su aportación económica, sino también por el impacto ambiental. El efecto principal es sobre el uso y abuso de los recursos agua y suelo, y los daños en la salud que éstos generan (CNA, 2006). Las grandes cosechas generan ingresos, pero también llevan consigo la contaminación de la superficie por el uso de fertilizantes, plaguicidas y otros desechos que se percolan hacia el acuífero, aunado a la pérdida de suelo y fertilidad por retrabajamiento de éstos (Neuman, 2006).

Los estados de Sinaloa, Sonora y Nayarit sobresalen a nivel nacional en las actividades agropecuarias y en la agroindustria de alimentos. La contribución de ambas actividades aporta al producto interno bruto (PIB) entre 8 a 9 %. La aportación al empleo de estas

actividades representa más del 17 % en el caso del sector agropecuario, y más del 5 % en las actividades agroindustriales (Neuman, 2006).

El Valle de Guasave, comúnmente llamado “Centro Agrícola de México” (CAM), se ubica al Noroeste de Sinaloa en la costa, y en los últimos años existe una disminución en su producción agrícola, debido a la sobreexplotación de sus aguas subterráneas lo cual ocasiona la intrusión salina y la inutilización del agua para el consumo humano y el regadío (Norzagaray, 2005). Otro fenómeno importante en el valle es el cambio en el uso del suelo agrícola, en adición con las tasas de erosión que pierde por su retrabajamiento (Trejo y Hernández, 2005; Llanes, 2007).

Por lo anterior y a fin de buscar soluciones a la problemática planteada, en este trabajo de Tesis se plantea la identificación de indicadores físicos del suelo y agua ponderantes de la desertificación los cuales mediante un sistema de valores numéricos, compuesto por: pesos, rangos y valores y posteriormente el análisis espectral se constituyen para proponer medidas de prevención y/o remediación en zonas identificadas de mayor peligro al avance de la desertificación que ponen en riesgo los recursos agua y suelo de este importante valle del Noroeste de México.

## 2 ANTECEDENTES

Las zonas áridas están caracterizadas por un gran número de factores comunes como: baja precipitación, baja humedad, alta temperatura del aire, vientos fuertes, suelos con bajo contenido orgánico, y alto contenido de sales minerales, alta erosión hídrica y eólica, así mismo son áreas donde la evaporación y vegetación excede a la precipitación y donde la flora y fauna muestran adaptación a las altas temperaturas y escasez de agua (Evenari, 1985).

Aunado a lo anterior, se considera que la densidad aparente del suelo puede ser incluida dentro del grupo mínimo de parámetros a medir para evaluar la calidad de un suelo, como indicador de la estructura, la resistencia mecánica y la cohesión del mismo (Doran *et al.*, 1994). Cambios en la densidad aparente reflejan cambios en la estructura del suelo, debido a la relación existente entre la densidad aparente y la porosidad total. La densidad aparente afecta al crecimiento de las plantas debido al efecto que tienen la resistencia y la porosidad del suelo sobre las raíces. Con un incremento de la densidad aparente, la resistencia mecánica tiende a aumentar y la porosidad del suelo tiende a disminuir, con estos cambios limitan el crecimiento de las raíces a valores críticos. Los valores que puede tomar la densidad aparente depende de muchos factores, que van desde la textura, contenido de materia orgánica, hasta el manejo que se le da al suelo. En contraste con la densidad real, que es mas o menos constante, la densidad aparente es altamente variable. La densidad aparente es afectada por la estructura del suelo, que es, su flojedad o grado de compactación, así como también por sus características de contracción y expansión. Esto último depende tanto de su contenido de arcilla como de la humedad del suelo. El espacio poroso puede ser altamente reducido por compactación, pero nunca se puede llegar a eliminar totalmente. Esta densidad aparente es necesaria para la práctica agronómica de la fertilización. La densidad aparente está directamente relacionada con la estructura del suelo, y por lo tanto depende de los mismos factores de control. Este es un dato que se puede obtener con bastante facilidad, y por ello es un parámetro que puede estar disponible para los diferentes horizontes de un suelo. Estos aspectos anteriormente tratados tienen importancia para predecir el movimiento del agua en el suelo y los riesgos de degradación de los agregados. A pesar de esta condición, la compactación del suelo a menudo es medida a través de los

incrementos de la densidad aparente y es una medida de la fertilidad del suelo (Vogel y Smith, 2002).

Para aumentar los rendimientos de granos, es necesario conocer los fundamentos de la fertilidad de suelos y de la nutrición de plantas. La práctica de la fertilización debe basarse en la correcta interpretación de los niveles de nutrientes surgidos de los resultados de análisis de muestras representativas de lotes. Nicolodi *et al.* (2009) relataron que los parámetros más utilizados para realizar diagnósticos e interpretación de la fertilidad de suelos en una región son pH, materia orgánica, fósforo y potasio. Sin embargo la textura puede influir en muchas otras de sus características, especialmente aquellas relacionadas con la humedad y fertilidad del suelo. Los suelos de textura fina pueden absorber más agua que los suelos de textura gruesa, por tal, el grado de pendiente de un terreno es importante porque influye sobre la velocidad y la cantidad de la corriente de agua en superficie. Debido a que el agua corriente es agente erosivo, las partículas son acarreadas a áreas más planas o áreas de depresión. Así, cerca de la parte superior de una colina, los suelos tienden a ser menos profundos, de textura más gruesa y, por tanto, son relativamente más profundos y de textura más fina al pie de una pendiente donde la profundidad del nivel freático también será menor. La profundidad hasta el agua subterránea es importante porque si la napa freática está muy profunda, las raíces de las plantas no podrán obtener la humedad disponible. Por otro lado, si la napa freática está demasiado cerca a la superficie, los aniegos serán un problema y, en estas áreas, la condición salina y alcalina puede matar la vegetación o retardar su crecimiento. Con lo anteriormente dicho, la manera de usar un determinado terreno o entorno puede iniciar el proceso de desertificación. Ciertas prácticas de agricultura como: agricultura extensiva, sobrepastoreo por ganado y fauna silvestre, la selvicultura extractiva, las actividades de construcción y el uso del fuego son frecuentemente considerados como las causas más importantes del proceso (Hiscock, 2005).

Las prácticas agrícolas en tierras secas pueden contribuir al proceso porque exponen los suelos al viento y a la erosión del agua durante períodos de sembrío temprano y después de la cosecha. Las partículas más finas del suelo son acarreadas por el viento o lavadas con el material orgánico esencial que hará falta en el próximo ciclo agrícola. Así, se da

una gradual reducción de nutrientes con el correr de los años. La materia orgánica del suelo (MOS) es un componente clave en los ecosistemas terrestres, tanto en su concentración como en distribución, y su contenido y calidad tienen un importante efecto en los procesos que ocurren dentro de los ecosistemas. El equilibrio entre las fracciones es dinámico y conceptualmente definido por las ganancias y pérdidas de materia orgánica. Dependiendo de las prácticas agrícolas y del sistema de manejo adoptado, el suelo actúa como fuente o destino de CO<sub>2</sub> atmosférico (Bruce *et al.*, 1999). En sistemas con pérdidas de materia orgánica superiores a las ganancias, rompiendo el equilibrio, el suelo puede actuar como fuente constante de CO<sub>2</sub> hacia la atmósfera, resultando en pérdidas significativas del contenido original de MOS. Por otro lado, la no remoción del suelo asociada con el aporte de residuos de cultivos, tienen como resultado la reducción de las pérdidas de carbono y el mantenimiento del stock de carbono en los primeros centímetros del perfil del suelo (Kern y Jonson, 1993; Bayer *et al.*, 1996; Sá *et al.*, 2001). El equilibrio estable “steady-state” del reservorio de carbono del suelo es el balance entre ganancias (residuos vegetales y abonos orgánicos) y, las pérdidas (descomposición y mineralización de la materia orgánica o por erosión).

Aunado a la erosión suele presentarse sequía, la cual es un fenómeno que ocurre en forma natural en las tierras secas o erosionadas, y que se produce cuando la precipitación es significativamente inferior a los niveles normalmente registrados y están relacionados con la evapotranspiración de dicha zona y a su vez las temperaturas son mayores a lo normal, aumentando desequilibrios hidrológicos severos que afectan en forma adversa los sistemas de producción de recursos agrícolas (Pauw, 2000). Cuando la capacidad productiva de las tierras secas no está afectada por la desertificación, éstas tienen la capacidad de recuperarse rápidamente después de las sequías o de períodos secos prolongados. Por el contrario, si ya han sido afectadas como consecuencia de una explotación excesiva tienden a perder rápidamente su productividad biológica y económica, afectando seriamente los suministros de agua y alimentos y generando pobreza y migración. La sequía y la desertificación están asociadas con la disminución de los niveles hídricos de los acuíferos superficiales y subterráneos, afectando la cantidad y calidad de los abastecimientos de agua dulce (Abraham, 2008).

Por otro lado cuando la cantidad de agua aumenta se puede presentar otro efecto adverso importante (erosión hídrica) la cual, presenta efectos como: redistribución y pérdida del suelo, la degradación de su estructura y el arrastre de materia orgánica y nutrientes y finalmente llevan a la pérdida de espesor del perfil cultural y el descenso de la fertilidad (Morgan, 1996). Los factores que originan los procesos erosivos son principalmente el clima, el suelo, el relieve, la vegetación y la acción antropogénica. Cada uno de éstos interviene en la erosión a través de sus distintas dimensiones: potencial erosivo de la lluvia, erosionabilidad del suelo, longitud y grado de la pendiente, cobertura vegetal y prácticas de conservación, entre otros.

Considerando a la desertificación como un fenómeno que actúa en el espacio y en el tiempo se puede decir que los índices de aridez le confieren un carácter más dinámico a los análisis que se efectúan, permitiendo efectuar características de severidad, persistencia y posibles fluctuaciones cíclicas en los eventos climatológicos que determinan condiciones de aridez extrema (Salinas-Zavala, *et al.*, 1998).

La desertificación es un proceso de deterioro de suelo y vegetación en el cual intervienen los grupos humanos que hacen uso de los recursos naturales. En México existen varias regiones en donde se conjuntan una serie de procesos de degradación de los recursos naturales y de tendencias socioeconómicas que son base de procesos de desertificación. Se requiere de indicadores generales que permita identificar la dirección de varias tendencias socioeconómicas y su relación con las condiciones en que se encuentra la cobertura vegetal y el suelo, con el fin de generar políticas públicas contra la desertificación.

Existe un amplio consenso en cuanto a que la degradación de las tierras y la cobertura vegetal es consecuencia tanto de la acción humana como de diversos factores climáticos. En el estudio de la desertificación es, como todo problema complejo, imposible separar lo natural de lo social, aunque analíticamente se deba proceder a examinar cada uno de los elementos por separado. Entre los factores naturales están la misma dinámica propia de los ecosistemas, que por su fragilidad son muy sensibles a los cambios climáticos globales, en los que se afecta vegetación y suelo con alta

erodabilidad (Suffis, 2004). Es importante identificar posibles ciclos naturales en las lluvias y sus consecuentes cambios en la vegetación. En el grupo de factores humanos se destacan la deforestación, la extracción excesiva de productos forestales, los incendios forestales, la sobrecarga animal, el uso demasiado intensivo del suelo, su manejo inadecuado y, por último, el empleo de tecnologías no apropiadas para ecosistemas frágiles. La desertificación es la consecuencia terminal de una serie de factores, tanto biofísicos como políticos, sociales, culturales y económicos. En líneas generales, se entiende que se trata de un proceso global de deterioro ambiental, que además de afectar al medio, ocasiona un impacto importante en la vida humana, al tiempo que los grupos sociales son vistos como agentes que contribuyen a aumentar este proceso. Las principales causas de la desertificación se relacionan con lo humano en el marco de prácticas tales como el sobrepastoreo, la deforestación y una agricultura no sustentable (Trejo *et al.*, 2005).

En numerosas investigaciones demuestran que en las áreas afectadas por los procesos de desertificación no han ocurrido cambios climáticos significativos y sin embargo se ha constatado un aumento considerable en la intensidad de las prácticas de manejo no sustentable de los recursos naturales, en especial de aquellas relacionadas con la producción agropecuaria. En general existen dos métodos empleados para describir datos de fenómenos registrados en ciertos instantes de tiempo: los métodos en el dominio del tiempo y los métodos en el dominio de la frecuencia; entre los métodos en el dominio de la frecuencia se encuentran el método de análisis espectral y los métodos para estimar funciones de distribución de probabilidad (como los descritos por Breña, 2005). Entre los métodos en el dominio del tiempo se encuentran los modelos de medias móviles (MA); modelos autorregresivos de orden  $p$  (AR ( $p$ )); los procesos mixtos (ARMA); los métodos anteriores son descritos en Gottman, 1984; Fuller, 1976; Guerrero, 1987. En esta Tesis se aplicó el método de análisis espectral (reportado en Chatfiel, 2003; Fuller, 1976; Gottman, 1984). Es conveniente decir que los análisis espectrales se han aplicado a un gran y variado número de trabajos en el campo de la física (Bath, 1974; Percibal y Waldel, 1995) así como también en el campo del medio ambiente (Hernández *et al.*, 2002).

Cuando se transforma una serie de tiempo de manera que se obtenga otra serie ya no en función del tiempo sino de la frecuencia (o de la longitud de onda), se obtiene el espectro de la serie; esto facilita muchos análisis y operaciones matemáticas, como por ejemplo la búsqueda de periodicidades y la aplicación de filtros (Bath, 1974, Box et al, 1994). En hidrometeorología por ejemplo, el estudio de espectros se utiliza ampliamente, ya que permite identificar las causas físicas que dan variabilidad a diferentes parámetros a través del tiempo, determinar valores máximos y mínimos más significativos de una serie y conocer particularidades muy importantes para su pronóstico. Aunque la aplicación del análisis espectral es muy amplia, se debe tener cuidado al analizar los resultados, debido a que la resolución de las frecuencias depende de la cantidad de datos de la serie y de los intervalos con los cuales fueron tomados (Press et al, 1992), por lo tanto, se deben conocer muy bien tanto las características de la serie inicial como las del fenómeno a investigar, para poder determinar con mayor seguridad las frecuencias de interés en el estudio a realizar. Dentro del análisis espectral, los filtros se utilizan con el propósito de extraer las componentes del espectro de una señal o de una frecuencia determinada. Los filtros pueden ser interpretados como un conjunto de datos en particular que el analista desea procesar, de manera que refleja explícita y cuantitativamente sus consideraciones extramuestrales acerca de la señal que pretende estimar.

### 3 JUSTIFICACIÓN

La desertificación disminuye la resistencia de las tierras ante la variabilidad climática natural. El suelo, la vegetación, los suministros de agua dulce, y otros recursos de las tierras secas en general pueden recuperarse después de sufrir perturbaciones climáticas como la sequía y efectos provocados por el hombre, como el pastoreo excesivo. Sin embargo, cuando las tierras se degradan, esta capacidad de recuperación se reduce sustancialmente, lo que conlleva repercusiones físicas y socioeconómicas (Jury, *et al.*, 1999).

Es conocido que el suelo se vuelve menos productivo. Los vientos y la lluvia pueden llevarse la capa superficial expuesta y erosionada de las tierras. La estructura física y composición bioquímica del suelo puede verse dañada, formándose hondonadas y grietas, en tanto que el viento y el agua pueden eliminar nutrientes vitales del suelo que son los responsables de la productividad agrícola y por ende del sustento alimentario (Moreno, 1993). Si el nivel freático sube debido a prácticas de irrigación deficientes, el suelo puede anegarse y la salinidad aumentar. Cuando el ganado pisotea y compacta el suelo, éste puede perder su capacidad para el cultivo de plantas y la conservación de la humedad, lo que aumentará la evaporación y la escorrentía superficial.

La vegetación se deteriora. La pérdida del manto vegetal es a la vez una consecuencia y una causa de la degradación de la tierra. Un suelo suelto puede marchitar las plantas con ráfagas de polvo, puede enterrarlas o dejar sus raíces peligrosamente expuestas. Cuando los pastizales se explotan excesivamente con demasiados animales, pueden desaparecer especies de plantas comestibles, lo que permitirá la invasión de plantas no comestibles (Pimentel, 1995). Algunas de las consecuencias afectan a las personas que viven afuera del área afectada. La degradación de tierras puede ocasionar inundaciones aguas abajo, disminuir la calidad del agua y aumentar la sedimentación en ríos y lagos y la creación de lodos en pantanos y vías de navegación. Puede asimismo provocar tempestades de polvo y contaminar el aire, lo que a su vez daña las máquinas, reduce la visibilidad, aumenta los depósitos de sedimentos indeseables y ocasiona estrés. Las ráfagas de polvo también pueden aumentar los problemas de salud, como las infecciones oculares, enfermedades respiratorias y alergias (Arévalo, 2002).

La desertificación se considera como un problema mundial mayor, sobre todo por el vínculo que existe entre la degradación de tierras secas y la producción alimenticia que es fundamental para la supervivencia del hombre. Para asegurar una dieta nutritiva adecuada a la creciente población mundial, sería necesario triplicar la producción de alimentos durante los próximos 50 años, lo cual es una empresa difícil de lograr, aun bajo circunstancias favorables. Si no se detiene o revierte la desertificación, la producción de alimentos en muchas áreas afectadas por este proceso disminuirá, lo que puede causar malnutrición y en última instancia hambrunas. No obstante, la relación que existe entre la degradación de tierras y el rendimiento de los cultivos raras veces es simple; sino por el contrario afectan la productividad numerosos factores como el clima, las enfermedades y plagas, los métodos de cultivo, los mercados externos y otros factores económicos (Suffis, 2004). Por lo anteriormente descrito, la desertificación arrastra consigo enormes costos económicos, ambientales y sociales.

En el caso del Valle de Guasave, se conoce que es eminentemente agrícola; aportando el 1 % del Producto Interno Bruto a nivel nacional (PIB) (INEGI, 2004) y debido a éstos altos volúmenes de producción agrícola, el suelo se ve afectado directamente con cambios en sus densidades, materia orgánica, pH, erosión, etc. En el municipio de Guasave, Sinaloa, las aguas superficiales y subterráneas se utilizan en labores domésticas, agrícolas, industriales y pecuarias. La agricultura es la actividad económica que consume los mayores volúmenes de agua, por lo que en el periodo de sequía existe un déficit para esta actividad y en consecuencia es necesario utilizar agua subterránea. Aunque la tendencia de la población a ingerir agua “purificada” es creciente, en algunas comunidades rurales todavía es común consumir el agua extraída de los pozos, lo que puede poner en riesgo su salud, por tal es de suma importancia el conocer el estado actual que guardan las aguas subterráneas ya que podría estar en riesgo de intrusión salina. Por lo anteriormente expuesto, es importante conocer el estado actual de los suelos y aguas de la región ya que podrían encontrarse en proceso de desertificación; de ahí la importancia de establecer metodologías de identificación de parámetros ponderantes a la desertificación y así abordarlos para revertir los daños ocasionados a los recursos naturales.

## **4 OBJETIVOS**

### **4.1 GENERAL**

- Aplicar y validar un método que defina las variables físicas del suelo y agua; y de mayor ponderación en los procesos que integran la desertificación en suelos, y sus aplicaciones agrícolas en una zona semiárida.

### **4.2 ESPECÍFICOS**

- Establecer y aplicar una metodología que defina las condiciones de interrelación entre el suelo, agua, ambiente geográfico y la desertificación, e identificar la potencia de parámetros que la propicien y la disminuyan.
- Utilizar los resultados obtenidos para definir las interrelaciones entre variables en función del comportamiento específico del fenómeno de desertificación y proponer metodologías de remediación y prevención.

## **5 HIPÓTESIS**

- La desertificación como proceso acentuado en cuencas agrícolas sobre-explotadas puede modelarse mediante la determinación de los parámetros que actúan en este proceso y obtener una aproximación cuantitativa a través del análisis espectral\*.

\*A través de los resultados obtenidos del análisis espectral en suelos agrícolas se conocerán los parámetros ponderantes que propician y disminuyen la desertificación y se proponen metodologías de remediación.

## 6 MATERIALES Y MÉTODOS

### 6.1 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El Valle de Guasave tiene una superficie aproximada de 3600 km<sup>2</sup> en la región costera al Noroeste de Sinaloa, México (Figura 1). El acuífero se localiza a 45 Km de la ciudad de Culiacán y su principal afluente es el Río Sinaloa que intercepta al Valle en dirección NO-SE. A este afluente descargan tres arroyos: Ocoroni, Cabrera y San Rafael (Figura. 1) (Norzagaray *et al.*, 2004).

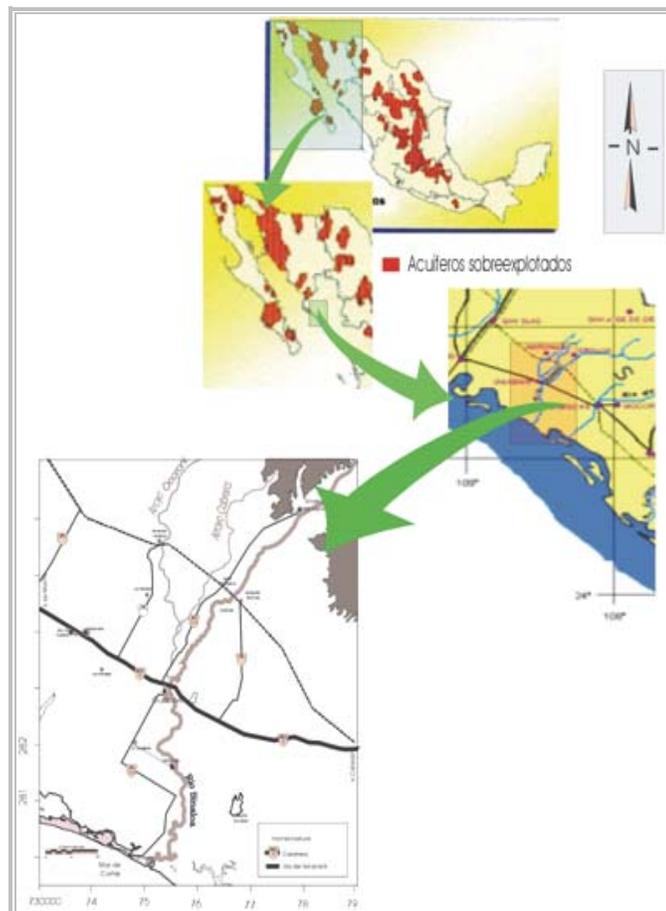


Figura 1.- Localización de la zona de estudio (Norzagaray, 2004).

Se recolectaron 198 muestras de suelo agrícola en una superficie aproximada de 3600 km<sup>2</sup> con la teoría del muestreo diseñada a través de semivariogramas y la frecuencia de Nyquist cada muestra se tomó con una pala de fierro a 0-30 cm de profundidad durante

el proceso de colección. Cada muestra se depositó en una bolsa de plástico de 2 kg de capacidad donde a cada bolsa se identificó con su respectiva coordenada en la dirección X e Y, con un GPS marca Cartom, Inc., serie 36851401. En el laboratorio los suelos se depositaron en un vaso de plástico para su mejor manejo. Una vez obtenidos todos los indicadores de desertificación se utilizó la herramienta DELPHIS que sirve para determinar la vulnerabilidad del Valle, pues pondera las variables y las ordena según su afectación ambiental en el sistema; finalmente se aplicó el análisis espectral.

## **6.2 INDICADORES DE SUELOS**

### **6.2.1 DETERMINACIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE TOTAL (CMT)**

En cada sitio donde se tomó una muestra de suelo se procedió a tomar el respectivo valor del campo magnético terrestre (CMT) mediante un magnetómetro marca Geometrics G-856; también se realizó una orientación previa de la antena del magnetómetro hacia el norte magnético bajo auxilio de una brújula manual. Se cuidó la ausencia de elementos de metal por parte del operador como: cinto, joyería, lentes, monedas, autos cercanos, cables de electricidad, entre otros que pudieran interferir con la lectura del aparato (Figura 2). Mediante la unión de todos los sondeos y su respectiva eliminación de errores (secular, estación, horaria, y aparato) mediante herramientas geoestadísticas (interpolación) según Emery (2007) se pudo conocer el campo magnético terrestre total (Bhattacharyya, 1964).



Figura 2.- Levantamiento magnético en el área de estudio.

### 6.2.2 PROFUNDIDAD DEL BASAMENTO GEOLÓGICO

Una vez conocidas las coordenadas del área de estudio y elaborado el mapa del (CMT) se procedió a asignar un nodo central a cada una de las 35 celdas resultantes del mapa pues se obtuvieron 6 X 7 celdas de los datos magnéticos, para identificar la coordenada UTM de cada nodo y convertir esta coordenada a geográfica en el programa de Excel (Utilidad para la conversión de coordenadas) utilizando el elipsoide WGS84, y acceder estas coordenadas geográficas en el programa en red gratuito de la NOAA (<http://www.ngdc.noaa.gov/geomagmodels/struts/calcDeclination>). Con lo anterior se obtuvo la inclinación y declinación magnética, las cuales sirvieron para alimentar el software de reducción al polo. La corrida de reducción al polo se repitió por segunda vez para reducir al máximo la influencia que tienen los polos sobre el campo magnético terrestre (CMT). Al final el resultado fue un mapa reducido al polo, el cual dio información de la profundidad de la roca basal.

### 6.2.3 DENSIDAD APARENTE ( $\rho_a$ )

A cada uno de los suelos se le determinó la densidad aparente ( $\rho_a$ ) por el método del terrón (NOM-021-RECNAT-2000 AS-03) previa eliminación de la materia orgánica mediante adición de 30 ml de agua oxigenada a cada muestra en tres sesiones y su posterior secado en un horno marca Hamilton Beach mod. 65 lince a 100 °C de temperatura constante. Primeramente se puso la muestra a secar al sol. Una vez seca, se seleccionó un terrón de aproximadamente 4 cm de longitud y éste se amarró con hilo de algodón, y una vez sujeto, se pesó en una balanza marca OHAUS HP de 120 gr de capacidad obteniendo el peso del terrón seco ( $W_s$ ). Después se sumergió el terrón en parafina líquida calentada a fuego constante en una parrilla eléctrica marca Saturno de un solo quemador, se dejó enfriar el terrón, se pesó para obtener el peso del terrón parafinado ( $W_p$ ). Mediante la diferencia entre ( $W_p$ ) y ( $W_s$ ) se obtuvo el peso de la parafina ( $W_p$ ). Este terrón se sumergió en agua destilada en un vaso de precipitado de 100 ml de capacidad marca Kimax y con el volumen de agua inicial del vaso ( $V_w$ ), se obtuvo la lectura del volumen de agua desplazado ( $V_t$ ) = volumen del suelo ( $V_s$ ) + volumen del agua ( $V_w$ ) y con una simple sustitución de ( $V_s$ ) = ( $V_t$ ) – ( $V_w$ ) se conoció el volumen de suelo ( $V_s$ ). Como el volumen de la parafina ( $V_p$ ) = ( $W_p$ )/0.87 (densidad de la parafina) entonces mediante la ecuación 1 se permitió obtener la densidad aparente de cada muestra.

$$\rho_a = \frac{W_{seco}}{(V_t - V_p)} \quad (1)$$

Donde:

$\rho_a$  = Densidad aparente ( $\text{gr cm}^{-3}$ )

$W_{seco}$  = Peso del terrón seco (gr)

$V_t$  = Volumen total ( $\text{cm}^3$ )

$V_p$  = Volumen de la parafina ( $\text{cm}^3$ )

### 6.2.4 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD REAL ( $\rho_r$ ) DE LOS SUELOS

Una vez seca la muestra de suelo, ésta se trituroó hasta afinar, se pasó a un vaso de precipitado marca Kimax de 100 ml de capacidad y se obtuvo el peso de la muestra seca

(Wm). Se saturó el suelo fino con agua destilada y mediante el conocimiento del volumen de agua destilada succionada por el suelo se conoció el volumen de vacíos (Vw). Con la ecuación 2 se conoció la densidad real del suelo.

$$\rho_r = \left( \frac{W_s}{V_w} \right) \quad (2)$$

Donde:

$\rho_r$  = Densidad real (gr cm<sup>-3</sup>)

$W_s$  = Peso del terrón seco (gr)

$V_w$  = Volumen de agua (cm<sup>3</sup>)

### 6.2.5 DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD (Ø) EN EL SUELO

Con la densidad aparente ( $\rho_a$ ) y la densidad real ( $\rho_r$ ) y la aplicación de la ecuación 3, se conoció la porosidad (Jeong, 1996).

$$P = 100 \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_r} \right) \quad (3)$$

Donde:

P = Porosidad (%)

$\rho_a$  = Densidad aparente (gr cm<sup>-3</sup>)

$\rho_r$  = Densidad real (gr cm<sup>-3</sup>)

### 6.2.6 DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DEL IÓN HIDRÓGENO (pH)

El potencial del Ión Hidrógeno (pH) en cada suelo se determinó mediante un potenciómetro (NMX-AA-091) marca HANNA instruments Grochek meter. Primeramente se pesaron 20 gramos de suelo seco y se añadió 50 ml de HI 7051, se agitó durante 30 segundos hasta homogenizar, se esperó 5 minutos y se mezcló durante

30 segundos. En suspensión se introdujo un potenciómetro previamente limpio y calibrado y se obtuvo el pH del suelo, este procedimiento se repitió por segunda vez para tener una segunda referencia del dato medido y se promedió el valor de las dos lecturas.

### 6.2.7 DETERMINACIÓN DE LA TEXTURA (T)

La textura se obtuvo en laboratorio con el método establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, AS-09, Bouyoucos (1936) (figura. 3). Con los resultados de la textura, se propuso una clasificación de la textura mediante una numeración arbitraria para los distintos materiales que caracterizan a este parámetro: 1) arcilla, 2) arcilla arenosa, 3) arcilla limosa, 4) migajon arcillo-arenoso, 5) migajon arcilloso, 6) migajon arcillo-limoso, 7) migajon arenoso, 8) franco, 9) migajon limoso, 10) limo y 11) arena.



Figura 3. Diagrama de flujo para la determinación del parámetro de textura del suelo por el método de Bouyoucos (1936).

El porcentaje de arcilla, limo y arena se interpretó con el triángulo de texturas (Figura 4). Este triángulo posee 12 clases texturales dentro de las cuales existe la textura franca que tiene propiedades medias en cuanto a fineza, retención hídrica, cohesión, entre otras propiedades. La textura franca es una textura fina, con alto porcentaje de fracción gruesa (arena) contenida en el suelo, la presencia de este tipo de composición en el suelo, posibilita la buena permeabilidad de éste y por lo tanto una adecuada aeración (Jury *et al.*, 1991), lo cual es benéfico para el cultivo. A continuación se muestran los porcentajes texturales de un suelo tipo franco:

<i>Arena</i>	30 a 52 %
<i>Limo</i>	28 a 50 %
<i>Arcilla</i>	7 a 27 %

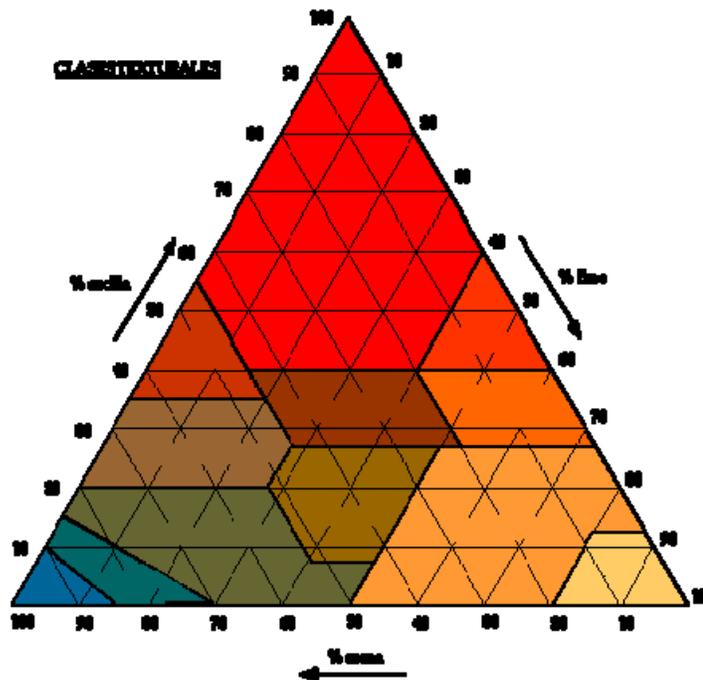


Figura 4. Triángulo de texturas (U.S.D.A, 1981).

### **6.2.8 DETERMINACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA (M.O.) EN EL SUELO**

Se determinó la materia orgánica en el suelo mediante el método de Walkley y Black (1946) NOM-021-RECNAT-2000 AS-07. Se pesó 0.5 g de suelo tamizado con la malla 0.850 mm (tamiz # 35), se transfirió éste a un matraz de Erlenmeyer y se añadieron 5 ml de Dicromato de potasio, 7.5 ml de ácido sulfúrico concentrado para digerir la muestra. Se agitó la muestra y se dejó reposar por 30 minutos. Se depositaron 100 ml de agua destilada en una probeta graduada para facilitar la medición, se añadieron 2.5 ml de ácido fosfórico y se agregó 0.5 ml de di fenilamina (17 gotas aproximadamente), se agitó continuamente hasta conseguir un color violeta oscuro. Por ultimo se añadió el sulfato ferroso gota a gota hasta que viró (cambió) del violeta oscuro al verde. A esta última reacción se le conoce comúnmente con el nombre de titulación.

### **6.2.9 FACTOR DE EROSIONABILIDAD DEL SUELO (K)**

Para el conocimiento de la erodabilidad (K) del suelo, se aplicó el criterio de Röder *et al.* (2006), se analizaron en el laboratorio del CIIDIR-IPN unidad Sinaloa 198 muestras de suelo distribuidas al azahar a una profundidad de 35 cm. Los análisis que se aplicaron a cada muestra fueron: materia orgánica (walkley-Black, 1934 ), textura (León, 2001) y permeabilidad (Regalado *et al.*, 2001; Trieste y Gifford, 1980). El estándar de (K) fue la clasificación del INTA (1995).

### **6.2.10 FACTOR DE LONGITUD Y GRADO DE PENDIENTE DEL TERRENO (LS)**

En cuanto al factor de longitud (L) y gradiente (S) de la pendiente del terreno los cuales para los sistemas SIG son los de mayor problema al usar el modelo *USLE/RUSLE* (Mannaerts, 1999), se unieron por simplicidad en un solo factor de topografía (LS) bajo la formulación general de Mc Cool *et al.* (1993). Lo anterior evitó limitaciones impuestas por los distintos algoritmos que permiten calcularlos separadamente. Los subfactores que satisficieron a la citada formulación provinieron de un modelo digital

de la elevación del terreno que se elaboró en Arc-View 3x con 582 bancos de nivel recopilados en la CONAGUA.

### 6.3 INDICADORES AMBIENTALES

#### 6.3.1 PRECIPITACIÓN PLUVIAL PROMEDIO ANUAL (P)

Mediante datos históricos de la CONAGUA (1964-2009) en las estaciones meteorológicas de Guasave y Ruiz Cortines, Casa Blanca y también con una estación propia en la comunidad de Ocoroni se procedió a determinar las gráficas representativas de las variaciones mensuales y anuales de (P) así como el promedio de cada una de éstas (Figura 5).

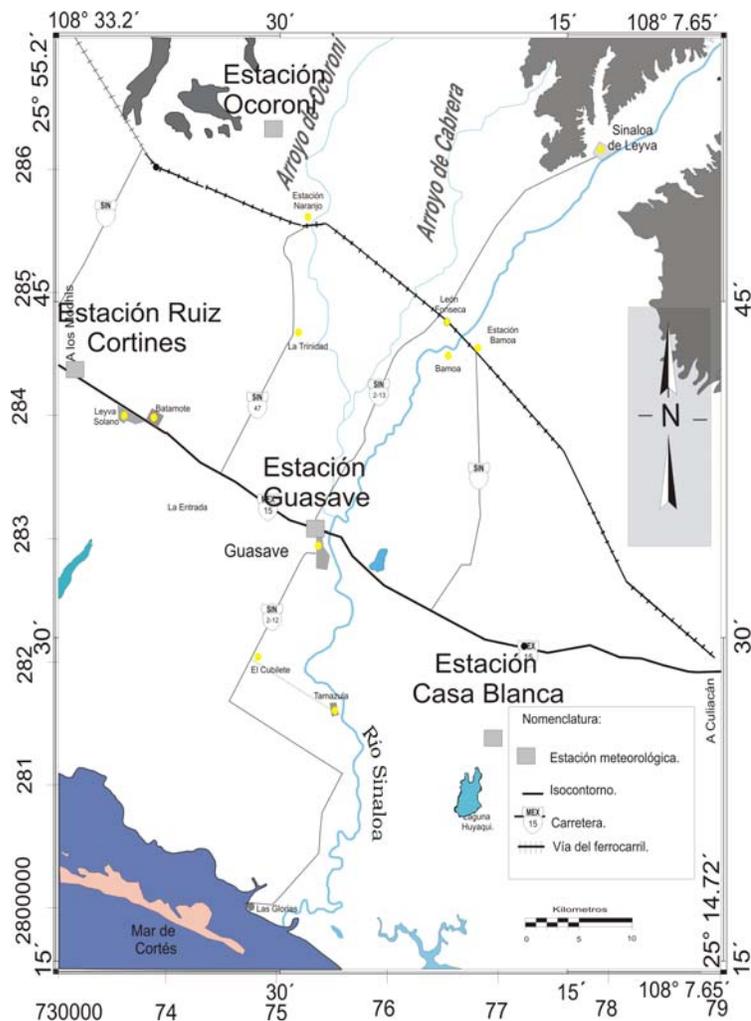


Figura 5.- Localización de las estaciones meteorológicas en el área de estudio (UTM).

### 6.3.2 TEMPERATURA MEDIA (T)

Con los datos de las estaciones meteorológicas (Guasave, Ruiz Cortines, Casa Blanca y Ocoroni) (Figura 5) se calcularon las gráficas que corresponden a las variaciones mensuales, anuales y promedios de (T). A cada variación se le realizó su respectivo análisis gráfico para su posterior interpretación espacio-temporales.

### 6.3.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ET<sub>o</sub>) (MÉTODO DE BLANEY-CRIDDLEY, 1950)

La evapotranspiración juega un papel estratégico en la ocurrencia de la desertificación y suele ser la variable que origina grandes pérdidas de volúmenes de agua dentro de un sistema hídrico de clima árido o semiárido como el Valle de Guasave (Fetter, 2001, Custodio y Llamas, 1983, Valle, 2002), y mediante el conocimiento de las temperaturas media diaria, máxima diaria y mínima diaria se determinó la evapotranspiración de referencia diaria (ET<sub>o</sub>) en las estaciones de Guasave, Ruiz Cortines, Casa Blanca y Ocoroni mediante la expresión de Blaney-Criddley, (1950) (Ecuación 4).

$$ET_o = p(0.46t_{med} + 8) \quad (4)$$

Donde:

ET<sub>o</sub> = Evapotranspiración de referencia (mm día<sup>-1</sup>)

T<sub>m</sub> = Temperatura media diaria (°C)

p = Diario de horas de luz del mes, con respecto al total anual (%).

### 6.3.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA ( $ET_0$ ) (MÉTODO DE HARGREAVES Y SAMANI, 1985)

Se calculó la evapotranspiración de referencia por el método de Hargreaves y Samani, (1985) para las cuatro estaciones; con la siguiente ecuación:

$$ET_0 = 0.0023(t_{med} + 17.78)R_0(t_{max} - t_{min})^{0.5} \quad (5)$$

Donde:

$ET_0$  = Evapotranspiración potencial diaria ( $\text{mm día}^{-1}$ )

$t_{med}$  = Temperatura media diaria ( $^{\circ}\text{C}$ )

$R_0$  = Radiación solar extraterrestre ( $\text{mm día}^{-1}$ ) (tabulada)

$t_{max}$  = Temperatura diaria máxima ( $^{\circ}\text{C}$ )

$t_{min}$  = Temperatura diaria mínima ( $^{\circ}\text{C}$ )

### 6.3.5 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL PROMEDIO ANUAL (ETP)

Existen varios métodos para el cálculo de ETP, pero especialmente con la información meteorológica disponible se pudo aplicar el método de Thornthwaite (1948). Sin embargo, las estimaciones de la Evapotranspiración potencial (ETP) (Thornthwaite, 1948, Penman, 1948, 1956) pueden llegar a subestimar en más de un 30 % la evapotranspiración real (ETR) de un cultivo. En zonas áridas y semiáridas, la evapotranspiración de algunos cultivos altos es superior a la ETP, lo que hace aconsejable utilizar el concepto de evapotranspiración de referencia del cultivo ( $E_{to}$ ) (Ferer, 1987).

Para el cálculo de ETP se determinó el índice de calor mensual ( $i$ ), en cada estación usando la ecuación 6:

(6)

$$i = \left( \frac{t}{5} \right)^{1.514}$$

Donde:

$i$  = Índice de calor mensual (Adimensional)

$t$  = Temperatura promedio mensual del aire (°C).

El índice de calor anual de cada estación, correspondió a la sumatoria de todos los índices de calor mensual ( $i$ ), y se expresó de la siguiente manera:  $I = \sum i$ . Conocida la temperatura y el índice de calor anual, se determinó la evapotranspiración potencial media, con la ecuación 7:

$$\varepsilon = 16 \left( \frac{10t}{I} \right)^a \quad (7)$$

Donde:

$\varepsilon$  = Evapotranspiración potencial media (mm día<sup>-1</sup>).

$t$  = Temperatura media diaria mensual (°C).

$I$  = Índice de calor anual (°C).

$a = 675.10^{-9} I^3 - 771.10^{-7} I^2 + 1972.10 I + 0.49239$ .

### 6.3.6 FACTOR DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA (R)

El factor R se determinó mediante los valores puntuales de 5 estaciones meteorológicas y se aplicó el índice de Alm el cual se muestra en la expresión 7 (Lal, 1976).

$$Alm = \sum_{j=1}^{12} \left[ \sum_{i=1}^n a I_{\max} \right] \quad (8)$$

Donde:

Alm = Erosividad de las lluvias (cm<sup>2</sup> h<sup>-1</sup>)

$a$  = Precipitación diaria (cm)

$I_{max}$  = Intensidad máxima de la lluvia a los 7 minutos ( $\text{cm h}^{-1}$ ) y  
 $n$  = Número de aguaceros en cada mes.

### 6.3.7 FACTOR DE ORDENACIÓN DE LOS CULTIVOS (C)

Se determinó mediante el conocimiento del tipo de vegetación, el cual se obtuvo de una imagen de satélite LANDSAT-2008. La información se corroboró en campo antes de aplicar las tablas de Röder *et al.* (2006).

### 6.3.8 EROSIÓN HÍDRICA POTENCIAL (EHP)

El modelo para determinar la EHP ( $\text{Ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) fue el USLE/RUSLE; el cual según Wishmeier y Smith (1978) es el producto entre el factor de erosividad de la lluvia ( $R$ ) ( $\text{MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ), la erosionabilidad del suelo ( $K$ ) (adimensional), el factor topográfico ( $LS$ ) (adimensional), la ordenación de los cultivos ( $C$ ) (adimensional) y las prácticas de conservación ( $P$ ) (adimensional) véase ecuación 9. De los cinco factores,  $P$  no se tomó en cuenta debido a que en esta región aún no se implementa ningún plan de manejo ni conservación. El estándar para la EHP fueron las tablas de Del Campo y Buceta (1994): Ninguna (Ng) 0- 1.0 Baja (Bj) 1.0 -10, Moderada (Md) 10- 50, Alta (Al) 50- 200 50 y Muy Alta (Ma) >200.

$$EHP = R \cdot K \cdot LS \cdot C \quad (9)$$

Donde:

EHP = Tasa de Erosión Hídrica Potencial ( $\text{T ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ )

$R$  = Erosividad de la lluvia ( $\text{cm}^2 \text{ hr}^{-1}$ )

$K$  = Erosionabilidad del suelo (Adimensional)

$LS$  = Topografía (adimensional)

$C$  = Ordenación de los cultivos (adimensional)

### 6.3.9 EROSIÓN EÓLICA (EE)

La erosión eólica (EE), se obtuvo a través de la ecuación 10, considerando la textura, el uso del suelo y la agresividad del viento para desagregar y transportar los gránulos de suelo que originan de esta forma la erosión (Arévalo *et al.*, 2002).

$$EE = A_v \cdot T \cdot S \quad (10)$$

Donde:

EE = Erosión Eólica (Ton ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>)

Av = Agresividad del viento (adimensional)

T = Textura del suelo (adimensional)

S = Uso del suelo (adimensional)

### 6.3.10 ÍNDICE DE ARIDEZ DE MARTONNE

Cabe destacar que este índice ya se ha utilizado para clasificación de desiertos en los estados de Sonora y Chihuahua (Schmidt, 1991).

A continuación se muestra la ecuación 11, la cual denota el índice de Martonne así como la tabla I, donde intervienen los tipos de clima y los respectivos intervalos del índice.

$$I_A = \frac{P}{T + 10} \quad (11)$$

Donde:

I<sub>A</sub> = Índice de aridez (Adimensional)

P = Precipitación anual (mm)

T = Temperatura media anual (°C)

Tabla I.- Índice de aridez de Martonne.

<b>Clima</b>	<b>Índice de aridez</b>
Árido	0-10
Semiárido	10-20
Subhúmedo	20-30
Húmedo	30-60
Muy húmedo	>60

### **6.3.11 ÍNDICE DE ARIDEZ DE J. DANTIN CERECEDA Y A. REVENGA CARBONELL**

Una vez obtenidos los datos de temperatura y precipitación, se procedió a aplicar la fórmula de Dantin Cereceda (1941) para la obtención del índice de aridez (Ecuación 12) (Tabla II). Lo anterior, con el objeto de destacar la importancia de la aridez y poder corroborar el tipo de clima mediante dos metodologías.

$$I_A = \frac{100 \cdot T}{P} \quad (12)$$

Donde:

$I_A$  = Índice de aridez (Adimensional)

T = Temperatura media anual (°C)

P = Precipitación anual (mm)

Tabla II.- Índice de aridez de Dantin Cereceda

Clima	Índice de aridez
Húmedo	0-2
Semiárido	2-3
Árido	3-6
Subdesértico	>6

### 6.3.12 ÍNDICE DE HUMEDAD PROMEDIO ANUAL DEL SUELO ( $H_o$ )

El índice de humedad, se determino considerando dos parámetros: (P) y (ETP) para lo cual los datos obtenidos en este trabajo ( $P_a$ ), (P) y (ETP) se conjuntaron con datos de la CONAGUA del período 1964-2009 para enriquecer la información. En función de estos valores, se determinó el índice de humedad del suelo (Ecuación 13):

$$HU_i = \frac{P}{ETP_o} \quad (13)$$

Donde:

$HU_i$ = Índice de Humedad (adimensional).

$P$ = Precipitación (mm).

$ETP_o$ = Evapotranspiración potencial (mm).

Esta metodología supone que cuando  $HU_i$ , es igual o inferior a 0.5 los cultivos sufren sequía. Al ser mayor de 0.5 y menor de 0.75 las plantas sufren una moderada deficiencia de humedad. Por último, si la relación es igual o superior a 1.5 los cultivos están sometidos a condiciones de mucha agua y no les permiten un desarrollo normal.

### 6.3.13 VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO

Para obtener la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero se usó el índice DRASTIC (ID), calculado mediante la sumatoria del producto existente entre el peso relativo (P) del impacto del nivel freático (D), la recarga neta (R), el material del acuífero (A), el tipo de suelo (S), la pendiente del terreno (T), el impacto de la zona no saturada (I) y la conductividad hidráulica (C) (Canter 1997; Pérez y Pacheco 2004):

$$ID = DpDi + RpRi + ApAi + SpSi + TpTi + IpIi + CpCi \quad (14)$$

Donde:

DpDi, RpRi, ApAi, SpSi, TpTi, IpIi y CpCi = Productos del peso relativo por el impacto ocasionado en el acuífero a causa de los factores D, R, A, S, T, I, C.

El modelo se aplicó considerando que Civita *et al.* (1991) caracterizaron a DRASTIC como un modelo con un sistema de conteo de puntos paramétricos apropiado. Dentro de la disponibilidad de programas como GRID: ARC/INFO, SURFER y otros SIG, en los cuales se procesan datos como herramienta espacial, SURFER 8.0 se seleccionó para elaborar los mapas de cada factor a una escala 1:10 000.

Para obtener D y T en campo con un GPS portátil GARMIN Olathe de 12 canales, se localizaron al azar 155 pozos y se posicionaron en coordenadas UTM. Para determinar D con una “sonda de nivel”, se levantó una piezometría instantánea de 3 días. La cota de la superficie del terreno (h) para obtener T se determinó mediante la técnica de “arrastre” con un teodolito electrónico APEX modelo ET-5 de desviación estándar ( $\sigma$ ) 0.05. Dado que la empresa Técnicas Modernas de Ingeniería (TMISA 1978) reveló que la mayoría de pozos se sitúan en un acuífero libre, dicha información proporcionó la certeza para aplicar DRASTIC, ya que se cartografiaron unidades hidrogeológicas e hidrodinámicas similares (Martínez *et al.*, 1998).

Al considerar que en un acuífero libre la carga hidráulica (H) corresponde a la altura del nivel freático sobre un nivel de referencia, en este caso el nivel del mar, dicha información es de utilidad para el cálculo de H en cada pozo, restando D a h (Serway y

Jewett 2005). Todas las cargas se interpolaron en SURFER 8.0 bajo el sistema de Krieger (Emery 2007) para obtener el mapa piezométrico; las direcciones del flujo subterráneo se definieron de manera perpendicular a las isopiezas (Hiscock 2005). Los factores A e I se determinaron usando 12 columnas estratigráficas en los pozos y la interpretación de 23 registros geofísicos eléctricos, 456 sondeos eléctricos Verticales y 751 mediciones electromagnéticas realizadas en el área de estudio por Norzagaray (2003). Los factores R, C y S se obtuvieron respectivamente de bibliografía existente en el área (Valle 2002; Norzagaray *et al.*, 2004; Llanes 2007). Una vez cartografiados los factores, se apilaron los mapas a P e I sobre la traza urbana de la región y se elaboró una malla de 150 celdas (15 x 10) correspondiente a 30 km<sup>2</sup> c/u (4 km de largo y 7.5 km de ancho) (Figura 1).

Según los criterios de Aller *et al.* (1987), a cada celda se asignó un valor de P considerando la contribución a la contaminación. Dicho valor fluctuó de 5 a 1 y la ponderación de cada factor se elaboró bajo la siguiente propuesta: R, A, S y C por no ser factibles a la modificación en un mediano o largo plazo, tuvieron un P de 3 unidades y representaron en el ID el 57.14 %; por ser sensibles al cambio D e I representaron en el ID un 28.57 % y un P de 5 y 4 unidades, respectivamente.

Por ser menos factibles a modificaciones, T representó en el ID un 14.28 % y un P de 2. En la interpretación del ID, para definir la sensibilidad natural del acuífero a la carga de contaminantes o vulnerabilidad hidrogeológica se utilizaron los siguientes intervalos: <100: Vulnerabilidad insignificante (Vi), 101-119: Vulnerabilidad muy baja (Vmb), 120-139: Vulnerabilidad baja (Vb), 140-159: Vulnerabilidad moderada (Vm), 160-179: Vulnerabilidad alta (Va), 180-199: Vulnerabilidad muy alta (Vma), >200: Vulnerabilidad extrema (Ve).

## **6.4 INDICADORES SOCIOECONÓMICOS**

### **6.4.1 DETERMINACIÓN DE INDICADORES SOCIOECONÓMICOS**

Para la obtención de estos indicadores, se realizaron 20 encuestas a expertos en el tema de la desertificación, estas encuestas, con preguntas específicas dieron a conocer el estado actual de la desertificación en el Valle. Cada encuesta contuvo 87 preguntas en total, con diferentes indicadores: suelos, agua, aire e indicadores socioeconómicos. Lo

anterior, permitió corroborar las afectaciones del suelo y agua y el aspecto socioeconómico en este proceso. Se utilizó el método delphi o criterio de expertos para conocer la vulnerabilidad de los indicadores arriba mencionados (Siegel y Sidney, 1989).

## **6.5 CONSTRUCCIÓN DEL ESCENARIO EXPLORATORIO DEFINIDO POR $\eta$ -VARIABLES**

Se construyó un escenario exploratorio del comportamiento dinámico en donde intervienen las diferentes variables tratadas en este caso a través del comportamiento de  $\eta$ -variables: predichas o indicadoras. En ambos casos, se requiere especificar la escala de medición utilizada en las opiniones de los expertos invitados para el experimento, y al igual para analizar cada una de las variables seleccionadas y estimar la desertificación. En el escenario exploratorio del comportamiento de la dinámica de indicadores, se consideró que existen dos alternativas para ejecutar el proceso de homogeneización de resultados:

- Mediante el uso de una escala cuantitativa (arbitraria), que requiere el uso de funciones de utilidad, y así pasar todas las variables cuantitativas o cualitativas a una misma escala.
- Escalas ordinarias de medición; que tienen implícitos los intervalos de calificación de los valores de cada variable o indicador.

Para la homogeneización de los datos, se optó por la segunda alternativa; ya que la primera es realmente tediosa y en su análisis consume mucho tiempo en su explicación. Lo anterior debido a que en particular cuando hay presencia de variables cualitativas o indicadores de gran utilidad; usualmente se obtienen deformaciones del proceso de medición, e incide de manera significativa en los resultados obtenidos.

## 6.6 INTEGRACIÓN DE LOS INDICADORES DEL SUELO (ISD), AMBIENTE (IAD) Y SOCIOECONOMÍA (ISED) PARA LA DESERTIFICACIÓN

En el proceso de integración de indicadores, que definió la sensibilidad del sistema a la desertificación, cubrió la totalidad de los datos concentrados en esta Tesis (suelos, ambiente y socioeconómicos) (Robinson, 1993). Todos los datos, se asignaron celda a celda y se les indicó con su respectiva coordenada (x, y). Se asignaron valores y pesos u orden de importancia de cada variable para que ocurra la desertificación, y se tomó en consideración el punto de vista de: bibliografía, encuestas, opinión de especialistas y conocimiento, experiencias y el sentido común del autor. Finalmente, se realizó el producto del valor por el peso de cada dato, celda a celda, para después aplicar la metodología DELPHIS (Aller *et al.*, 1987) (Ecuación 15).

$$I.D. = A_R \cdot A_W + \dots \dots \dots Z_R \cdot Z_W \quad (15)$$

Donde:

I.D. = Integración de indicadores de desertificación (adimensional)

$A_R$  = Valor del indicador A (adimensional)

$A_W$  = Peso del indicador A (adimensional)

$Z_R$  = Valor del indicador Z (adimensional)

$Z_W$  = Peso del indicador Z (adimensional)

En la metodología previamente descrita de indicadores DELPHIS; se sumaron los tres grupos de indicadores (ISD, IAD y ISED) para obtener el mapa de integración de todos lo indicadores tratados en esta Tesis, según la sensibilidad a la Desertificación,

misma que fue evaluada a través del análisis espectral. La normalización, permitió obtener intervalos de valores de sensibilidad a la desertificación; los valores asignados a esta sensibilidad se pueden apreciar en la tabla III.

Tabla III.- Sensibilidad a la desertificación en el Valle de Guasave

Intervalo	Clase	Sensibilidad
0.70-0.76	Baja	1
0.76-0.82	Media baja	2
0.82-0.88	Media alta	3
0.88-0.96	Alta	4
0.96-1.00	Muy alta	5

## 6.7 ANÁLISIS ESPECTRAL

Para obtener la fuente y origen que rige a la sensibilidad a la desertificación del Valle se propuso un análisis espectral que definió a los espectros de potencia y radiales de cada celda. La ecuación 16 es la que se aplicó a cada una de las celdas de los mapas del índice DRASTIC:

$$h_1(x) = \left[ \sum_{i=1}^n \left[ \sum_{-\infty}^{\infty} u_1 / I + \sum_{-\infty}^{\infty} u_2 / I_s \right] \right] / I_t = u_{1p}$$

para  $n = 4$  (16)

$$h_2(x) = \left[ \sum_{i=1}^n \left[ \sum_{-\infty}^{\infty} u'_1 / I + \sum_{-\infty}^{\infty} u'_2 / I_s \right] \right] / I_t = u_{2p}$$

Donde:

- $h_1(x)$  y  $h_2(x)$  = funciones que forman el armónico
- $u_1, u_2, u'_1$  y  $u'_2$  = variables internas y externas de los indicadores
- $I$  y  $I_t$  = Indicador por índice y total respectivamente
- $u_{1p}$  y  $u_{2p}$  = variación ponderada de la suma de las variables

El gráfico logarítmico de  $h_1(x)$  y  $h_2(x)$ , es un armónico y cumple con las condiciones de Dirichlet (Suarez, 1998): continuo, período acotado, pocos máximos y mínimos, dos límites laterales, número finito de discontinuidades que convergen en la zona continua y al promedio para la discontinua con la serie de Fourier. Por lo que se pudo obtener a su respectivo par de transformadas. Para reducir las zonas discontinuas a sólo 4 (esquinas) (fenómeno de Gibbs), se representó a 2-D las funciones  $h_1(x, y)$  y  $h_2(x, y)$  (Ecuación 17), manteniendo constante la dirección j:

$$h_1(x, y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (u_{1pi}, v_j), \quad \text{para } n = 4 \text{ y } m = 100 \quad (17)$$

$$h_2(x, y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (u_{2pi}, v'_j)$$

Donde:

- $(h_1(x, y) \text{ y } h_2(x, y))$  = funciones bidimensionales
- $u_{1p}, u_{2p}$  = variables ponderadas en cada índice de desertificación
- $v_1 \text{ y } v_2$  = N° de indicadores por índice de desertificación

La serie de armónicos de las series de Fourier establecieron el par de transformadas de  $(h_1(x, y) \text{ y } h_2(x, y))$ , del dominio del tiempo al número de onda o viceversa, empleando las siguientes expresiones (Suárez, 1998):

$$h_2(x, y) = \Delta u \Delta v \sum \sum H(k\Delta u, l\Delta v) e^{i2\pi(k\Delta u + l\Delta v y)} \Leftrightarrow H_2(u, v) = \sum \sum h_2(n\Delta x, m\Delta y) e^{i2\pi(un\Delta x + vm\Delta y)} \quad (18)$$

$$h_1(x, y) = \Delta u \Delta v \sum \sum H_1(k\Delta u, l\Delta v) e^{i2\pi(k\Delta u + l\Delta v y)} \Leftrightarrow H_1(u, v) = \sum \sum h_1(n\Delta x, m\Delta y) e^{i2\pi(un\Delta x + vm\Delta y)}$$

$$r = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (19)$$

Donde :

$u$  y  $v$  = Números de onda  $u = 2\pi/L$ ,  $v = 2\pi/T$ , (m-1).

$L$  y  $T$  = Longitud de la señal para  $x$  e  $y$  respectivamente, (m).

$|H(u, v)|$  = Transformada de Fourier para  $h_1(x, y)$  y  $h_2(x, y)$ , respectivamente

El espectro de amplitud de  $|H(u, v)|$  o de Fourier, fue definido con el algoritmo logarítmico de la FFT considerando los principios de Bath (1974), que utiliza la subrutina de Claerbout (1976). Para ello se elaboró un programa de cómputo en FORTRAN al cual se le llamó “copotrad.for” (Ecuación 20):

$$|H(u, v)| \xleftrightarrow[\text{copotrad}]{\text{FFT}} |H(r, \theta)| \quad (20)$$

Estableciendo la equivalencia de 20 con 18 es:

$$H(u, v) = \sum \sum h(n\Delta x, m\Delta y) e^{i2\pi(u n\Delta x + v m\Delta y)} \xleftrightarrow[\text{copotrad}]{\text{FFT}} H(r, \theta) = \sum \sum h(n\Delta r, m\Delta \theta) e^{i2\pi(r n\Delta r + \theta m\Delta \theta)} \quad (21)$$

Esta ecuación 21 representó al código ó espectro de potencia de desertificación de cada celda y contiene todos los armónicos de frecuencias (Fbs, Fm, y Fh). Para independizarlas, cada armónico se diseñó con un filtro en función de  $H(r, \theta)$ , e integró en forma “radial” o “azimutal” a  $|H(r, \theta)|$  grado a grado ( $\Delta\theta = 1^\circ$ ) para los límites 0 a  $2\pi$ , en la dirección  $\theta$ , y con respecto a la dirección radial  $\Delta r = 1/2R$ , con lo que se obtuvo al espectro radial:

$$|H(r)| = 1/2\pi \int_0^{2\pi} |H(r, \theta)| d\theta, \quad \text{para } r = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (22)$$

En forma sectorizada los resultados de la ecuación 22, darán a conocer todas las Fbs, Fm, y Fh de h1(x,y) y h2(x,y) junto con los ruidos del proceso. A partir de la forma de los resultados de /H(r)/ sirvió para quitar todos los ruidos mediante la construcción de un filtro. Además este filtro que define a las Fbs causantes de la desertificación se encuentran más cerrados debido al ruido ambiental y al proceso numérico, por tal, fue necesario mediante la forma H(r) diseñar un filtro para obtener en forma real todos los parámetros que definen y rigen a la desertificación en el Valle. Después, se consideró a este filtro libre de presencia de ruido y se consideró que el espectro radial proviene de una señal de un conjunto de variables de distinta fuente y que es un filtro de la serie “sin sentido geofísico”. De los filtros existentes en la literatura, se seleccionó el más sencillo para el diseño del algoritmo para un filtro óptimo al cual se le denominó “pasabajas” en el dominio del número de onda. Este tipo de filtro considera una Fc y un rl el cual determina el filtrado utilizando las siguientes relaciones (Almendros, 1999) (Ecuación 23):

$$H(r) = \begin{cases} 0 & E \leq r \leq F_N \\ 1 & 0 \leq r < S \\ 1 - \frac{3(r-S)^2}{2r_i^2} + \frac{3(r-S)^3}{4r_i^3} & S \leq r < F_c \\ 2 \left[ 1 - \frac{(r-S)}{2r_i} \right]^3 & F_c \leq r < E \end{cases} \quad \text{para: } \sqrt{u^2+v^2}, S = F_c - r, \text{ y } E = F_c + r_{li}, \quad (23)$$

El filtro “pasabajas” se cumple cuando:

(24)

$$H(F_c) = \frac{H(0)}{4} \quad F_c > 0$$

Donde

$F_c$  = Frecuencia de corte, en la cual la amplitud del filtro según  $H(F_c) = \frac{H(0)}{4}$   $F_c > 0$ , debe de ser equivalente a 0.25 (rad/s).

$FN$  = Frecuencia de Nyquist ( $FN=1/2\Delta t$ ), (c/s).

$rl$  = “roll-off” define la caída del filtro, (c/s).

$u$  y  $v$  = Frecuencias espaciales (c/s).

$S$  = Banda de frecuencia “pasatodo”

$E$  = Caída del filtro.

El algoritmo presente se concentra en el programa “copotrad.for” el cual es a 2-D y realiza en conjunto el calculo de  $/H(r,\theta)/$  y  $/H(r)/$  con la FFT. Da la pauta conforme la forma de  $/H(r)/$  a elaborar manualmente un filtro “pasabajas”, que se multiplicar por  $/H(r,\theta)/$  y deja pasar solo las Fbs. Con  $/H(r,\theta)/$  filtrado se aplica nuevamente la FFT, y se obtiene  $/H(r)/$  con la mayoría Fbs confiable y real para una adecuada interpretación de la FFT. El algoritmo también considera un filtro tipo Hanning diseñado exclusivamente para disminuir en el fenómeno de Gibbs o de discontinuidad en las esquinas. Además de obtener a  $/H(r,\theta)/$  y  $/H(r)/$  en forma suave, con una mejor resolución, previo al proceso de la FFT elimina de los datos a procesar la media y la tendencia lineal que hace suavizar el resultado de ambos espectros (potencia y radial). Para graficar  $/H(r,\theta)/$  y  $/H(r)/$ , ya que constituyen la información final de los espectros o códigos de la desertificación se utilizó SURFER 8.0, y en  $/H(r)/$  GRAPHER 7.0, En el acabado final de las figuras se empleo el paquete Corell Draw 12. La serie de pasos que se describieron en los párrafos superiores se aplicaron a cada una de las celdas para obtener el mapa de desertificación y todos los parámetros que rigen a la desertificación.

## 6.8 GRADO DE DESERTIFICACIÓN (GD)

Una vez concluidos los análisis espectrales, se procedió a determinar los siguientes indicadores: Continuidad (C), Resolución (R), Amplitud (A) y Grado de la Desertificación (GD). La C se obtuvo de acuerdo a la similitud que existió entre los los cuadrantes de cada imagen de los espectros de potencia y radial en cada celda y se

consideró un intervalo de variación de 1-10 donde 1 corresponde a una mínima continuidad y 10 a una máxima continuidad, la (R) se estableció de acuerdo a la sinuosidad de cada gráfica y se consideró un intervalo de variación de 1-10 donde 1 corresponde a una mínima resolución y 10 a una máxima resolución y la (A) se obtuvo mediante la variación de la curva del espectro radial en el eje Y. Una vez obtenidos gráficamente C, R y A; éstos tres indicadores se sumaron y se obtuvo el mapa integrador de todos los indicadores estudiados en esta Tesis. El GD se obtuvo mediante la variación del intervalo de la sumatoria de C, R y A.

## **6.9 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS**

Con la ayuda de los programas de cómputo Surfer 8.0 y Corel Draw. 12.0, se obtuvieron mapas representativos de la variación espacial de cada indicador estudiado en este trabajo de Tesis. Cada mapa se discretizó mediante un mallado de 15 X 10 celdas en las direcciones x e y respectivamente. Una vez obtenidos los mapas de la integración de los Indicadores del suelo (ISD), Ambiente (IAD) y socioeconómicos (ISED), se obtuvo un mapa de integración de los tres grupos de indicadores antes mencionados y a este último mapa se le aplicó el análisis espectral en las 150 celdas totales.

## 7 RESULTADOS

### 7.1 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL MONITOREO DE SUELOS

En la figura 6, se observa el monitoreo del suelo, el cual constó de 198 muestras, distribuidas en todo el Valle de Guasave. A cada muestra se le determinó su respectiva coordenada UTM.

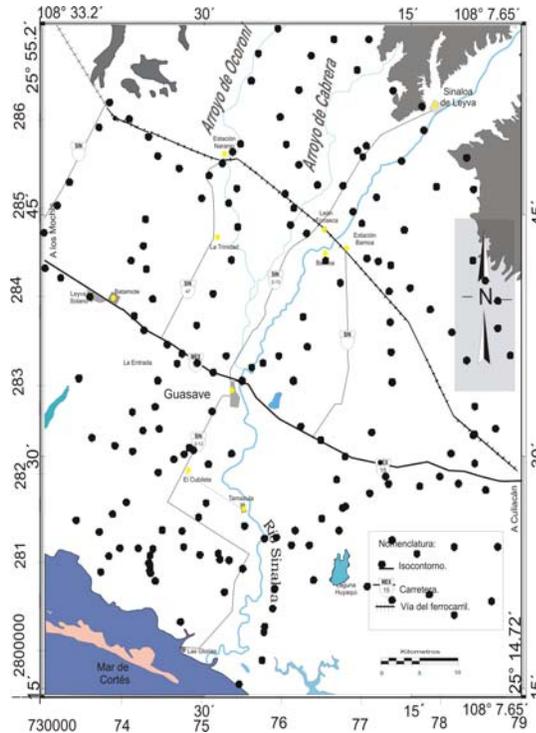


Figura 6.- Representación espacial del muestreo de suelos en el Valle de Guasave, Sinaloa, México (UTM).

### 7.2 INDICADORES DEL SUELO

#### 7.2.1 VARIACIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

En la figura 7 se pueden observar variaciones del CMT, resultado de 198 mediciones, donde los valores altos se encuentran en el Cerro de Tetameche que presenta variaciones de hasta 3000 nt, así como también la parte serrana. El cerro de Tetameche se ubica a 15 km al norte de la comunidad de Gabriel Leyva Solano y es una

protuberancia única en el Valle. La figura 7 se presenta ya con la corrección diurna e IGRF.

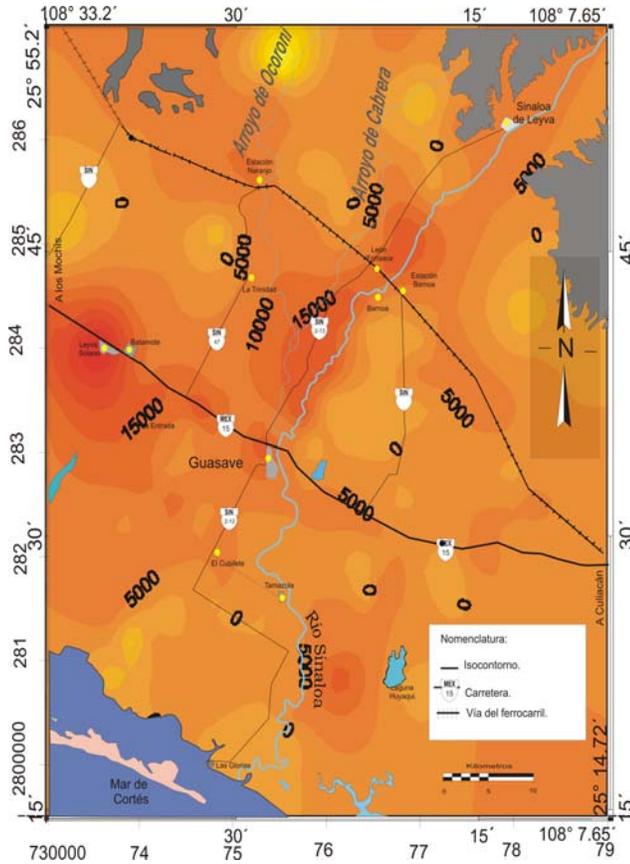


Figura 7.- Representación espacial del campo magnético terrestre total sin reducción al polo en el Valle de Guasave, Sinaloa, México (nt).

### 7.2.2 REDUCCIÓN AL POLO DEL CMT

En la figura 8 se puede observar la geoposición de 37 nodos que sirven para el conocimiento de la inclinación y declinación magnética y su posterior reducción al polo el cual se logra mediante el programa de cómputo obtenido bajo la colaboración del Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICSE). Este algoritmo de reducción al polo eliminó la influencia que ejercen los polos sobre la medición de CMT. Al momento de hacer la corrección diurna e IGRF se percató que 11 lecturas de CMT presentaban un error, ya que al momento de hacer la diferencia de la

última lectura del magnetómetro o estación base resultaba una magnitud superior a 500 nt, lo cual se trató de casos donde hubo ruido o interferencias diversas como es el caso de: líneas eléctricas, paso de automóviles, entre otros, por tal motivo procedió a eliminar tales lecturas del total de los datos de CMT, al final se graficaron en el espacio solo 187 datos de 198 totales.

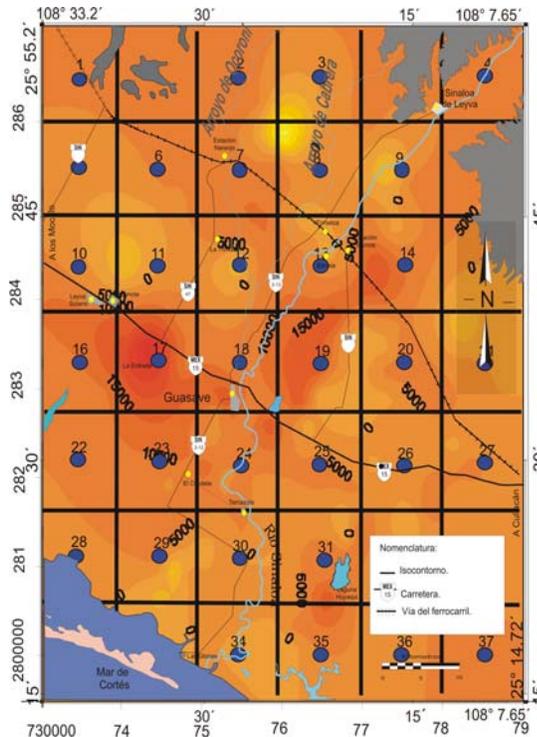


Figura 8.- Geoposición del nodo para correr el software de reducción al polo en el Valle de Guasave, Sinaloa, México (UTM).

### 7.2.3 PROFUNDIDAD DEL BASAMENTO GEOLÓGICO

En las figuras 9 A y 9 B se muestran los resultados finales de CMT, se puede observar que los lugares donde existen magnitudes menores de CMT se pueden asociar a la presencia de las cuencas hacia donde fluye el agua de los arroyos de Cabrera, Ocoroni y el Río Sinaloa. Según la forma de las cuencas dependieron de la forma del basamento, que es irregular en su mayoría y por donde circula también el agua subterránea de la región. Esta agua subterránea tiene una circulación acorde al gradiente del basamento al

igual que su velocidad (Figura 10). Los valores mínimos de la profundidad se registraron en la parte serrana y al Noroeste del Valle debido a la presencia de la roca basal (montañas).

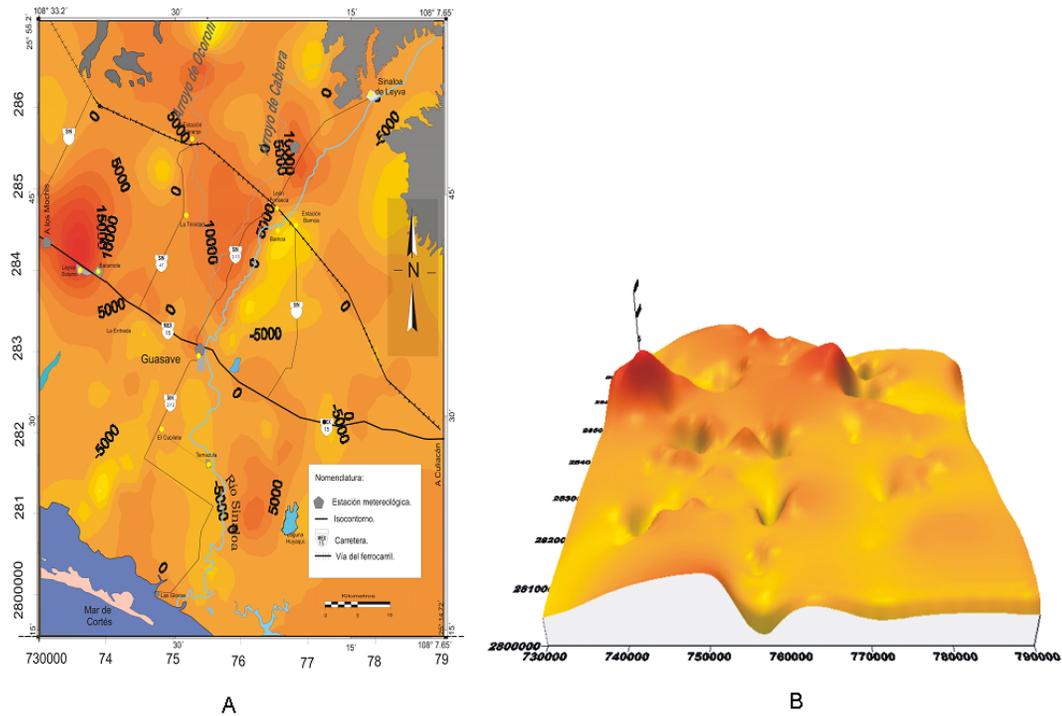


Figura 9 (A y B).- CMT a 2-D y 3-D respectivamente con su respectiva reducción al polo para el valle de Guasave, Sinaloa (nt).

#### 7.2.4 DENSIDAD APARENTE DEL SUELO ( $\rho_a$ )

La densidad aparente ( $\rho_a$ ) del suelo presentó variaciones de 1.2 a 1.9 gr cm<sup>-3</sup> y un promedio de 1.59 gr cm<sup>-3</sup>. Se observaron valores mínimos en las comunidades de: Ocoroni, Bamóa, El Cubilete y La Trinidad y máximos en: Laguna de Huyaqui, y en la parte serrana (Figura 10).

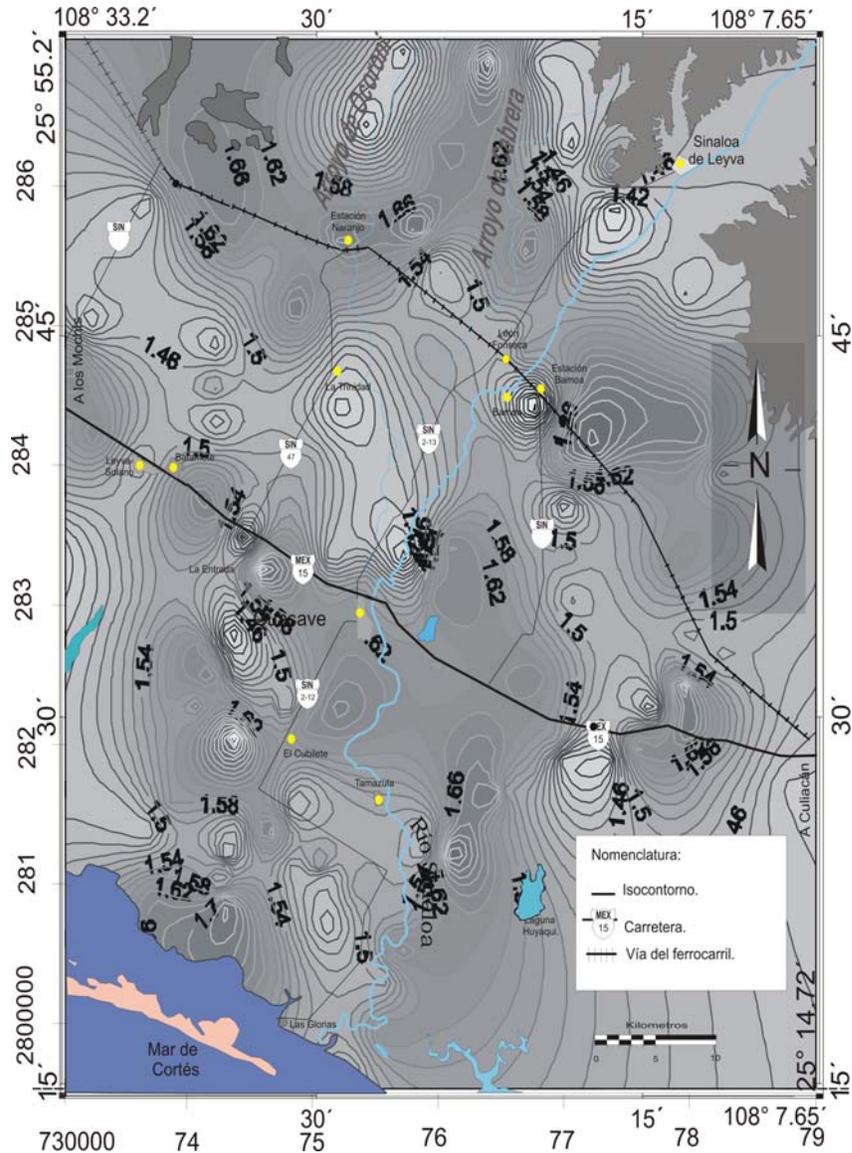


Figura 10.- Variación espacial de la densidad aparente en el Valle de Guasave, Sinaloa, México ( $\text{gr cm}^{-3}$ ).

### 7.2.5 POROSIDAD ( $\emptyset$ )

Los resultados de porosidad manifiestan un promedio de 39.96 % con mínimos en: Estación Bamó y El Cubilete y máximos en: La Trinidad, Tetameche y Sinaloa de Leyva (Figura 11).

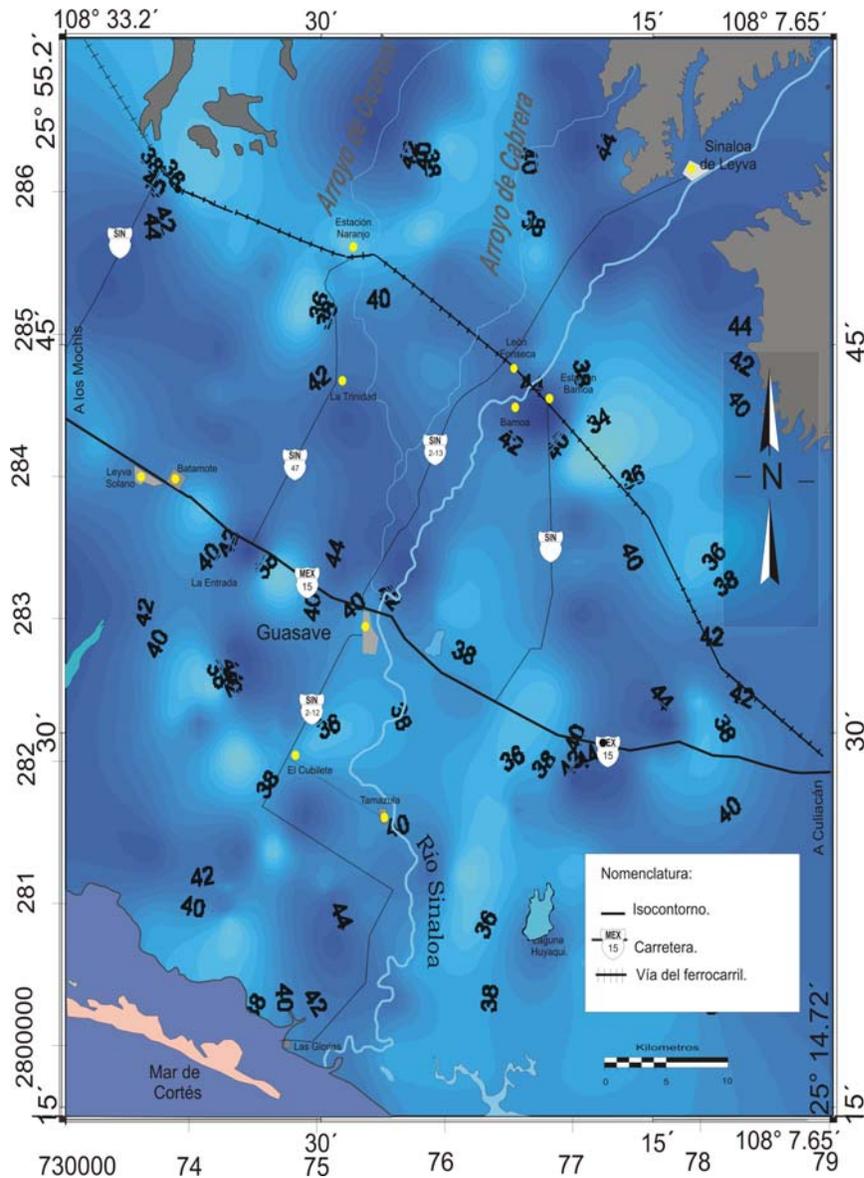


Figura 11.- Porosidad en suelos del Valle de Guasave, Sinaloa, México (%).

### 7.2.6 POTENCIAL DEL IÓN HIDRÓGENO (pH)

Los valores de pH se registran entre 3.2 y 5.98 con un promedio de 4.38. Los valores mínimos se encuentran en las comunidades de: La Entrada, Bamoa y La Trinidad y los máximos en: cercanías a Estación Naranjo y Tetameche (Figura 12).

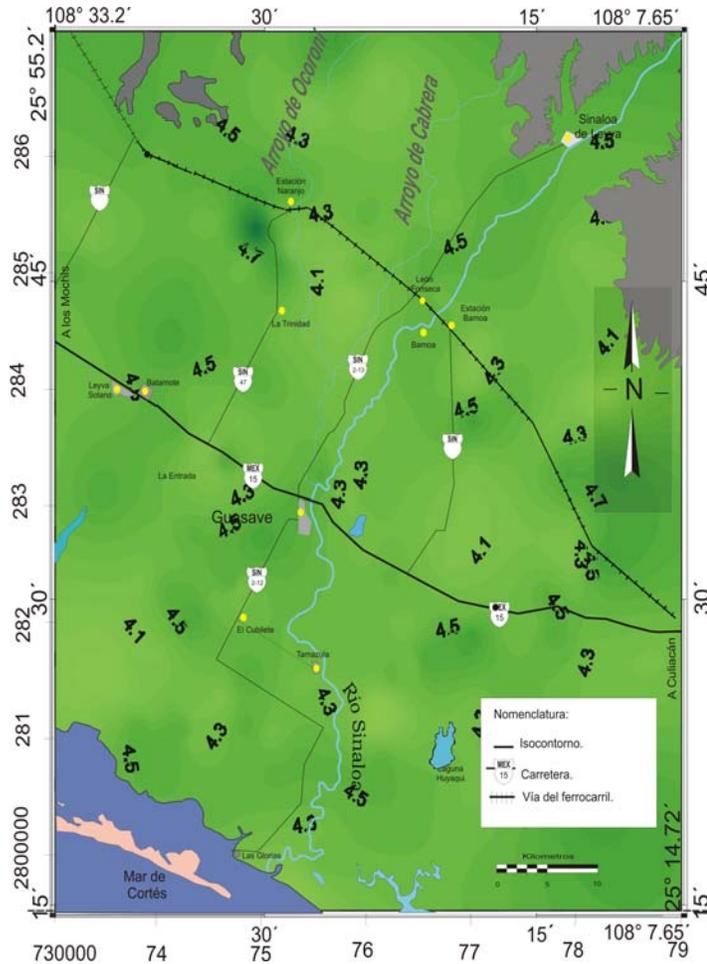


Figura 12.- Distribución espacial del pH en suelos del Valle de Guasave, Sinaloa, México (Adimensional).

### 7.2.7 TEXTURA (T)

La textura de tipo migajón-arenoso correspondientes a una magnitud 7 se sitúan en la parte costera, así como en las proximidades del Río Sinaloa, y algunas pequeñas zonas del norte del área. La textura de tipo migajón-arcilloso correspondientes a una magnitud 5 son los de menor ocurrencia, y están situados en la parte oeste, cerca de la comunidad de La Entrada. En cuanto a la textura migajón arcillo-limoso con magnitud 6 se encuentran bordeando la Laguna de Huyaqui, La Sierrita de Sinaloa de Leyva y cercanías de la ciudad de Guasave, así como sus zonas costeras principalmente cerca de

la Playa Las Glorias y “Buenavista”. La textura de tipo Franco correspondiente a una magnitud 8, están distribuidos en forma dispersa tanto en la zona serrana (Sinaloa de Leyva y Tetameche), como en la parte central y costera (figura 13).

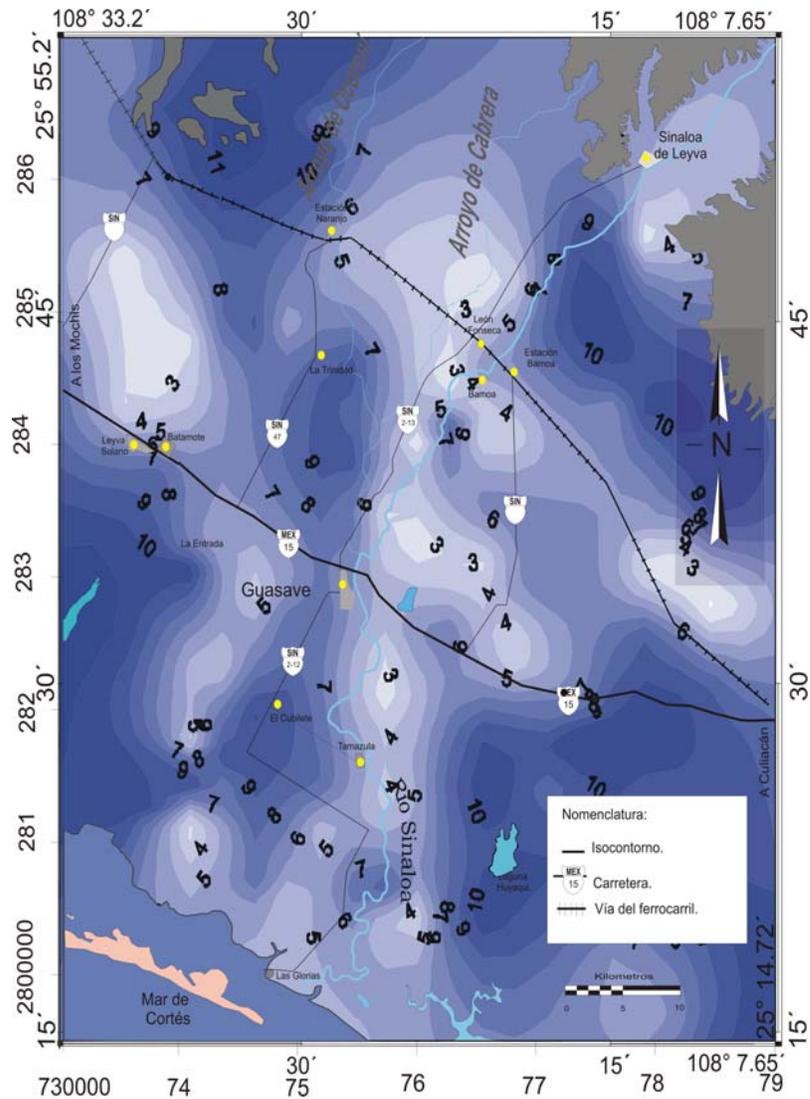


Figura 13. Variación espacial de la textura con técnica de Bouyoucos para el Valle de Guasave, Sinaloa, México (Adimensional). 1) arcilla, 2) arcilla arenosa, 3) arcilla limosa, 4) migajon arcillo-arenoso, 5) migajon arcilloso, 6) migajon arcillo-limoso, 7) migajon arenoso, 8) franco, 9) migajon limoso, 10) limo y 11) arena.

### 7.2.8 MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO (M.O)

En la figura 14 la materia orgánica se manifiesta con un promedio de 0.66 %, con mínimos en Tetameche y a 20 km al sureste de Bamóa con 0.2 %, y con máximos a 10 km al norte de Estación Bamóa con valores encontrados de 2.4 %.

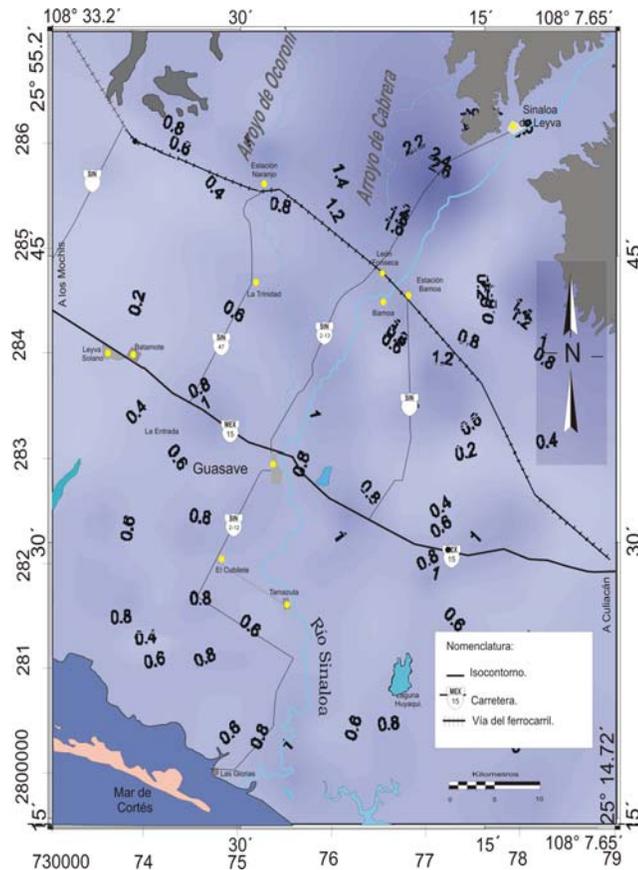


Figura 14.- Materia orgánica en suelos del Valle de Guasave, Sinaloa, México (%).

### 7.2.9 FACTOR DE EROSIONABILIDAD DEL SUELO (K)

La media de  $K$  fue de 0.24 y varió de 0.001 a 0.61 (Figura 15). La zona A es de una resistencia muy alta a la erosión se compone de dos celdas (1.37 %) y tiene un área aproximada de 60 km<sup>2</sup>; y se atribuye a suelos en donde prolifera la vegetación, lo que permite la baja erosionabilidad. La zona B es de una resistencia a la erosión de moderadamente alta y está conformada por 35 celdas (24.13 %), cubre al Norte, las

inmediaciones de los pie de monte de la Sierra Madre Occidental aproximadamente 1035 km<sup>2</sup>.

Considerando que para relacionar la erosión del suelo, a consecuencia de la erosión hídrica, se recomienda el grado de estabilidad al agua de los agregados, los resultados de la zona B se atribuyeron a la buena agregación que tienen los suelos por el adecuado contenido de arcillas que permite a las partículas se mantengan unidas lo que dificulta el proceso de erosión. Las zonas C y D de una resistencia a la erosión de baja a moderada de la parte centro y la costa se encuentran constituidas por 108 celdas (74.48 %) que cubren sobre los terrenos destinados a la actividad agrícola un área aproximada de 3240 km<sup>2</sup>. Esta baja a moderada resistencia a la erosión se atribuyó a que los riegos agrícolas por gravedad, que son los más comunes, hicieron que la estabilidad de los agregados del suelo disminuyera, que éstos se dispersaran y se saturaran los poros; por lo que el agua en lugar de infiltrarse fluyó sobre la superficie haciendo sensibles a los suelos a la erosión.

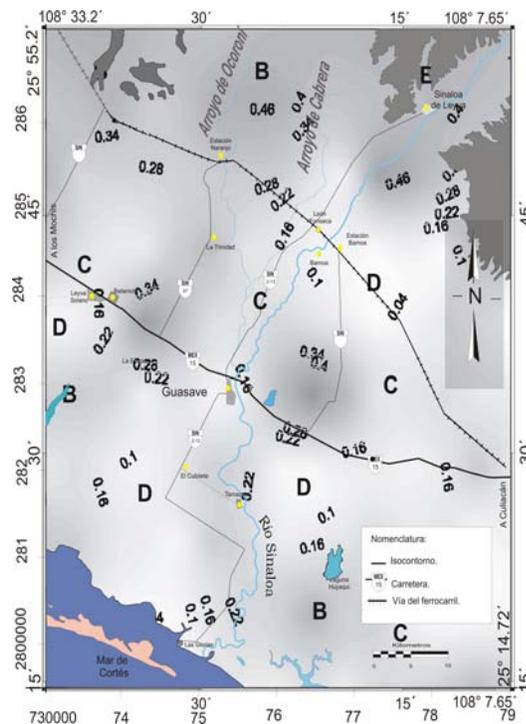


Figura 15.- Erosionabilidad del suelo en el Valle de Guasave (Adimensional).

### 7.2.10 FACTOR DE LONGITUD Y GRADO DE LA PENDIENTE (LS)

La media de LS fue de 12.64, presentó variaciones de 0.64 a 41.12 que clasifica su comportamiento de ninguno a moderado-alto, y se refleja desde la costa hasta la zona serrana (2.849 a 196.142 msnm). Los valores bajos correspondientes a la zona A estuvieron presentes en 5 celdas (0.70 %), los bajos correspondientes a la zona B estuvieron en 81 celdas (54 %), los moderados de la zona C se presentaron en 21 celdas (14 %), los intermedios de la zona D se presentaron en 34 celdas (22.67 %) y los de moderada a alta correspondientes a la zona E se presentaron en 9 celdas (8.63 %). Las variaciones espaciales de LS pueden apreciarse en la parte sur y centro debido a sus cuerpos de agua superficiales y el mar de Cortés. Estas cinco zonas manifestaron relieves promedio de hasta 40 con gradientes de  $0.4 \text{ cm km}^{-1}$  en los terrenos agrícolas. Las pendientes inclinadas de altos valores de LS de 20 a 41.12, se presentaron al Norte y se ilustran mediante la figura 16 con las zonas C, D y E.

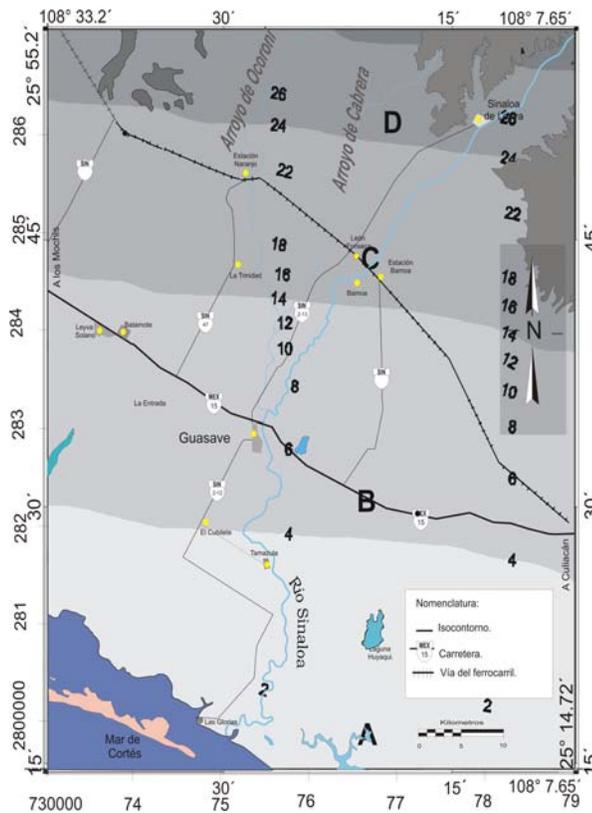


Figura 16.- Factor de longitud y grado de pendiente (Adimensional).

### 7.2.11 INTEGRACIÓN DE LOS INDICADORES DEL SUELO PARA LA DESERTIFICACIÓN (ISD)

En la figura 17 se pueden observar los resultados de la integración de los Indicadores del Suelo para la Desertificación (ISD) los cuales van desde 77 hasta 187 unidades, manifestándose los valores mínimos en la parte costera, Tamazula y La trinidad y la parte central del Valle y los valores máximos se presentaron en Laguna de Huyaqui, Sinaloa de Leyva, Estación Naranjo, Cubilete y La entrada. El promedio del ISD fue de 125.

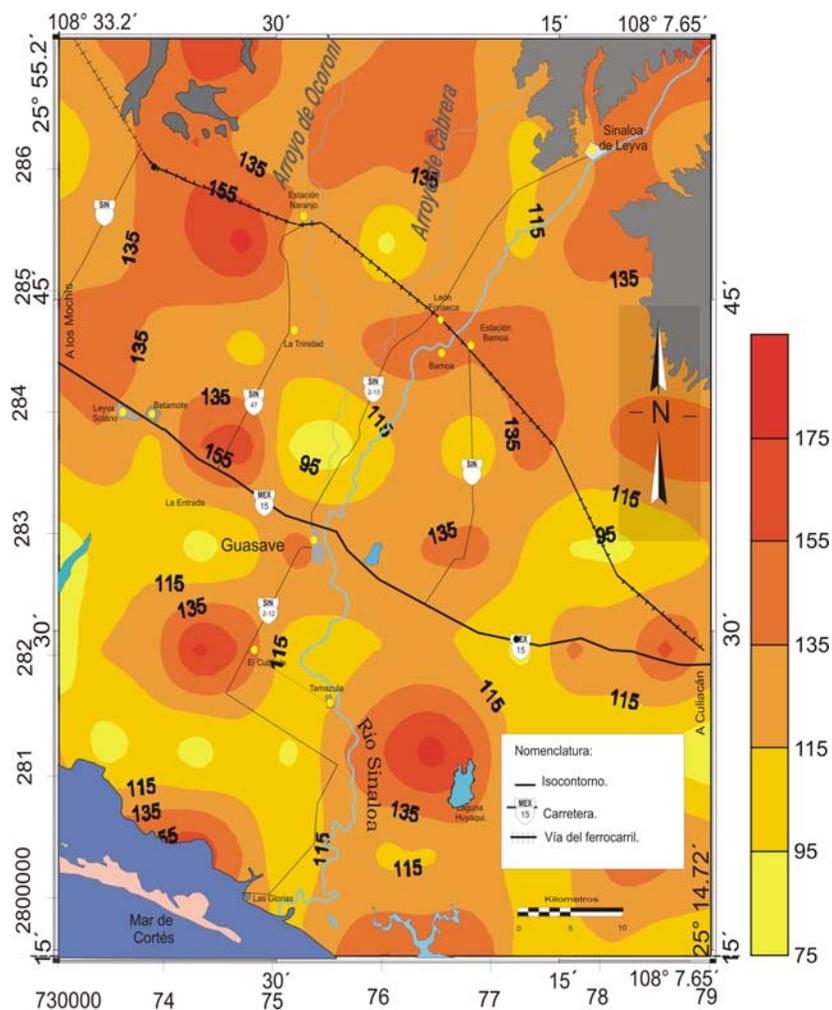
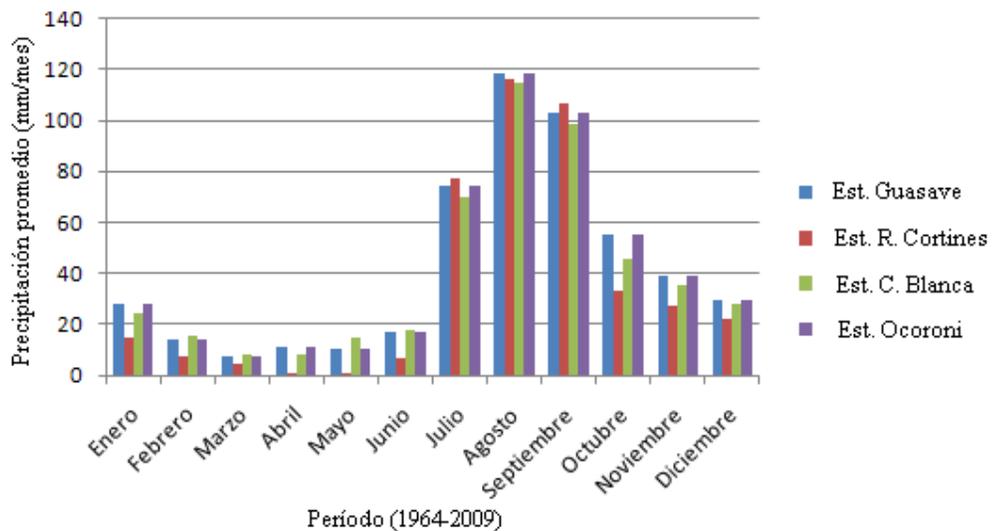


Figura 17.- Integración de los indicadores del suelo para la desertificación (ISD) (Adimensional)

### 7.3 INDICADORES AMBIENTALES

#### 7.3.1 PRECIPITACIÓN PLUVIAL PROMEDIO (P)

En la gráfica 1, se observa que los registros con mayor P se registraron en el mes de Agosto con valores cercanos a 120 mm y la estación con mayor precipitación fue la de Guasave con 118.42 mm. Los meses de Septiembre y Julio fueron los expuestos a mayores precipitaciones después del mes de Agosto respectivamente en la estación de Ruiz Cortines en ambos casos con registros de 106.44 mm y 77.59 mm respectivamente. Cabe mencionar que los meses con mínimas precipitaciones fueron: para el caso de Abril y Mayo en la estación de Ruiz Cortines con valores de 1.02 mm y 0.77 mm respectivamente.

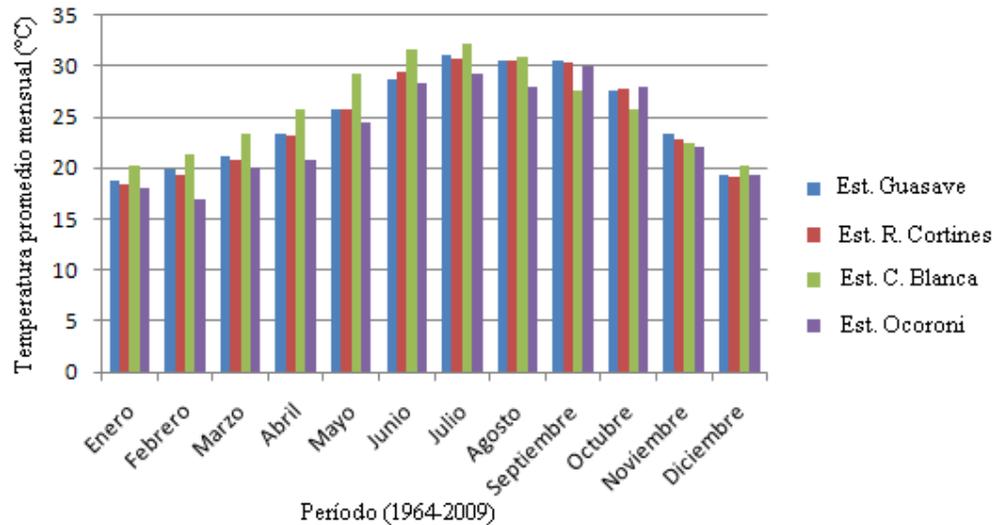


Gráfica 1.- Precipitación pluvial promedio mensual en el período 1964-2009 (mm)

De acuerdo a la distribución espacial de la P que se muestra en la figura 18, que la zona serrana manifiesta los valores máximos de precipitación así como también la parte central y Este con valores de 506.19 mm en poblaciones como las de Sinaloa de Leyva, Estación Bamóa y León Fonseca. Los valores mínimos se registraron en la parte costera así como al Oeste con magnitudes de 417.22 mm, ejemplos lo son las localidades de Leyva Solano, Batazote y La entrada. El promedio de este valor registró 484.38 mm.



valores mínimos se registraron en los meses de Enero y Diciembre respectivamente con magnitudes de 17 °C y 19.06 °C en la estación de Ocoroni y Ruiz Cortines.



Gráfica 2.- Temperatura promedio mensual en el período de 1964-2009 (°C)

En la figura 19, se distinguen tres zonas de temperatura: la zona norte, la zona centro y la zona sur. En la zona norte, se presentan los valores mínimos de 23.75 °C en la zona de Sinaloa de Leyva y Estación Naranjo, valores de 24.9 °C hasta 25.1 °C en comunidades como: Guasave, Cubilete y Tamazula y por último la zona sur con valores de 25.90 °C en las comunidades de: Ruiz Cortines y la Laguna de Huyaqui. Los valores se incrementan en la dirección Noroeste-Sureste donde los valores mayores se presentan en la zona costera donde se localizan las comunidades de Playa Las Glorias, Boca del Río y La Laguna de Huyaqui.

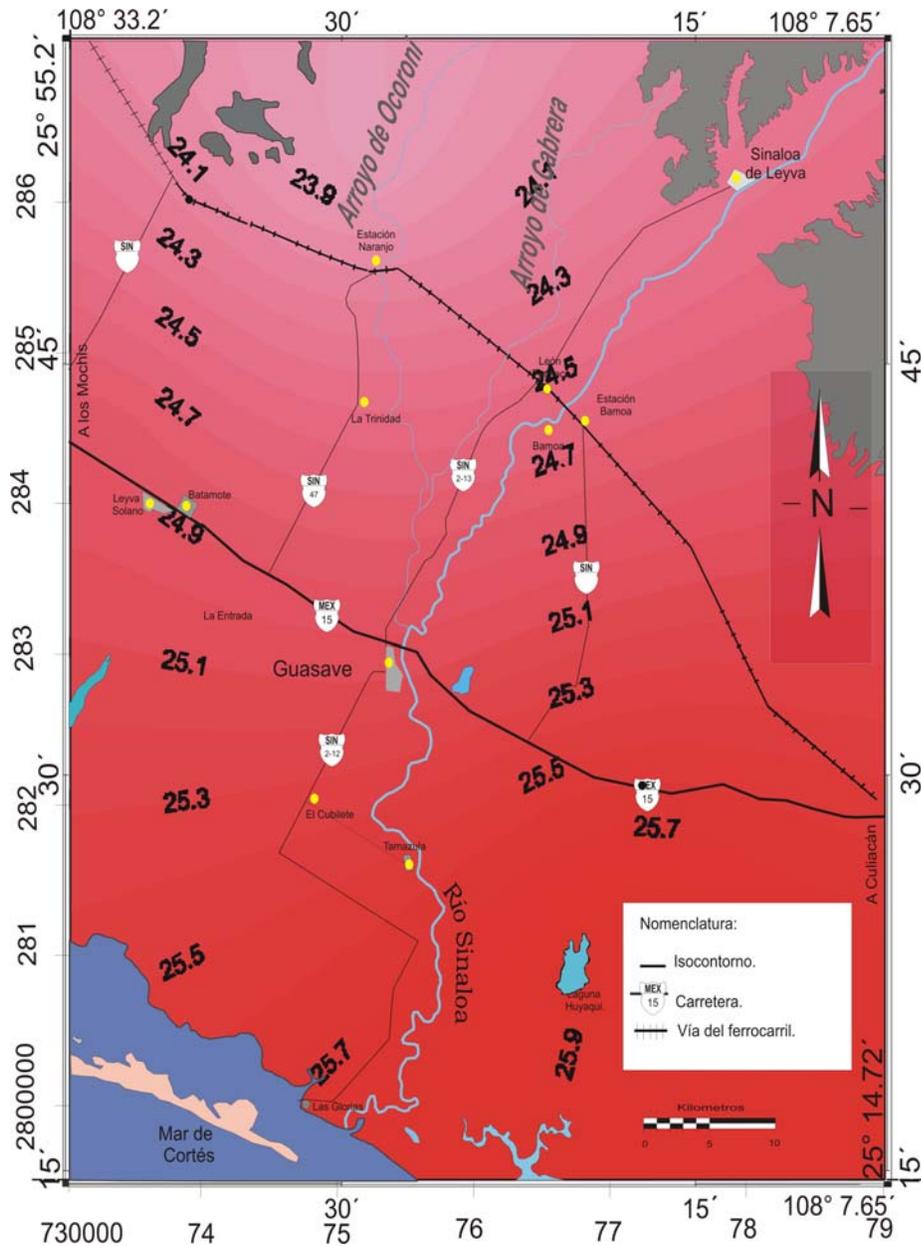
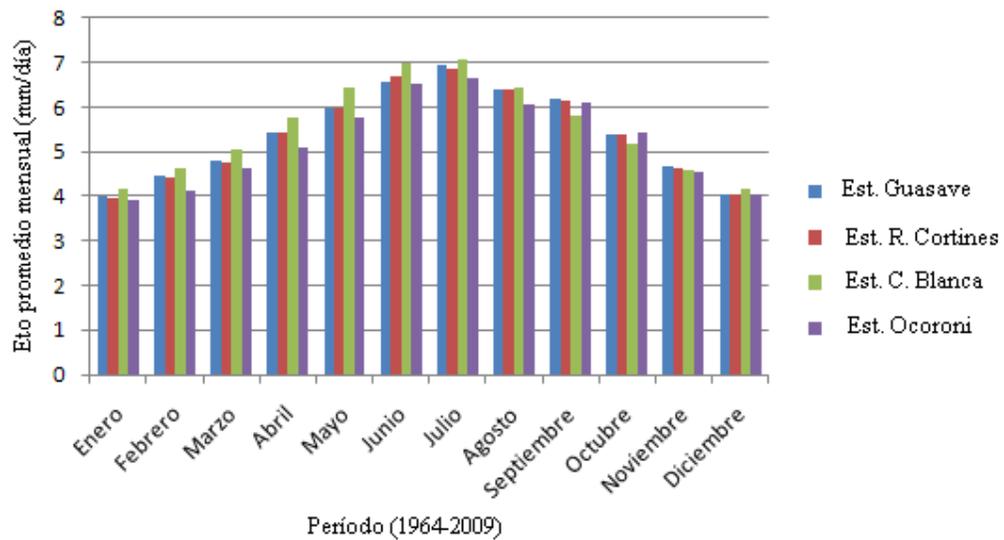


Figura 19.- Temperatura promedio anual en el período 1964-2009 en el Valle de Guasave (°C) (CONAGUA, 2009).

### 7.3.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (MÉTODO DE BLANEY-CRIDDLEY, 1950)

De acuerdo a los resultados de la gráfica 3 se aprecia que los valores mínimos se presentaron en Enero y Diciembre respectivamente con magnitudes de  $3.95 \text{ mm día}^{-1}$  y

4.02 mm día<sup>-1</sup>, las dos temperaturas se registraron en la estación de Ruiz Cortines en ambos casos. Los valores mayores se presentaron en los meses de Julio y Junio respectivamente con valores de 7.06 mm día<sup>-1</sup> y 7.00 mm día<sup>-1</sup> en la estación de Casa Blanca.



Gráfica 3.- Evapotranspiración de referencia promedio mensual (mm día<sup>-1</sup>)

De acuerdo a la figura 20 se puede mencionar que los valores mínimos se registraron en la estación de Ocoroni con 5.24 mm día<sup>-1</sup> y el valor mayor lo registró la estación de Casa Blanca con un valor de 5.52 mm día<sup>-1</sup>. Las comunidades de Sinaloa de Leyva, Estación Naranjo y Estación Bamoa registraron los valores mínimos y las comunidades de El Cubilete, Tamazula y Las Glorias con valores mayores.

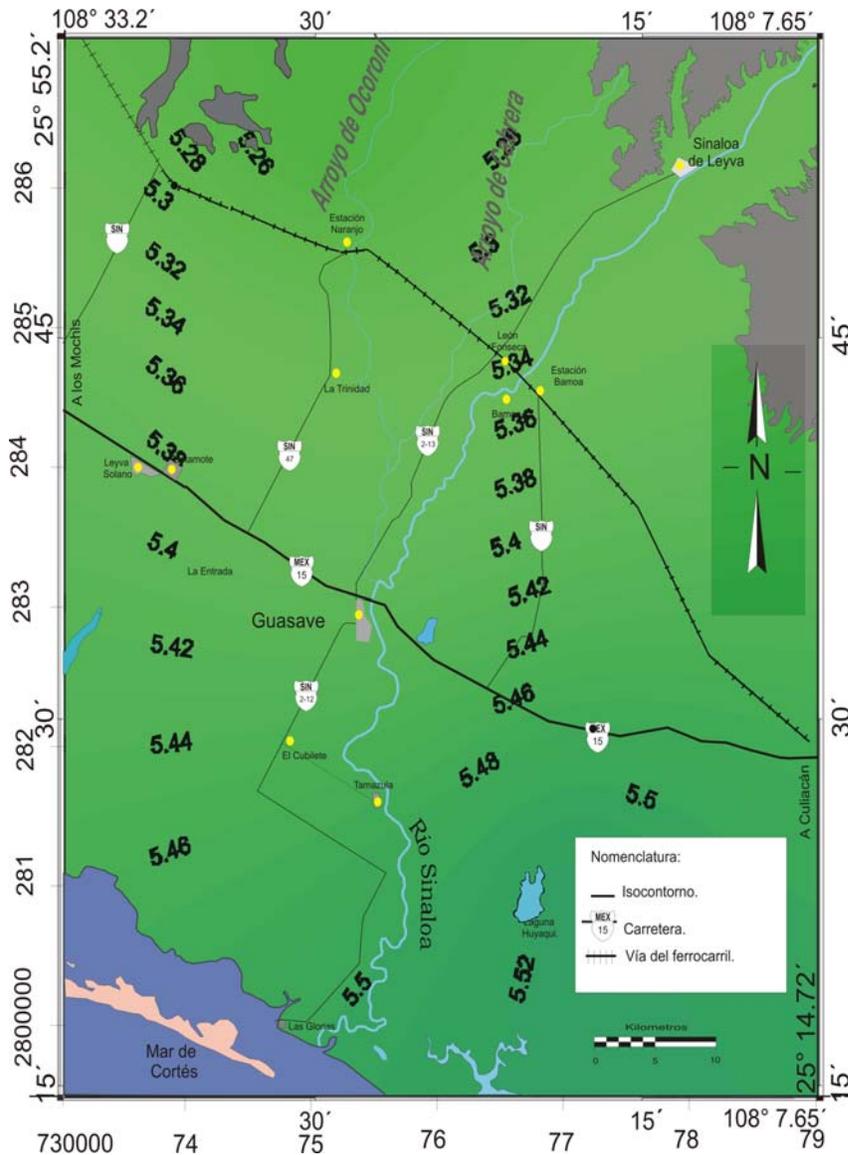
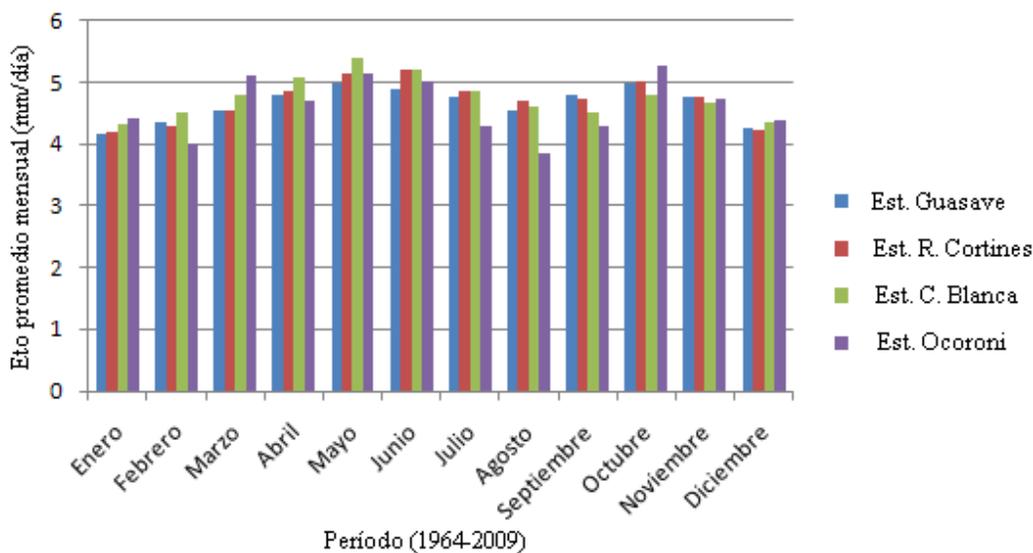


Figura 20.- Evapotranspiración de referencia promedio anual por el método de Blanney-Criddeley, 1950 en el período 1964-2009 ( $\text{mm día}^{-1}$ ).

### 7.3.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (MÉTODO DE HARGREAVES Y SAMANI, 1985)

De acuerdo a la gráfica 4 se observa que los valores mínimos se presentaron en Enero y Diciembre con magnitudes de  $4.16 \text{ mm día}^{-1}$  en la estación de Guasave y  $4.21 \text{ mm día}^{-1}$  en la estación de Ruiz Cortines. Los valores máximos correspondieron a los meses de

Mayo y Junio respectivamente con valores de  $5.38 \text{ mm día}^{-1}$  en la estación de Casa Blanca y  $5.21 \text{ mm día}^{-1}$  en la estación de Ruiz Cortines.



Gráfica 4.- Evapotranspiración de referencia promedio ( $\text{mm día}^{-1}$ )

De acuerdo a la figura 21 los valores mínimos se registraron en las comunidades de Estación Naranjo y Sinaloa de Leyva con valores de  $4.60 \text{ mm día}^{-1}$  y las comunidades con magnitudes mayores fueron El Cubilete, Laguna de Huyaqui y la parte costera con valores de  $4.72 \text{ mm día}^{-1}$  a  $4.75 \text{ mm día}^{-1}$ . Cabe señalar que la evapotranspiración de referencia aumenta con magnitudes de  $4.60$  a  $4.75 \text{ mm día}^{-1}$  en la dirección Noroeste-Suereste como se puede apreciar en la figura 21. Las magnitudes intermedias se presentaron en comunidades de La Entrada, Guasave, Estación Bamoa, Batamote y Leyva Solano con magnitudes de  $4.68$  a  $4.72 \text{ mm día}^{-1}$ .

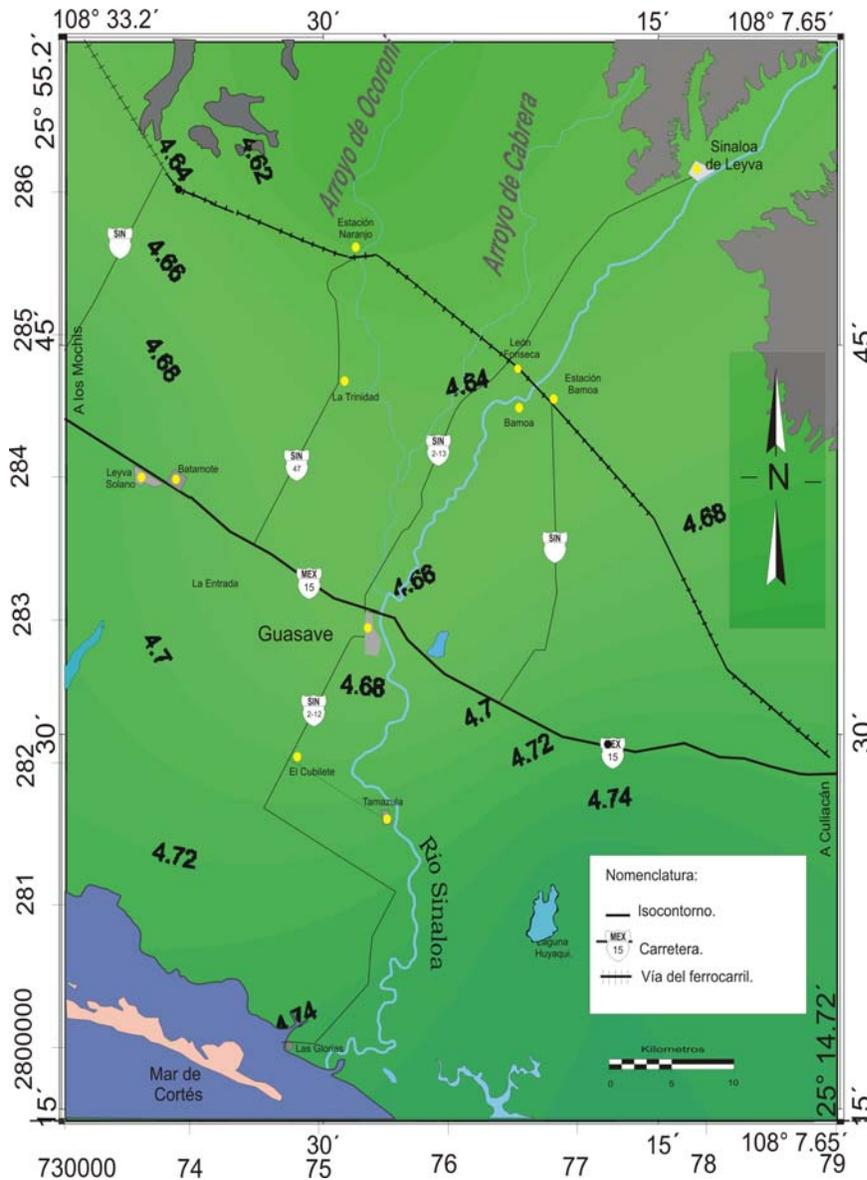
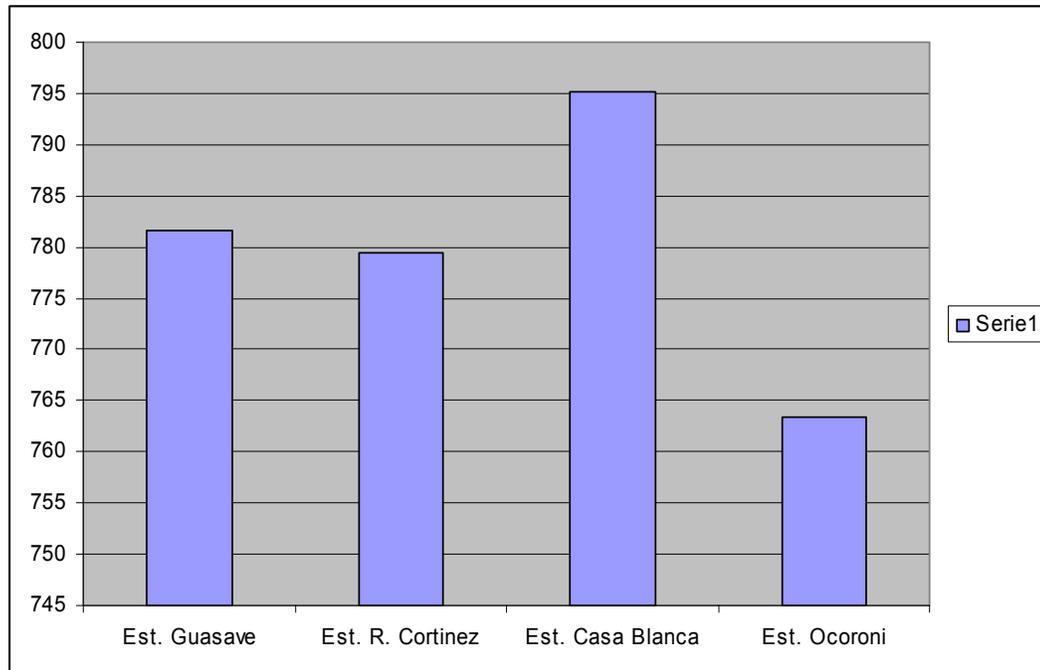


Figura 21.- Evapotranspiración de referencia promedio anual en el período 1964-2009 en el Valle de Guasave ( $\text{mm día}^{-1}$ ) (CONAGUA, 1964-2009).

### 7.3.5 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL PROMEDIO ANUAL (ETP)

En la gráfica 5, se puede apreciar que la estación Casa Blanca adquiere los mayores valores de evapotranspiración promedio anual con  $795.10 \text{ mm año}^{-1}$  la estación Ocoroni

obtuvo el mínimo valor con  $763.37 \text{ mm año}^{-1}$ . El promedio de este indicador fue de  $779.05 \text{ mm año}^{-1}$ .



Gráfica 5.- Evapotranspiración potencial promedio anual ( $\text{mm año}^{-1}$ ) (CONAGUA, 1964-2009).

De acuerdo a los resultados de la figura 22 los valores mínimos de evapotranspiración potencial promedio anual son de  $763.91 \text{ mm año}^{-1}$  y se localizan en la parte serrana de Sinaloa de Leyva. Los valores intermedios se localizan en la zona centro del Valle: Guasave, Estación BAmóa Leyva Solano, La Trinidad y León Fonseca con magnitudes de  $774$  a  $778 \text{ mm año}^{-1}$ . Finalmente los valores mayores de Evapotranspiración se registraron en la zona costera de Playa Las Glorias así como también en las comunidades de La Entrada, El Cubilete y Laguna de Huyaqui con valores de  $782$  hasta  $795.10 \text{ mm año}^{-1}$ .

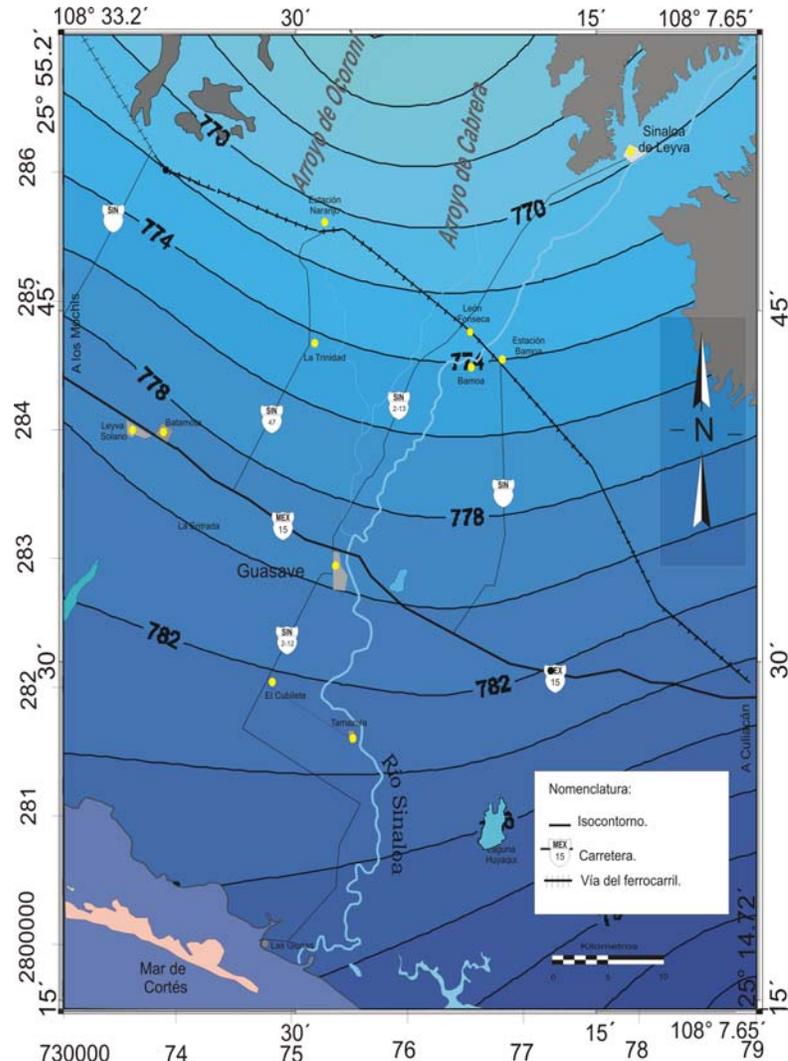


Figura 22.- Evapotranspiración potencial promedio anual en el Valle de Guasave (mm año<sup>-1</sup>) (CONAGUA, 1964-2009).

### 7.3.6 FACTOR DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA (R)

La media de  $R$  fue de  $263.14 \text{ cm}^2 \text{ h}^{-1}$  con cambios graduales de norte a sur de  $858.93 \text{ cm}^2 \text{ h}^{-1}$  a  $84.83 \text{ cm}^2 \text{ h}^{-1}$ . Este factor refleja las diferencias de la precipitación entre el régimen de lluvias y del estiaje; el primer régimen se caracteriza principalmente durante los meses de Agosto y Septiembre por tener una precipitación muy agresiva, de corto período e intensa que alcanza un promedio anual de  $577.9 \text{ mm año}^{-1}$  y propicia la erosión del suelo; mientras que en el segundo régimen la precipitación es de  $314.8 \text{ mm}$

año<sup>-1</sup> y constituye un riesgo menor a la erosión. La variación espacial de  $R$  se muestra en la figura 23 y en ésta se observa.

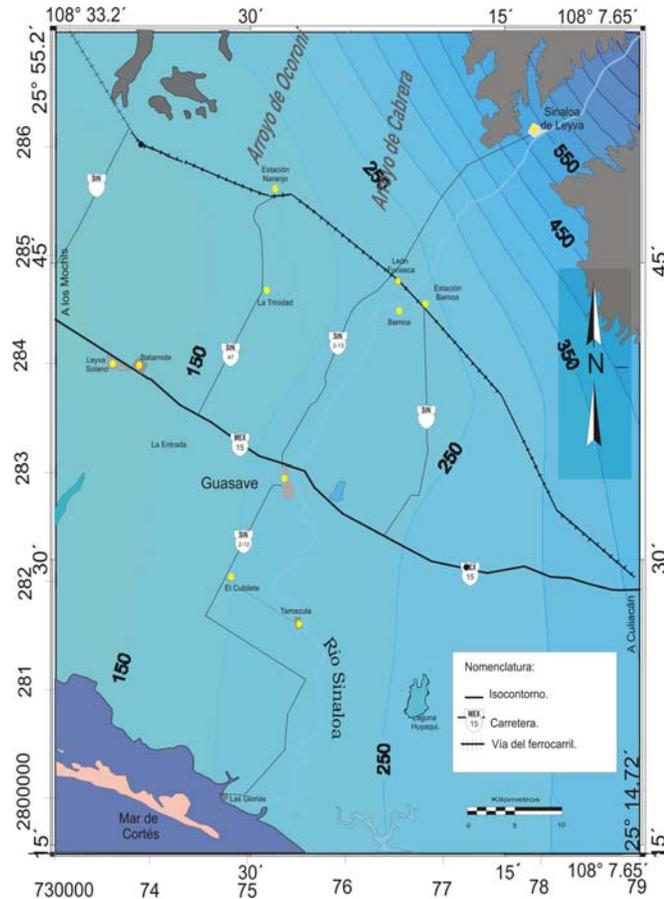


Figura 23.- Erosividad de la lluvia en el Valle de Guasave ( $\text{cm}^2 \text{h}^{-1}$ ).

### 7.3.7 FACTOR DE ORDENACIÓN DE LOS CULTIVOS (C)

El resultado del factor  $C$  que refleja el efecto de los cultivos, se presentaron para la zona serrana, agrícola y la costa tal como se muestra en la figura 24. La zona serrana donde prolifera el bosque y matorral denso se le asignó un valor de 0.001; y a las actividades agrícolas de temporal en las que no se desarrollan cultivos con laboreo intensivo, un valor de 0.35. Dentro de la zona agrícola con maíz o cultivos similares de forma intensiva con laboreo el valor fue de de 0.7, dado que en ciertas regiones predominan las actividades hortícolas para su comercio, también se asignó un valor

representativo de 0.33. En la costa donde existe el manglar, se dio el valor de 0.1. Considerando de manera aislada que tanto en la costa como en la zona agrícola contigua a ésta existen lomeríos de arenas y suelos con salitre procedentes respectivamente del mar y con una cobertura vegetal nula similar a la de las zonas urbanas, se asignó un valor de 1.0. El bosque y matorral denso se presentó en 20 celdas (13.79 %) cubriendo área de 600 km<sup>2</sup>, los cultivos que carecen de un labranza intensiva en sus productos se presentaron en 14 celdas (9.65 %) con una cobertura de 420 km<sup>2</sup>. La zona agrícola donde se siembra el maíz o cultivos similares con labranza intensiva estuvieron presentes en un área de 2, 310 km<sup>2</sup>, con una mayor extensión y presentes en 77 celdas (53.10 %). En esta misma zona agrícola las actividades hortícolas se presentaron en 11 celdas (7.58 %) en un área de 330 km<sup>2</sup>, las zonas de manglar estuvieron representadas en 12 celdas (8.27 %) en un área aproximada de 360 km<sup>2</sup>. Los suelos desnudos presentaron magnitudes similares a la vegetación hortícola.

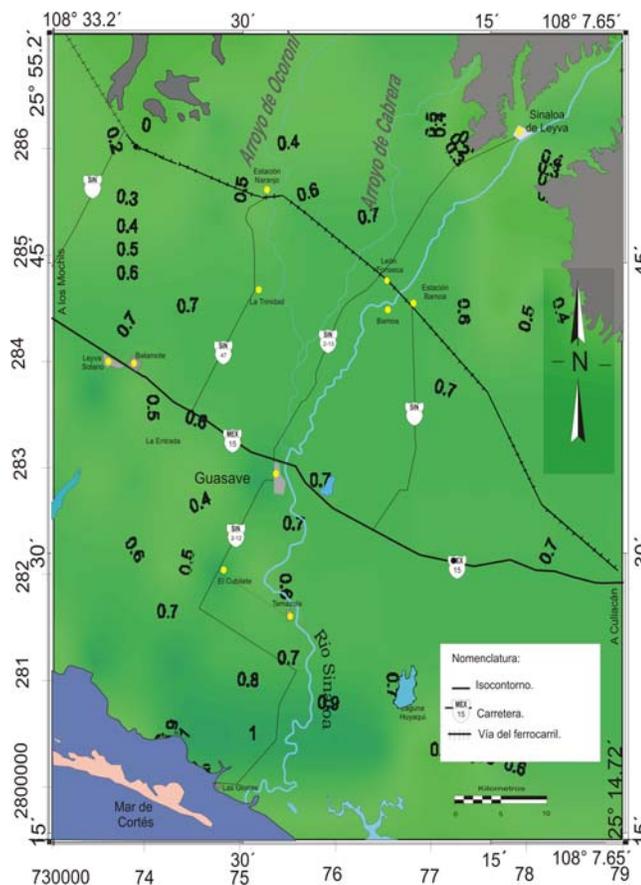


Figura 24.- Factor de ordenación de los cultivos (Adimensional).

### 7.3.8 EROSIÓN HÍDRICA POTENCIAL (EHP)

La manipulación de la información a través de las 150 celdas o unidades de manejo tuvieron elevaciones de 3.58 a 137 msnm (metros sobre el nivel medio del mar) y pendientes de 2.56 a 59.71 grados, en éstos se presentó una EHP que posee una media de  $3.36 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  y variaciones de  $0.01$  a  $29.86 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  que la clasifican de baja a muy alto. Estas variaciones se caracterizaron con un 45.33 % con 68 celdas con valores que van de 0 a  $1 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  y que corresponden a una clase de degradación de ninguna y se registran mayormente en la parte costera de la zona de estudio; con 40.66 % con 61 celdas con valores que van de 1 a  $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  y que corresponden a una degradación baja y un 14.01 % con 21 celdas que se registraron preferentemente en la parte serrana y son valores que van de 10 a  $50 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  que corresponden a una degradación de tipo moderada, no se registraron erosiones de clase alta ( $50$  a  $200 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) ni muy alta ( $> 200 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ). El mayor registro de pérdidas de suelo es en las zonas serranas y regiones que se encuentran a riveras del río Sinaloa como: Sinaloa de Leyva, Ocoroni y Estación Bamóa; debido al incremento de pendientes alcanzando hasta 86.5 grados y ocasionado así el arrastre de sedimentos a las partes bajas (Figura 25) y (Tabla IV).

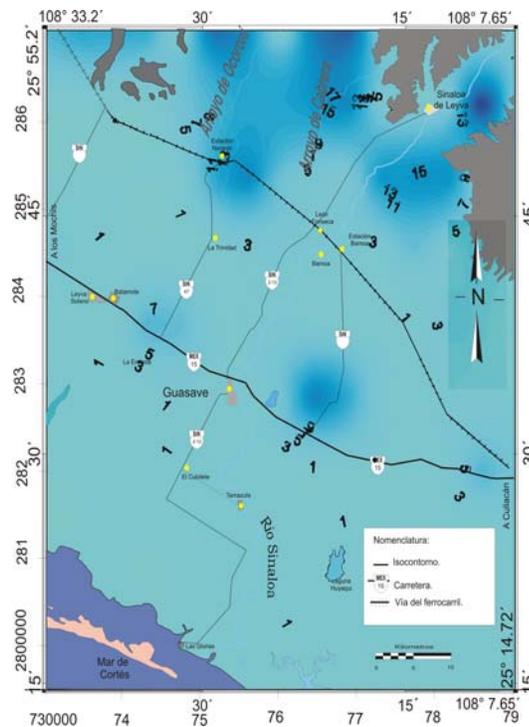


Figura 25.- Erosión hídrica potencial ( $\text{t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ )

Tabla IV.- Valores de los factores R, K, LS, C y EHP.

Valor	R	K	LS	C	EHP
Máximo	858.53	0.61	35.81	0.71	29.86
Mínimo	84.83	0.0015	0.6455	0.001	0.01
Promedio	263.14	0.25	10.55	0.5	3.36

### 7.3.9 EROSIÓN EÓLICA (EE)

Según la figura 26 los valores mínimos presentes en el área son en Sinaloa de Leyva, en la parte noroeste, con valores de pérdida de suelo de 5 hasta 16  $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ . Los valores mayores se presentaron en Estación Naranja así como la parte central del Valle con valores de 18 hasta 35  $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ . Es importante destacar que los vientos provenientes del mar chocan contra las protuberancias de la zona serrana (Sinaloa de Leyva). Las corrientes de viento tienen un alineamiento paralelo a la costa del Mar de Cortés. En el Valle existen solo dos tipos de erosión: la ligera y la moderada. La erosión eólica ligera presenta una degradación de 551.56  $ton\ ha^{-1}\ año^{-1}$  en un área de afectación de 3413.87  $km^2$ .

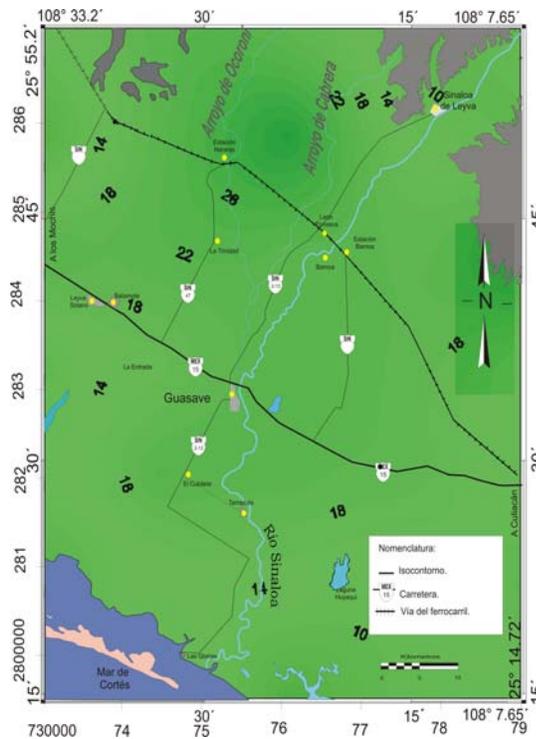


Figura 26.- Erosión eólica para el Valle de Guasave ( $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ).

### 7.3.10 ÍNDICE DE ARIDEZ DE MARTONNE

De acuerdo a la figura 27, el índice de aridez de Martonne varía desde resultados menores correspondientes a menor humedad en la zona del Cerro de Tetameche y Ruiz Cortines con valores desde 13, correspondientes a un índice de aridez de Semiárido hasta 10 correspondientes a un índice de aridez Árido. Los valores más altos registrados en el Valle de de Guasave fueron en la parte serrana (Sinaloa de Leyva) y parte centro (Estación Bamoa y Estación Naranja), es decir, donde tienen presencia los cuerpos hídricos (Río Sinaloa, Arroyo de Cabrera y arroyo de Ocoroni) con valores adquiridos de 14.2 hasta 15.5, es decir, en el Valle de Guasave solo se presentan dos índices de aridez según la metodología de Martonne (Semiárido y árido). El índice de aridez Semiárido representa un 95 % aproximadamente de la superficie total y el índice de aridez Árido representa un 5 % restante.

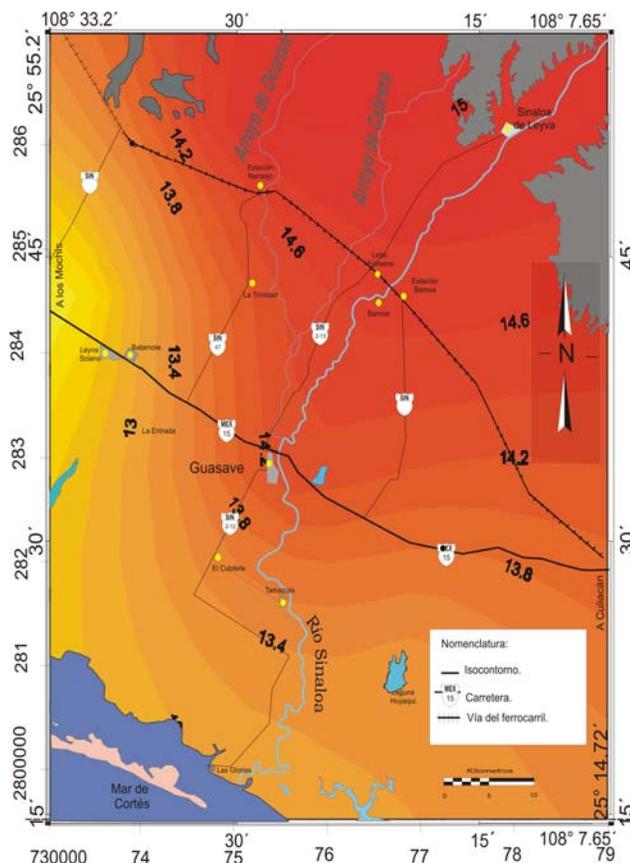


Figura 27.- Índice de aridez de Martonne para el Valle de Guasave (Adimensional)

### 7.3.11 ÍNDICE DE ARIDEZ DE DANTIN CERECEDA

De acuerdo al índice de aridez de Dantin Cereceda, en el Valle, (Figura 28) se presentan dos índices de aridez: Semiárido y Árido. Con respecto al índice de aridez Semiárido éste comprende la mayor superficie con 97 % del total aproximadamente y el 3 % restante al índice de aridez Árido. Las comunidades con un índice de aridez Semiárido son Sinaloa de Leyva, Estación Naranjo, Estación Bamóa, La trinidad, Guasave, el Cubilete Tamazula, Playa Las Glorias y La Entrada. La zona de transición entre el ambiente Árido y Semiárido se presenta en la comunidad de Leyva Solano y la comunidad con un índice de aridez de tipo Árido son las zonas aledañas a Ruiz Cortines.

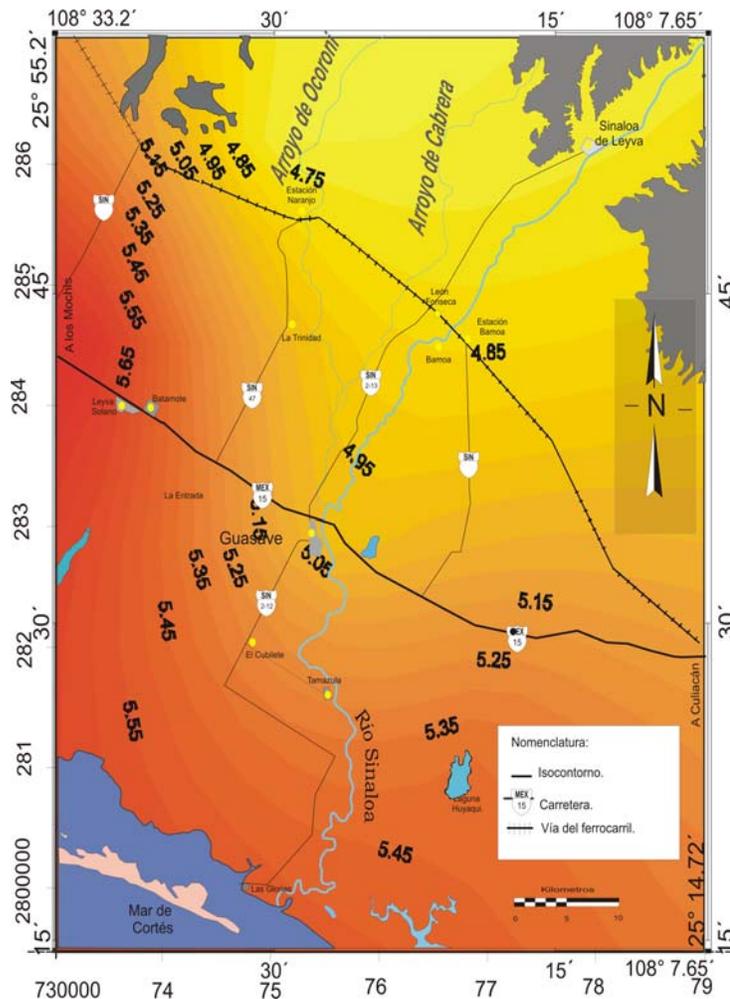


Figura 28.- Índice de aridez de Dantin Cereceda (Adimensional).

### 7.3.12 ÍNDICE DE HUMEDAD PROMEDIO ANUAL DEL SUELO

De acuerdo con los resultados de la figura 29 los valores en su totalidad se refieren a suelos que manifiestan valores de 0.55 hasta 0.66 lo cual significa que los suelos del Valle son predominantemente deficientes de humedad con respecto al requerimiento de las plantas, por tal es importante cuidar y saber administrar el recurso hídrico para disminuir el riesgo de sequías y evitar la disminución del índice de humedad promedio anual del suelo que se encuentra por abajo de 0.5 y que a partir de este valor se considera a los cultivos que manifiestan sequía, la cual es perjudicial para el desarrollo socioeconómico óptimo de cualquier región.

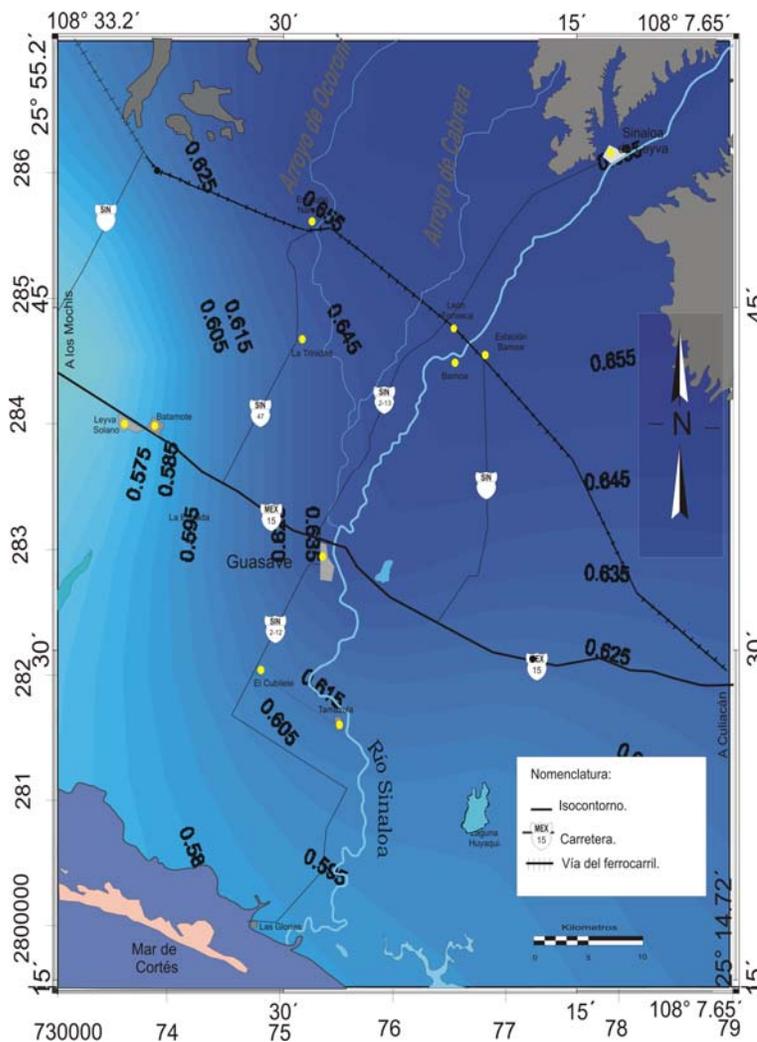


Figura 29.- Índice de humedad promedio anual del suelo (Adimensional)

### 7.3.13 CARGA HIDRÁULICA (H) Y VARIACIONES DEL NIVEL FREÁTICO (Nf)

El promedio de la profundidad del nivel freático (Nf) fue de 3.59 m y estuvo dentro del intervalo 0.1 a 9.2 m; el 15.3 % registró <1 m, el 24 % entre 1.1 y 2 m, el 20 % entre 2.1 y 4 m, el 28 % entre 4.1 y 6 m y el 12.6 % fue >6.1 m. Exceptuando la protuberancia de la serranía del Tetameche, que se encuentra al Noroeste de la región, con una altura promedio de 194.2 msnm, el promedio de H alcanzó 34.7 msnm y estuvo dentro del intervalo 4 a 85 msnm; el 14 % fue <10 msnm, el 31.3 % entre 11-20 msnm, el 17.3 % entre 21-40 msnm y el 16 % entre los 40-60 msnm y el 21.3 % fue > 60 msnm.

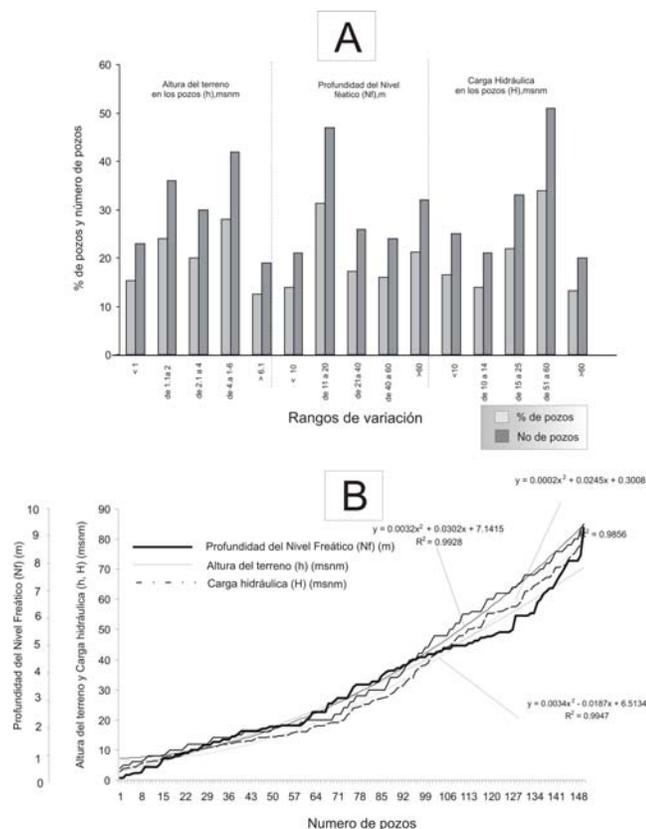


Figura 30. Porcentaje de intervalos de variación del nivel freático (Nf), la altura del terreno (h) y la carga hidráulica (H) (A) y comparativos morfológicos entre la altura de la superficie del terreno (msnm), profundidad del nivel freático (m) y la carga hidráulica (B) (msnm) del acuífero del Río Sinaloa (Norzagaray, 2009).

Se observa en la sección A de la Figura 30 que la profundidad del Nf y H presentan ascensos y descensos que caracterizan al acuífero con un agotamiento. En la parte B, el comparativo entre las tendencias de las curvas de la profundidad de Nf, h y H, al tratarse de un acuífero libre, muestran morfologías similares entre sí. Lo anterior se demostró mediante el resultado de ANOVA con un valor de  $F = 0.01$  al que le correspondió un “valor de P” de 0.99, mayor éste último al nivel de significación de 0.05; concluyendo que no existen diferencias significativas entre las medias de Nf, h y H. El análisis grupal ANOVA (Nf, h y H) también dio a conocer una diferencia honestamente significativa de Tukey entre Nf y h de 0.0028, entre Nf y H de 0.0544 y entre h y H de 0.0516; marcando un parecido entre Nf y h del 99 %, entre Nf y H del 97 % y entre h y H del 97 %. La aproximación numérica entre las curvas de la figura 2 se rige respectivamente por un error cuadrático ( $R^2$ ) de 0.992, 0.994 y 0.998. Dicha aproximación se describe mediante una expresión cuadrática de segundo orden del tipo:  $ax^2+bx+c$ , donde a, b y c son constantes que definen su morfología. Las constantes de la profundidad de h y H fueron  $a = 0.0032$  y  $0.002$ ,  $b = 0.03$  y  $0.024$ , y  $c = 7.141$  y  $0.3008$ , respectivamente. Las constantes para la profundidad del Nf fueron  $a = 0.0034$ ,  $b = -0.018$  y  $c = 6.51$  (Sección B, Figura 30).

#### **7.3.14 VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO**

En la figura 31 se observan valores de vulnerabilidad hidrogeológica desde  $v_i$  hasta  $v_a$  alta. En la parte central se manifiesta una  $v_{mb}$  debido a la presencia de cuerpos hídricos y ésta es la de mayor presencia en el Valle. Con respecto a la  $v_a$ , se presenta a orillas de la costa y se presenta en menor proporción en el área de estudio (figura 32).

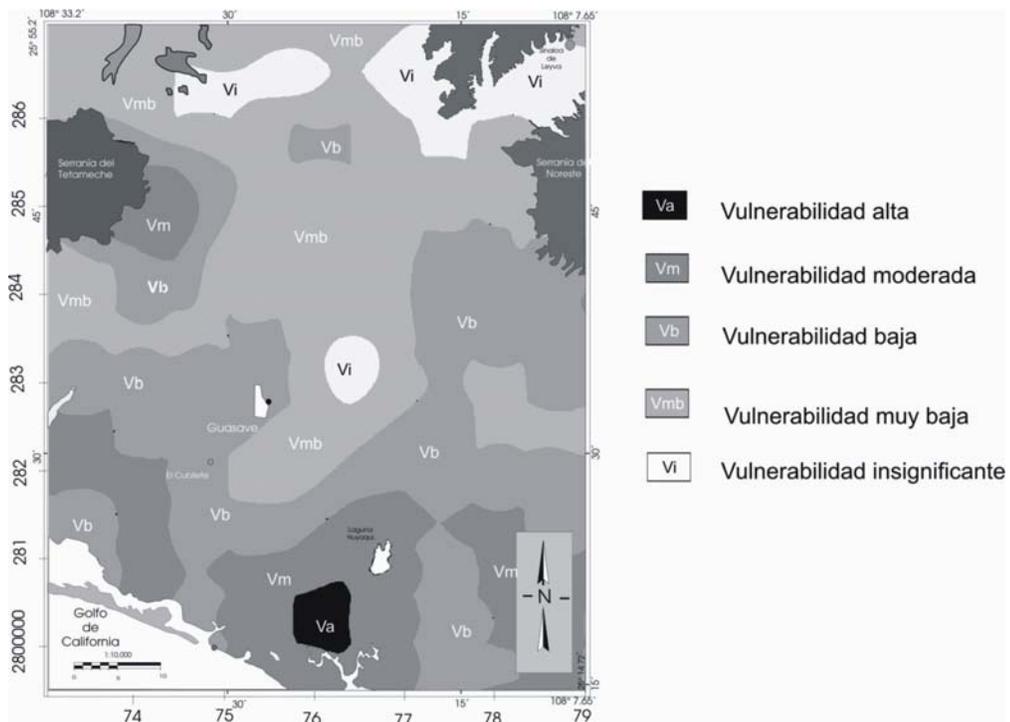


Figura 31. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero del Río Sinaloa (Llanes, 2009) (adimensional).

La dirección del flujo subterráneo e índice DRASTIC se presentan en la figura 32. En cuanto a la dirección del flujo subterráneo se observa que el flujo sigue la dirección de los cuerpos de agua superficiales tales como los arroyos de Cabrera y Ocoroni y el río Sinaloa y su dirección es desde la parte Norte hacia el Sur para finalmente desembocar en el Mar de Cortés. Con respecto al índice DRASTIC los mayores índices se presentan en forma paralela a la costa de playa Las Glorias; con índice DRASTIC de hasta 166 (figura 32).



ambientales mayores a los IDS con valores de 125, por lo que el IDA es 300 % mayor que los ISD.

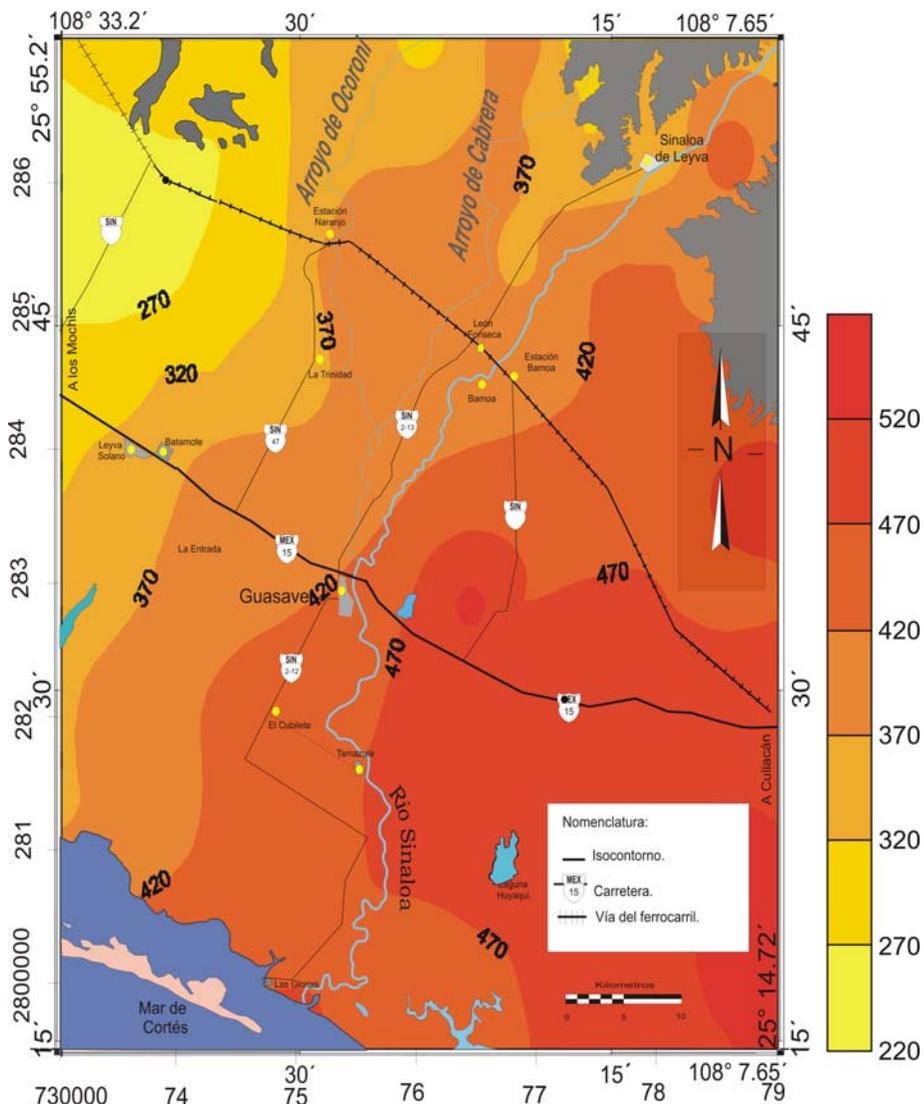


Figura 33.- Integración de los Indicadores Ambientales para la desertificación (IAD) (Adimensional).

## 7.4 INDICADORES SOCIOECONÓMICOS

### 7.4.1 DETERMINACIÓN DE LOS INDICADORES SOCIOECONÓMICOS

Se realizaron 20 encuestas a los expertos del tema. Cada encuesta consistió en un total de 87 preguntas en las que intervinieron 17 indicadores (socioeconómicos, suelo-agua, y

ambientales). Los indicadores que intervinieron en el proceso se mencionan a continuación:

- Uso del suelo
- Demografía
- Infraestructura y tecnología utilizada en la agricultura
- Actividades productivas presentes por explotación
- Volumen de agua por ciclo
- Conductividad hidráulica
- Intrusión salina
- Vulnerabilidad del acuífero a la contaminación
- Cambio climático local

Tabla V.- Resultados de las encuestas para aplicar el método Delphis para ISD, IAD y ISED.

ÁREA DE CONOCIMIENTO DE LAS PREGUNTAS	NÚMERO DE PREGUNTAS	SUMA DE PREGUNTAS A FAVOR DE LA DESERTIFICACIÓN	SUMA DE PREGUNTAS EN CONTRA DE LA DESERTIFICACIÓN	TOTAL DE PREGUNTAS
<b>Preguntas de socioeconomía</b>	<b>25</b>	<b>467</b>	<b>33</b>	<b>500</b>
Usos del suelo	5	95	5	100
Demografía	5	93	7	100
Infraestructura y tecnología utilizada en la agricultura	5	82	18	100
Actividades productivas presentes por explotación	5	100	0	100
Volumenes de agua/ciclo	5	97	3	100
<b>Preguntas sobre suelos</b>	<b>32</b>	<b>504</b>	<b>137</b>	<b>641</b>
Porosidad	9	119	61	180
Densidad aparente	4	80	0	80
pH	4	80	0	80
Textura	5	66	34	100
M.O.	5	81	19	100
Cond. Hidráulica	5	80	20	100
<b>Preguntas sobre aguas subterráneas</b>	<b>10</b>	<b>192</b>	<b>7</b>	<b>199</b>
Dispersión de contaminates en el acuífero	5	97	3	100
Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero	5	93	7	100
<b>Preguntas sobre el medio ambiente</b>	<b>20</b>	<b>328</b>	<b>72</b>	<b>400</b>
Precipitación promedio anual	5	100	0	100
Índice de humedad promedio anual del suelo	5	66	34	100
Evapotranspiración potencial	5	64	36	100
Efectos del cambio climático local	5	96	4	100
<b>SUBTOTAL DE PREGUNTAS</b>	<b>87</b>	<b>1492</b>	<b>249</b>	<b>1740</b>
<b>Número de encuestas</b>	<b>20</b>			
<b>TOTAL DE PREGUNTAS</b>	<b>1740</b>			

#### **7.4.2 INTEGRACIÓN DE LOS INDICADORES SOCIOECONÓMICOS PARA LA DESERTIFICACIÓN (ISED)**

Los valores de esta integración arrojaron resultados constantes con un valor de 420.3 unidades. Se consideró que a lo largo y ancho de la zona existe un ISED constante, pues no se obtuvieron valores puntuales en cuanto a cada celda.

El ISED se reflejó con un mayor promedio con 420.3 unidades con respecto a la integración de los Indicadores inherentes al suelo en el Valle de Guasave para la Desertificación (ISD) y a la integración de los indicadores Ambientales para la Desertificación (IAD) estudiados en este trabajo de Tesis que obtuvieron un promedio de 125 y 412 unidades respectivamente.

#### **7.5 INTEGRACIÓN DE LOS INDICADORES DEL SUELO (ISD), AMBIENTE (IAD) Y SOCIOECONOMÍA (ISED) PARA LA DESERTIFICACIÓN**

Los valores de la integración de todos los indicadores estudiados en este trabajo de Tesis, muestran una tendencia al incremento en la dirección Noroeste-Sureste.

Los mayores valores se presentan en la zona costera y La Laguna de Huyaqui con magnitudes de 940 a 1109.3 unidades que se presentaron en 90 celdas con un área de 2160 Km<sup>2</sup> (60 %).

Los mínimos se registraron en la zona serrana particularmente en la comunidad de Sinaloa de Leyva así como también en la parte Noroeste del Valle con magnitudes de 776.3 a 935.3 unidades cubriendo un área de 1440 Km<sup>2</sup> (40 %) (Figura 34).

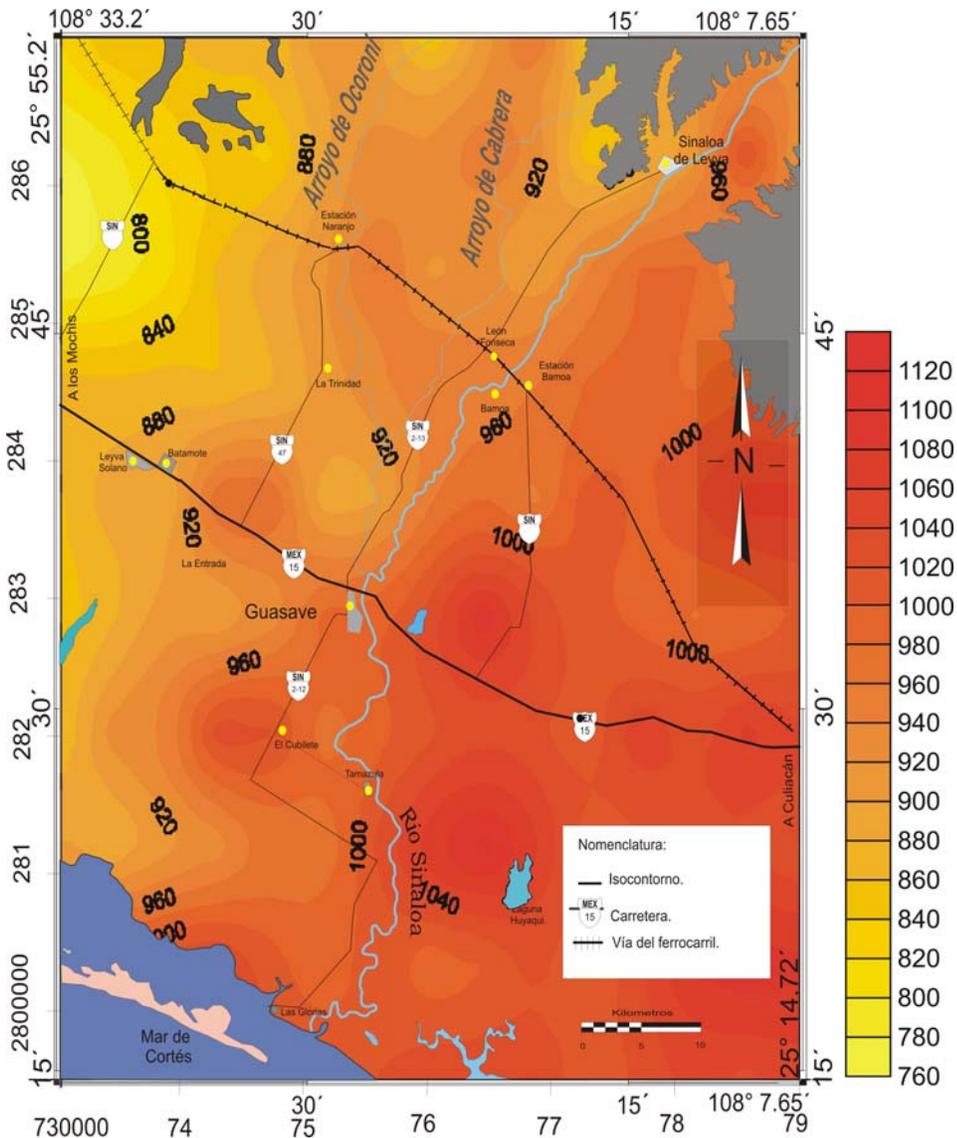


Figura 34.- Integración de todos los indicadores (ISD, IDA y ISED) para la desertificación en el Valle de Guasave (Adimensional).

## 7.6 SENSIBILIDAD A LA DESERTIFICACIÓN

La integración que define la sensibilidad a la desertificación y que conjunta a todos los indicadores, muestra una tendencia que incrementa en la dirección Suroeste-Noreste. Los mayores valores se presentan en la zona costera y La Laguna de Huyaqui con magnitudes de 5 a 4 unidades con una sensibilidad muy alta y alta respectivamente que representan el 48.67 % (1752 Km<sup>2</sup>) del área total. La sensibilidad de 2 y 3 unidades

correspondientes a una clase media baja y media alta respectivamente se presentan en la parte central y norte del Valle, donde se localizan las comunidades de Guasave, El Cubilete, Estación Bamoá, Tamazula y Estación Naranjo y representan el 45.33 % (1632 Km<sup>2</sup>) del área total. Por último, la baja sensibilidad a la desertificación en el área, representada por 1 unidad, se localizó en la zona noroeste y serrana del Valle; donde se encuentra la comunidad de Sinaloa de Leyva y representa el 6 % (216 Km<sup>2</sup>) del área total (Figura 35).

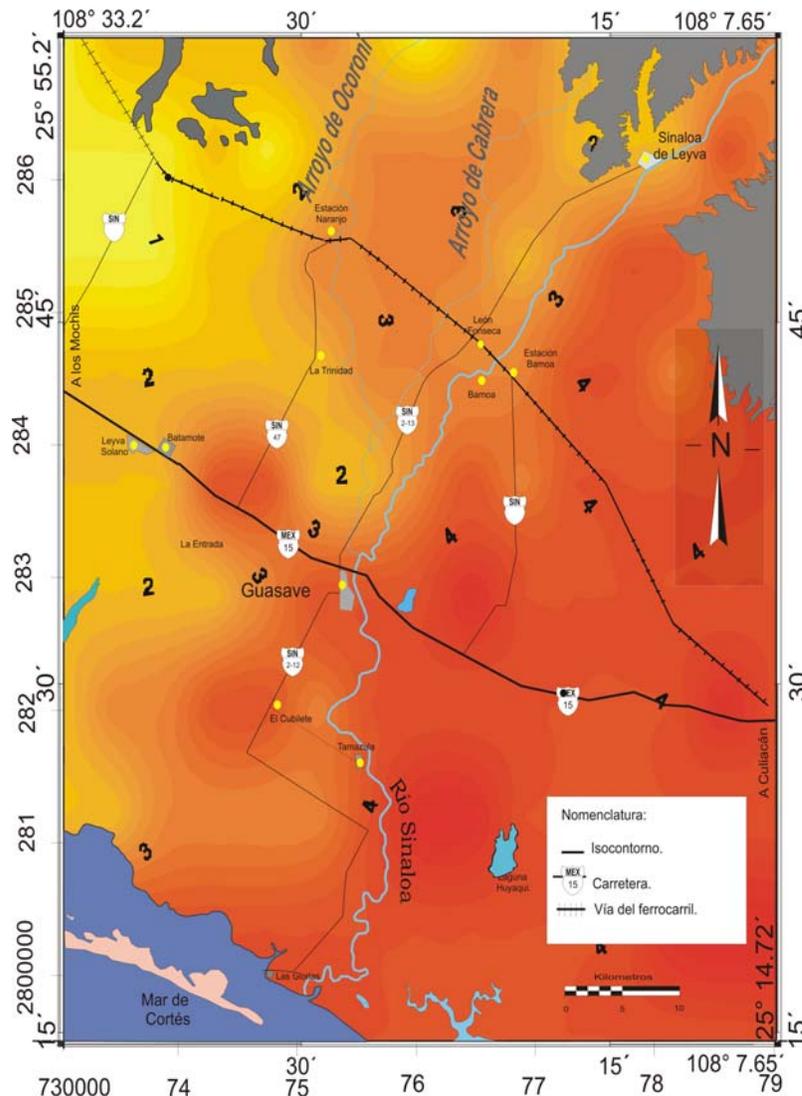


Figura 35.- Sensibilidad a la desertificación en el Valle de Guasave (Adimensional).

## 7.7 ANÁLISIS ESPECTRAL

Los resultados del análisis espectral muestran variaciones en la Continuidad (C) que va de 4 a 10 unidades, una Resolución (R) que varió de 4 a 10 unidades y una Amplitud (A) que presentó variaciones de 0.45 hasta  $5.70 \text{ Hz s}^{-1}$ . En la figura 36, se presentan por cuestiones de espacio, solamente las celdas 20 y 21, mismas que ilustran los espectros de potencia y radiales, mediante los cuales se definieron los parámetros de C, R y A. El mismo procedimiento para definir C, R y A se aplicó en las 150 celdas que constituyeron en forma discreta toda el área de estudio.

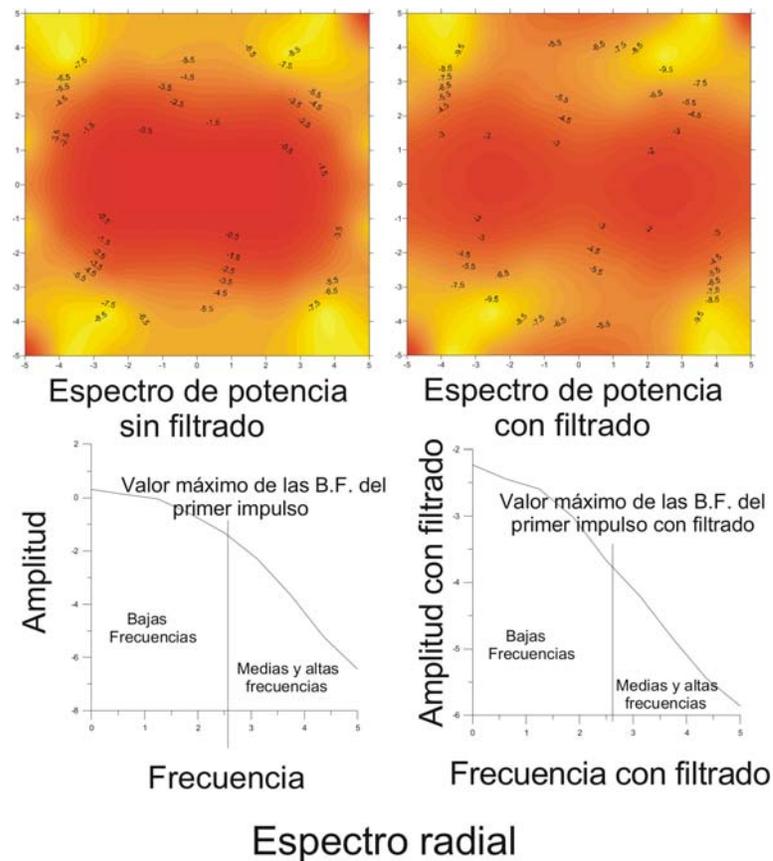


Figura 36.- Espectros de potencia y radiales donde intervienen: Continuidad (C), Resolución (R), Amplitud (A) y el grado de certificación en el Valle (GD).

## 7.8 GRADO DE DESERTIFICACIÓN

En la figura 37, resultante del análisis espectral, se definieron los rangos de desertificación que se muestran en la Tabla VI. El mayor GD se presentó en la parte costera con 5 y 4; estas unidades corresponden a una intensidad que va de muy alta a alta respectivamente; y estuvo presente en 64 celdas cubriendo una superficie aproximada de 1536 km<sup>2</sup> que corresponde a un 42.66 % del área total. En la parte central se manifiesta un GD de 3 y 2 unidades con intensidades que varían de media baja a media alta respectivamente. Este grado que va de 2 a 3 unidades manifestó una cobertura de 53 celdas que corresponden a 2171 km<sup>2</sup> (35.33 % del área total). La zona serrana, localizada al norte de la zona de estudio, con GD de 1 unidad, es la que menos se encuentra afectada por este proceso de desertificación; le corresponde un área de 1811 km<sup>2</sup>. (22 % del área).

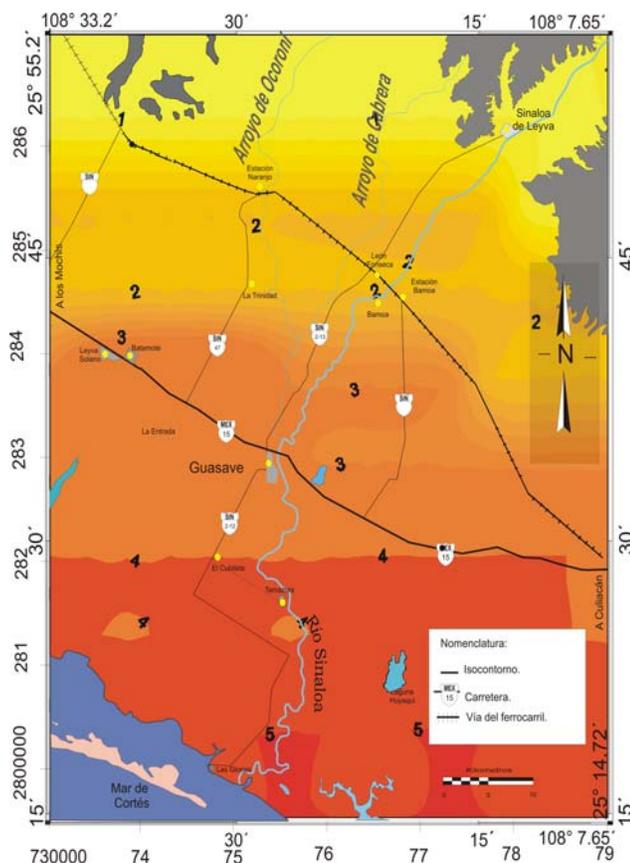


Figura 37.- Grado de Desertificación del Valle de Guasave (Adimensional).

Tabla VI.- Clasificación del Grado de la Desertificación

<b>Intervalo, Intensidad y Grado de la Desertificación</b>		
<b>Intervalo</b>	<b>Intensidad</b>	<b>Grado</b>
24.80-21.00	Baja	1
20.90-18.90	Media baja	2
18.80-16.80	Media alta	3
16.70-14.45	Alta	4
14.35-10.80	Muy Alta	5

## **7.9 PROPUESTAS DE MITIGACIÓN Y REMEDIACIÓN**

Mediante información en la literatura, se proponen las siguientes alternativas de remediación para disminuir el proceso de desertificación en el Valle de Guasave.

### **7.9.1 SUELOS Y AGUA SUBTERRÁNEA**

De acuerdo con Altieri (1990), en América Latina los enfoques tecnológicos del desarrollo agrícola en el Valle no han tomado en cuenta las enormes variaciones del ambiente, las presiones de la población, relaciones económicas y organizaciones sociales que existen en la región, y consiguientemente el desarrollo agrícola ha estado puesto a la par con las necesidades y potencialidades de los campesinos locales. Este desajuste en la región se puede caracterizarse por tres aspectos:

- a) Cambio tecnológico concentrado.
- b) Cambio tecnológico beneficio de la producción de bienes agrícolas de exportación, impactando marginalmente la productividad de los productos alimentarios, cultivados en gran medida por el sector campesino.
- c) El Valle se ha convertido en un importador neto de insumos químicos y maquinaria agrícola, aumentando los gastos del gobierno y agravando la dependencia tecnológica.

Debido a lo anterior, en el Valle de Guasave se recomienda el uso de estrategias de producción con base en técnicas agroecológicas, ya que han surgido como un enfoque nuevo al desarrollo agrícola más sensible a las complejidades de las agriculturas locales, al ampliar los objetivos y criterios agrícolas para abarcar propiedades de sustentabilidad, seguridad alimentaria, estabilidad biológica, conservación de los recursos y equidad junto con el objetivo de una mayor producción (Altieri, 1987).

Varias características del enfoque agroecológico al desarrollo de la tecnología y a su

difusión lo hacen especialmente compatible con la racionalidad de las Organizaciones no Gubernamentales (ONG's), que viendo la gravedad del problema agrícola están participando en la búsqueda de un desarrollo alternativo de la agricultura. Hay tres grupos de métodos básicos para remediar la contaminación de aguas subterráneas: 1) separación; 2) contención; y 3) tratamiento. El primero elimina la contaminación del subsuelo, e incluyen los métodos de pump-and-treat, y ventilación del terreno (SVE). El segundo controla el movimiento de la contaminación e incluye barreras físicas como trincheras de lodos y controles hidrodinámicos (campos de pozos). Por último, las tecnologías de tratamiento incluyen la destrucción o transformación de la contaminación mediante reacciones químicas o biológicas, in situ y/o ex situ, o combinaciones.

#### **7.9.1.1 SEPARACIÓN DE CONTAMINANTES**

Técnicas electrocinéticas.- Se recomiendan en zonas que necesitan por lo menos un par de electrodos alrededor del área a tratar, y una corriente DC, de 50 a 150 V. El tratamiento electrocinético, consta de varios procesos: electromigración, electroósmosis y electrofóresis, que movilizan a los contaminantes y electrolisis que los degrada. Por ello, los procesos electrocinéticos se usan para la movilización de metales, radionucleidos, o residuos mixtos (EPA, 1997). Un proceso llamado LASAGNA combina el transporte electrosmótico con la captura de los contaminantes por adsorbentes. Este proceso se aplicó en el campo en un sitio contaminado por TCE con una eficacia del 99 % (NRC, 1999).

#### **7.9.1.2 CONTENCIÓN**

Barreras Impermeables.- Las barreras impermeables, para las zonas saturada y vadosa, pueden impedir en el Acuífero Sinaloa la migración de los líquidos de fase no acuosa (NAPLs). Son tecnologías probadas y su misión es confinar pequeñas bolsas de NAPLs que pueden contaminar el agua subterránea. Hay barreras verticales, coberteras superficiales, barreras horizontales, y combinaciones de ellas. La configuración va de

barreras verticales simples, coberteras a muros que rodean la zona contaminada. La configuración depende de la movilidad del contaminante, agua de percolación, velocidad y dirección del flujo del agua. Las barreras verticales pueden llegar a 70 metros de altura excepto sobre rocas duras.

### **7.9.1.3 TRATAMIENTO**

Fitoremediación.- Específicamente para el caso de la erosión se recomiendan, las zonas de baja aptitud hacia actividades de menor exigencia de inversión, esto permitirá dentro del término de un año, favorecer la cubierta vegetal mediante el uso de cereales como la avena y la cebada, entre otros. Esto permitirá reducir los niveles de erosión y aprovechar al máximo la humedad del suelo. La fitoremediación también considera el desarrollo de plantas o cultivos con la finalidad de incrementar la capacidad productiva de los terrenos y disminuir la erosión del suelo (Figuroa y Morales, 1992). Los objetivos que se persiguen con estas prácticas en el Valle de Guasave son las siguientes:

- 1.- Establecer una cubierta vegetal en zonas específicas tales como: la parte central, Este y Oeste en el Valle.
- 2.- Disminuir la Erosión Hídrica Potencial y eólica mediante fitoremediación.
- 3.- Lograr una mejor utilización de los terrenos al mejorar sus características físicas y químicas.

Dada la gran variedad de especies vegetales existentes y las formas en que se manejan en el Valle, se señalan las prácticas que puedan lograr los objetivos antes señalados:

- a) Rotación de cultivos
- b) Cultivos en fajas
- c) Reforestaciones

La clasificación de la aptitud de los suelos en el Valle puede ser una herramienta para el ordenamiento de las actividades productivas. También se sabe que las prácticas mecánicas son un medio para disminuir los efectos de la sequía. Las prácticas

vegetativas y la labranza de conservación permiten la retención de humedad y la oportunidad de lograr un producto bajo condiciones de baja o escasa humedad.

### **7.9.2 AMBIENTE**

Un problema importante en el Valle de Guasave es la escasez y calidad de agua, por ende, se requieren medidas de uso eficiente del recurso. A continuación, se mencionan algunas de las técnicas más usuales para el uso eficiente del agua:

1.- La utilización de sistemas de riego localizados como, como el sistema por goteo, ya sea con manguera rígida o con cintilla; superficial o subterránea; y la micro aspersión, utilizada con buenos resultados en frutales y en suelos de textura gruesa. Está claro que una herramienta bastante útil para desarrollar la sustentabilidad en la región es la cosecha de agua, ya que en los últimos años los períodos de lluvia han sido frecuentemente irregulares. Finalmente, entre los aspectos importantes ante el escenario de cambios climáticos que se reflejarán en incrementos en la cantidad de CO<sub>2</sub> y de la falta de agua en el suelo, se tienen que generar estrategias para:

- 1.- Evitar la pérdida de agua de la lluvia o el riego por evaporación directa del suelo
- 2.- Creación de genotipos altamente eficientes en el uso del agua, que sean capaces de interceptar menor cantidad de radiación solar y que el cociente transpiración/evaporación sea mayor.

### **7.9.3 SOCIOECONOMÍA**

Uno de los indicadores más importantes para la prevención de la desertificación es la educación y número de habitantes, es decir, a mayor número de analfabetas mayor será la vulnerabilidad a la desertificación y viceversa. Lo anterior se debe principalmente al desconocimiento que está ocasionando la sobreexplotación de los recursos naturales. Es destacable el proceso de divulgación de la información, ya que ésta, tomará un papel

estratégico al difundir el estado actual y futuro de los recursos, pues los recursos, pueden tener carácter de no renovables, como es el caso del suelo.

#### **7.10 IMPORTANCIA DE LOS ANÁLISIS ESPECTRALES EN EL VALLE DE GUASAVE**

Está claro que la herramienta de análisis espectral ha sido, es y seguirá siendo utilizada en amplias ramas de la ciencia (biología, física, química, medicina, medio ambiente, etc.) de tal suerte, que es una herramienta confiable al momento de conferir la importancia de ocurrencia de ciertos fenómenos. En este trabajo de Tesis, se utilizaron los análisis espectrales para conocer los indicadores más importantes o ponderantes para el proceso de desertificación en el valle de Guasave, lo cual es sumamente importante ya que conociendo cual o cuales son los indicadores con mayor presencia en este fenómeno se pueden atacar éstos con medidas específicas de remediación o prevención según sea el caso. Esta metodología es aplicable a cualquier región del mundo lo cual redundará en una gran importancia, ya que es un paso a la sustentabilidad de diversas regiones a nivel mundial y de esta forma se puede garantizar la sustentabilidad de los recursos naturales.

## 8 DISCUSIÓN

Se recomienda en el Valle de Guasave en el contexto de la producción agrícola, que la calidad del suelo sea interpretada como la aptitud para el uso (Larson y Pierce, 1994), específicamente en relación a la capacidad de sostener el crecimiento de los vegetales, sin que esto resulte en la degradación del mismo o en un daño ambiental (Gregorich y Acton, 1995).

La gran mayoría de los suelos del Valle de Guasave se componen principalmente de vertisoles con poca cantidad de materia orgánica la cual en promedio manifiesta 0.66 % , puesto que se obtuvieron valores de densidad aparente ( $\rho_a$ ) de 1.2 a 1.9 g cm<sup>-3</sup> y según Ahmad (1983) basados en muestras de suelo pequeñas los valores de densidad aparente en suelos de tipo vertisol oscilan entre 1.3 y 2.0 g cm<sup>-3</sup>, aunado a lo anterior Davis y Lucas (1959) mencionan que los suelos orgánicos (Histosoles) tienen valores de densidad aparente entre 0,14 y 0,54 g cm<sup>-3</sup>, la cual aumenta conforme disminuye su contenido de fibra por efecto de su descomposición y también con el aumento en el contenido de la fracción mineral (Everett, 1983). En el caso de la porosidad, los suelos de Guasave registran un promedio de 39.96 % y de acuerdo con resultados de textura en el área de estudio se muestran suelos arcillo-limosos y francos distribuidos en toda la zona y éstos son susceptibles a la desertificación mediante una escasa aireación y penetración del agua producto de riego (Miralles *et al.*, 2002). También se considera que los suelos arcillosos presentes en el Valle son altamente susceptibles de salinización y degradación (INEGI, 2006) y éstos se pueden ver afectados por los factores de ISD, IAD y ISED. En el caso del pH, los suelos registran valores de 3.2 a 5.98 que de acuerdo con Moreno-Dahme (1993) en un intervalo de 4.2-5.59 el pH se considera fuertemente ácido y por debajo de un 4.2 se considera un suelo con pH extremadamente ácido, por lo tanto el 80 % de los suelos del Valle de Guasave mantienen un pH fuertemente ácido y el 20 % restante son extremadamente ácidos, es decir no existen suelos neutros ni alcalinos.

Con respecto a los indicadores socioeconómicos, se obtuvieron resultados que evidencian poca materia orgánica en los suelos, lo cual manifiesta una desaprobación conforme a la manera de utilizar actualmente los recursos agua-suelo. También en la inmensa mayoría de los resultados se observa una sobreexplotación de estos recursos sin el previo cuidado de la preservación y de la sustentabilidad y se debe en parte por el

escaso nivel educativo y el aumento de la población, en referencia a lo anterior la CESOP (2004) menciona que la población total del municipio de Guasave es de 277,402 habitantes con un 9.20 % de analfabetismo en personas con 15 años de edad o mayores. También 34.95 % de la población Guasavense con 15 años de edad o más no terminó la escuela primaria y por último 50.04 % de las viviendas del municipio registran algún nivel de hacinamiento y se espera que estos indicadores se eleven en el futuro. Por lo que es importante difundir los estragos que se están generando mediante medios de divulgación con los usos discriminados de los recursos y proponer medidas de remediación y prevención para evitar la desertificación.

Con respecto a la erosividad de la lluvia, refleja las diferencias de precipitación entre el régimen de lluvias y el de estiaje; el primer régimen se caracteriza principalmente durante los meses de Agosto y Septiembre por tener una precipitación muy agresiva, de corto período e intensa que alcanza un promedio anual de 506.19 mm y propicia la erosión del suelo; mientras que en el segundo régimen la precipitación es de 314.8 mm año<sup>-1</sup> y constituye un riesgo menor a la erosión.

El valor máximo de la erosividad de la lluvia (R) es de 858.93 cm<sup>2</sup> h<sup>-1</sup> con un promedio de 263.14 cm<sup>2</sup> h<sup>-1</sup>. Los resultados de erosividades mayores de 412.98 hasta 858.93 cm<sup>2</sup> h<sup>-1</sup> se manifiestan en la parte central y serrana del Valle respectivamente; así como los valores mínimos desde 84.32 hasta 397.67 cm<sup>2</sup> h<sup>-1</sup> se presentan en la Noroeste y en la parte costera respectivamente. Los resultados son similares a los reportados por alonso *et al*, (2007) en el Oeste de Cuba

Para relacionar la erosión del suelo a consecuencia de la erosión hídrica se recomienda el grado de estabilidad que presentan los agregados del suelo al agua (Bryan, 1968), los resultados de la zona B del factor K de la figura 16 se atribuyeron a la buena agregación que tienen los suelos por la adecuada litificación y contenido de arcillas que permite a las partículas se mantengan unidas lo que dificulta el proceso de erosión. Las zonas C y D de una resistencia a la erosión de baja a moderada del centro y la costa se encuentra constituida por 108 celdas (74.48 %) y cubre sobre los terrenos destinados a la actividad agrícola un área aproximada de 3240 km<sup>2</sup>. Las zonas C y D se atribuyeron a que los riegos agrícolas por gravedad, que son los más comunes, hicieron que la estabilidad de los agregados del suelo disminuyeran, que éstos se dispersaran y que saturaran los poros; por lo que el agua en lugar de infiltrarse fluyó sobre la superficie haciendo

sensibles a los suelos a la erosión (Cerdá, 2001). El comportamiento de las zonas C y D se debió también a la variación de 9.09 a 950.49 m día<sup>-1</sup> de la permeabilidad y al poco contenido de materia orgánica de 0.07 a 4.7 %; la cual en ésta última el 82 % de las muestras tuvieron un porcentaje < 4 % que define dentro de la región una superficie de 3480 km<sup>2</sup> en la cual la baja resistencia a la erosión es una consecuencia de la baja estabilidad de los agregados del suelo más que del tamaño de sus partículas elementales (Morgan, 1997).

La EHP presentó una media de 3.36 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y variaciones de 0.01 a 29.86 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> que la clasifican de baja a muy alto según Del Campo y Buceta (1994). Estas variaciones se caracterizaron con un 45.33 % con 68 celdas con valores que van de 0 a 1 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y que corresponden a una clase de degradación de ninguna y se registran mayormente en la parte costera de la zona de estudio; con 40.66 % con 61 celdas con valores que van de 1 a 10 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y que corresponden a una degradación baja y un 14.01 % con 21 celdas que se registraron preferentemente en la parte serrana. El mayor registro de pérdidas de suelo es en las zonas serranas y regiones que se encuentran a riveras del río Sinaloa como: Sinaloa de Leyva, Ocoroni y Estación Bamóa; debido al incremento de pendientes alcanzando hasta 86.5 grados y ocasionado así el arrastre de sedimentos a las partes bajas (Figura 26).

Por otra parte se identificaron dos direcciones del flujo subterráneo (Tóth, 2000): una principal o regional con orientación noroeste-sudoeste y una intermedia en dirección noreste-sudoeste desde los pies de monte de las serranías bajas de la Cuenca. La corriente regional ingresa a la llanura en la superficie piezométrica con una profundidad de 65 msnm y de manera concurrente desde la superficie, de 25 a 10 msnm. Esta corriente se retroalimenta por las infiltraciones del Canal del Valle del Fuerte para continuar hacia su destino final, el Golfo de California. Parte de los volúmenes regionales de la región hidrológica RH10-SINALOA corresponden a 3473.73 Mm<sup>3</sup> procedentes del estado de Chihuahua, reportados por Toutcha *et al.* (2005). La corriente intermedia procede desde la superficie piezométrica de 60 msnm del este de la región, alimentando al Arroyo San Rafael y al Río Sinaloa. Durante mucho tiempo los flujos regional e intermedio han impedido que la intrusión salina ingrese a la llanura (TMISA, 1978, Manson, 2007) y han amortiguado sus efectos anómalos. A pesar de esta protección natural del acuífero, la hidrodinámica costera actual se encuentra alterada y

se refleja en las distintas direcciones que toma el flujo, además de la evidente presencia de un cono de abatimiento de 0.9 msnm. Esta reciente hidrodinámica se encuentra en desarrollo y fuera de control, debido a los requerimientos de los volúmenes de agua comprometidos al sector productivo, de hasta  $1131.03 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$  (SEMARNAT, 2006) muy por arriba de la recarga anual ( $510.46 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$ ) identificada para la Subregión de Planeación Norte del Estado de Sinaloa (PEDUES, 2007). De dicho volumen le corresponden al acuífero del Río Sinaloa entre  $200$  y  $300 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$ .

Las demandas en su mayor parte se deben a la agricultura, lo cual ya es histórico. Lo anterior se registra desde 1967 con extracciones de  $430 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$  contra una recarga del flujo regional e intermedio de  $230 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$ ; a su vez, en 1968 las extracciones fueron de  $130 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$  contra una recarga del flujo regional e intermedio de  $200 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$  y posteriormente, en 1977 las extracciones se incrementaron hasta  $500 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$  (TMISA, 1978). Por el momento, el acuífero no presenta índices ID muy altos ni extremos, en tanto que registra un promedio de 133.60 unidades. Presenta un intervalo de variación de 88 a 166 unidades que corresponden a una  $V_i$  a  $V_a$ . De las 150 celdas en las que se dividió la traza urbana, 8 registraron un ID insignificante (5.3 %), 24 muy bajo (16 %), 54 bajo (36 %), 56 moderado (37 %) y 8 con ID alto (5.3 %). La mencionada variación espacial de ID, en donde a los valores elevados de ID se muestran en sectores aislados de la costa y el Tetameche, en tanto que los valores no significativos cerca de las riveras de los arroyos de Ocoroni, de Cabrera y el Río Sinaloa, principalmente. Aproximadamente el 35 % de la costa muestra un ID entre 140 y 166 unidades, que corresponden a una  $V_m$  a  $V_a$ . Al comparar el ID y la dirección del flujo en las secciones A y B de la Figura 34, observa que el ID se resiente y disminuye en lugares donde la fuerza de este flujo aumenta, ocurriendo lo contrario cuando la fuerza del mismo disminuye. Por tal razón, 65 % de las  $V_i$ ,  $V_{mb}$  y  $V_b$  cercanas a los afluentes importantes (Figura 34) son producto de la fuerza del flujo regional y de la unión de los flujos regional e intermedio cuando tienen las condiciones apropiadas para la atenuación de la carga contaminante. Los mismos al relacionarse con la composición granulométrica, textura, porcentaje de materia orgánica y características geomorfológicas de la zona saturada, ocasionan que el ID disminuya. Este comportamiento, indicador de la protección natural del acuífero a la contaminación, no se presenta cerca del cauce del arroyo de Cabrera, lo que se atribuye a que la corriente

Intermedia no tiene la suficiente fuerza para atenuar los ID. Caso contrario sucede con la corriente regional, que al unirse con la corriente intermedia entre las superficies piezométricas de 20 a 50 msnm, incrementa su fuerza y con ello las propiedades naturales del acuífero para su protección (Tóth, 2000). Por debajo de los 20 msnm de la superficie piezométrica producto de las extracciones de agua se manifiestan cambios en las direcciones del flujo, por lo que su fuerza se dispersa haciendo vulnerable la costa. El potencial de contaminación del acuífero está en función de la interacción entre el tipo, intensidad, disposición y duración de la carga contaminante, de la vulnerabilidad del acuífero, de las características físicas y químicas del acuífero y asimismo de la naturaleza del flujo regional e intermedio. De los 7 factores, R fue el de mayor grado de incertidumbre debido a la escasez de la información, ya que se optó por trabajar con datos disponibles escasos. Como los mapas de vulnerabilidad son una guía para los tomadores de decisiones, lograrlos representa un trabajo que debe realizarse con la debida precaución, por lo que se requiere estar informado de nuevas herramientas metodológicas que simulen con mayor exactitud y precisión el entorno geohidrológico. Dado que DRASTIC es uno de los métodos que soporta las estrategias y políticas de protección y conservación de los recursos subterráneos, su uso resulta de utilidad, como en este caso cuya aplicación se realizó posterior al trazo del mapa de vulnerabilidad (Figura 33).

Los promedios de las integraciones de los indicadores de suelos (ISD), Ambiente (IAD) y Socioeconómicos (ISED) presentan valores de: 125, 412 y 420.3 respectivamente, lo cual nos dice que los indicadores que están ocasionando más estragos aumentando el grado de desertificación son los socioeconómicos y esto se atribuye al escaso nivel educativo de las personas así como al aumento de la población (CESOP, 2004). Los altos valores (ISED) se ven reflejado en un uso y abuso de los recursos naturales sin tomar en cuenta la sustentabilidad.

Con respecto a los resultados del Grado de Desertificación (GD) producto de los análisis espectrales, se presentó un valor de 5 y 4 unidades en la parte costera con una intensidad muy alta y alta respectivamente, debido a la presencia de suelos con Textura (T) arenosa y arcillo-arenosa con poca Materia Orgánica (M.O.) (0.5 a 1 %), los cuales reflejan una moderada Erosionabilidad (K) y a su vez Vulnerabilidades altas y moderadas (Va y Vm) a la contaminación por intrusión salina del acuífero del Río

Sinaloa, ya que existen las Precipitaciones (P) mínimas con 455 a 485 mm año<sup>-1</sup> así como también una Evapotranspiración Potencial promedio anual (ETP) de hasta 779.86 mm año<sup>-1</sup> reflejando un Índice de Humedad promedio anual (Ho) del suelo de 0.57 a 0.60 (Mancera, 2006; Tóth, 2000; Cerdá, 2001)). El Grado de Desertificación (GD) de 2 y 3 unidades con una intensidad media baja y media alta respectivamente se presentaron en la parte central del Valle donde se localizan la mayoría de los suelos agrícolas cubriendo un 35.33 % del área total con 53 celdas, lo anterior debido a que los suelos presentaron una Densidad aparente (pa) de 1.45 a 1.6 gr cm<sup>-3</sup> debido a su Textura (T) predominantemente arcillosa y arcillo-limosa con una Precipitación promedio anual (P) de 465 a 510 mm año<sup>-1</sup> y una Erosividad de la lluvia (R) de 150 a 250 cm<sup>2</sup> h<sup>-1</sup> refleja en una Erosión Hídrica Potencial (EHP) de 1 a 5 T ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y una Vulnerabilidad a la contaminación por intrusión salina del acuífero del Río Sinaloa de Insignificante (Vi), baja (Vb) y muy baja (Vmb). Por último la zona con menor Grado de Desertificación se registró en la parte serrana con un Grado de Desertificación (Gd) de 1 con una intensidad baja, esto debido que aquí se registraron los escasos Índices de aridez (IA) (15) y Evapotranspiración Potencial Promedio Anual (ETP) (766 mm año<sup>-1</sup>) y Temperatura Promedio anual (T) de 24 °C y mínimo Índice de Humedad Promedio Anual del suelo (Ho) con 0.665 (TMISA, 1978, Manson, 2007).

## 9 CONCLUSIONES

- Alrededor del 80 % de los suelos del Valle de Guasave corresponden a suelos con características de tipo arcillosa y resultaron con un promedio de materia orgánica de 0.66 %.
- De acuerdo a los resultados de porosidad que registra un promedio de 39.96 % y tomando en cuenta la textura, se puede concluir que se presentan en gran medida suelos con susceptibilidad a ser erosionados.
- De los ISD, IAD y ISED, el ISED fue mayor con un promedio de 420.3, siguiendo el IAD con un promedio de 412 y por último ISD con un promedio de 125.
- Los análisis espectrales arrojaron resultados de mayor vulnerabilidad a la desertificación en la parte costera del Valle con un Grado de desertificación de 5 y 4 unidades correspondientes a 64 celdas y un 42.66 % del área total aproximadamente.
- La parte central la cual incluye la gran mayoría de suelos de uso agrícola manifiesta un GD de 2 y 3 unidades con 53 celdas y un 35.33 % del área.
- La parte serrana localizada al Norte de la zona de estudio, es la que se ve menos afectada con un GD de 1 correspondiente a 33 celdas y un 22 % del área.

## 10 LITERATURA CITADA

Abraham, E.M. 2003. Desertificación: bases conceptuales y metodológicas para la planificación y gestión. Revista Zonas Áridas, Lima, Centro de Investigaciones de Zonas Áridas, Univ. Agraria La Molina, N° (7), 19: 68 420-432.

Ahmad, N. 1983. Vertisols. In: L.P. Wilding, N.E. Smeck, G.F. Hall (eds.). edogenesis and Soil Taxonomy. II. Soil Orders. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands. 91-123.

Aller, L.T., J.H., Lerh, R.J., Petty, G., Hackett. 1987. DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Dround Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. U.S. Environmental Protection Agency, 600/2-87/035, Ada, OK, 622p.

Almendros, F.J. 1999. Análisis de señales sismovolcánicas mediante técnicas de array. Tesis doctoral. Universidad de Granada. 302 p.

Alonso, R.G., M.E., Ruiz, W., Schiettecatte, J., Díaz, y Y., Almoza. 2007. Riesgo de Erosión Hídrica en la Cuenca Hidrográfica La Guira, Río Cuyaguaje, Cuba. Zonas Áridas 11(1). 110-123.

Altieri, M.A. 1987. Agroecology: The Scientific Basis for the development of Alternative Agriculture. Westview Press, Boulder, CO.

Altieri, M.A. 1990. Why Study Traditional Agriculture?. In Energy Use in U.S. Agricultural Production. In Agroecology. Autors C. Ronald Carroll; John H. Vendermeer and Peter M Rosset. Biological Resource Management. A series of primers on the Conservation and Exploitation of Natural and Cultivated Ecosystems. Mc Graw-Hill. Publishing Company. Printed in USA.

Alvarez, M., E., Ochoa, A., Villalba, E., Siu. 2001. Buenas Prácticas de Manejo para el Cultivo de Camarón. En: Perfil De Caracterización De Las Prácticas De Camaronicultura En Sinaloa. Instituto Sinaloense de Acuacultura, Culiacán Sinaloa, México, 5-38.

Alvarez, M., A., Baltanás, J.L., Velasco, C., Rojo. 2002. Daily variations in the optical properties of a small lake. Freshwater Biology 47, 450-461.

Anónimo. 2003. Vulnerabilidad de Acuíferos. E-book. (<http://www.tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/vulnerabilidad.htm>).

Arévalo, A.G., E.A., Maldonado, J.J., Méndez y G.R., González. 2002. Automatización del índice de erosión hídrica propuesta en la metodología de ordenamiento ecológico del territorio. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 245p.

Bath, M. 1974. Spectral Analysis in Geophysics. Elsevier, Amsterdam.

Bhattacharyya, B.K. 1964. Magnetic anomalies due to prism-shaped bodies with arbitrary polarization: Geophysics, Vol. 29, 517-53.

Biesemans, J. 2000. Erosion modeling as support for land management in the loess belt of Flanders. Unpublished PhD thesis, Ghent University. 260p.

Blaney, H.F., y W.D., Criddle. 1950. "Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data". Dept. Agric. SCS. U.S. 96p.

Bouyoucos, G.S. 1936. Directions for making mechanical analysis of soil by hydrometer method. Soil Sci. 4: 225-228.

BOX, G.E., P., JENKINS, G.M., REINSEL. 1994. Time Series Analysis, Forecasting and Control, Third Edition, Delhi, India, Pearson Education. 598p.

Brady, N.C., R.R. Weil. 2000. Elements of the nature and properties of soil. 12th edition. New Jersey, USA: Prentice Hall, Inc.

Bryan, R.B. 1968. The development, use and efficiency of indices of soil erodibility. Geoderma 2(1): 5-26.

Canter, L.W. 1997. Nitrates in groundwater. CRC Press Inc. Lewis Publisher, Boca Raton, Florida, USA. 129p.

Casanova, E. 1991. Introducción a la Ciencia del Suelo. CDCH. UCV. Caracas. 379p.

- Centro, de Estudios Sociales y de Opinión Pública (CESOP). 2004. Monografías socioeconómicas (Sinaloa). Camara de diputados, México, D.F. 86p.
- Cerdà, A. 2001. Erosión hídrica del suelo en el Territorio Valenciano. El estado de la cuestión a través de la revisión bibliográfica. Logroño: Geoforma, 79p.
- Civita, M., M., De Maio. 2000. SINTACS R5 - Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico. [SINTACS R5 – A new parametric system for the assessment and automatic mapping of the groundwater vulnerability to contamination. Pitagora, Bologna, 226p.
- Civita, M., P., Forti, L., Meccheri, L., Piccini, G., Panzini. 1991. Pollution vulnerability map for the aquifers of the Apuan Alps (Tuscany-Italy) National Research Group for the Defense against Hydrogeological Disasters Firenze, Italy, 111p.
- Claerbout, J.F. 1976. Fundamentals of Geophysical Data Processing with Applications to Petroleum Prospecting, McGraw-Hill.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2006. Estadísticas del Agua en México. Situación del recurso Hídrico. Capítulo 3, 15p.
- Custodio, E. y M.R., Llamas. 1983. Hidrología subterránea., Ediciones Omega., 1157 p.
- Da Silva. 2003. Rainfall erosivity map for Brasil. 23-25.
- Dantín, C.J., C.A., Revenga. 1941. Las líneas y las zonas isoxeras de España según los índices termopluviométricos: avance al estudio de la aridez en España. Estudios geográficos, ISSN 0014-1496, Madrid, España, Vol. 2 (2), 35-91.
- Davis, J.F., R.E., Lucas. 1959. Organic soils, their formation, distribution, utilization and management. East Lansing, Michigan. Department Soil Science, Agricultural Experiment Station, Michigan State University. Special Bulletin No. 425. 156p.

Del Campo, A.A.C. y N., Buceta. 1994. Simulación del paisaje erosivo en el lago Chapala (MEXICO). Evaluación de la erosión mediante herramientas GIS. Revista Internacional de Ciencias de la Tierra. 11-16.

Emery, X. 2007. Conditioning simulations of Gaussian random fields by ordinary kriging. *Mathematical Geology*. 39(6): 607-623.

Environmental Systems Research Institute (ESRI). 1991. Avenue, Customization and Application Development for ArcView, Editorial Limusa, 210p.

EPA. 1997. Electrokinetic Laboratory and field processes applicable to radioactive and hazardous mixed waste in soil and groundwater. EPA 402/R-97/006. Washington, D.C.

Everet, K.R. 1983. Histosols. In: L.P. Wilding, N.E. Smeck, G.F. Hall (eds.). *Pedogenesis and soil taxonomy. II. Soil orders*. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands. 1-53.

Fereres, E. 1987. "Necesidades hídricas de los cultivos y su abastecimiento "simposio AERYD. Nov., 1-33p.

Fetter, C.W. 2001. *Applied Hydrogeology*. Fourth Edition, Prentice-Hall, Inc. 598p.

Figuroa, B.S., F.J.F., Morales. 1992. Manual de producción de cultivos con labranza de conservación. SARH. Colegio de postgraduados, México.

Foster, S., R., Hirata. 1988. Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas, una metodología basada en datos existentes, Organización Panamericana de la Salud, (OMS), 74p.

Gregorich, L.J. and D.F., Acton. 1995. Understanding soil health. In D. F. Acton and L. J. Gregorich, Eds. *The health of our soils-towards sustainable agriculture in Canada*. Centre for Land and Biological Resources Research, Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa, Ont., Canada. 5- 10p.

Hargreaves, G.H., Z.A., Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. in Agric.*, 1(2): 96-99.

Hernández, D., I., Málikov, N., Villegas. 2002. Relaciones espacio-temporales entre la temperatura superficial del mar de la cuenca del pacífico colombiano y el ciclo El Niño oscilación del Sur. Grupo de Investigación CENIT, Departamento de Geociencias, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Ciudad Universitaria Bogotá, Colombia. 20p.

Hiscock, H. 2005. Hydrogeology. Principles and practice. Blackwell, 389p.

Humphries, R. 1986. Los Mochis: historia oral de una ciudad 2 ed. Universidad de Occidente, los Mochis, Sinaloa, 305p.

I.N.T.A. 1995. Carta de suelos de la República Argentina, Hoja 3763 – 36 Quiñihual. Instituto de Suelos, área de investigación en cartografía de suelos y evaluación de tierras. 56p.

INEGI (Instituto Nacional de Estadísticas Geografía e Informática). 2005. Anuario Estadístico del Estado de Sinaloa. Gobierno del Estado de Sinaloa, México, 321p.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2006. Guía para la interpretación de cartografía. Edafología. México, D.F. 20-21p.

Jeong, H. and D.K., Hsu. 1996. “Quantitative estimation of material properties of porous ceramics by means of composite micromechanics and ultrasonic velocity”. NDT & E. International, 29(2), 95-101.

Jury, W.A., W.R., Gardner, and W.H., Gardner. 1991. Soil Physics, Jhon Wiley & Sons Inc., New York, 112-142.

Larson, W. and F., Pierce. 1994. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. Soil Science Society of America 677: 37-51.

Laureano, C. 2001. A new procedure to estimate the RUSLE EI30 Index based on monthly rainfall data and applied to the Algarve región, Portugal. 60p.

León, A.R. 2001. Comparación de métodos de análisis mecánico de suelos. *TERRA Latinoamericana*. Universidad Autónoma Chapingo, México 19(003) 219-225.

Llanes, C.O. 2007. Evaluación espacio-temporal de la pérdida de suelo: indicadores de erosión hídrica y eólica para el valle de Guasave, Sinaloa. Tesis de Maestría. CIIDIR-IPN-Sinaloa. Guasave, Sinaloa, México 137p.

Lobo-Ferreira, J.P., M.M., Oliveira. 1997. DRASTIC Groundwater vulnerability mapping of Portugal in: Groundwater: An Endangered Resource, Proceeding of Theme C. 27th Congress of the International Association for Hydraulic Research, held in San Francisco, USA, 132-137.

Lorente, J.M. 1961. Meteorología. Editorial Labor, 4ª. Ed., Barcelona, España. 28-59p.

Mannaerts, C. 1999. Factores de erosión. Módulo 11: Degradación de suelos. ITC.

Martín, F.A., F.E., Martínez, F.S., Martín, G.C., Gonzalez, T.E., Ayuga, y A.A., García 2000. Aplicación del análisis espectral a la modelización de la distribución y la correlación espacial entre variables forestales. *Tecnologías geográficas para el desarrollo sustentable*; Departamento de geografía. Universidad de Alcalá, 2000: 1-15.

Martínez, M., P., Delgado, V., Fabregat. 1998. Aplicación del método DRASTIC para la evaluación del riesgo de afección a las aguas subterráneas por una obra lineal. En: *Jornadas sobre la contaminación de las aguas subterráneas: un problema pendiente*. Instituto Tecnológico Geominero de España (AIH-GE). Valencia, 413-420.

Manson, R.H. 2007. "Efectos del uso del suelo sobre la provisión de servicios ambientales hidrológicos: monitoreo del impacto del PSAH". Informe final. Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, Veracruz, México. 94p.

McCool, D.K., G.O., George, M., Freckleton, C.L., Douglas, R.I., Papendick. 1993. Topographic effect on erosion from cropland in the northwestern wheat region. *Trans. ASAE*; 36:1067-1071.

Mancera, M., G. 2006. Evapotranspiración y déficit hídrico en un agostadero representativo de matorral sarcocaula en La Paz, Baja California Sur. Tesis de Maestría. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR). La Paz, Baja California Sur, 97p.

Miralles, I., R., Ortega, y C., Ascencio. 2002. Degradación del suelo por exceso de sales y su relación con la topografía al sur de España. *Agrochimica*. 45(6), 270-279.

Morales, E.C., S., Parada. 2005. Pobreza, desertificación y degradación de los recursos naturales. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Santiago de Chile. 267p.

Moreno, D.R. 1993. Criterios para la interpretación de resultados de análisis de suelos. Documento de circulación interna. INIFAP. México, D.F. 25p.

Morgan, R.P.C. 1997. Erosión y conservación del suelo. Ed. MundiPrensa. Madrid, 343p.

Neuman, T. 2006. Un futuro comprometido: La agricultura y la acuicultura compiten por el agua. Programa de las Américas 1-9p.

Norma Mexicana NMX-AA-091-1987. 1990. Calidad del Suelo - Terminología. Soil Quality -Terminology. 5p.

Norzagaray, C.M. 2003. Flujo regional en acuíferos, sus causas y efectos en la dispersividad hidrodinámica: Un caso de estudio. Tesis Doctoral. Centro de Investigaciones y de Estudios avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Mérida Yucatán, México. 250p.

Norzagaray, C.M., B.J.,Herrera, G.T., Ladrón. 2004. Variación espacial de la conductividad hidráulica para suelos del acuífero costero de Guasave, Sinaloa. *Revista Tláloc Asociación Mexicana de Hidráulica*. 30(1):11-16.

Norzagaray, C.M., F.L., Capurro, S.P., Muñoz, y G.T., Ladrón. 2005. La evapotranspiración potencial de una zona árida: Un caso de estudio: Valle de Guasave, Sinaloa, México. Asociación Mexicana de Hidráulica, A.C. México D.F., 26p.

NRC. 1999. Groundwater soil cleanup. Improving management of persistent contaminants. Natl. Acad.Press, Washington, D.C. 182-188

Oriza, B.A., C.C., Diaz, y S.M.L.M., Ortiz, M.G., Anaya y B.W., Estrada. 1994. Evaluación, cartografía y políticas preventivas de la degradación de la tierra. Colegio de Postgraduados-CONAZA. México, 48-56p.

Oyarzun, C. 1993. "Evaluación del modelo U.S.L.E. para predecir pérdidas de suelo en áreas forestadas de la cuenca del río Bío-Bío", Bosque 14(1): 45-54.

PEDUES. 2007. Plan Estatal de Desarrollo Urbano del estado de Sinaloa (PEDUES). Gobierno del estado-Secretaria de Desarrollo Social y Sustentable. Culiacán Sinaloa, México. 133p.

Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. Proc. Roy. Soc. London A 193:120-146.

Penman, H.L. 1956. Evaporation: An introductory survey. Netherlands J. Agric. Sci. 1:(9-29), 87-97,151-153.

Percibal, D. and A., Walden. 1995. Spectral Analysis for Physical Applications. Cambridge University Press. Cambridge, 1995. 18p.

Pérez, C.R., A.J., Pacheco. 2004. Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatán. Ingeniería, 8(1):33-42.

Pimentel, D.C.H., P.K.S., Resosudarmo., D.M.M., Kurz., S.L.S., Crist., L.R.S., Fitton., and R., Blair. 1995. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. Science 267:1117-1123.

Piscopo, G. 2001. Groundwater vulnerability map explanatory notes-MacIntyre Catchment. NSW Department of Land and water Conservation. 13p.

PRESS, W.S., W., TEUKOLSKY, B., VETTERLING, G., FLANNERY. 1992. Numerical Recipes in C, the Art of Scientific Computing. 2d Ed. New York, Cambridge University Press. 994p.

Regalado, C.M., R., Muñoz, B.J., Alvarez, A.R., Socorro, y M.J.M., Hernández. 2001. Field and Laboratory Setup to Determine Preferential Flow in Volcanic Soils, 93-96.

Reynoso, I., C., Sasal, S., Portela, A., Andriulo. 2005. Vulnerabilidad del acuífero pampeano a la contaminación en el norte de la provincia de buenos aires. Aplicación de la metodología DRASTIC. Revista de Investigaciones Agropecuarias 34 (1): 85-99.

Röder, D., M., Jeschke, K., Kiehl. 2006. Vegetation und Böden des Naturschutzgebiets "Garching Heide" im Norden von München. Forum Geobotanicum 2, 24-44.

Ruiz, P.E., G.A., Brito. 2007. Las precipitaciones como factor erosivo en la cuenca del río Cuyaguaje. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, Universidad Agraria de La Habana. La Habana, Cuba. 16(003) 84-89.

Santibáñez, Q.F. 1999. "Un sistema de información y modelamiento ambiental (EIMS) para el desarrollo sustentable", Anales de la Universidad de Chile, Santiago de Chile, 33p.

Santibáñez, Q.F. y A., De la Fuente. 1998. "Multiscale modeling of land use and desertification", *An environmental information and modeling system for sustainable development. Computer tools for sustainable management of arid and Antarctic ecosystems*, F. Santibáñez y V. Marín, Santiago de Chile, Universidad de Chile/IBM International Foundation.

Santibáñez, Q.F. 1997. "Topoclimatic modeling for minimum temperature prediction at a regional scale in the Central Valley of Chile", *Agronomie*, vol. 17, 22.

Santibáñez, Q.F. y J.M., Uribe. 1999. "Origen y variabilidad y aspectos agroclimáticos de las sequías en Chile", *Las sequías en Chile: causas, consecuencias y mitigación*, Santiago de Chile, Editorial Pontificia Universidad Católica de Chile, 269p.

Schmidt, R.H. 1991. The arid zones of Mexico;: Climatic extremes and conceptualization of the Sonoran Desert: Memoria of V. Congress Nacl. de Meteorology. 39-54.

Secunda, S. M.L., Collin, J., Molloul. 1998. Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region. *Journal of Environmental*, 54:39-57.

SEMARNAT. 2006. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) Diario Oficial (Primera Sección). Acuerdo que da a conocer el resultado de los estudios de disponibilidad media anual de las aguas superficiales en las cuencas hidrológicas del Río Sinaloa 1, Arroyo Ocoroni, Arroyo Cabrera y Río Sinaloa 2. México D.F 24 de Noviembre 76p.

Serway, R.A., J.W., Jewett. 2005. Física (2 Vol.). Thomson, México, 268p.

Sharadghah, S. 2001. Evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en Jordania. Aplicación del modelo DRASTIC. Trabajo de Investigación, Universidad Politécnica de Valencia 165p.

Siegel, S. 1989. Diseño experimental no paramétrico. La Habana. Editorial Pueblo y Educación, 222p.

Suffis. 2004. Alternative land use systems for controlling water erosion on steep slopes in small watersheds of the paute River Basin, Ecuador. 30p.

Thirumalaivasan, D., M., Karmegan, K., Venugopal. 2003. AHP-DRASTIC: software for specific aquifer vulnerability assessment using DRASTIC model and GIS. *Environmental Modelling & Software* 18: 645-656.

Thornthwaite, C.W. 1948. An aproach toward a racional classification of climate. *Geologic, Rev.* Vol.38. 55-94.

Thornthwaite, C.W. y J.R., Matter. 1955. The water balance. Publication in climatology. Drexel Institute of Techonology, New Jersey, 104p.

- TMISA. 1978. Estudio de Evaluación de acuíferos en la zona Fuerte - Sinaloa, en el estado de Sinaloa. Técnicas Modernas de Ingeniería (TMISA), Culiacán Sinaloa, México. 314p.
- Tóth, J. 2000. Las aguas subterráneas como agente geológico, causas procesos y manifestaciones, Boletín Geológico y Minero, 111(4): 9-26.
- Toutcha, L., R., Sosa-Soto. 2005. La Flora de las Barrancas de Cobre Chihuahua, México. Ecología Aplicada 4(1-2): 17-23.
- Trejo, V.I., y L.J., Hernández. 2005. Vegetación y uso del suelo. In SEDESOL-IGG-UNAM (2005) Integración del Sistema Nacional de Información para el desarrollo territorial en la fase correspondiente a la caracterización del territorio. Informe Técnico. México. 271-300p.
- Trieste, D.J. y G.F., Gifford. 1980. "Applications of the universal soil loss equation to rangelands on a per-storm basis", Journal of Range Management 33(1): 66-70.
- UNCCD/PNUMA. 1995. Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación y la Sequía , en particular en África. Texto con anexos. Suiza, 71p.
- USEPA. 1993. A Review of Methods for Assessing Aquifer Sensivity and Ground Water Vulnerability to pesticide Contamination. Office of Water (4602) 813-R-93-002, 97p.
- Valle, M.O. 2002. Planeación regional bidimensional del agua subterránea en el Valle de Guasave, Sinaloa, México. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Sinaloa. Guamúchil, Sinaloa. 189p.
- Van Ert, M., J.B., Sullivan. 1992. Organochlorine Pesticides In Sullivan, J.B. and Krieger, G.R., Hazardous Materials Toxicology, Clinical Principles of Environmental Health. Williams & Wilkins, Baltimore, MD, 72p.

Vogel, C.H. y J., Smith. 2002. Building social resilience in arid ecosystems. En *Global Desertification: Do Humans Cause Deserts?* (eds. Reynolds, J. F. y Stafford Smith, M.), Dahlem University Press, Berlin, Alemania 149-166.

Walkley, A. 1946. A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils effect of variations in digestion conditions and of inorganic constituyents. *Soil Sci.* 63: 251-263.

**11 ANEXOS**

A ANÁLISIS ESPECTRALES APLICADOS AL MAPA DE INTEGRACIÓN DE  
LOS INDICADORES DEL SUELO (ISD), AMBIENTE (IAD) Y  
SOCIOECONOMÍA (ISD) PARA LA DESERTIFICACIÓN

No. Celda	UTM		C	R	A	$\Sigma V = C+R+A$	GD
	X	Y	Adim	Adim	Hz/s	Adim	Adim
1	732000	2800000	5	6	3.00	14.0	5
2	736000	2800000	5	5	3.75	13.8	5
3	740000	2800000	4	5	4.7	13.7	5
4	744000	2800000	5	5	2.2	12.2	5
5	748000	2800000	6	5	2.3	13.3	5
6	752000	2800000	5	5	1.7	11.7	5
7	756000	2800000	4	4	5.3	13.3	5
8	760000	2800000	5	6	2.9	13.9	5
9	764000	2800000	4	5	4.7	13.7	5
10	768000	2800000	7	4	2.7	13.7	5
11	772000	2800000	6	5	1.9	12.9	5
12	776000	2800000	6	5	3	14.0	5
13	780000	2800000	6	5	5.3	16.3	4
14	784000	2800000	7	4	1.8	12.8	5
15	788000	2800000	8	6	1.7	15.7	4
16	732000	2807777.78	6	4	3.9	13.9	5
17	736000	2807777.78	5	5	3.5	13.5	5
18	740000	2807777.78	5	6	2.7	13.7	5
19	744000	2807777.78	6	6	1	13.0	5
20	748000	2807777.78	6	5	4.5	15.5	4
21	752000	2807777.78	4	5	1.8	10.8	5
22	756000	2807777.78	5	5	3.2	13.2	5
23	760000	2807777.78	6	4	3.4	13.4	5
24	764000	2807777.78	7	6	3.6	16.6	4
25	768000	2807777.78	5	5	2.6	12.6	5
26	772000	2807777.78	5	4	1.8	10.8	5
27	776000	2807777.78	4	5	4	13.0	5
28	780000	2807777.78	5	5	3.2	13.2	5
29	784000	2807777.78	4	4	3	11.0	5
30	788000	2807777.78	5	5	4.2	14.2	5
31	732000	2815555.56	5	5	2.1	12.1	5
32	736000	2815555.56	6	5	4	15.0	4
33	740000	2815555.56	6	4	4.5	14.5	4
34	744000	2815555.56	5	6	3.5	14.5	4
35	748000	2815555.56	6	4	2.8	12.8	5
36	752000	2815555.56	7	6	3	16.0	4
37	756000	2815555.56	7	5	3.6	15.6	4
38	760000	2815555.56	7	5	3.4	15.4	4
39	764000	2815555.56	6	5	0.6	11.6	5
40	768000	2815555.56	7	4	2.9	13.9	5
41	772000	2815555.56	6	6	2.35	14.4	4
42	776000	2815555.56	6	5	3	14.0	5
43	780000	2815555.56	7	4	3.3	14.3	5
44	784000	2815555.56	5	6	4	15.0	4
45	788000	2815555.56	6	5	4.3	15.3	4
46	732000	2823333.33	7	6	2.6	15.6	4
47	736000	2823333.33	7	5	4.8	16.8	4
48	740000	2823333.33	6	6	4.2	16.2	4
49	744000	2823333.33	8	6	0.45	14.5	4
50	748000	2823333.33	7	7	2.8	16.8	4

51	752000	2823333.33	7	7	2.8	16.8	4
52	756000	2823333.33	7	7	2.6	16.6	4
53	760000	2823333.33	6	8	1.6	15.6	4
54	764000	2823333.33	7	7	2.8	16.8	4
55	768000	2823333.33	7	7	2.8	16.8	4
56	772000	2823333.33	7	7	2.2	16.2	4
57	776000	2823333.33	8	6	2.4	16.4	4
58	780000	2823333.33	6	6	4.2	16.2	4
59	784000	2823333.33	8	6	2	16.0	4
60	788000	2823333.33	8	7	3.3	18.3	3
61	732000	2831111.11	8	8	1.3	17.3	3
62	736000	2831111.11	7	7	3.1	17.1	3
63	740000	2831111.11	8	6	3.1	17.1	3
64	744000	2831111.11	8	6	4	18.0	3
65	748000	2831111.11	7	7	4.5	18.5	3
66	752000	2831111.11	7	7	4.5	18.5	3
67	756000	2831111.11	7	8	3.8	18.8	3
68	760000	2831111.11	7	6	4.8	17.8	3
69	764000	2831111.11	8	6	3.5	17.5	3
70	768000	2831111.11	7	7	3.5	17.5	3
71	772000	2831111.11	8	7	3.5	18.5	3
72	776000	2831111.11	7	7	3.05	17.1	3
73	780000	2831111.11	8	7	3	18.0	3
74	784000	2831111.11	7	8	3.25	18.3	3
75	788000	2831111.11	7	8	2.5	17.5	3
76	732000	2838888.89	7	8	3.75	18.8	3
77	736000	2838888.89	8	7	1.2	16.2	4
78	740000	2838888.89	7	7	2.8	16.8	4
79	744000	2838888.89	7	6	3.7	16.7	4
80	748000	2838888.89	7	6	1.9	14.9	4
81	752000	2838888.89	8	5	2	15.0	4
82	756000	2838888.89	9	6	2.7	17.7	3
83	760000	2838888.89	8	8	2.7	18.7	3
84	764000	2838888.89	7	8	2.5	17.5	3
85	768000	2838888.89	8	7	2.6	17.6	3
86	772000	2838888.89	7	8	2.75	17.8	3
87	776000	2838888.89	8	8	4.2	20.2	2
88	780000	2838888.89	7	8	4.5	19.5	2
89	784000	2838888.89	8	8	4.2	20.2	2
90	788000	2838888.89	7	7	5	19.0	2
91	732000	2846666.67	7	8	5.4	20.4	2
92	736000	2846666.67	7	8	4.8	19.8	2
93	740000	2846666.67	8	8	3.3	19.3	2
94	744000	2846666.67	8	8	3	19.0	2
95	748000	2846666.67	7	7	4.9	18.9	2
96	752000	2846666.67	8	8	3.6	19.6	2
97	756000	2846666.67	8	8	5	21.0	2
98	760000	2846666.67	8	8	4.7	20.7	2
99	764000	2846666.67	9	7	4.8	20.8	2
100	768000	2846666.67	8	7	4.75	19.8	2

101	772000	2846666.67	8	8	4.5	20.5	2
102	776000	2846666.67	9	8	3.5	20.5	2
103	780000	2846666.67	8	8	4.2	20.2	2
104	784000	2846666.67	9	7	3	19.0	2
105	788000	2846666.67	9	8	2.8	19.8	2
106	732000	2854444.44	8	8	4.1	20.1	2
107	736000	2854444.44	8	8	3.6	19.6	2
108	740000	2854444.44	8	7	4.4	19.4	2
109	744000	2854444.44	8	7	4.3	19.3	2
110	748000	2854444.44	8	8	3.1	19.1	2
111	752000	2854444.44	7	8	3.9	18.9	2
112	756000	2854444.44	8	8	3.5	19.5	2
113	760000	2854444.44	8	8	3.2	19.2	2
114	764000	2854444.44	8	8	3	19.0	2
115	768000	2854444.44	9	8	3.9	20.9	2
116	772000	2854444.44	8	9	3.2	20.2	2
117	776000	2854444.44	8	8	3.8	19.8	2
118	780000	2854444.44	9	9	3.7	21.7	1
119	784000	2854444.44	8	9	4.5	21.5	1
120	788000	2854444.44	9	8	4.5	21.5	1
121	732000	2862222.22	9	9	4	22.0	1
122	736000	2862222.22	8	9	4.3	21.3	1
123	740000	2862222.22	8	9	5.7	22.7	1
124	744000	2862222.22	9	9	3.5	21.5	1
125	748000	2862222.22	9	9	3.3	21.3	1
126	752000	2862222.22	9	8	3.5	20.5	1
127	756000	2862222.22	9	9	4	22.0	1
128	760000	2862222.22	9	9	3.6	21.6	1
129	764000	2862222.22	9	8	3.7	20.7	1
130	768000	2862222.22	10	8	3.2	21.2	1
131	772000	2862222.22	10	9	2.2	21.2	1
132	776000	2862222.22	9	8	3.9	20.9	1
133	780000	2862222.22	9	10	3.9	22.9	1
134	784000	2862222.22	9	8	4.6	21.6	1
135	788000	2862222.22	9	10	3.7	22.7	1
136	732000	2870000	9	8	4.3	21.3	1
137	736000	2870000	8	7	4.5	19.5	1
138	740000	2870000	9	9	4.5	22.5	1
139	744000	2870000	10	10	3.5	23.5	1
140	748000	2870000	10	8	3.3	21.3	1
141	752000	2870000	9	10	3.4	22.4	1
142	756000	2870000	9	9	4.7	22.7	1
143	760000	2870000	10	10	4.8	24.8	1
144	764000	2870000	10	9	4.8	23.8	1
145	768000	2870000	10	9	4.1	23.1	1
146	772000	2870000	8	10	3.7	21.7	1
147	776000	2870000	9	10	3.7	22.7	1
148	780000	2870000	9	10	3.5	22.5	1
149	784000	2870000	9	9	3.5	21.5	1
150	788000	2870000	9	9	4	22.0	1

C = Continuidad  
 R = Resolución  
 A = Amplitud  
 $\Sigma V$  = Suma de vectores  
 GD = Grado de desertificación