



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MÉXICO**



FACULTAD DE GEOGRAFÍA

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO GEOMÁTICO
PARA EL ANÁLISIS ESPACIAL DE ÍNDICES DE ARIDEZ Y SEQUÍA:
CASO DE ESTUDIO ESTADO DE MÉXICO”**

T E S I S

Para obtener el Título de

LICENCIADO EN CIENCIAS GEOINFORMÁTICAS

P R E S E N T A N:

**FLORES ESCUTIA ZITLALY
SEGURA GARDUÑO MARILU**

A S E S O R:

Dr. MIGUEL ÁNGEL GÓMEZ ALBORES

R E V I S O R E S:

M.C.A. LUIS RICARDO MANZANO SOLÍS

Dr. JOSE LUIS EXPÓSITO CASTILLO

Noviembre 2014

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al proyecto de investigación de la Universidad Autónoma del Estado de México, con clave 3459/2013CHT y título “Uso de la precipitación estimada por satélite en la modelación hidrológica: aplicación en cuencas mexicanas”, por el apoyo recibido para la realización de este trabajo de tesis.

Se agradece al Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA) por permitir llevar a cabo el desarrollo de la tesis en su espacio académico, además de facilitarnos información (producto de trabajos de la maestría en ciencias del agua) para cumplir con los objetivos de este trabajo.

Dedicatorias

A Dios, por estar siempre a mi lado.

A mis padres, que hicieron el gran esfuerzo de brindarme lo necesario.

Gracias mamá por apoyarme y quedarte con nosotros.

A mis hermanos; Aurora, Moisés, Saúl y Yuriko a quienes admiro, respeto y quiero profundamente. Gracias por su apoyo y consejos.

A mis sobrinos, que son la chispa que nos impulsa a toda la familia.

A mis abuelos, donde quiera que estén.

A mis amigos, que han estado siempre en el momento exacto. Con quienes he pasado experiencias inolvidables, y que a pesar del tiempo y la distancia siguen ahí.

A esa persona que después de un tiempo se convirtió en familia y ha escuchado mis silencios, MIZPAH.

Agradecimientos

Al Dr. en C.A. Miguel Ángel Gómez Albores por su tiempo y dedicación brindado.

A mi compañera de tesis Marilú, por haberme permitido compartir este logro.

Zit

“Las viñas son como la gente, Aurora, mientras más difíciles son las circunstancias, mejores son los frutos”.

Isabel Allende, Retrato en sepia

*“Un viaje de diez mil kilómetros comienza por un solo paso”
Proverbio chino*

Dedicatorias:

A Dios por estar siempre presente guiándome.

A mi familia: mi MAMA y PAPA, mis hermanos y hermanas (Tony, Lupe, Diana y Jesús), a todos gracias por sus apoyo y ánimos, gracias por estar, gracias por que constantemente me recordaban que tenía que terminar y cerrar este ciclo, gracias por su confianza y compartir esta alegría conmigo.

A mis sobrinitas que con su presencia y en cada sonrisa me regalan tanto.

A mis amigas y compañeras de trabajo (Gabriela, Adriana, Judith, Ángela y Yadira) por el apoyo brindado en mi trabajo y sus palabras.

A mi jefe Maestro Luis Sánchez Pompa por su apoyo, dándome tiempo y espacio para poder terminar con este proyecto.

A mis amigos por sus palabras de aliento y por compartir.

Agradecimientos

A nuestro asesor Dr. Miguel Ángel Gómez Albores por su apoyo en tiempo y dedicación para poder culminar nuestro trabajo.

A Zitlaly amiga y compañera de tesis, por compartir y no haber desistido, por el esfuerzo brindado y lograr terminar este proyecto.

Malu

CONTENIDO

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Justificación.....	3
1.4 Antecedentes	3
1.4.1 La sequía y aridez	3
1.4.2 Los SIG empleados en el estudio de la sequía y aridez a nivel internacional.....	4
1.4.3 Los SIG empleados en el estudio de la sequía y aridez en México.....	6
1.4.4 La sequía y aridez en el Estado de México.....	7
1.5 Objetivos	9
1.5.1 Objetivo General.....	9
1.5.2 Objetivos específicos.....	10
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL.....	11
2.1 Sequía.....	11
2.1.1 Tipos de sequías	12
2.1.2 Parámetros de caracterización de las sequías.....	13
2.2 Aridez.....	15
2.3 Módulo Geomático para índices de sequía y aridez: conceptos básicos	16
2.3.1 Geomática	16
2.3.2 Sistema, programa y módulo	16
2.3.3 Programación: lenguajes de programación.....	18
2.3.4 Los Sistemas de Información Geográfica: Definición y tipos.....	19
2.3.5 Sistemas de Información Geográfica y los lenguajes de programación	19
CAPÍTULO 3 DESARROLLO METODOLÓGICO.....	21
3.1 Revisión bibliográfica, identificación y selección de índices de sequía y aridez	22
3.2 Conceptualización de los Índices de aridez y sequía considerados para el módulo.....	22
3.2.1 Índice de Concentración de la Precipitación (ICP)	23
3.2.2 Índice de Fournier Modificado (IFM)	24
3.2.3 Índice de Aridez de De Martonne.....	24
3.2.4 Cuantiles de precipitación.....	26
3.3 Modelo Conceptual de Índices de Aridez y Sequía.....	27

3.4 Análisis y Diseño del Módulo geomático.....	27
3.4.1 Identificación de requerimientos	27
3.4.2 Obtención y Depuración de Información	28
3.4.3 Diseño de la base de Geodatos	29
3.4.4 Diseño conceptual-lógico de los índices: Macromodelos Idrisi.....	30
3.5 Implementación del módulo: Plataforma SIG Idrisi – Delphi 6.0.....	36
3.5.1 Especificaciones para la implementación	36
3.5.2 Elección del Lenguaje de Desarrollo en Idrisi	38
3.5.3 Interfaz de usuario del módulo geomático.....	39
CAPÍTULO 4 APLICACIÓN AL ÁREA DE ESTUDIO: ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS INDICES DE ARIDEZ Y SEQUÍA	49
4.1 Características Físico-Geográficas del Estado de México	49
4.2 Aplicación de los índices de Aridez y Sequia en el Estado de México para los años de 1980 – 2010	50
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	68
BIBLIOGRAFÍA	72
ANEXO A. Mapas Anuales de Índice de Fournier Modificado (IFM)	77
ANEXO B. Mapas Anuales de Índice de Concentración de Precipitación (ICP).....	83
ANEXO C. Mapas de Índice de De Martonne mensual	89
ANEXO D. Mapas anuales de Deciles de precipitación	92
ANEXO E. Mapas mensuales de Deciles de precipitación años 1982 y 1992	98
ANEXO F. Tabla de concentrado de índices encontrados de aridez y sequía	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Eventos de sequía en el Estado de México, datos tomados de CENAPRED....	8
Tabla 3.1. Clasificación de ICP.....	23
Tabla 3.2. Clasificación de IFM.....	24
Tabla 3.3. Clasificación De Martonne.....	25
Tabla 3.4. Clasificación de Cuántiles de Precipitación.....	26
Tabla 3.5. Simbología del Macro Modeler de Idrisi.....	30

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Metodología para el desarrollo del módulo Geomático.....	21
Figura 3.2. Especificación de necesidades de cálculo de los índices.....	27
Figura 3.3. Modelo conceptual de la base de Geodatos.....	29
Figura 3.4. Macromodelo para el cálculo de la precipitación anual.....	31
Figura 3.5. Macromodelo para el cálculo del ICP.....	31
Figura 3.6. Macromodelo para el cálculo de la precipitación anual.....	32
Figura 3.7. Macromodelo para el cálculo del IFM.....	32
Figura 3.8. Macromodelo para el cálculo de la temperatura media anual.....	33
Figura 3.9. Macromodelo para el cálculo de la precipitación anual.....	33
Figura 3.10. Macromodelo para el cálculo del Índice de Martonne Anual.....	33
Figura 3.11. Macromodelo para el cálculo del Índice de Martonne Mensual.....	34
Figura 3.12. Macromodelo para el cálculo de máximo y mínimo.....	34
Figura 3.13. Macromodelo para el cálculo del intervalo.....	35
Figura 3.14. Macromodelo para el cálculo de los deciles o quintiles.....	35
Figura 3.15. Macromodelo para el proceso de reclasificación de deciles o quintiles.....	35
Figura 3.16. Macromodelo para obtención del mapa final de deciles o quintiles de precipitación.....	36
Figura 3.17. Ejemplo de grupo raster de un año.....	37
Figura 3.18. Ejemplo de grupo raster de más de un año.....	37
Figura 3.19. Interfaz principal del módulo.....	39
Figura 3.20. Información y parámetros de entrada y salida del módulo.....	40
Figura 3.21. Información y parámetros de entrada para cálculo de IFM e ICP.....	41
Figura 3.22. Lista de mapas anuales de IFM o ICP.....	42
Figura 3.23. Información y parámetros de entrada para cálculo de De Martonne.....	43
Figura 3.24. Información y parámetros de entrada para cálculo de cuántiles de precipitación.....	45
Figura 3.25. Interfaz para la opción de obtención de un mapa de frecuencia.....	46
Figura 3.26. Interfaz de usuario para especificar el formato de información.....	47
Figura 3.27. Escenarios para la obtención de mapas de frecuencia.....	48
Figura 4.1. Ubicación del Estado de México y sus municipios.....	49
Figura 4.2. Climas del Estado de México y sus municipios.....	50

Figura 4.3. Ejemplo de grupo raster de 31 años e imagen de precipitación, para el cálculo de los índices IFM e ICP.....	51
Figura 4.4. Ejemplo de grupo raster de precipitación y temperatura para el cálculo del índice de Martonne.....	51
Figura 4.5. Ejemplo de grupo raster de precipitación de los 31 años y grupo raster de comparación para cálculo de deciles.....	52
Figura 4.6. Distribución espacial del IFM en el Estado de México 1980-2010.....	53
Figura 4.7. Comportamiento de la precipitación anual por categoría de índice IFM (promedio de las regiones identificadas en el mapa final de IFM).....	54
Figura 4.8. Frecuencias para la categoría “Muy Alto” por décadas 1980-2010.....	55
4.8a. Frecuencia de IFM categoría “Muy alto” para los años 1980 a 1989.....	55
4.8b. Frecuencia IFM categoría “Muy Alto” para los años 1990 a 1999.....	55
4.8c. Frecuencia IFM categoría “Muy alto” para los años 2000 a 2010.....	55
Figura 4.9. Distribución espacial del ICP en el Estado de México 1980-2010.....	56
Figura 4.10. Comportamiento de la precipitación mensual promedio por categoría de índice ICP (promedio de las regiones identificadas en el mapa final de ICP).....	57
Figura 4.11. Frecuencias para la categoría “estacional” por décadas 1980-2010.....	59
4.11a. Frecuencia ICP, categoría “estacional” para los años 1980-1989.....	59
4.11b. Frecuencia ICP, categoría “estacional” para los años 1980-1989.....	59
4.11c. Frecuencia ICP, categoría “estacional” para los años 1980-1989.....	59
Figura 4.12. Frecuencias para la categoría “estacional” 1980-2010.....	59
Figura 4.13. Comportamiento de la precipitación mensual promedio por categoría índice De Martonne.....	61
Figura 4.14. Índice de Aridez De Martonne para el Estado de México.....	62
Figura 4.15. Comportamiento de la temperatura mensual promedio por categoría Índice De Martonne.....	63
Figura 4.16. Frecuencia de años secos según deciles anuales 1980-2010 en el Estado de México.....	64
Figura 4.17. Frecuencia de meses secos según deciles de precipitación 1982.....	66
Figura 4.18. Frecuencia de meses secos según deciles de precipitación 1992.....	66
Figura 4.19. Quintiles y deciles de precipitación año 1982.....	67
4.19a. Quintiles de precipitación año 1982.....	67
4.19b. Deciles de precipitación año 1982.....	67
Figura 4.20. Quintiles y deciles de precipitación año 2010.....	67

4.20a. Quintiles de precipitación año 2010.....	67
4.20b. Deciles de precipitación año 2010.....	67

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

1.1 Introducción

El agua es el recurso natural primordial para la vida, por lo que la escasez de este líquido no solo afecta a la población sino también al medio ambiente; el déficit de este recurso aunado a los cambios climáticos que hoy en día ocasionan condiciones extremas, determinan las características climáticas de un lugar como la aridez y causan uno de los fenómenos que afectan en demasía a la población como la sequía; no existe una definición exacta de sequía puesto que su presencia está sujeta a diferentes factores que dependen del lugar y de diferentes aspectos climatológicos, no obstante es principalmente caracterizada por la disminución de precipitaciones en un lapso de tiempo.

A nivel mundial las sequías representan una fuerte problemática ya que su impacto es: económico, ambiental y social; económicamente afecta la productividad agrícola e industrial; ambientalmente la sequía es capaz de cambiar radicalmente el paisaje de un lugar afectando la calidad y bienestar de los recursos naturales, y por último en el aspecto social la migración es uno de los principales problemas, puesto que la población tiende a migrar a las zonas urbanas en busca de un mejor nivel de vida, dejando sus tierras por ser poco rentables. La aridez no es considerada un fenómeno o desastre natural como la sequía, sin embargo cuando esta última se presenta en una región árida agrava las condiciones ambientales y sociales de la misma.

En nuestro país gran parte del territorio es árido por lo que es más susceptible a la sequía, sin embargo este fenómeno se ha presentado en todo el territorio nacional; en el presente trabajo se estudiará la sequía y aridez en el Estado de México, entidad que ha tenido registros históricos de déficit hídrico y que sin embargo ha sido poco lo que se ha hecho para el estudio y monitoreo de este fenómeno. La aplicación de índices de sequía y aridez ya desarrollados por investigadores permiten la detección y monitoreo de este fenómeno mediante el análisis del comportamiento de las precipitaciones y temperaturas, con lo cual permite tomar medidas que ayuden a mitigar sus efectos, así mismo los

sensores remotos (SR) son una tecnología muy útil ya que brindan el acceso a información a gran escala de manera rápida y actualizada.

Con lo anterior, la presente investigación tuvo por objetivo desarrollar un módulo geomático que automatice los procesos de cálculo de algunos índices de sequía y aridez, utilizando imágenes raster de series de temperatura y precipitación, esto ayudará a muchos usuarios interesados (como investigadores, profesores, alumnos, autoridades municipales, etc.) en la detección de este fenómeno, identificar el área afectada y el grado con la que se presente.

1.2 Planteamiento del problema

La sequía ha demostrado ser uno de los fenómenos que más daño causa a la población y al medio ambiente, su forma de hacerse latente lentamente agrava el bienestar de la sociedad aunado a la poca conciencia de un uso razonable de los recursos. Así mismo la aridez, que es una condición climática propia de una región, empeora la situación cuando hay sequía, ya que un lugar árido es más vulnerable ante este fenómeno, por lo cual es importante saber la intensidad de aridez en una región.

Los actuales estudios sobre sequía y aridez manejan el análisis de la información de manera aislada, es decir de manera tabular con información climática por estación, sin embargo este fenómeno es a gran escala, y realizar y mapear los cálculos con los procedimientos tradicionales implican más tiempo, mientras que las problemáticas día con día demandan soluciones rápidas y más precisas. Así mismo los estudios encontrados se han enfocado en el análisis continuo de datos actuales para un pronóstico inmediato, no obstante esta investigación considera importante aplicar un análisis temporal que permita un diagnóstico de la evolución de este fenómeno hasta los efectos actuales.

Ante estos eventos el gobierno ha mostrado interés ante la severidad del fenómeno, a pesar de esto no se le ha dado un monitoreo adecuado que permita la evaluación de la magnitud e intensidad de las sequías así como la propuesta de medidas de mitigación para la población que se ve afectada por dicho fenómeno.

1.3 Justificación

Ante la necesidad de la automatización de procesos convencionales para la identificación de sequías y zonas áridas, en la presente investigación se identificó la necesidad de realizar un módulo geomático que permitiera el cálculo de índices de manera automatizada. Para lo cual era necesaria una revisión bibliográfica para la selección de índices tomando en cuenta la disponibilidad de información (en formato matricial o raster).

Como se sabe un estudio sobre aridez o sequía implica analizar una serie de tiempo larga, con datos de al menos 30 años, por lo cual el uso de formato raster como lo son las imágenes de satélite o imágenes procesadas ayuda a la mejor administración de información que abarquen grandes porciones de terreno, lo que implica cálculos espaciotemporales más fáciles y rápidos.

La automatización de procesos dentro de un ambiente SIG facilita el estudio interdisciplinario para obtener alternativas que mejoren la toma de decisiones. Así mismo la metodología empleada dejaría como base una estructura abierta para la implementación en algún otro lenguaje de programación o en otro programa SIG.

1.4 Antecedentes

1.4.1 La sequía y aridez

La sequía es uno de los fenómenos naturales que más ha afectado a la población en todo el mundo, amenazando la sobrevivencia de más de 1,000 millones de personas en más de 110 países (Kofi, en Morales y Parada, 2005). Este fenómeno meteorológico se presenta en cualquier régimen climático del planeta, sin embargo su magnitud se ve intensificada en regiones áridas por las condiciones climáticas que se viven en estas.

En nuestro planeta la superficie terrestre equivale a 14.9 billones de hectáreas de las cuales un 40% son tierras áridas que equivalen aproximadamente a 6.1 billones de hectáreas, de éstas 1 billón son meramente híper-áridas desérticas (UNEP, en El Hassan, 2004); dos millones de personas se encuentran en estas regiones, en donde el 90% de

éstas pertenecen a países en desarrollo (UNEMG, 2011). América Latina y el Caribe tienen una superficie de 20.18 millones de km², de los cuales un 25% corresponde a tierras áridas, semiáridas y subhúmedas secas, y a su vez, el 75%, tiene serios problemas de degradación; en Argentina, México y Paraguay, gran parte de su territorio ha sido afectado por problemas de degradación y desertificación (Morales y Parada, 2005).

Dados los efectos persistentes de la sequía y aridez, científicos y dirigentes políticos, así como organizaciones (en lucha contra estos fenómenos naturales) se han visto en la necesidad de llevar a cabo estudios para obtener herramientas que permitan la identificación y valoración temprana de sequías y que por consiguiente se puedan aplicar medidas preventivas que ayuden a aminorar los efectos de las mismas sobre la población; el surgimiento rápido y continuo de tecnologías de información como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) o los sensores remotos (SR) permiten la identificación, el análisis espacio-temporal y predicción de un fenómeno natural en la superficie terrestre, convirtiéndose así en una herramienta primordial para la gestión sustentable de los recursos naturales.

1.4.2 Los SIG empleados en el estudio de la sequía y aridez a nivel internacional

Los SIG surgieron como herramientas para inventario de recursos naturales, hoy en día con los avances tecnológicos se han situado como un elemento importante en el estudio de fenómenos naturales por el manejo y análisis de información geográfica vectorial y raster. Por las bondades que estas herramientas ofrecen han sido de mucha utilidad en el estudio de la sequía y aridez en los lugares que por condiciones geográficas son susceptibles a la presencia de estos fenómenos. A continuación se citarán algunos ejemplos de la aplicación de los SIG en el estudio de estos temas a nivel internacional:

- La Organización Meteorológica Mundial (OMM) en 2006, realizó un estudio sobre la conceptualización, entendimiento, vigilancia y alerta temprana de sequía, indicando algunos Sistemas de Información Web para la vigilancia de la sequía en seis regiones:
 - **El Monitor de Sequías de Estados Unidos (USDM, por sus siglas en inglés)** sistema web para la vigilancia de las sequías y el abastecimiento del agua, utilizando índice de sequía de Palmer, índice de precipitación

normalizado, caudal fluvial, salud de vegetación, humedad del suelo y efectos concomitantes.

- **Centro sobre el clima de Beijing:** ofrece mapas diarios sobre la vigilancia de sequías en China, utilizando el índice de precipitación normalizada, evapotranspiración potencial y deciles de precipitación.
 - **Centro de Aplicaciones y Predicción Climáticas de la Autoridad Intergubernamental para el Desarrollo (IGAD por sus siglas en inglés), (ICPAC, por sus siglas en inglés):** es un sistema para la vigilancia, predicción y alerta temprana de riesgos climáticos en la región “cuerno de África”.
 - **Servicio Meteorológico de Sudáfrica (SAWS, por sus siglas en inglés):** sistema web para la vigilancia de la sequía concentrando la información de precipitaciones y predicciones a largo plazo en un solo lugar. Evalúa la gravedad de la sequía, utiliza el índice de precipitación normalizado aplicado para diferentes periodos de tiempo principalmente largos.
 - **Instituto de Meteorología de Portugal:** mapas publicados en la Web para caracterizar la sequía de manera mensual, utilizando el Índice de Severidad de Sequia de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés).
 - **Sistema Nacional de Vigilancia Agrícola de Australia (NAMS, por sus siglas en inglés):** sistema Web que muestra mapas actuales del estado del clima en toda Australia, los indicadores que utilizan son: percentiles de precipitación acumulativa por varios meses para identificar el déficit de lluvia.
- Murad e Islam (2011) realizaron un estudio para la identificación del riesgo de sequía en la región noroeste de Bangladesh, utilizando el índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, por sus siglas en inglés) y SIG para el mapeo del cálculo del índice de precipitación estandarizado para la sequía meteorológica.
- Lin, Chu y Tsai (2011) llevaron a cabo un estudio para la Identificación de áreas con alto riesgo de sequía en la región occidental (Ejina Oasis) de Inner Mongolia, para los años 2001 y 2004, haciendo uso de SIG y los sensores remotos como una buena herramienta para el estudio de fenómenos a gran escala y por intervalos de tiempo, los índices utilizados fueron: NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), NDVIA (Anomaly of Normalized Difference Vegetation Index),

SVI (Standardized Vegetation Index), SMI (Standard Moisture Index) y NDMI (Normalized Difference Moisture Index).

- Ebrahimi y Matkan (2010), realizaron un estudio para obtener el nivel de severidad de sequía en zonas áridas de Irán, utilizando SR y datos meteorológicos, aplicando índice de vegetación, PDI (Perpendicular Drought Index), VSWI (Vegetation Supply Water Index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) y MPDI (Modified Perpendicular Drought Index).
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura - El Programa Hidrológico Internacional (UNESCO-IPH, por sus siglas en inglés) y Gobierno de Flandes (2010), llevaron a cabo un proyecto para la elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas de América Latina y el Caribe, recabando información climatológica (de 30 años) de más de 26 países (para la conformación de una base de datos), los índices utilizados fueron: Índice de Aridez, Índice de Concentración de Precipitación y el Índice de Fournier Modificado.
- Vázquez *et al.* (2007), realizaron la actualización del mapa de aridez de Cuba, utilizando el Índice de Aridez para 40 años de información pluviométrica de precipitación, dicho mapeo les permite la valoración de la aridez y desertificación de Cuba.

1.4.3 Los SIG empleados en el estudio de la sequía y aridez en México

Nuestro país cuenta con una superficie de 1,958,201 km² de la cual el 52.5% corresponde a tierras áridas y semiáridas (Ruiz y Febles, 2004), por lo que gran parte del territorio es susceptible a la presencia de sequías, tal como el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) (2011) menciona, que México ha padecido los efectos de la sequía a lo largo de la historia, sin embargo no se tienen registradas las fechas de ocurrencia de estos eventos, se sabe que en 1450 hubo una sequía severa. Así mismo entre 1822 y 1910 hubo un total de 39 periodos secos, aunque se desconoce su duración exacta. Por lo anteriormente mencionado en México se han llevado a cabo estudios para la identificación y seguimiento de sequías en algunos estados de la república, enseguida se mencionan algunos ejemplos de estudios sobre sequías particularmente en México:

- Barragán *et al.* (2010), llevaron a cabo un estudio para la identificación de las variaciones de la precipitación en la cuenca Lerma - Chápala entre los años 1970-2006, utilizando el Índice de Concentración de Precipitación para la obtención de los periodos más y menos lluviosos.
- Mercado *et al.* (2010), realizaron la adaptación del índice De Martonne para el estudio de balance hídrico en zonas áridas y semiáridas de las cuencas La Paz y Comondú de Baja California Sur. Aplicaron los índices IDHA (Índice de Disponibilidad Hídrico Ambiental), IDDH (Déficit Hídrico Ambiental) y el Índice de Aridez para la sensibilidad a gradientes de precipitación y temperatura.
- Flores *et al.* (2011), llevaron a cabo un estudio para la valoración de lugares que habían sufrido sequías, utilizando datos climatológicos, geográficos y edafológicos considerando diez años 2000-2011 y por ende obtener la delimitación de las zonas agropecuarias con mayor probabilidad de presencia de sequías en el estado de Puebla, con el fin de crear un sistema de alerta en los riegos de producción agrícola.
- Madrigal-Gómez *et al.* (2008), realizaron un estudio para determinar el estado de degradación del paisaje, aplicando el indicador de desertificación de albedo, para determinar la temperatura, humedad y aridez, haciendo uso de imágenes de satélite Landsat ETM+ para calcular el NDVI y el índice de desviación estándar dinámico (MSDI).

Como se puede apreciar en los ejemplos de estudios de sequía y aridez en nuestro país han sido importantes principalmente en aquellos estados que por su ubicación geográfica y condiciones climáticas son vulnerables a la presencia de estos fenómenos, como lo es el Estado de México que cuenta con diversidad geográfica y climatológica, y que ha tenido presencia importante de sequía.

1.4.4 La sequía y aridez en el Estado de México

De acuerdo con la CONABIO, que toma en cuenta la clasificación de Köppen modificada por García, en el Estado de México, el clima seco semiárido comprende el 5.73 % del territorio estatal, en la parte de la región hidrológica del Pánuco, en los municipios de Acolman, Apaxco, Atenco, Axapusco, Chiautla, Chiconcuac, Papalotla, Ecatepec,

Hueyoxtla, Jaltenco, Nextlalpan, Nopaltepec, Tecámac, Temascalapa, Teotihuacan, Tepetlaoxtoc, Tequixquiac, Texcoco, Tezayuca, Tonanitla y Zumpango.

De acuerdo con el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2002), los principales eventos de sequía en el estado han sido:

Tabla 1.1. Eventos de sequía en el Estado de México, datos tomados de CENAPRED

AÑO	MES	EFFECTOS ECONÓMICOS Y SOCIALES
1993	Mayo	Provocó la pérdida de 1,000 hectáreas sembradas de maíz y se quedarán sin cultivar 5 mil hectáreas más. La sequía ha propiciado 2,235 incendios forestales.
1998	Marzo	Más de 4 millones de habitantes afectados en siete municipios.
	Mayo	Se perdieron más de 300 mil hectáreas de cultivo.
	Junio	Se dejaron de sembrar 300 mil hectáreas de cultivos de temporal
	Agosto	Más de mil millones de pesos de pérdidas en el campo, afectadas 200 mil familias.

Como se puede observar la presencia de sequía ha afectado en primera estancia al sector agrícola disminuyendo la productividad y poniendo en riesgo la seguridad alimenticia de la sociedad, siendo la agricultura una de las principales actividades económicas para el estado, el estudio de este fenómeno y monitoreo de la aridez se vuelve un tema de vital importancia. A continuación se señalan algunos de los estudios referentes a este tema en el Estado de México.

- Romero (1995), realizó un trabajo de tesis en el que determinó el grado de sequía en el noroeste del Estado de México basándose en tres parámetros: *Tendencia de la precipitación*: para determinar el comportamiento de precipitación en todos los años partiendo de 1951, *Sequía intraestival*: para identificar déficits, prevaleciendo la sequía moderada en todos los años, y *Grado de humedad*: para identificar qué tan seco o húmedo fue un año. Teniendo como resultado la presencia de sequías en la zona noroeste del Estado de México por la disminución de precipitación

sobre todo en el 1958, y que además está influenciada por otros aspectos como la ubicación geográfica.

- Herrera (2000), en su trabajo de tesis doctoral realizó un análisis estadístico de las sequías en México tomando datos climatológicos de estaciones meteorológicas de 1921 a 1987 aplicando el índice de Palmer, y considerando la regionalización climatológica de Douglas(1985), obteniendo como resultados finales mapas y gráficas que muestran el comportamiento e historia de las sequías en nuestro país a través de los años, en donde se observa que no hay un patrón de ocurrencia e intensidad de las mismas, sin embargo hay periodos en los que las sequías son muy fuertes en todo el país como la de la década de los cincuentas; para este estudio también se consideraron factores externos como el fenómeno “El niño” para el análisis del comportamiento de las temperaturas.

Han sido pocos los estudios encontrados sobre sequía y aridez en el Estado de México sin embargo históricamente se han ubicado eventos importantes de este fenómeno pero no se le ha dado atención para minimizar sus efectos, sumado a esto es importante incorporar los efectos que se han suscitado debido al cambio climático, que hoy en día nos lleva a la necesidad de tener un mejor conocimiento y seguimiento espacio-temporal de este fenómeno, ya que la alerta temprana de éste podría ayudar a la toma de decisiones que mitiguen los efectos no solo para la población más vulnerable, sino también para el medio ambiente puesto que un mal manejo de los recursos naturales en presencia de sequía aunado a zonas áridas dan como resultado un problema aún mucho más grave como lo es la desertificación.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Diseñar e implementar un módulo geomático que permita el cálculo de índices de aridez y sequía de manera automatizada mediante un software SIG, para analizar su comportamiento en el Estado de México en los últimos 31 años.

1.5.2 Objetivos específicos

1. Identificar y seleccionar los índices de aridez y sequía, más aptos para ser automatizados, de acuerdo con la disponibilidad de información.
2. Diseñar el modelo conceptual de los índices seleccionados para identificar las necesidades de los mismos.
3. Obtener y depurar la información necesaria para el cálculo de los índices.
4. Diseñar el modelo conceptual de la base de Geodatos a partir de las necesidades de información de los índices, para ser considerada en la automatización de los mismos.
5. Diseñar el modelo conceptual-lógico de cada índice, utilizando la herramienta de modelación del SIG Idrisi, para que estos puedan ser implementados en cualquier lenguaje de programación o SIG.
6. Implementar el módulo, a partir de los modelos conceptuales-lógicos, para el cálculo de los índices de aridez y sequía dentro de la plataforma Delphi en SIG Idrisi.
7. Aplicar el módulo con información del Estado de México con la finalidad de evaluar el rendimiento espacial y temporal de la herramienta, para los años 1980 - 2010.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL

2.1 Sequía

De acuerdo con Diouf (2010) la sequía y la escasez de agua son la amenaza más importante para la producción mundial de alimentos, ya que cerca del 80% de la crisis de alimentos del mundo se debe a estos fenómenos climáticos que condicionan y ponen en riesgo el bienestar de la humanidad, todo ello, aunado a la mala gestión de los recursos naturales trae como resultado la agravación de las sequías que ponen en peligro los suelos pudiendo llegar al grado de desertificación que es una problemática aún mayor. Claro ejemplo de los efectos catastróficos que causa la sequía sucede en la región del Cuerno de África y que actualmente están afectando a miles de millones de personas dejándolas sin alimentos.

Dada la versatilidad del concepto de sequía debido a las causas que la originan y al impacto de esta sobre diferentes escenarios existen variadas definiciones, tales como:

- La sequía se produce cuando la cantidad de precipitación retenida ha estado significativamente debajo de los niveles de los registros normales (Stein *et al.*, 2011)
- Deficiencia de la precipitación sobre un periodo prolongado, por lo general una temporada o más, lo que resulta en escasez de agua causando efectos adversos en la vegetación, animales o personas (NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration por sus siglas en inglés, 2008)
- Fenómeno que muestra una alta variabilidad en el tiempo y espacio por lo que es difícil identificar exactamente la ubicación espacial de estas áreas de sequía. Lin, Chu y Tsai (2011) llevaron a cabo un estudio para la identificación de áreas con alto riesgo de sequía en la región occidental (Ejina Oasis) de Inner Mongolia, para los años 2001 y 2004, los cuales han sido considerablemente inferiores a los niveles normales registrados causando un agudo desequilibrio hídrico que perjudica los sistemas de producción de las tierras (ONU, 1994).

- Puede ser considerada en términos generales como la consecuencia de una reducción en la cantidad de precipitación que es recibida, usualmente en una o más temporadas, también es considerada como una característica normal y recurrente del clima y ocurre en casi todos los regímenes climáticos (International Strategy for Disaster Reduction (ISDR por sus siglas en inglés), 2003).

Aunque hay distintas definiciones, la característica principal de la sequía es el déficit de la precipitación en un periodo de tiempo largo, provocando escasez de agua, sin embargo como lo menciona el Instituto Nacional de Ecología (2007) al momento de hacer un estudio sobre sequia existen otros factores que pueden ser considerados como la evapotranspiración (balance entre precipitación y evapotranspiración en un periodo de tiempo), retraso de lluvia en temporada de lluvias, temperaturas altas, vientos fuertes y baja humedad relativa, factores que varían por las características físicas y climáticas de la región en estudio y también por los cambios climáticos que se viven hoy en día, lo que hace que los impactos de sequía varíen de una región a otra.

2.1.1 Tipos de sequías

Existen cuatro tipos de sequía, tres relacionados con los factores climáticos (Meteorológica, Hidrológica y Agrícola) y uno con el impacto social (Socioeconómica) (Wilhite y Glantz, 1987):

- **Meteorológica**

La sequía meteorológica es principalmente considerada como el déficit de precipitación a partir de la cantidad esperada en un periodo prolongado de tiempo (ISDR, 2003), debido a que su duración y magnitud varían por la diferencia entre áreas geográficas, algunas definiciones optan por no especificar umbrales fijos, tal como Palmer (1965) la define como el intervalo de tiempo, generalmente con una duración del orden de meses o años, durante el cual el aporte de humedad en un determinado lugar cae consistentemente por debajo de lo climatológicamente esperado o del aporte de humedad climatológicamente apropiado.

➤ **Hidrológica**

Hace referencia a una deficiencia en el caudal o volumen de aguas superficiales o subterráneas; ocurre generalmente después de un déficit de precipitación por periodos extendidos, causando un impacto en el suministro de agua (ríos, embalses, lagos, etc.) (NOAA, 2008), teniendo en cuenta la gestión de este recurso para la sociedad y sus diferentes actividades, Linsley *et al.* (1975) considera que la sequía hidrológica es un periodo durante el cual los caudales son inadecuados para satisfacer los usos establecidos del agua.

➤ **Agrícola**

Este tipo de sequía no es equivalente a la meteorológica por estar sujeta a condiciones meteorológicas, sino que también depende de las características biológicas del cultivo y de las propiedades del suelo, puesto que esta sequía tiene presencia cuando los niveles de humedad en el suelo no son suficientes para satisfacer las necesidades de agua de las plantas (Susnik, 2002), la vulnerabilidad a este tipo de sequía depende de las propiedades y características del suelo ya que algunos son más resistentes a esta sequia por su capacidad de retención de agua, cuando hay déficit de precipitación.

➤ **Socioeconómica**

Este tipo de sequía se refiere a los daños económicos o sociales materiales que causa la misma, de acuerdo con el NOAA (2012) la sequía socioeconómica está basada en el impacto de las condiciones de la sequía (meteorológica, hidrológica o agrícola) en la oferta y la demanda de algunos bienes económicos, es decir, cuando la demanda de un bien económico excede la oferta, esto como resultado de un déficit relacionado con el clima en el suministro de agua.

2.1.2 Parámetros de caracterización de las sequías.

Para el estudio de sequías es importante saber bajo qué términos puede ser medida, para ello existen algunos parámetros que permiten caracterizar a las sequias. Dichos parámetros varían no solo por el estudio o el autor si no también el tipo de sequía que se desea medir puesto que cada parámetro puede ser personalizado de acuerdo a las necesidades de los índices que se utilizan para la identificación de sequias.

Se consideran 10 parámetros, uno independiente (magnitud), cuatro correspondientes al componente temporal (duración, frecuencia, velocidad de implantación y espaciamiento temporal), y dos al espacial (extensión y dispersión espacial) (Burton *et al.*, 1978; Tsakiris *et al.*, 2005, citados por Marcos, 2001):

- **Magnitud:** Es el déficit medio de precipitación o caudal durante el periodo de duración del evento seco. Puede medirse como el porcentaje o el valor absoluto de precipitación o caudal para el periodo seleccionado.
- **Severidad:** Se mide con el déficit acumulado de caudal o precipitación para la duración del periodo seco.
- **Frecuencia:** Se refiere a analizar los promedios de precipitaciones para determinar el número de casos que se produce la sequía durante un periodo de tiempo. Puede medirse también a través de la probabilidad empírica de que la precipitación o el caudal sean inferiores a la media, o del periodo de retorno del evento seco (intervalo medio de tiempo dentro del que puede esperarse que ocurra una sequía de determinada magnitud).
- **Velocidad de implantación:** Es el tiempo transcurrido entre el momento de inicio del déficit de precipitación o caudal, y el momento en que ese déficit alcanza su valor máximo.
- **Espaciamiento temporal:** Es el tiempo transcurrido entre diversos periodos secos, lo que proporciona una medida de la regularidad o aleatoriedad del fenómeno.
- **Intensidad:** Relación entre déficit acumulado y la duración. Es una medida de la deficiencia de lluvia por un periodo de tiempo dado.
- **Déficit acumulado:** Suma de la desviación negativa durante el periodo de sequía.
- **Duración:** Número consecutivo de intervalos donde la variable (precipitación o caudal) está por debajo del promedio de un periodo de tiempo dado.
- **Extensión:** Es la superficie total en la que se registra déficit hídrico.
- **Dispersión espacial:** Es la medida del grado de concentración de la anomalía de caudal o de precipitaciones.

- **Previsibilidad:** tiempo conocido con antelación por medio de ciertos indicios. Mediante el parámetro de espaciamiento temporal se obtiene una primera aproximación a la previsibilidad de la sequía.

2.2 Aridez

Cuando escuchamos la palabra aridez o árido hacemos alusión inmediatamente a desiertos, tierras secas, vegetación escasa y de bajo tamaño, etc.; también es relacionada o confundida con la sequía por las características que definen a ambas sin embargo existe diferencia entre ambos términos.

Para entender lo que es la aridez y poder diferenciarla correctamente de otro fenómeno parecido es importante saber su definición:

- Guerra (2003) la define como el grado de humedad que le falta a un clima.
- Mercado *et al.*, (2010) mencionan que es un concepto sinónimo de sequedad, que se traduce como la ausencia o escasa presencia de agua o bien de humedad en el aire y suelo.
- Kassas (2008) en un reporte sobre Arabia sugiere que la Aridez se refiere a la escases de los recursos hídricos, es decir, los ingresos de agua son menores a los que se gastan (evapotranspiración potencial).

Al igual que la sequía, el agua es la variable principal que la caracteriza sin embargo la manera en cómo se aborda y mide esta variable es lo que hace diferente la aridez de la sequía, tomando en cuenta que para medir la aridez de una región también se toman en cuenta otros factores climáticos como la temperatura y la humedad (Guerra, 2003) puesto que permiten la caracterización de un lugar árido cuando la evapotranspiración excede la cantidad de precipitación en un periodo de tiempo (NOAA, 2013).

Mientras que la sequía se refiere al déficit de precipitación en un periodo de tiempo específico en una región, la aridez es permanente y es una característica propia del clima (UNL, 2003), lugares secos, mismos que son más vulnerables a la recurrencia de la

sequía por la falta de precipitación, ambos fenómenos están muy relacionados puesto que la presencia de sequía en un lugar árido ocasiona que se agrave o extienda la aridez.

2.3 Módulo Geomático para índices de sequía y aridez: conceptos básicos

Para la conceptualización, diseño y desarrollo del módulo geomático es importante saber qué es un módulo y por qué es considerado este término “módulo geomático” y cómo se diferencia de otros términos en informática.

2.3.1 Geomática

La Geoinformática o también conocida en algunos lugares como Geomática se compone de dos palabras: Geoinformación (información geográfica, con referencia espacial) e Informática (Tecnologías de información y comunicación) (Flores, 2004).

Conforme a lo anteriormente descrito, Kavanagh (2003) citada por Franco Plata (2008, p. 30), define a la geomática como *un término usado para describir la ciencia y la tecnología del tratamiento de datos de mediciones terrestres. Incluye la colección, clasificación, manejo, planeación y diseño, almacenamiento y presentación. Tiene aplicaciones en todas las disciplinas y profesiones que usan datos espaciales con referencia terrestre.*

Desde su origen con la revolución de las Tecnologías de información, la Geomática ha brindado muchos aportes a la ciencia y a la sociedad por las bondades que ofrece en la manipulación de los datos geográficos, así como los resultados obtenidos para el análisis y gestión de problemáticas que necesitan una observación espacial y temporal, y que día con día exigen respuestas rápidas y precisas.

2.3.2 Sistema, programa y módulo

Para entender el contexto y el ámbito en el que se ubica un módulo y por qué es considerado módulo en lugar de decir sistema o programa o software, es importante comprender ciertos conceptos y poder diferenciar un sistema, un programa y un módulo,

de acuerdo con el grado de importancia es importante definir en primera instancia lo que es un sistema.

La palabra sistema es muy general y puede ser utilizada en muchas áreas de conocimiento, la utilizamos en nuestra vida diaria cuando hacemos mención al sistema de suministro de electricidad, sistema respiratorio, etc., refiriéndonos a un ente de gran tamaño que consta de partes más pequeñas que interactúan entre sí para que el sistema pueda cumplir una cierta función.

En informática o computación Pressman (2006) que cita la definición del diccionario Webster como “un sistema de información es un conjunto o disposición de elementos que están organizados para cumplir una meta predefinida al procesar información”, esos elementos son llamados programas que a su vez también tienen una tarea específica dentro de un sistema.

Por otra parte, de acuerdo con Giusti (2001) y Joyanes (2003) un **programa** es un conjunto de instrucciones (órdenes dadas a la computadora), ejecutables sobre una computadora, que permite cumplir una función o tarea específica, para conseguir un fin, el cual es definido como la especificación necesaria para solucionar un problema.

Por la complejidad y tamaño que implica un sistema, este se compone de programas que ayudan a satisfacer necesidades propias del mismo, sin embargo también un programa puede ser demasiado complejo, lo cual lleva a la subdivisión de dicho programa en tareas más pequeñas llamadas subprogramas y que a su vez también son llamadas módulos.

Como ya se mencionó en párrafo anterior un módulo es considerado como un subprograma, los cuales son parte de un programa (Santos *et al.*, 2005: 40). A este proceso de dividir un software o programa en modulo o subprogramas se le conoce como modularidad, donde el software se divide en componentes con nombres independientes (módulos) que se integran para satisfacer los requisitos de un problema (Pressman 2005: 254).

2.3.3 Programación: lenguajes de programación

Como se mencionó en el apartado anterior, se concibe un módulo dentro de un sistema de información, y es importante saber que cuando se escribe un programa se denomina programación y que a su vez el conjunto de instrucciones que se utilizan para crear un programa se le llama lenguaje de programación, por lo tanto entendemos que un lenguaje de programación es el que nos permite escribir y crear un programa (Joyanes, 2003).

Para que un usuario se pueda comunicar con una máquina e indicarle que debe de hacer (tomando en cuenta que un ser humano y una máquina tienen diferentes funciones y capacidades), debe usar un lenguaje de computadora o informático que pueda ser entendido por una máquina, existen tres tipos de lenguaje de computadora:

- Lenguaje máquina: lenguajes escritos y entendidos por código binario, instrucciones de 0 y 1 que indican operación y posición de memoria.
- Lenguaje de bajo nivel o ensamblador: son más fáciles de codificar, es el encargado de traducir los programas, basados en instrucciones nemotécnicas, a lenguaje máquina para que pueda ser entendido y ejecutado por la computadora.
- Lenguaje de alto nivel: son lenguajes independientes, más usados por los programadores para escribir programas, ya que sus instrucciones están más personalizadas y sofisticadas, y al igual que un ensamblador también deben de ser traducidos para ser entendidos por la computadora, en este caso se les llama compiladores.

Existen diferentes lenguajes de programación de alto nivel, comerciales (implican costo) y libres (son gratuitos), que son elegidos dependiendo el tipo de programación o paradigma de programación a utilizar (programación procedural, orientada a objetos u orientada a eventos, etc.) y las necesidades de los requerimientos de la problemática a resolver, algunos de estos programas son: Object Pascal (con su Entorno de Desarrollo Integrado Delphi), C, C++, Visual Basic, Python, Java, Ada, etc., lenguajes que día con día mejoran y extienden sus funcionalidades para ser más fácil de usar y proporcionar más utilidad a los programadores.

2.3.4 Los Sistemas de Información Geográfica: definición y tipos

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se han convertido en una herramienta para la gestión de muchas problemáticas en las que ha sido necesario el análisis espacio-temporal de las mismas, sirviendo de apoyo para las autoridades e investigadores en la toma de decisiones para la solución de problemas.

Los SIG surgieron como herramientas de inventario sin embargo con los avances tecnológicos los SIG han mejorado y provisto a los usuarios más funcionalidades para el almacenamiento, análisis y visualización de información espacial. O'Sullivan (2010) y Demers (2005) definen a un SIG como una herramienta compuesta por hardware y software, así como la intervención de recursos humanos y económicos para su desarrollo, que permiten el almacenamiento, análisis y visualización de datos espaciales en información, usada en la toma de decisiones de algún problema en la superficie terrestre.

Existen herramientas SIG comerciales para la manipulación de información geográfica ya sea de tipo vectorial o raster, pero se pueden crear un SIG desde cero para una finalidad específica, como monitorear recursos o fenómenos naturales, control de redes (eléctricas, drenaje, agua, telecomunicaciones, etc.), sistemas para la visualización y análisis de información política, de educación o salud, etc., muchas son las áreas en las que un SIG puede ayudar. Sin embargo tanto a los sistemas comerciales como a los personalizados se les puede agregar más funcionalidades conforme las necesidades lo requieran, esto gracias a los lenguajes de programación que permiten la creación de programas más pequeños (módulos) que satisfagan dichas necesidades y que puedan ser añadidos al SIG.

2.4.5 Sistemas de Información Geográfica y los lenguajes de programación

Idrisi es una herramienta SIG que permite la manipulación de datos Raster, es decir, datos representados en una malla o matriz de celdas organizadas en filas y columnas, en la cual una celda o pixel (picture element que significa elemento de la imagen) guarda la condición o atributo de la superficie terrestre en un determinado momento por medio de un valor numérico asignado a cada pixel.

El SIG Idrisi fue desarrollado por la escuela de Postgrado de Geografía de la Universidad de Clark, en Worcester, Massachusetts, EE.UU. en 1987, inicialmente llamado “The Idrisi Project”, a pesar de que solo fue creado pensando en estudiantes e investigadores por su bajo costo, fue evolucionando en sus versiones (Taiga, Kilimanjaro, Andes y Selva) aportando nuevas funcionalidades y mejoras, hasta convertirse hoy en día en una de las herramientas SIG más utilizada en todo el mundo.

Algunos SIG cuentan con una Interfaz de Programación de Aplicaciones (API, por sus siglas en inglés) que permiten el desarrollo de nuevas funcionalidades y por consiguiente la mejora de los mismos; Idrisi cuenta con una API debido a que se desarrolló como un servidor de automatización Object Linking and Embedding (OLE, por sus siglas en inglés) que permite el uso de objetos de Idrisi para poder ser utilizados desde otras aplicaciones, de esta manera se puede hacer uso de lenguajes de programación de alto nivel como Delphi, Visual C++, Visual Basic, VBA, etc., para el desarrollo de módulos que amplíen la funcionalidad de Idrisi.

CAPÍTULO 3 DESARROLLO METODOLÓGICO

Para el presente trabajo de tesis la metodología se basó en la propuesta por Quentin, *et al.* (2007): modelación conceptual, modelación geomática, implementación (módulo SIG) y aplicación (casos de estudio), las cuales se detallan en las siguientes secciones de este documento; en la Figura 3.1 se muestra el esquema de las fases de metodología a seguir para este trabajo:

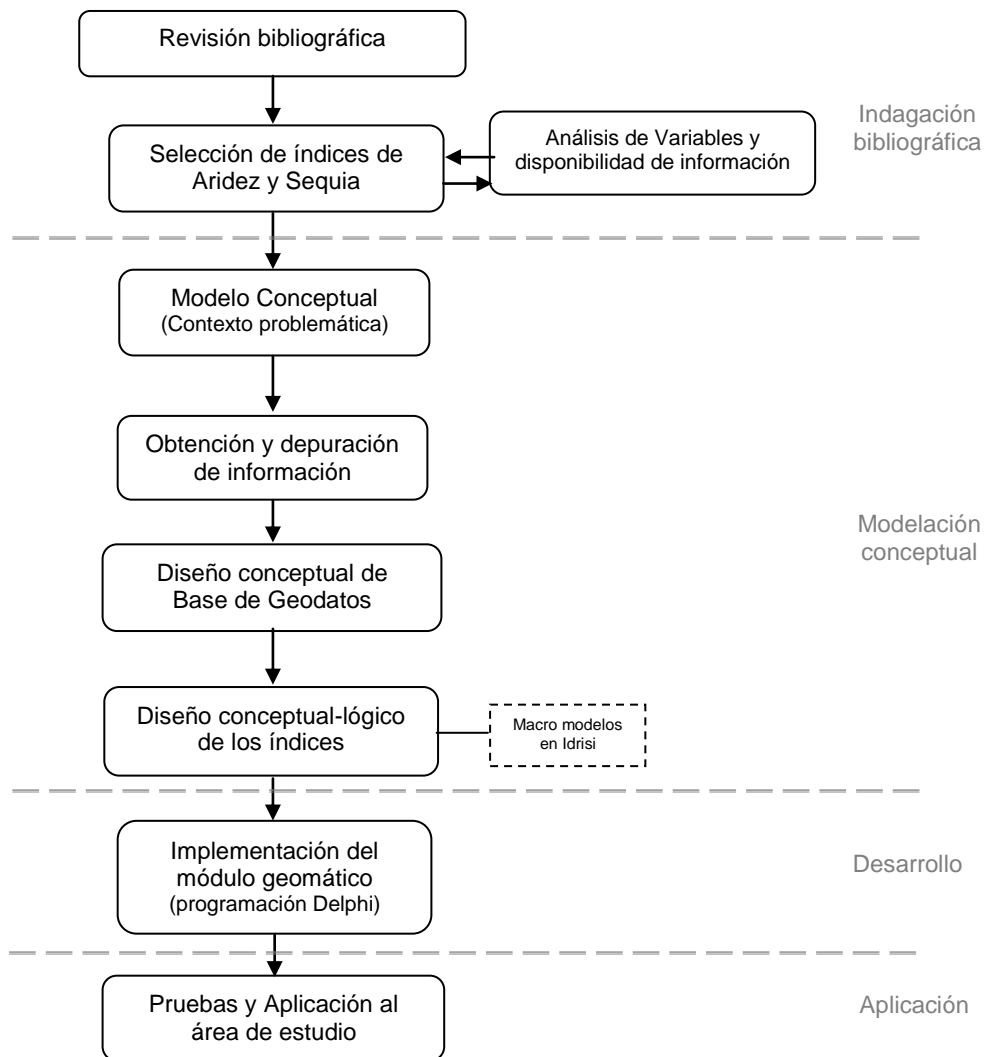


Figura 3.1. Metodología para el desarrollo del módulo Geomático

3.1 Revisión bibliográfica, identificación y selección de índices de sequía y aridez

En el estudio de sequía y aridez existen diversidad de índices, sin embargo no todos pueden ser abordados en este trabajo de tesis, debido a que se debe tomar en cuenta el tipo de información necesaria, la temporalidad a manejar, y la disponibilidad de la misma. Por tal motivo se hizo una búsqueda bibliográfica para analizar los índices más empleados en la literatura especializada en sequías y aridez, el resultado de esta búsqueda se concentra en la Tabla 2 del anexo F donde se especifica el nombre del índice, características, fórmula, variables, escala de medición o valoración, autor y año.

Para hacer la selección de los índices se hizo una valoración de las *variables necesarias* para el cálculo de cada índice, la *temporalidad* que maneja ya que hay índices que son anuales, mensuales o que manejaban 10 o 30 años, y también se consideró el *formato* de la información, tomando estos tres aspectos se fueron descartando los índices que se podían automatizar y los que no, y no por ser menos importantes si no por no contar con los medios para calcularlos, teniendo como resultado final la selección de cuatro índices uno de sequía (cuántiles de precipitación) y tres de aridez (Índice de Fournier Modificado, Índice de Concentración de Precipitación e Índice de Martonne), mismos que serán definidos en el siguiente apartado.

3.2 Conceptualización de los Índices de aridez y sequía considerados para el módulo

La sequía es un fenómeno y desastre natural muy complejo, al igual que la aridez que aunque no es considerado como fenómeno natural en sí en conjunto con la sequía agravan los impactos de la misma. Para caracterizar y medir la sequía, los indicadores pueden presentar desde un panorama general (identificar el grado de ocurrencia y medir la severidad) hasta una perspectiva muy específica (análisis detallado midiendo impactos y daños en los sectores económicos, sociales y ambientales, y la predicción) (Tsakiris, 2007), los cuales permiten también el análisis espaciotemporal e histórico para poder tomar medidas de prevención y mitigación ante este fenómeno.

Debido a que la aridez es considerada como una característica climática los indicadores correlacionan las variables de precipitación y temperatura, y por los cambios climáticos y la presencia de otros fenómenos naturales estos índices de aridez deben ser considerados en el dominio del tiempo y del espacio por ser un fenómeno dinámico, y de esta manera poder identificar la severidad, persistencia y análisis histórico al igual que la sequía (Salinas *et al.*, 1998).

3.2.1 Índice de Concentración de la Precipitación (ICP)

Este índice fue desarrollado por Oliver en 1980 (PHI, 2006), para estimar la agresividad de las lluvias a partir de la variabilidad temporal de las precipitaciones mensuales (Velasco *et al.*, 2009), es decir, permite evaluar la distribución de la lluvia en un año, definiendo la estacionalidad de la misma, y el comportamiento, para la identificación de medidas en la gestión del agua en el ámbito social, agrícola y ambiental, este índice se calcula de la siguiente manera:

$$ICP = 100 \left(\frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{P^2} \right)$$

Dónde:

P_i: Precipitación en mm del mes *i*

P: Precipitación total anual en mm

i: 1, 2, 3, ..., 12

El procesamiento de ICP es anual, por lo que cuando se maneja un periodo largo de tiempo, se hace el cálculo anual y posteriormente se hace un promedio, sus valores van de 8.3 (distribución uniforme en todo el año) a 100 (distribución aislada en un periodo corto) como se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Clasificación de ICP

Valor del Índice	Clasificación
8.3 – 10	Uniforme
10 – 15	Moderadamente estacional
15 – 20	Estacional
20 – 50	Altamente Estacional
50 – 100	Irregular

3.2.2 Índice de Fournier Modificado (IFM)

Desarrollado por Arnoldus en 1980 como mejora del Índice de Fournier (IF) (Velasco, 2009) considerando la precipitación de todos los meses, permite identificar la agresividad de la precipitación. En las zonas áridas la precipitación es poca e intensa cuando llueve, lo que ocasiona que el suelo seco y con poca vegetación sea vulnerable a procesos de erosión, es por eso que es importante saber la intensidad de la precipitación y la duración de temporada seca para valorar pérdidas en el suelo, por ello el Índice de Fournier Modificado se basa en la distribución anual y mensual de la precipitación.

$$\text{IFM} = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P}$$

Dónde:

P_i: precipitaciones del mes *i* en mm

P: precipitación total anual, en mm

i: 1, 2, 3, ..., 12

Al igual que ICP el cálculo de IFM se hace para cada año y se saca un promedio, su clasificación se muestra en la Tabla 3.2, la cual va de muy bajo (no hay mucha agresividad de la lluvia) a muy alto (presenta alta agresividad de la lluvia).

Tabla 3.2. Clasificación de IFM

Valor del Índice	Clasificación
0 – 60	Muy bajo
60 – 90	Bajo
60 – 120	Moderado
120 – 160	Alto
Mayor a 160	Muy alto

3.2.4 Índice de Aridez de De Martonne

De Martonne en 1926 desarrolló un índice de aridez basado en precipitación y temperatura a manera de balance hídrico, con el cual estratificó los tipos de vegetación. (Bravo *et al.*, 2006), permite definir límites climáticos de los desiertos, praderas y bosques, cuando se aplica a climas fríos se agrega una constante a la temperatura (T + 10) para evitar valores negativos, y cuando se trabajan zonas húmedas y secas la constante

cambia (T + 7) de acuerdo con la clasificación de Köppen. Existen dos maneras de calcular este índice: índice anual o índice mensual.

Índice de De Martonne Anual (I_a)

$$I_a = \frac{P}{T + 10}$$

Dónde:

P: precipitación total anual en mm

T: temperatura media anual en °C

Índice de De Martonne Mensual (I_m)

$$I_m = \frac{12 P}{T + 10}$$

Dónde:

P: precipitación mensual en mm

T: temperatura media mensual en °C

El cálculo de Martonne es anual y mensual, su clasificación se muestra en la Tabla 3.3, donde sus valores van de 0 (año o mes caracterizado como desierto) a valores mayores de 30 (año o mes caracterizado como muy húmedo).

Tabla 3.3. Clasificación De Martonne

Valor del Índice	Clasificación
0 - 10	Árido
10 - 20	Semiárido
20 - 30	Subhúmedo
30 - 60	Húmedo
> 60	Muy húmedo

3.2.4 Cuántiles de precipitación

Esta técnica fue desarrollada por Gibbs y Maher en 1967, como mejora al “método por ciento de la norma”, se lleva a cabo un análisis estadístico de variable de precipitación, consiste en la clasificación de los valores de precipitación de un lapso de tiempo de mayor a menor y construir una distribución de frecuencia acumulativa, la cual se divide en diez para el caso de los deciles (Tsakiris, 2007 que citó a Kininmonth, 2000) en donde el primer decil corresponde a la precipitación menor al 10%, el segundo decil corresponde a la precipitación menor al 20% y así sucesivamente (UNESCO, 2007). Es importante mencionar que para el cálculo de este índice es importante contar mínimo con 30 años de información de precipitación del área de estudio, lo cual resulta una desventaja (por el periodo de información) y una ventaja (análisis histórico de la precipitación). También es importante mencionar que el análisis de distribución no solo se puede hacer a diez deciles también puede ser a cinco, llamados quintiles y a cien llamados percentiles, depende de los objetivos del estudio para saber cómo manejar la distribución.

Para caracterizar los resultados de los cuántiles en las diferentes referencias bibliográficas encontradas se hallaron diferentes clasificaciones, como Marcos (2001) define 10 clasificaciones para valorar la sequía, la UNESCO (2007) y otros definen 7 clasificaciones, y los autores originales Gibbs y Maher citados por Sivakumar *et al.* (2010) definen 5 clasificaciones, para el presente trabajo se hizo toma en cuenta la clasificación de la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Clasificación de Cuántiles de Precipitación

Decil	Frecuencia	Clasificación	Rango	Porcentaje	Clasificación	Equivalencias		
						Percentiles	Deciles	Quintiles
1	0-10	Mucho muy bajo al promedio	Deciles 1-2	El 20% más bajo	Muy inferior a lo normal	20	2	1
2	10-20	Muy bajo al promedio						
3	20-30	Abajo del promedio	Deciles 3-4	20% cercano del más bajo	Inferior a lo normal	40	4	2
4	30-40	Ligeramente abajo del promedio						
5	40-50	Normal	Deciles 5-6	20% del medio	Cercano a la normalidad	50	5	3
6	50-60	Normal						
7	60-70	Ligeramente arriba del promedio	Deciles 7-8	20% cerca del más alto	Superior a lo normal	60	6	4
8	70-80	Arriba del promedio						
9	80-90	Muy arriba del	Deciles 9-	20% más	Muy superior	80	8	5

		promedio	10	alto	a lo normal			
10	90-100	Mucho muy arriba del promedio						

Fuente: elaboración propia con base en: Fairbanks *et al.*, 2005 y Mendoza *et al.*, 2007.

3.3 Modelo Conceptual de Índices de Aridez y Sequía

El modelo conceptual permite ubicar el contexto de la problemática en estudio antes de pasar a la programación, en este apartado se diseñó el modelo conceptual para los índices seleccionados que serán automatizados, mostrado en la figura 3.2, con el fin de saber a grandes rasgos cuales son las necesidades que cada índice tiene, partiendo de la conceptualización y definiciones anteriormente mencionadas.

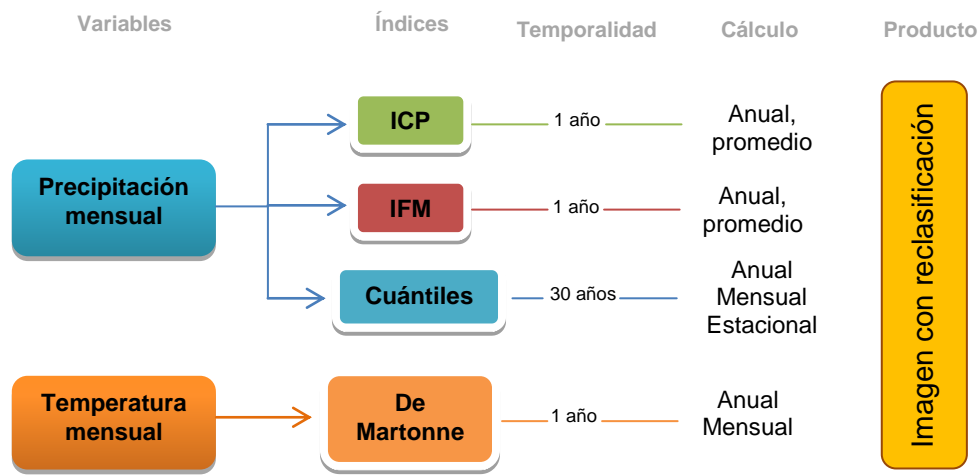


Figura 3.2. Especificación de necesidades de cálculo de los índices

3.4 Análisis y Diseño del Módulo geomático

3.4.1 Identificación de requerimientos

Dentro de este trabajo de tesis se tienen dos requerimientos primordiales:

- ✓ El primero corresponde al diseño y desarrollo de un módulo geomático que calcule los índices de aridez y sequía previamente seleccionados.

- ✓ El segundo es que el módulo debe ser implantado dentro de la herramienta SIG Idrisi, por lo que la información de entrada para el cálculo de los índices debe de ser en formato raster.

Para el diseño y desarrollo del módulo y tomando en cuenta el modelo conceptual previamente establecido, se tiene que las necesidades de información para el módulo son:

- Imágenes raster con información de precipitación mensual
- Imágenes raster con información de temperatura mensual
- Imagen Vector de los límites de la zona de estudio

3.4.2 Obtención y Depuración de Información

De acuerdo con los requerimientos para el módulo, las variables que se manejan en los índices son: precipitación y temperatura, de las cuales se pudo obtener información en imágenes raster.

Para la variable de precipitación se obtuvo la precipitación mensual de 31 años que comprende el periodo de 1980 a 2010 con una resolución espacial de 100 m por pixel, la cual fue proporcionada por el Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA) como producto del proyecto de investigación: “Efectos de la variabilidad climática en el cultivo de maíz de temporal, los puntos de análisis espacio-temporal en la cuenca alta del río Lerma (1960-2009)” (Díaz-Delgado *et al.*, 2012). Dichas imágenes comprenden el territorio que abarca la cuenca alta del río Lerma (Estado de México y D.F, y parte de los estados de Guerrero, Morelos, Puebla, Tlaxcala, Querétaro, Michoacán e Hidalgo).

Debido a que el índice de Martonne requiere de ambas variables, y no se contaba con información de temperatura con la misma resolución que la anterior, se pudo adquirir un promedio mensual de precipitación y temperatura, de los últimos 50 años de toda la república, con una resolución de 1 km por pixel, la cual también fue proporcionada por el CIRA.

Todas las imágenes en formato raster para Idrisi: “.rst”, tienen proyección cartográfica WGS84.

3.4.3 Diseño de la base de Geodatos

Un módulo no es un sistema que dependa de la conexión física a una base de datos mediante un gestor de base de datos que permita la administración y manipulación de la información sin embargo, como se mencionó es un programa que realiza funciones específicas para ampliar la funcionalidad de otro sistema o satisfacer un requerimiento de otro sistema, por lo tanto necesita información de entrada para poder cumplir su función y mostrar sus resultados: información de salida.

En esta investigación la base de Geodatos estará conformada por imágenes en formato raster que contengan la información necesaria para calcular cada índice, es decir “precipitación” y “temperatura”, dicha información puede ser a través de grupos raster o sólo una imagen específica dependiendo del índice a calcular, siendo el producto final una sola imagen raster que representa la clasificación del grado de aridez o sequía, de acuerdo con la temporalidad a manejar: año, mes o estación.

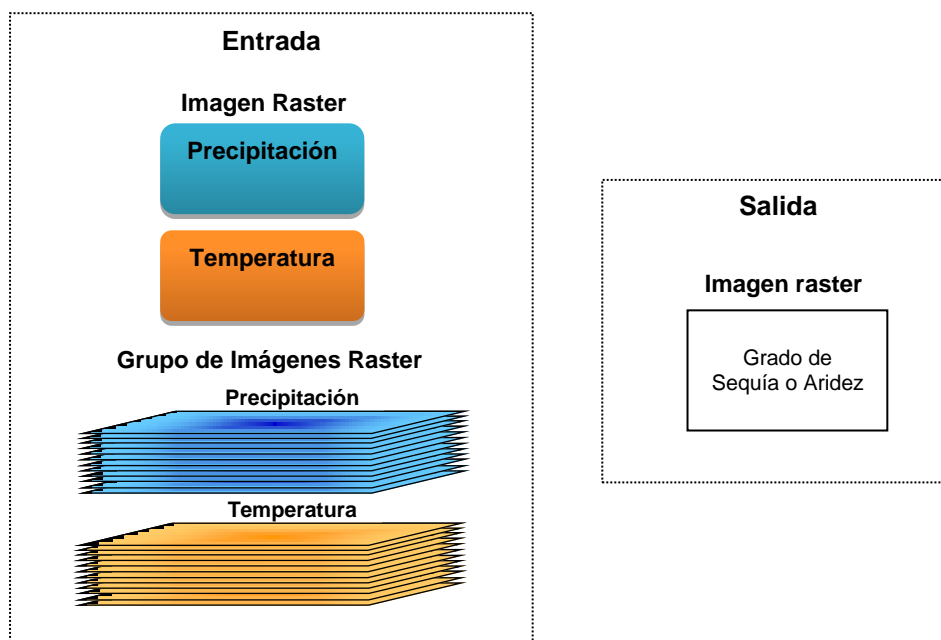







Figura 3.3. Modelo conceptual de la base de Geodatos

3.4.4 Diseño conceptual-lógico de los índices: Macromodelos Idrisi

Una vez que se tiene la información necesaria de acuerdo a los requerimientos de cada índice, en este apartado se definirán los modelos conceptuales lógicos del proceso de cálculo de los índices, para ello el software SIG Idrisi cuenta con una herramienta llamada Macro Modeler, la cual permite de manera gráfica esquematizar procesos y cumplir con cierto tipo de cálculo.

Antes de la realización y descripción de los modelos para el cálculo de los índices es necesario conocer cuál es la simbología utilizada en el Macro Modeler de Idrisi, para que se puedan comprender, la cual se describe en la Tabla 3.5:

Tabla 3.5. Simbología del Macro Modeler de Idrisi

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	EXTENSIÓN DEL ARCHIVO
 Imagen Raster	Imagen Raster	*.rst , *.rdc
 <Grupo raster>	Grupo Dinámico de Imágenes Raster (misma resolución)	*.rgf
 overlay	Módulo (ejecución de operaciones o procesos)	*.imm
	Conector	
	Conector Dinámico (permite iteraciones)	

Nota: en los macromodelos se utiliza una imagen llamada contador, la cual es de las mismas características de las imágenes con las que se está trabajando, esta es una imagen vacía la cual permite, como en programación, guardar el incremento de los valores que se le van sumando como resultado de otra operación.

Macromodelo del Índice de Concentración de la Precipitación

$$ICP = 100 \left(\frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{P^2} \right)$$

P_i = precipitación en mm del mes i
 P = precipitación total anual en mm
 i : 1, 2, 3, ..., 12

De acuerdo con la fórmula del índice en primera instancia se tiene que calcular la precipitación anual sumando las imágenes de la precipitación mensual (Figura 3.4) para posteriormente poder realizar el cálculo del índice (Figura 3.5).

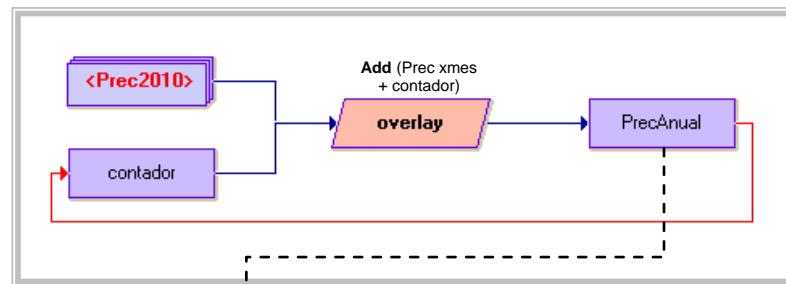


Figura 3.4. Macromodelo para el cálculo de la precipitación anual

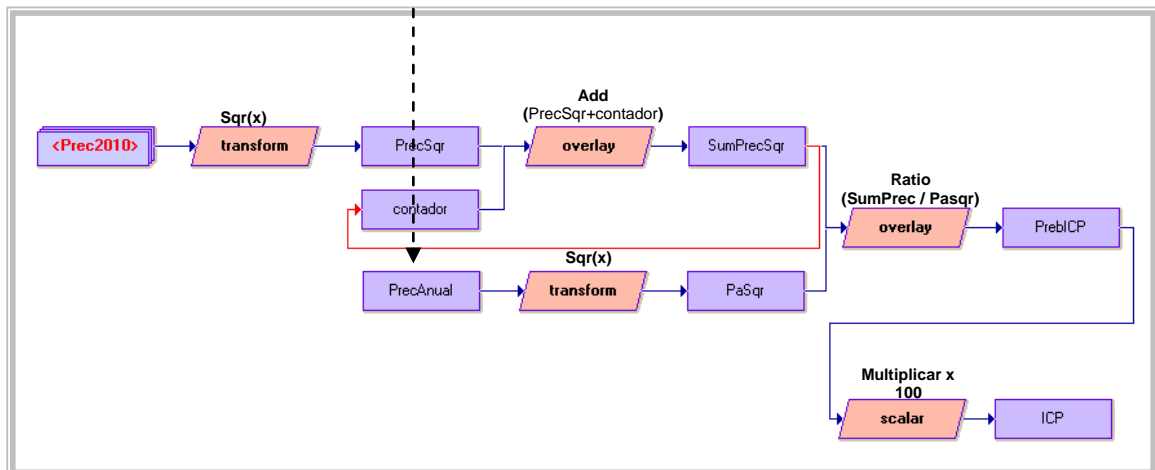


Figura 3.5. Macromodelo para el cálculo del ICP

Macromodelo del Índice de Fournier Modificado

$$IFM = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P}$$

P_i: precipitaciones del mes *i* en mm

P: precipitación total anual en mm

i: 1, 2, 3, ..., 12

Al igual que ICP para el cálculo de IFM se debe de calcular primero la precipitación anual con la suma de las imágenes de la precipitación mensual (Figura 3.6), y posteriormente calcular el índice (Figura 3.7).

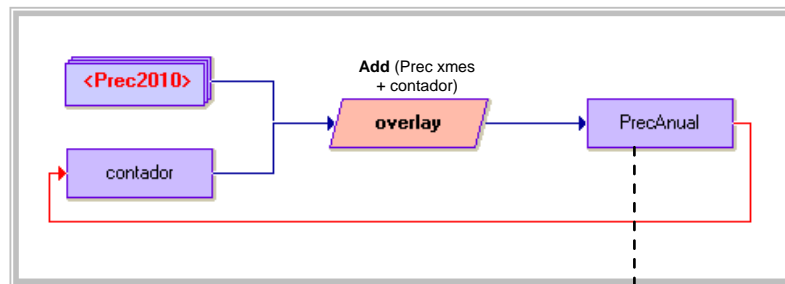


Figura 3.6. Macromodelo para el cálculo de la precipitación anual

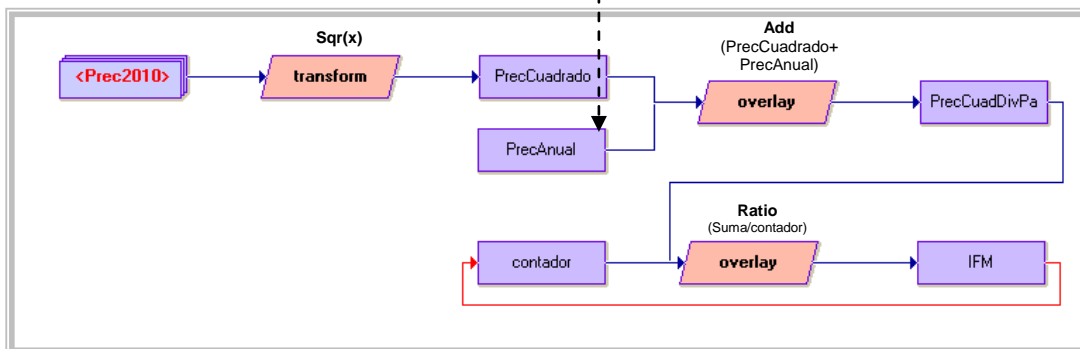


Figura 3.7. Macromodelo para el cálculo del IFM

Macromodelo del Índice de De Martonne Anual

$$I_M = \frac{P}{T + 10}$$

P: precipitación anual en mm

T: temperatura media anual en °C

De acuerdo con la fórmula del índice de Martonne anual es necesario calcular primero la precipitación anual sumando las imágenes de precipitación mensual (Figura 3.9), enseguida se calcula la temperatura media anual sumando las imágenes de temperatura mensual y dividirla entre doce (Figura 3.8), posteriormente se calcula el índice de Martonne anual (Figura 3.10)

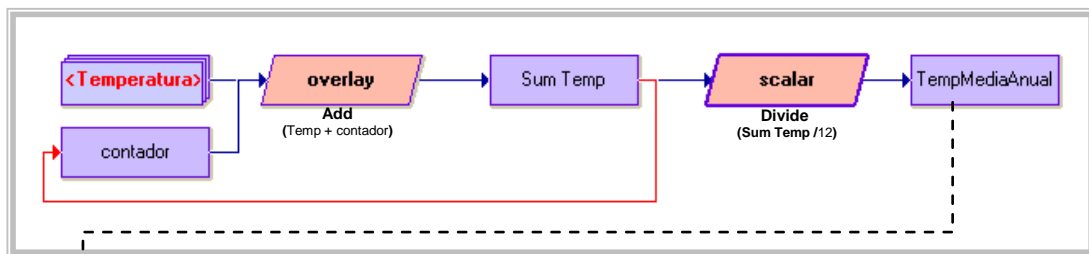


Figura 3.8. Macromodelo para el cálculo de la temperatura media anual

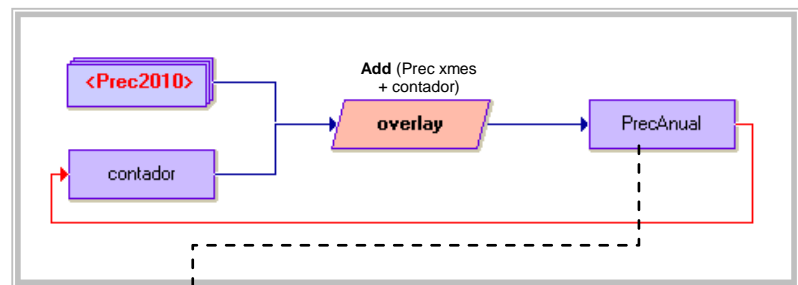


Figura 3.9. Macromodelo para el cálculo de la precipitación anual

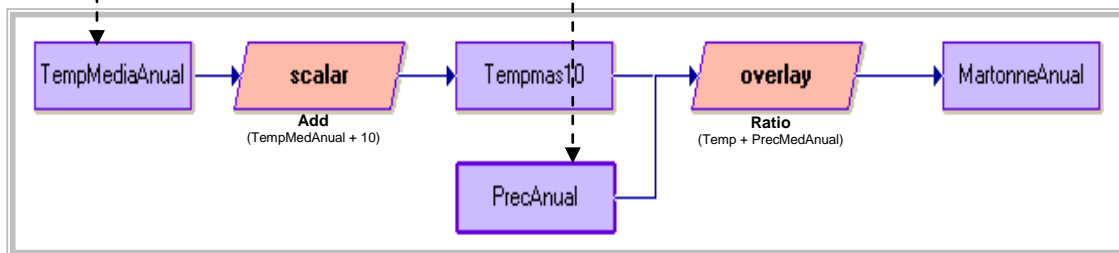


Figura 3.10. Macromodelo para el cálculo del Índice De Martonne anual

Macromodelo del Índice de De Martonne Mensual

$$I_M = \frac{12 P}{T + 10}$$

P: precipitación mensual en mm

T: temperatura media mensual en °C

Para el cálculo del índice de Martonne mensual solo se necesitan los grupos de imágenes de precipitación y temperatura mensuales y calcular el índice como se muestra en la Figura 3.11.

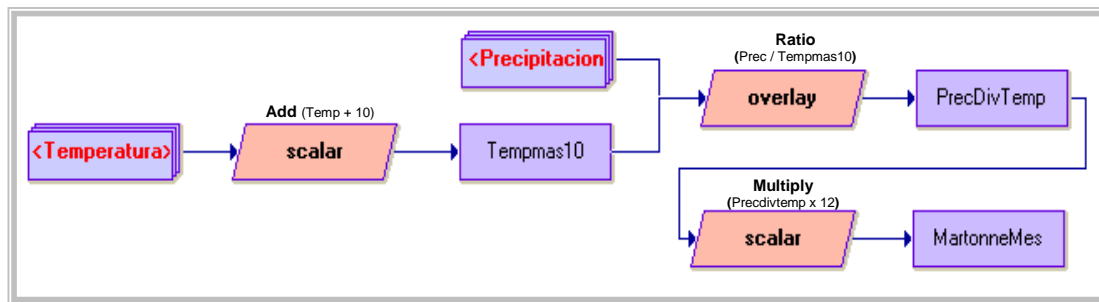


Figura 3.11. Macromodelo para el cálculo del Índice De Martonne mensual

Macromodelo del Índice de Cuántiles de Precipitación

Para calcular los cuántiles de Precipitación es necesario calcular primero el máximo y mínimo del grupo de precipitación mensual, anual o trimestral de un largo periodo de tiempo, mínimo 30 años (Figura 3.12).

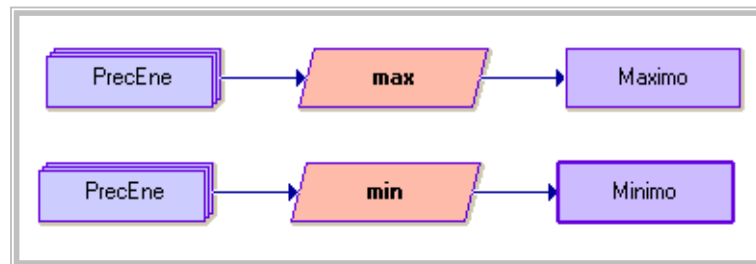


Figura 3.12. Macromodelo para el cálculo de máximo y mínimo

Una vez calculado el máximo y mínimo se obtiene el tamaño del intervalo con el residuo de ambas capas y dividiéndolo según el tipo de cuántil: quintil o decil (Figura 3.13).

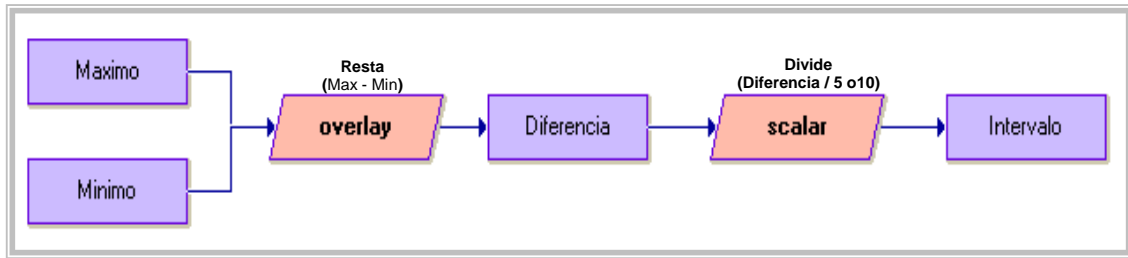


Figura 3.13. Macromodelo para el cálculo del intervalo

Posteriormente con el tamaño del intervalo se calculan los deciles o quintiles, sumando al valor mínimo el intervalo hasta llegar al máximo (Figura 3.14)

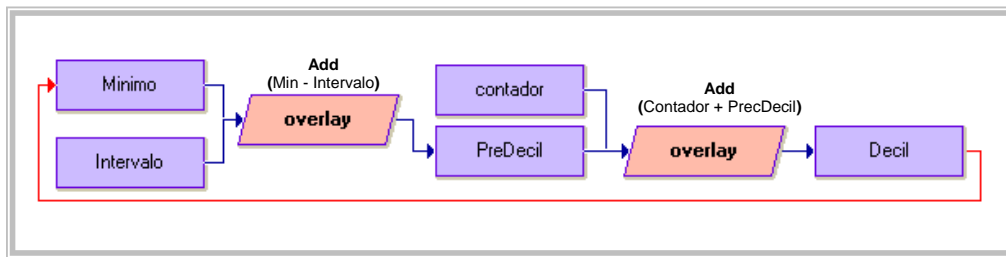


Figura 3.14. Macromodelo para el cálculo de los deciles o quintiles

Ya que se tengan las capas de los deciles o quintiles se reclasifica la imagen mensual, trimestral o anual que se va a estudiar o comparar, con el fin de obtener la reclasificación las capas de deciles o quintiles de la imagen en estudio (Figura 3.15).

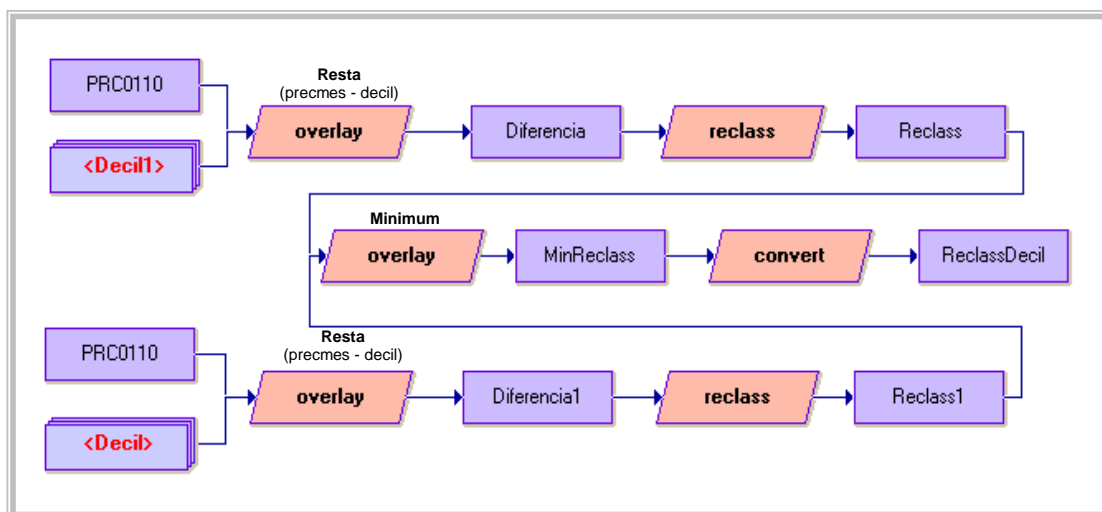


Figura 3.15. Macromodelo para el proceso de reclasificación de deciles o quintiles

Por ultimo las capas con su respectiva clasificación de decil o quintil se sobreponen para obtener el mapa final de deciles o quintiles de precipitación del mes, trimestre o año en estudio (Figura 3.16).

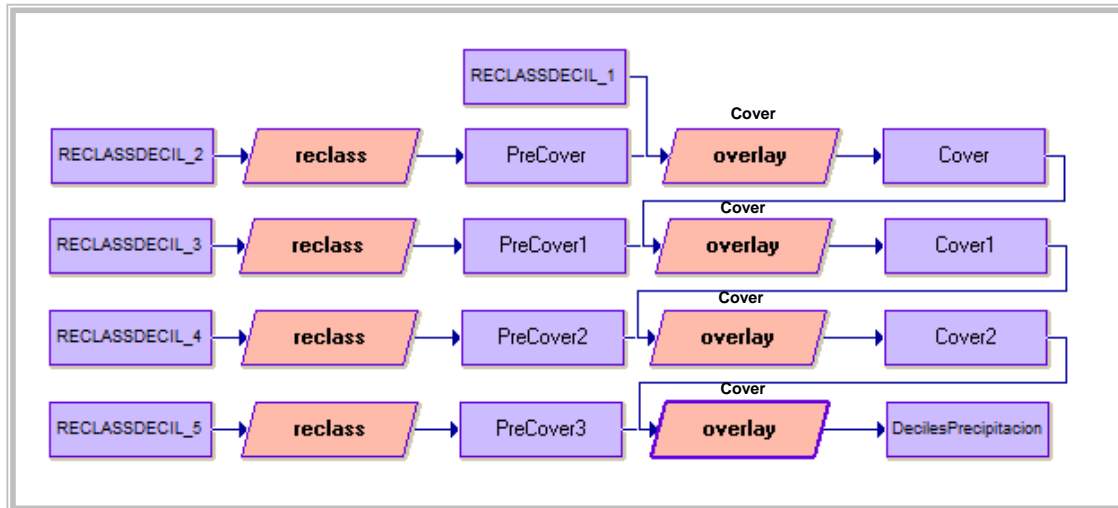


Figura 3.16. Macromodelo para obtención del mapa final de deciles o quintiles de precipitación

3.5 Implementación del módulo: Plataforma SIG Idrisi – Delphi 6.0

3.5.1 Especificaciones para la implementación

La información debe de cumplir ciertas especificaciones para que el módulo pueda realizar el cálculo correcto, esto debido a que se pueden manejar varios años de información, por lo que es importante diferenciarla, enseguida se describen los criterios que se deben de tomar en cuenta:

➤ **Imagen Raster (*.rst, *.rdc)**

El nombre de las imágenes debe de contener en los últimos cuatro dígitos el número del mes y el año al que pertenece la imagen.

Ejemplo:

“imagen_0199” (en donde 01 es el mes de enero y 99 es el año 1999)

➤ **Grupo Raster (*.rgf)**

En Idrisi un grupo raster es un archivo de texto con extensión “rgf” que contiene en la primera línea el número de imágenes consideradas para un grupo, seguido de la

lista del nombre de las imágenes, mismas que deben de estar ordenas por año y por mes sea un solo año (Figura 3.17) o más de un año a manejar (Figura 3.18):

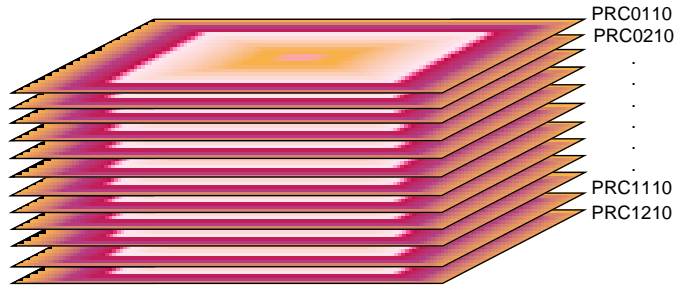


Figura 3.17. Ejemplo de grupo raster de un año

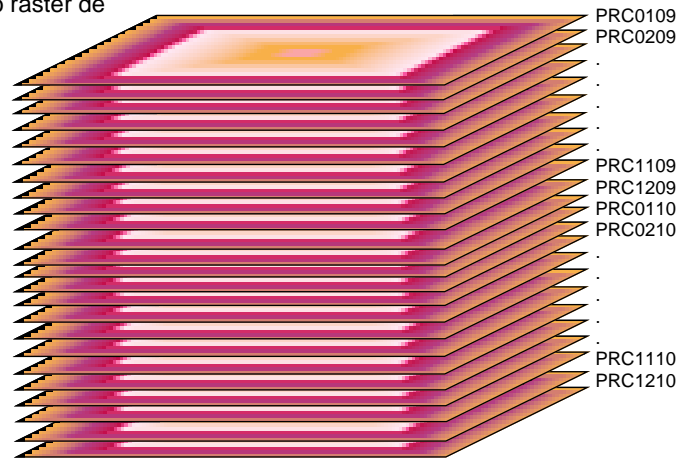


Figura 3.18. Ejemplo de grupo raster de más de un año

➤ **Mínimo y Máximo de Información**

El cálculo de la mayoría de los índices es de tipo anual por lo tanto se requiere un grupo raster de 12 imágenes (los doce meses), aunque en ocasiones no es posible contar con la mayoría de la información, se pide como mínimo 8 imágenes (de lo contrario el cálculo no procederá), sin embargo es importante mencionar que lo recomendable es poder contar con toda la información, debido a que no tomar en cuenta algunos datos hace que los resultados no sean exactos y reales.

Para el Índice de Deciles de Precipitación el cálculo requiere de un historial de información de 31 años, y de acuerdo con el tipo de cálculo (mensual, estacional o anual) el grupo raster puede ser personalizado dependiendo del número de meses

que se quieren evaluar y tomando en cuenta los mínimos y máximos de imágenes a considerar.

➤ ***Archivos temporales y nombre de archivos finales***

Los archivos temporales son aquellos que se obtienen en el intermedio de un ciclo de cálculo para poder llegar al resultado final, los nombres están relacionados con los descritos en los macro modelos de cada índice, los archivos son borrados al finalizar cada cálculo para ahorrar espacio en el disco.

Los archivos finales llevan por nombre el que indique el usuario si el cálculo es de un sólo año, si es de más años el modulo asigna al final del nombre el año o mes o estación para que se diferencien los resultados, o en caso de no proporcionar nombre se da por default el nombre del índice que se calcula seguido del mes o año que se está calculando, dicha información se obtiene de los nombres de las imágenes del grupo raster.

3.5.2 Elección del Lenguaje de Desarrollo en Idrisi

Como ya se mencionó en el marco teórico Idrisi es un Servidor de Automatización OLE que a través de una API permite la manipulación de objetos propios de Idrisi desde otra aplicación, es por eso que se pueden desarrollar módulos usando lenguajes de programación de alto nivel.

Uno de esos lenguajes de alto nivel que se pueden comunicar con Idrisi es Object Pascal de Delphi 6 que actualmente pertenece a Embarcadero (puesto que pertenecía a la empresa Borland), y fue sucesor de Turbo Pascal, es un entorno de desarrollo de software diseñado para la programación visual, puede ser utilizado para el desarrollo de muchos proyectos, permite la conexión a base de datos, conexiones a servidores Web, etc., y permite la generación de archivos ejecutables para Windows y Linux.

3.5.3 Interfaz de usuario del módulo geomático

El módulo tiene una interfaz principal y sencilla en la cual se muestran los cuatro índices que se pueden calcular, así como la información básica requerida, tal como se muestra en la Figura 3.19:

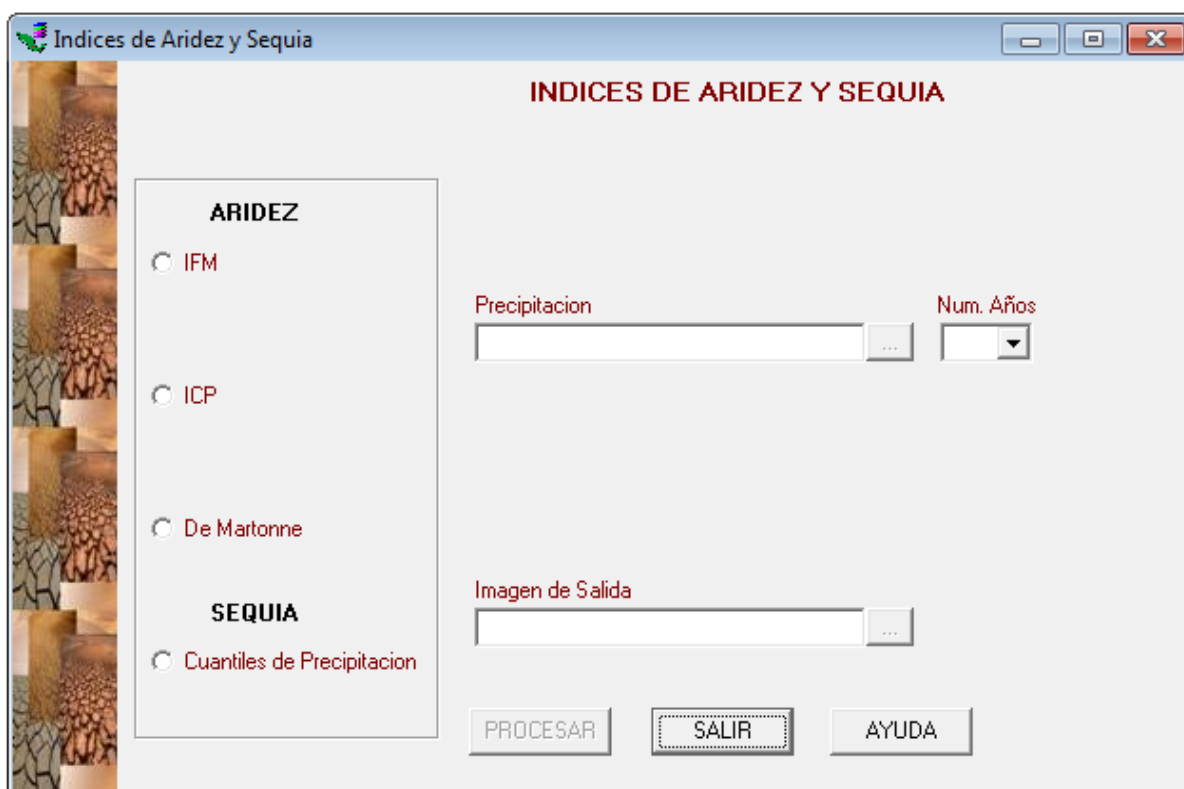


Figura 3.19. Interfaz principal del módulo

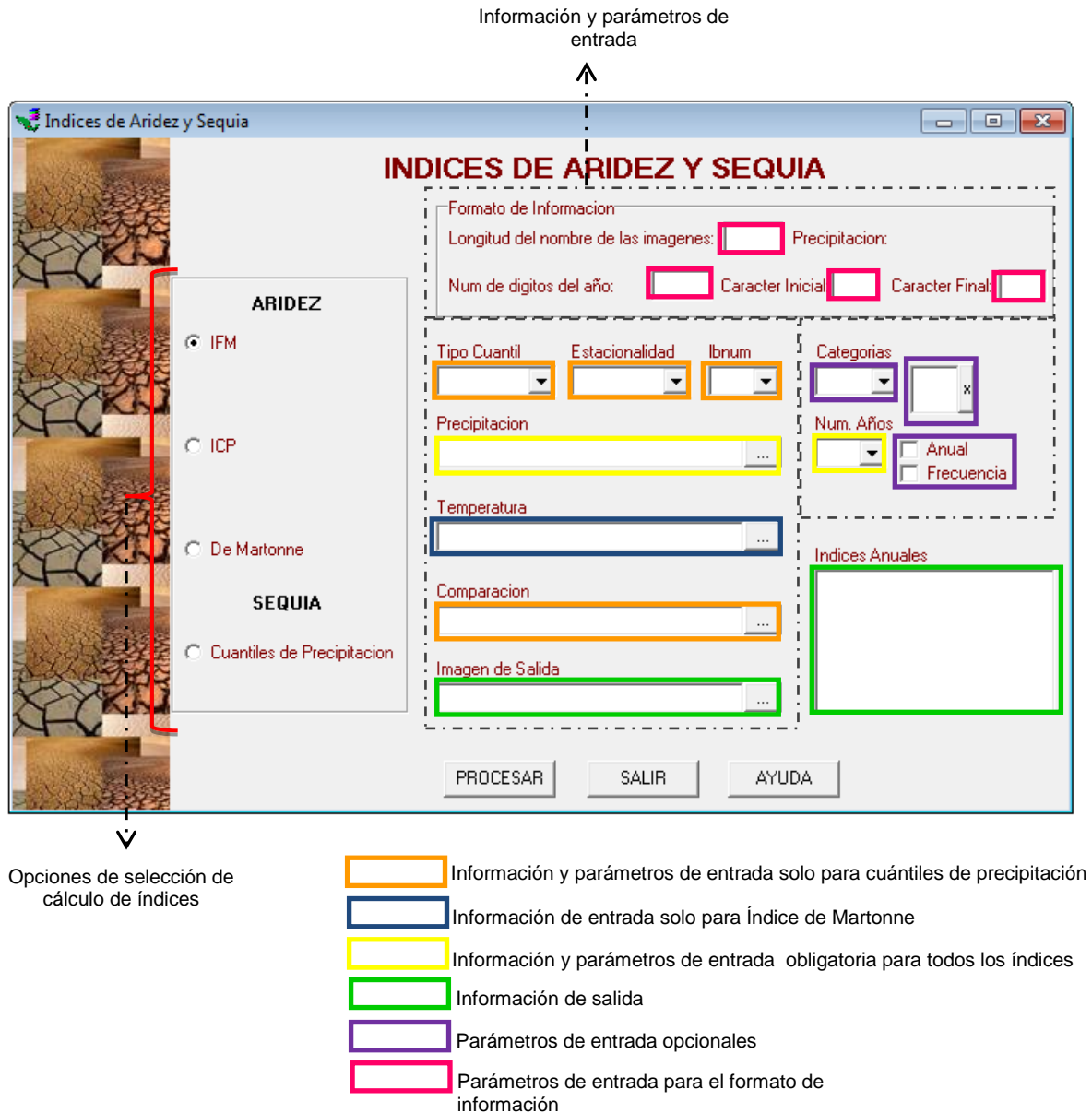


Figura 3.20. Información y parámetros de entrada y salida del módulo

Conforme se active una opción de cálculo se activan o desactivan los parámetros necesarios para calcular el índice seleccionado, los datos importantes para poder realizar cualquier cálculo son:

- El o los grupos raster de temperatura o precipitación.
- El número de años que serán calculados: el número de imágenes en el o los grupos raster debe de coincidir con los años indicados, es decir, si se indica que

se va a realizar el cálculo por un año, el rgf debe de tener 12 imágenes si se indican que el cálculo será para dos años, el rgf debe de tener 24 imágenes, etc., para el caso de cuantiles las imágenes en el grupo raster debe de coincidir de multiplicar el número de años del periodo considerado con el número de meses años o estaciones a comparar, es decir, si se indican que se compararan dos meses de 31 años, el rgf debe de tener 62 imágenes, las primeras 31 corresponden al primer mes y las segundas al segundo mes..

- El nombre de la imagen de salida.

Para el caso de los índices: IFM e ICP requieren de la misma información de entrada: precipitación, por lo que la interfaz no cambia, tal como se muestra en la figura 3.21:

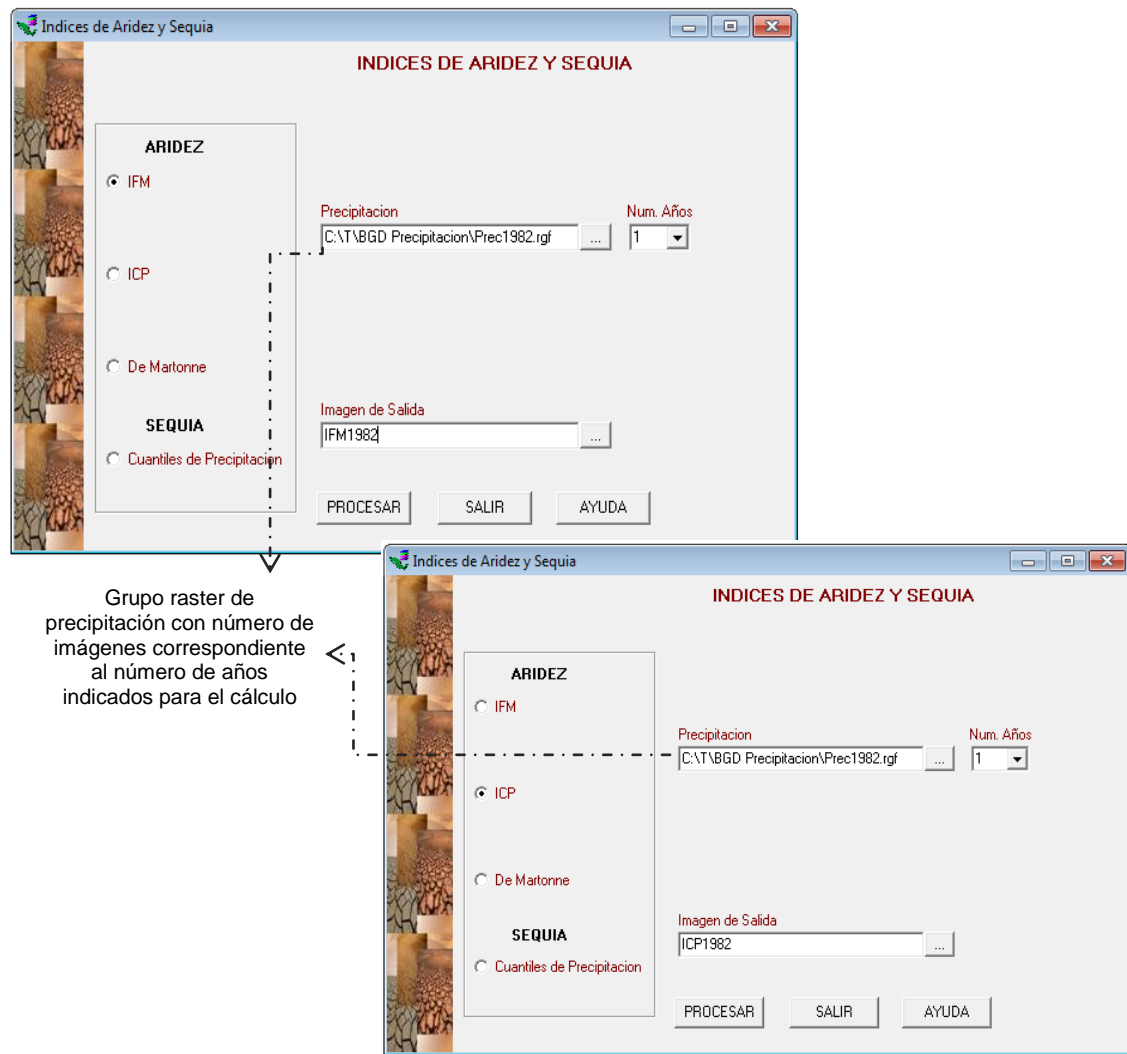


Figura 3.21. Información y parámetros de entrada para cálculo de IFM e ICP

Como se especificó en el modelo conceptual el cálculo para IFM e ICP es anual y un promedio de los anuales del periodo de años considerado, por lo que cuando el número de años a obtener de IFM e ICP es mayor que uno el módulo solo muestra el resultado final que es el promedio, sin embargo en este caso el módulo permite al usuario indicar si desea ver los mapas anuales, de ser así al final se muestra una lista con los nombres de los mapas anuales, mismas que el usuario al ir seleccionando en la lista se van desplegando, en la figura 3.22 se observa como el módulo muestra los resultados anuales:

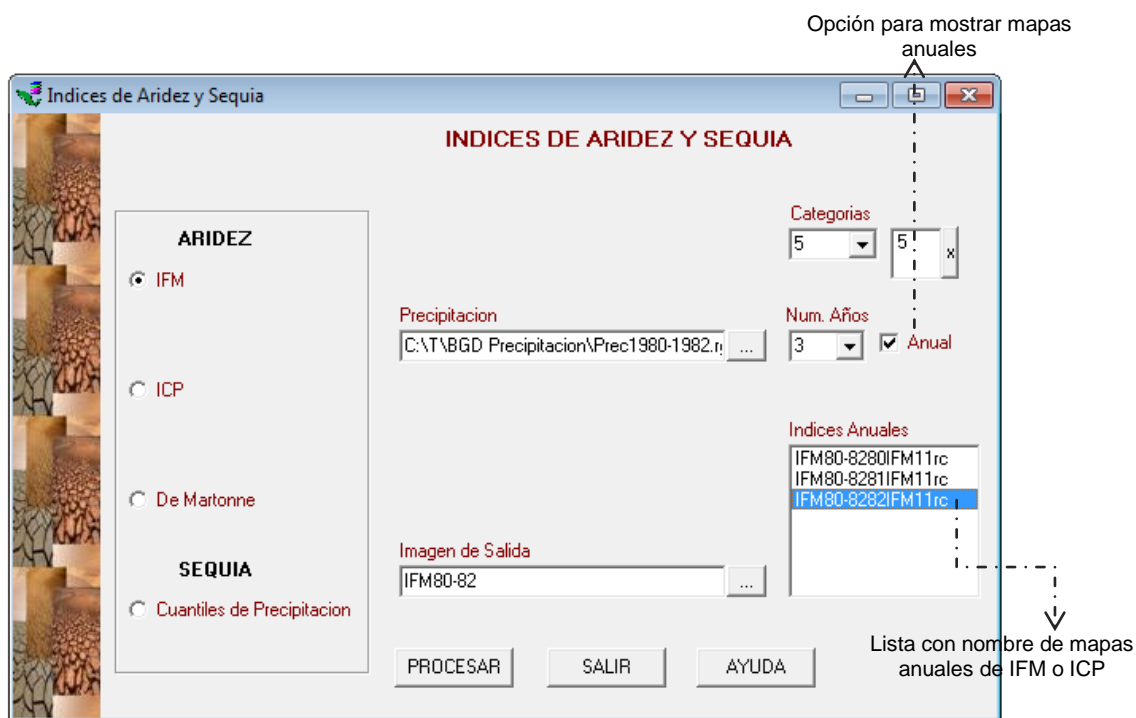


Figura 3.22. Lista de mapas anuales de IFM o ICP

Para el caso del Índice de Martonne la información de entrada requerida es precipitación y temperatura, para este caso por default se realiza el cálculo anual sin embargo, como se mencionó en el apartado de la conceptualización de los índices De Martonne se calcula para cada mes también, por lo que se le da al usuario la opción de calcularlo mensual, como se muestra en la Figura 3.23.

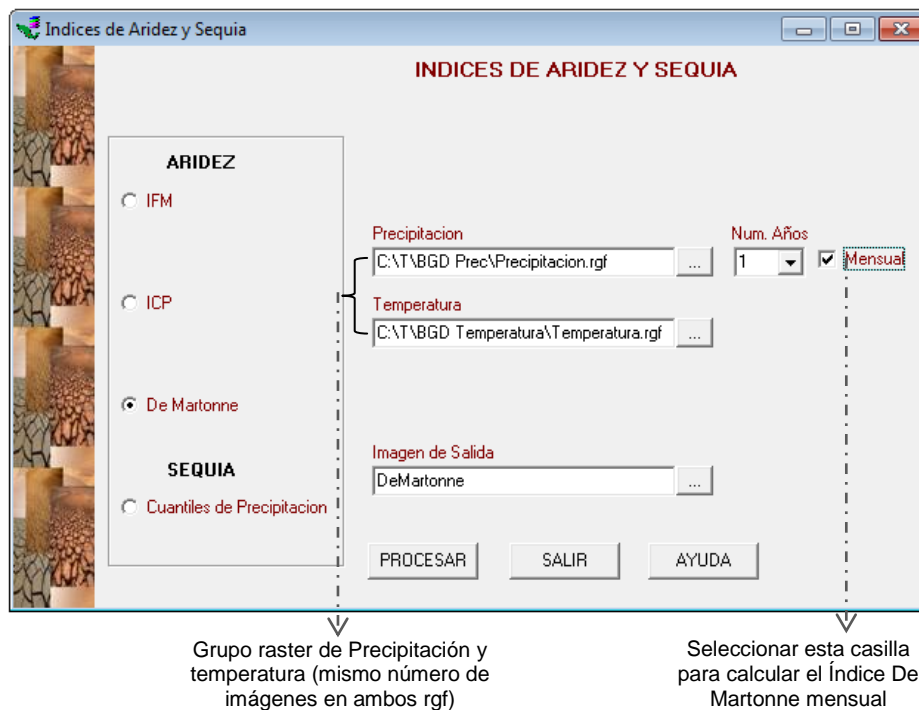


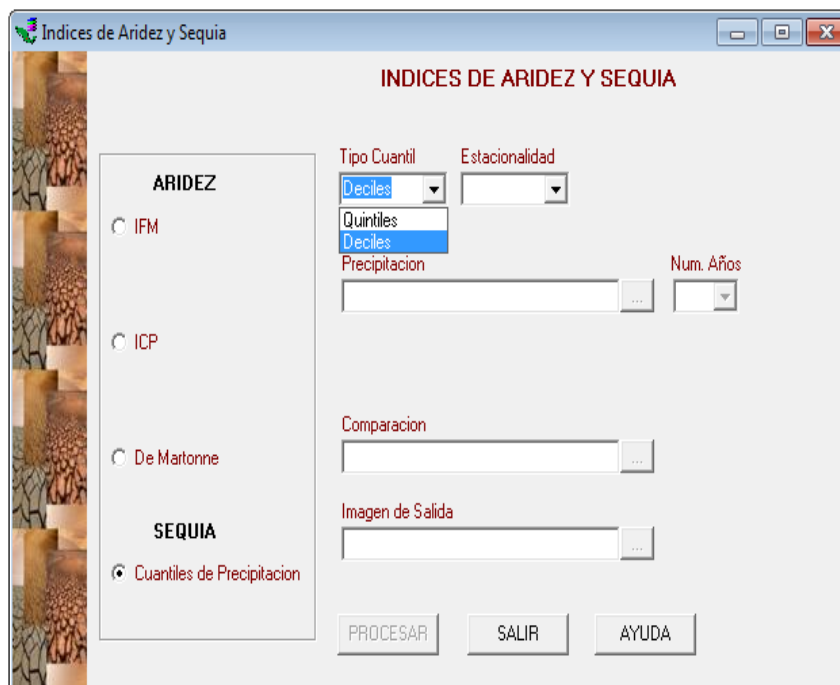
Figura 3.23. Información y parámetros de entrada para cálculo de De Martonne

Para los cuántiles de precipitación el módulo solicita indicar los siguientes parámetros, en orden:

- **(1) Tipo de cuántil** que se desea calcular, puede ser **Quintiles** o **Deciles**
- **(2) Tipo de estacionalidad** que se va a manejar, puede ser Mensual (precipitación mensual), Estacional (precipitación total de la estación, es decir, de tres meses) y Anual (precipitación total de cada año)
- **(3) Número de años, meses o estaciones**, que serán evaluados o comparados:
 - Si se indicó que la estacionalidad a manejar es *Mensual*, se indicaran el número de meses para los que se va a hacer el cálculo: de uno a doce meses.
 - Si se indicó que la estacionalidad es *Estacional*, se indican cuantas estaciones se van a manejar: de una a cuatro estaciones.
 - Si se indicó que la estacionalidad es *Anual*, se indicaran el número de años que serán evaluados.

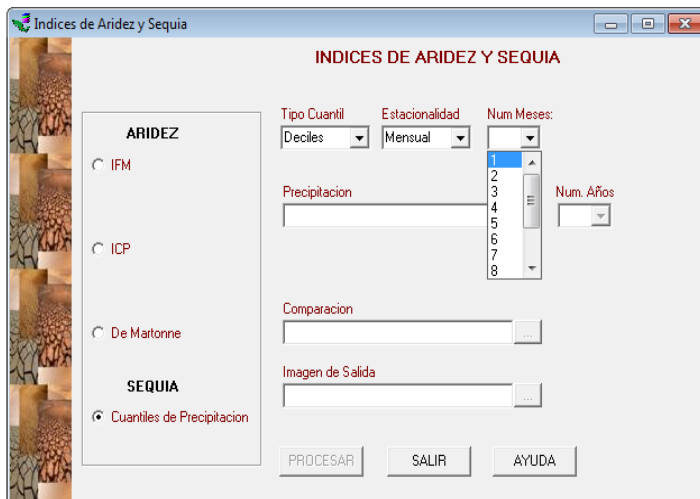
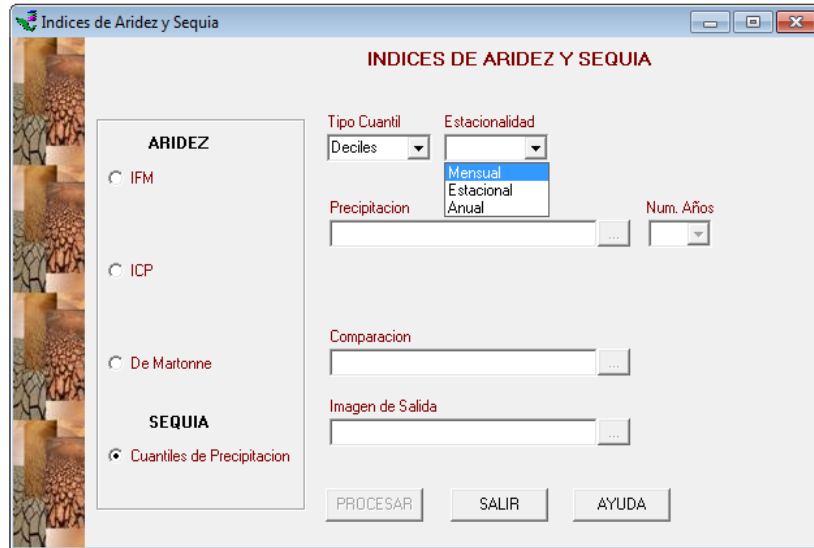
- **(4) Número de Años** a considerar, corresponde al periodo histórico, que como se mencionó anteriormente en la metodología deben de ser mínimo 30 años.
- **(5) Grupo raster de precipitación histórica**, contiene el número de imágenes necesarias para el cálculo, las cuales deben coincidir, con el número de meses, estaciones o años a evaluar y el número de años a considerar, es decir, si se indicó que se evaluarán 2, con 31 años a considerar, el grupo raster debe contener 62 imágenes.
- **(6) Imagen comparación o grupo raster comparación**, esto es de acuerdo con el número de años, meses o estaciones que se indicó anteriormente, es decir, si se especifica que serán dos meses los que se evaluarán, en la imagen comparación se proporcionará un grupo raster con las imágenes de los dos meses a evaluar.

En la Figura 3.24 se muestra el ejemplo de los datos requeridos para el cálculo de los cuántiles de precipitación:



(1)

(2)



(3)

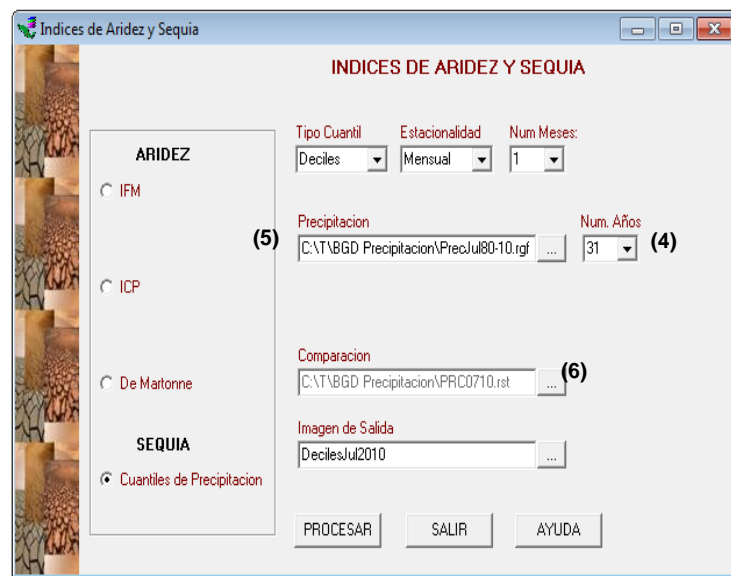


Figura 3.24. Información y parámetros de entrada para cálculo de cuantiles de precipitación

Una funcionalidad más que ofrece el modulo es el cálculo de frecuencia, esta opción solo está habilitada para los índices IFM, ICP y cuántiles, y se muestra al usuario cuando el cálculo es de más de un año, el usuario indica bajo que categoría o clasificación del índice desea obtener un mapa de frecuencia como se ilustra en la Figura 3.25, es importante mencionar que en el caso de los índices IFM, ICP y quintiles de precipitación solo se puede seleccionar una categoría y en el caso de los deciles, por la similitud de sus categorías se pueden seleccionar dos.



Figura 3.25. Interfaz para la opción de obtención de un mapa de frecuencia

Como se mencionó en el apartado de especificaciones de información, lo recomendable es que la imágenes tengan en los últimos cuatro caracteres de su nombre el mes y el año, sin embargo el modulo pregunta al usuario si el formato de su información cumple con dichas especificaciones de lo contrario el modulo solicita al usuario le indique por cuantos caracteres está conformado el dato del año en sus imágenes y en qué carácter inicia y en cual termina, esta funcionalidad solo aplica para los índices de aridez ya que para los cuántiles la información debe cumplir con las especificaciones indicadas anteriormente, en la Figura 3.26 se muestra la interfaz de ejemplo con los parámetros del formato de información:

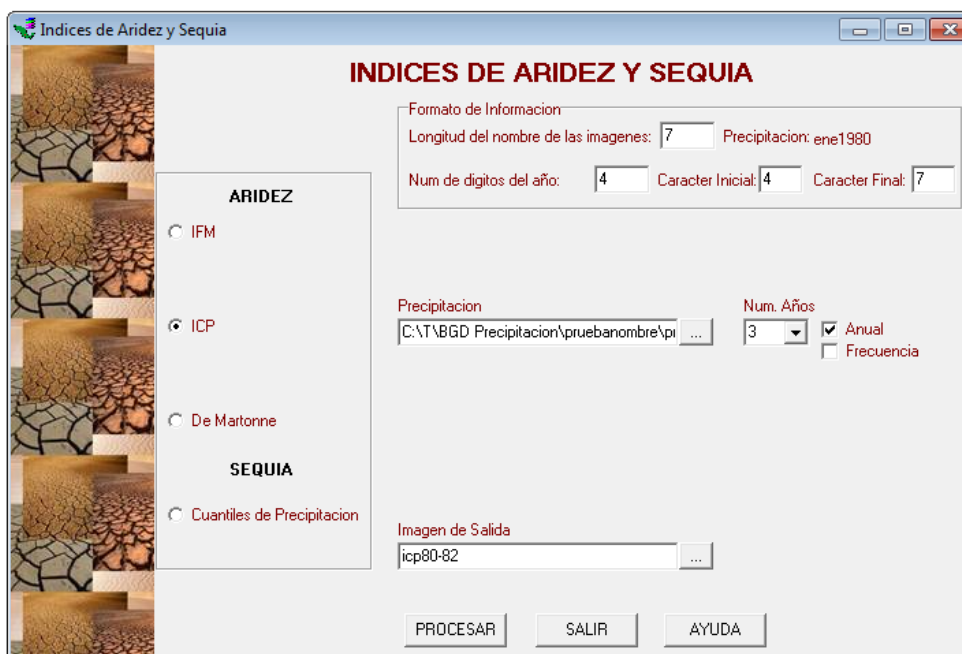


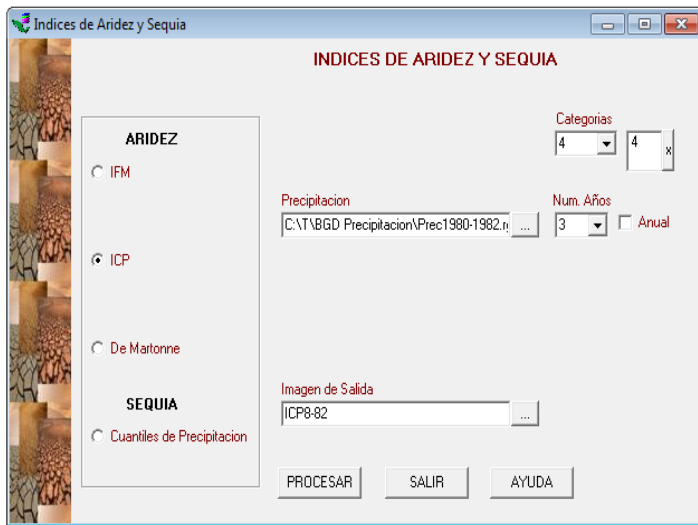
Figura 3.26. Interfaz de usuario para especificar el formato de información

Por último el módulo permite al usuario, a parte de la obtención de los mapas finales de cada índice, obtener un mapa de frecuencia por categorías o clasificaciones y por mes, año o estacionalidad, de los años considerados, es decir, si se evaluaron 10 años, el módulo muestra un mapa final con la frecuencia, de una categoría dada, en los resultados finales de los 10 años, es importante mencionar que esta opción sólo es válida en los siguientes casos:

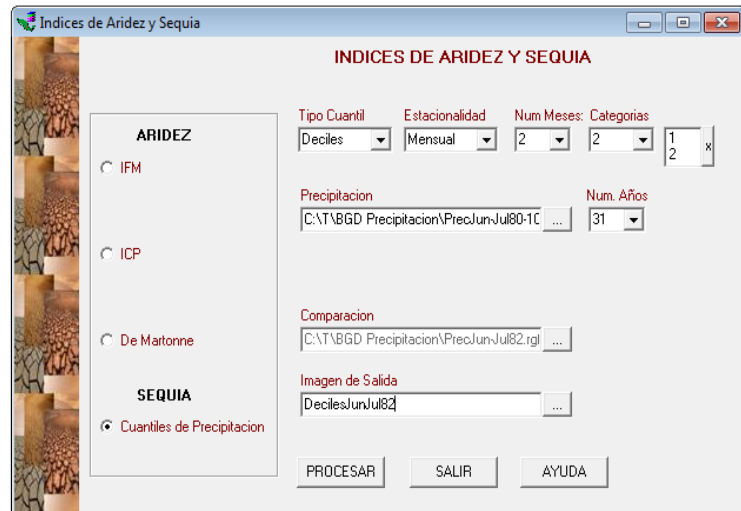
- (1) Para IFM e ICP se puede obtener mapa de frecuencia por categorías sólo si el número de años es mayor que uno.
- (2) Para De Martonne se puede obtener mapa de frecuencia si el número de años es mayor de uno o el cálculo es mensual.
- (3) Para los cuántiles se puede obtener mapa de frecuencia cuando el número de meses, estación o años a evaluar es mayor que uno.
- (4) Para IFM, ICP, De Martonne y quintiles de precipitación sólo se puede seleccionar una categoría.
- (5) Para deciles de precipitación se pueden seleccionar uno o dos categorías máximo, esto debido a que la descripción de las mismas son parecidas.

En la figura 3.27 se muestra un ejemplo para los casos anteriormente descritos:

(1)



(3) y (5)



(2) y (4)

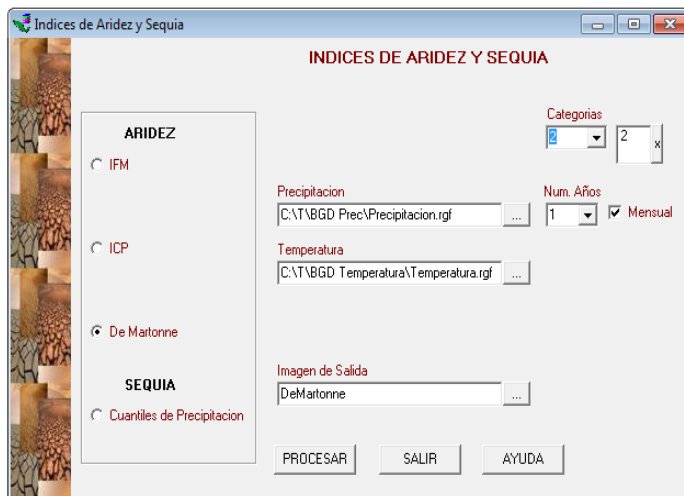


Figura 3.27. Escenarios para la obtención de mapas de frecuencia

CAPÍTULO 4 APLICACIÓN AL ÁREA DE ESTUDIO: ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS INDICES DE ARIDEZ Y SEQUÍA

4.1 Características Físico-Geográficas del Estado de México

El Estado de México se encuentra en el centro de la República Mexicana, con una extensión de 22,351 km². Forma parte del eje neovolcánico y de la sierra madre del sur:

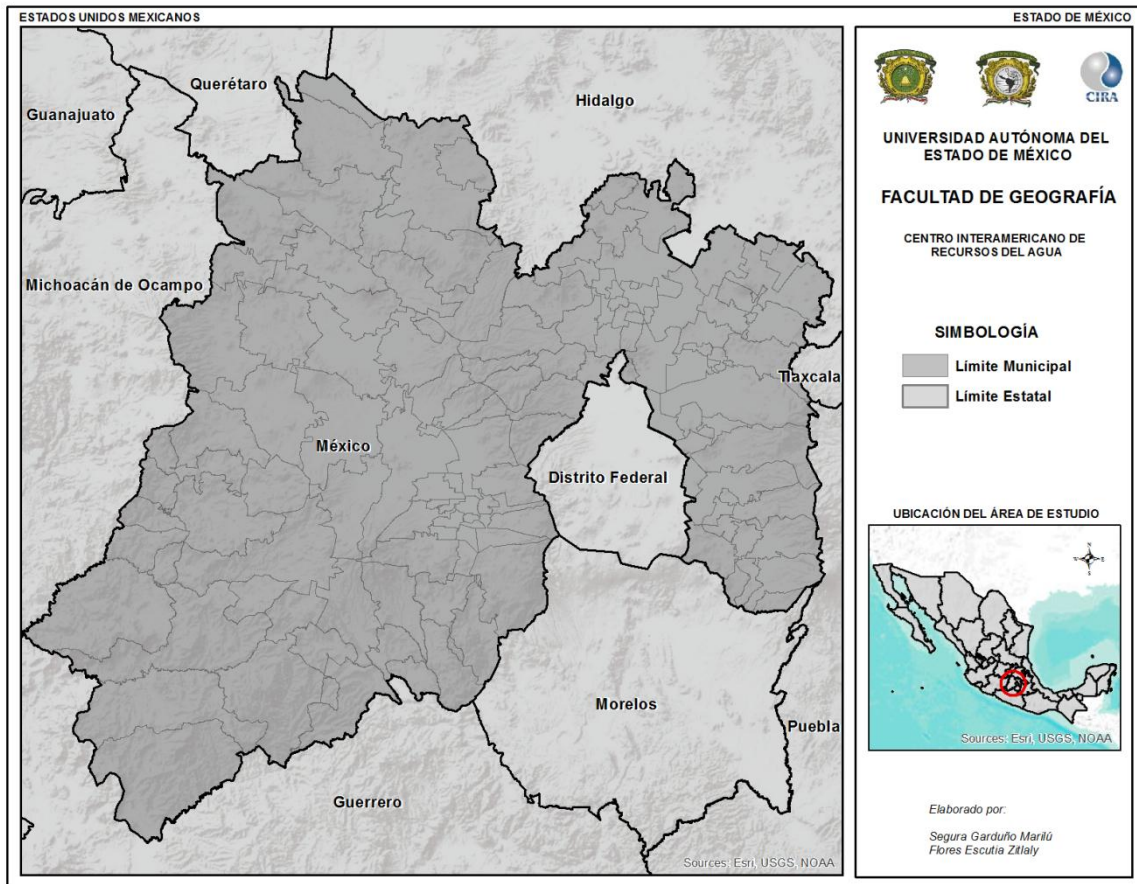


Figura 4.1. Ubicación del Estado de México y sus municipios

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en el Estado de México, la mayor parte de su territorio es de clima templado subhúmedo correspondiente a un 73 % localizados en el norte, centro y este, el 21% es cálido subhúmedo en el suroeste, el 6 % es seco y semiseco ubicados en la región noreste y 0.16 % corresponde a climas fríos que se encuentran en las partes altas de los volcanes; su temperatura media anual es de 14.7°C, la temperatura más baja es de 3°C y la más alta es de 25°C;

en cuanto a precipitación su media anual de 900 mm, la cual se presenta en la temporada de lluvias que corresponde a los meses de junio a septiembre.

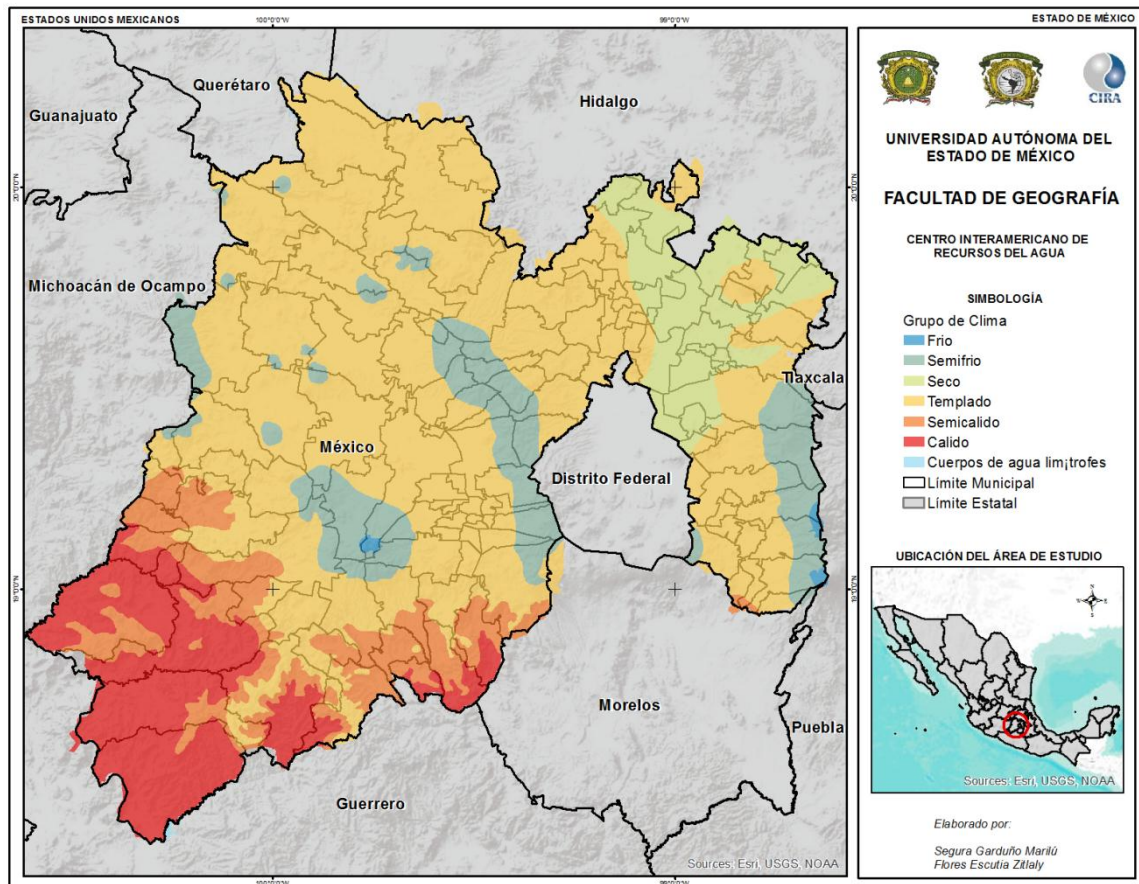


Figura 4.2. Climas del Estado de México y sus municipios

De acuerdo con la “Enciclopedia de Municipios y Delegaciones de México”, del total de la superficie de la entidad el 38.1 % es agrícola, el 34.9% forestal, 16.7%pecuario, el 10.3% industrial y urbano; en materia de tenencia de la tierra, el 40.32% es ejidal. Hidrológicamente el estado de México está comprendido en tres grandes cuencas: Lerma, ocupa el 27.3 % de la superficie estatal; el Balsas 37.2 % y el Pánuco 35.5 %.

4.2 Aplicación de los índices de Aridez y Sequia en el Estado de México para los años de 1980 – 2010

En la aplicación de los índices de aridez IFM e ICP se creó un grupo raster con los nombres de las imágenes pertenecientes a los 31 años, siendo un total de 372 imágenes

raster con formato “.rst”, ordenas por mes y año, como se muestra en la Figura 4.3. Como se indicó anteriormente para el cálculo del índice De Martonne, se utilizó información de un promedio de 50 años por lo que solo se hizo un grupo raster de precipitación y temperatura de 12 imágenes cada uno (Figura 4.4).

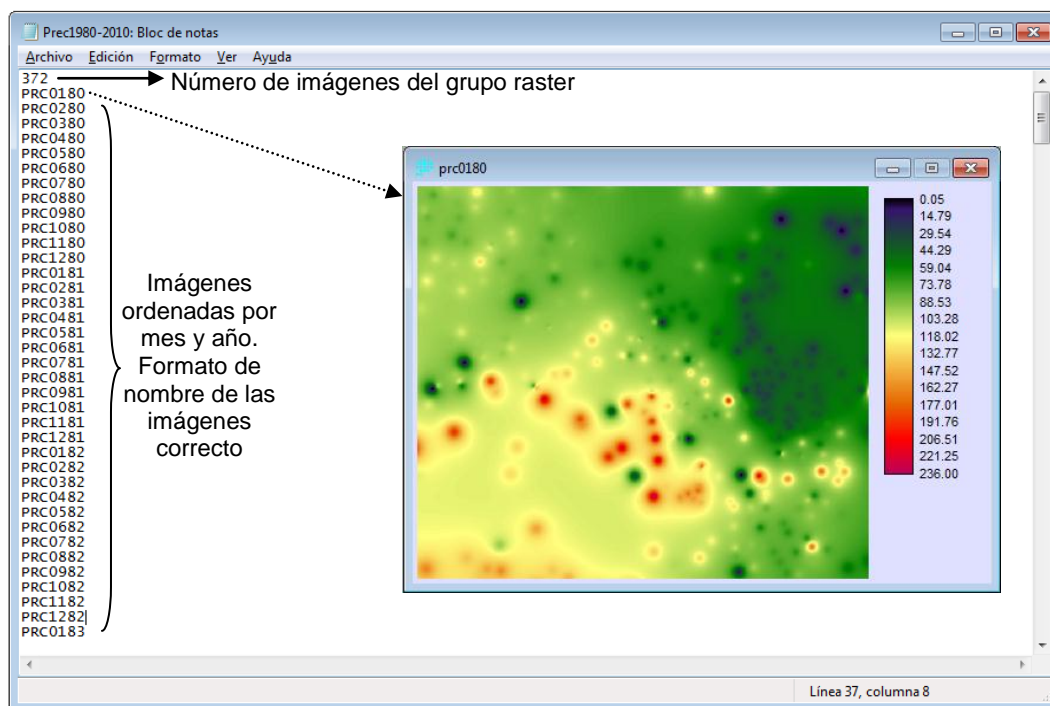


Figura 4.3. Ejemplo de grupo raster de 31 años e imagen de precipitación, para el cálculo de los índices IFM e ICP

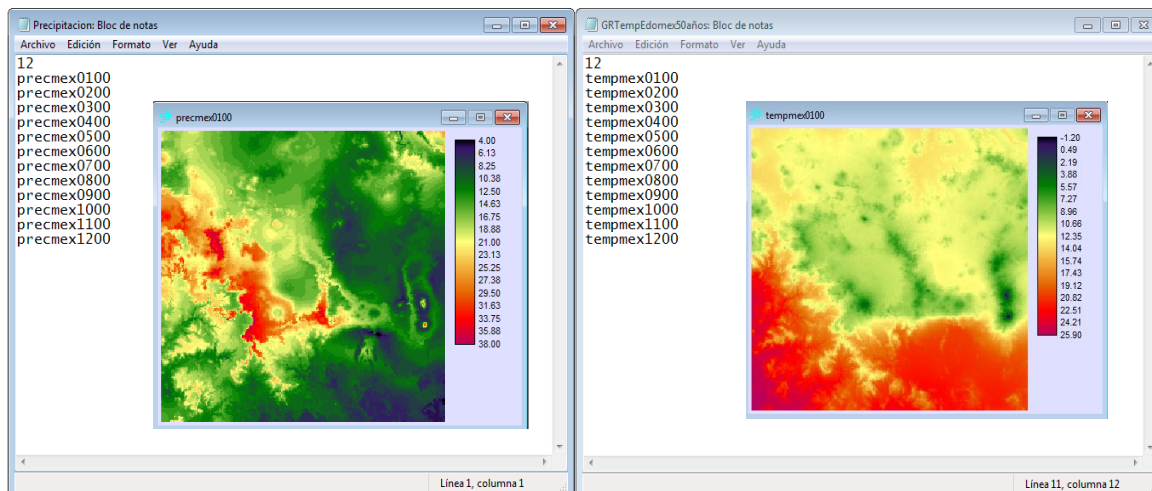


Figura 4.4. Ejemplo de grupo raster de precipitación y temperatura para el cálculo del índice de Martonne

Para realizar el cálculo de los cuántiles de precipitación; si es un cálculo anual se utilizan los totales anuales, si es cálculo trimestral o estacional se manejan los totales estacionales y si es cálculo mensual se utiliza la precipitación mensual. Para el cálculo anual se hizo un grupo raster con 31 imágenes correspondientes a los totales anuales de los 31 años considerados (Figura 4.5), y debido a que se necesitaba obtener los cuántiles de todos los años se utiliza el mismo raster como raster de comparación, en caso de ser dos años para comparar, en el grupo raster se ponen los nombres de la imágenes de los años que se desean evaluar.

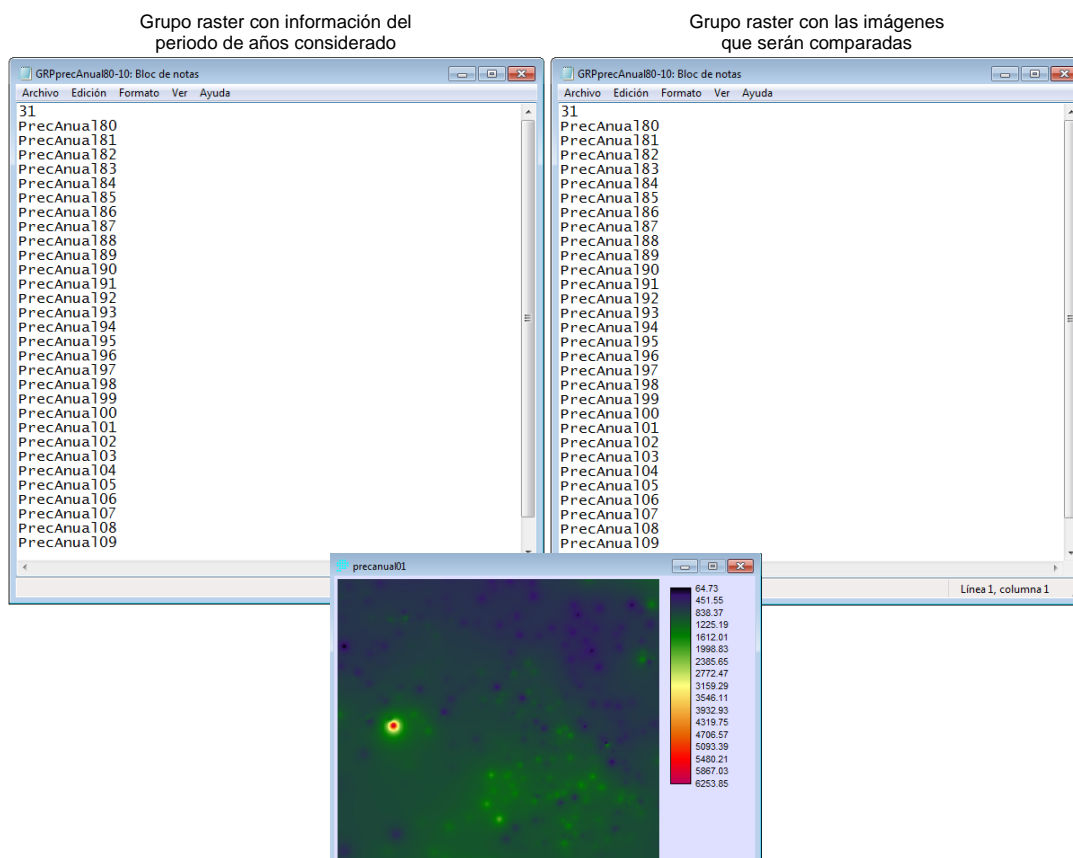


Figura 4.5. Ejemplo de grupo raster de precipitación de los 31 años y grupo raster de comparación para cálculo de deciles

Índice de Fournier Modificado (IFM)

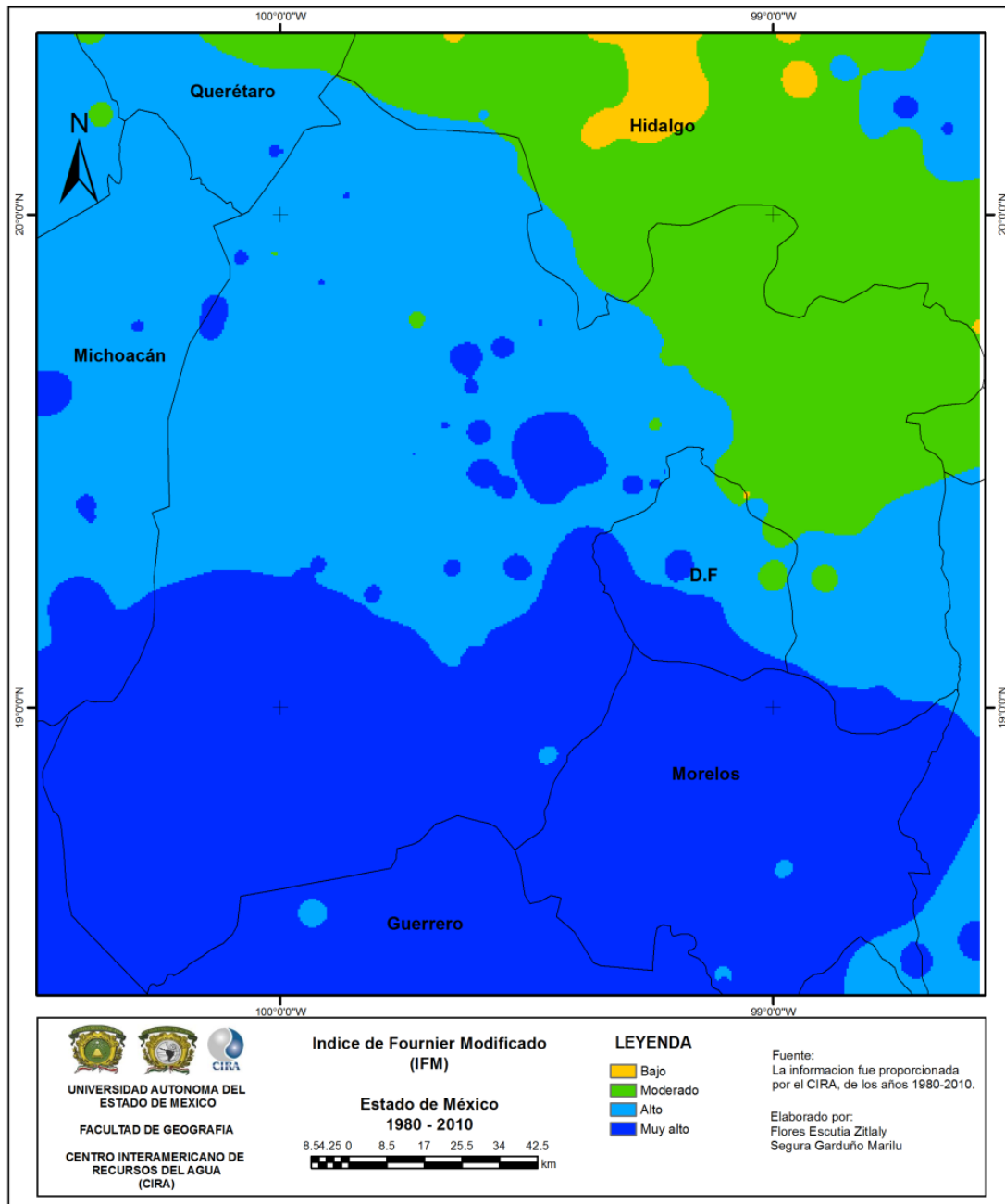


Figura 4.6. Distribución espacial del IFM en el Estado de México 1980-2010

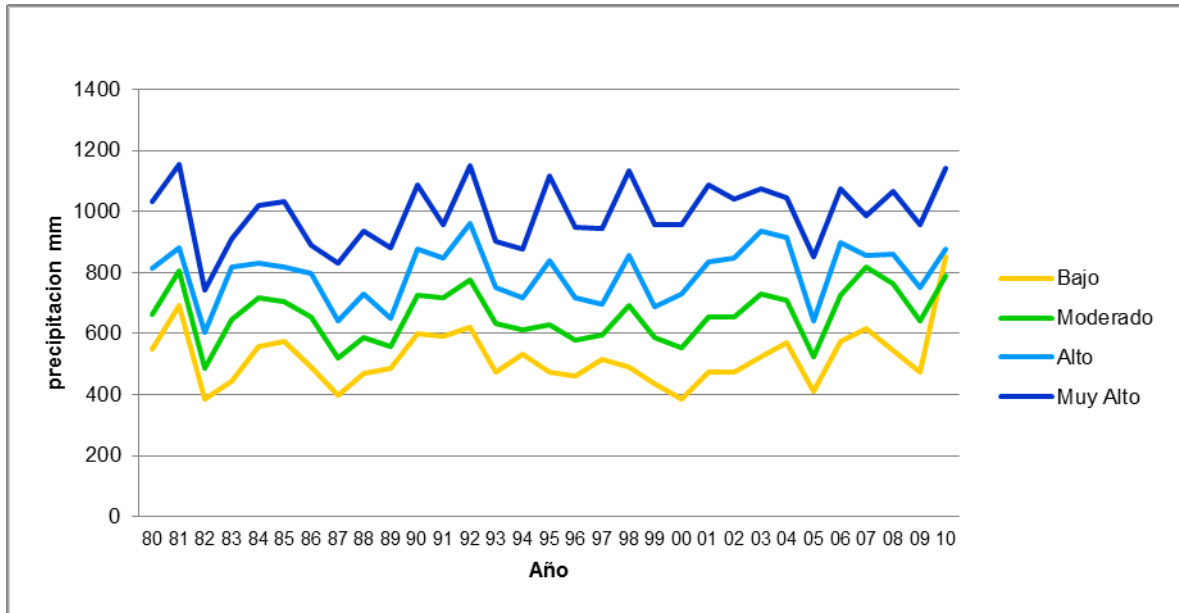


Figura 4.7. Comportamiento de la precipitación anual por categoría de índice IFM (promedio de las regiones identificadas en el mapa final de IFM)

En la figura 4.6 se puede apreciar la tendencia del IFM hacia tres clasificaciones principales: moderado, alto y muy alto. Los valores muy altos se concentran en la parte sur y centro ocupando un 40% de la entidad, los valores altos se encuentran en una franja que abarca el centro, norte y oriente con un 45%, mientras que los valores moderados ocupan un 15% de la parte nororiental del estado. La distribución espacial de la agresividad de la precipitación en el área de estudio, concuerda con un gradiente climático que va de norte a sur, cuya transición va de una región seca, templada, a una región cálida con lluvias abundantes representadas por los altos valores del índice que se observan en la mayor parte de los mapas anuales de la distribución del IFM.

De igual manera, observando la distribución del IFM en los mapas anuales (ver Anexo A), se puede apreciar que el año con menor agresividad de precipitación fue en 1982 el cual se registró como el año más seco, y los años que prese alta agresividad fueron 1981, 1984, 1986, 1998, 2003, 2008 y 2010. Se resalta que la zona con tendencia a valores “muy altos” es la región sur, tal como se puede observar en la figura 4.8 en los mapas de frecuencias, es decir la región donde el clima es cálido, tomando en cuenta los valores de precipitación de la figura 4.7 se observa que la precipitación llega a estar por arriba de los 1000 mm anuales y valores bajos de 800 mm en años secos.

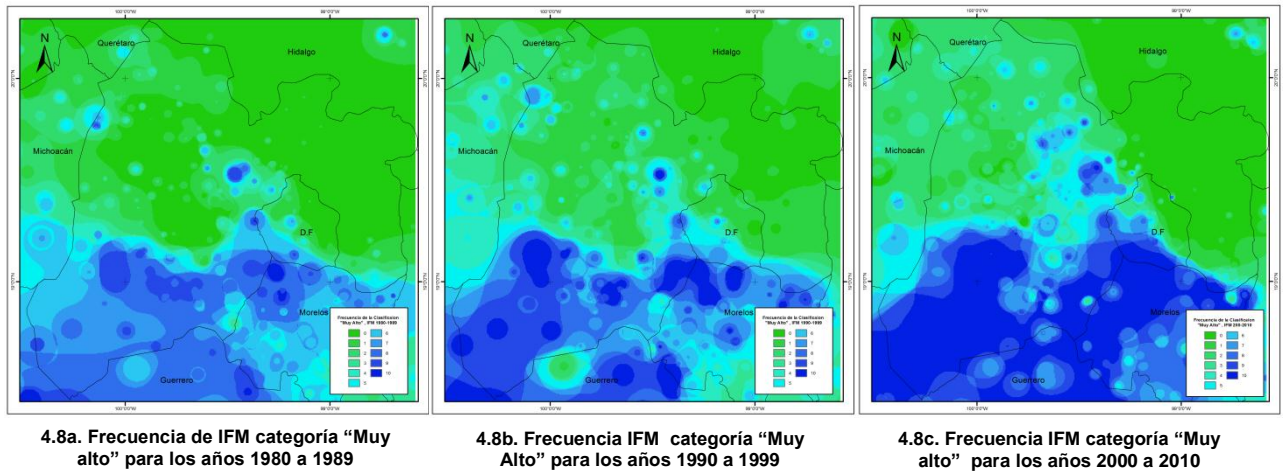


Figura 4.8. Frecuencias para la categoría "Muy Alto" por décadas 1980-2010

Como se aprecia en los mapas de frecuencia de las tres últimas décadas, Figura 4.8, la región sur que se identifica como la más afectada por la agresividad de la precipitación a través del periodo analizado, ha ido extendiéndose hacia el centro y parte nororiente de la entidad, lo que nos permite identificar la tendencia a la erosión que da inicio a la degradación de los suelos, este proceso suele ser lento y progresivo si no se toman las medidas de mitigación apropiadas, convirtiendo estas áreas afectadas en zonas vulnerables a la presencia de sequía puesto que los suelos no solo pierden vegetación sino que además estos son sobreexplotados por las actividades agrícolas.

Índice de Concentración de la Precipitación (ICP)

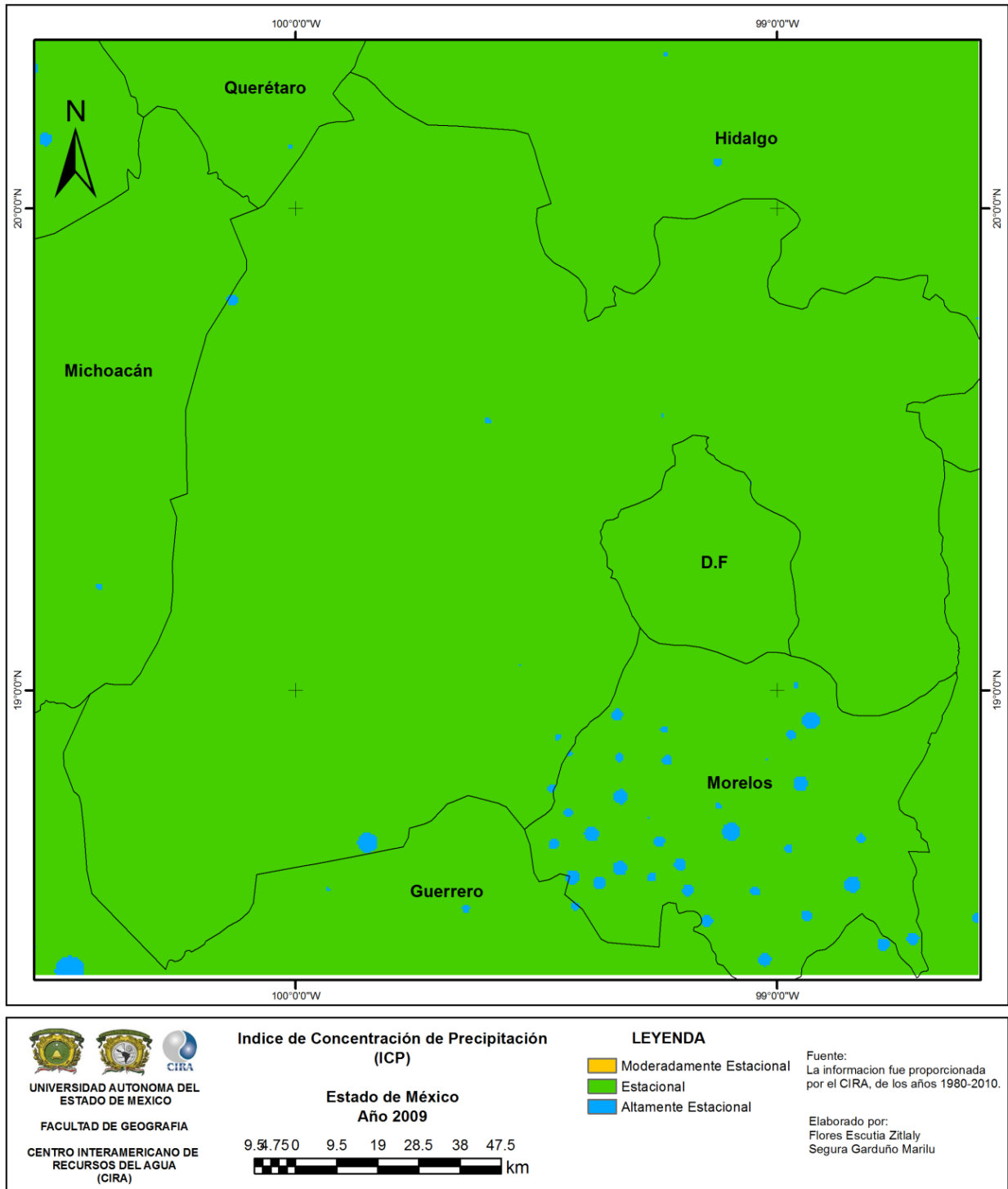


Figura 4.9. Distribución espacial del ICP en el Estado de México 1980-2010

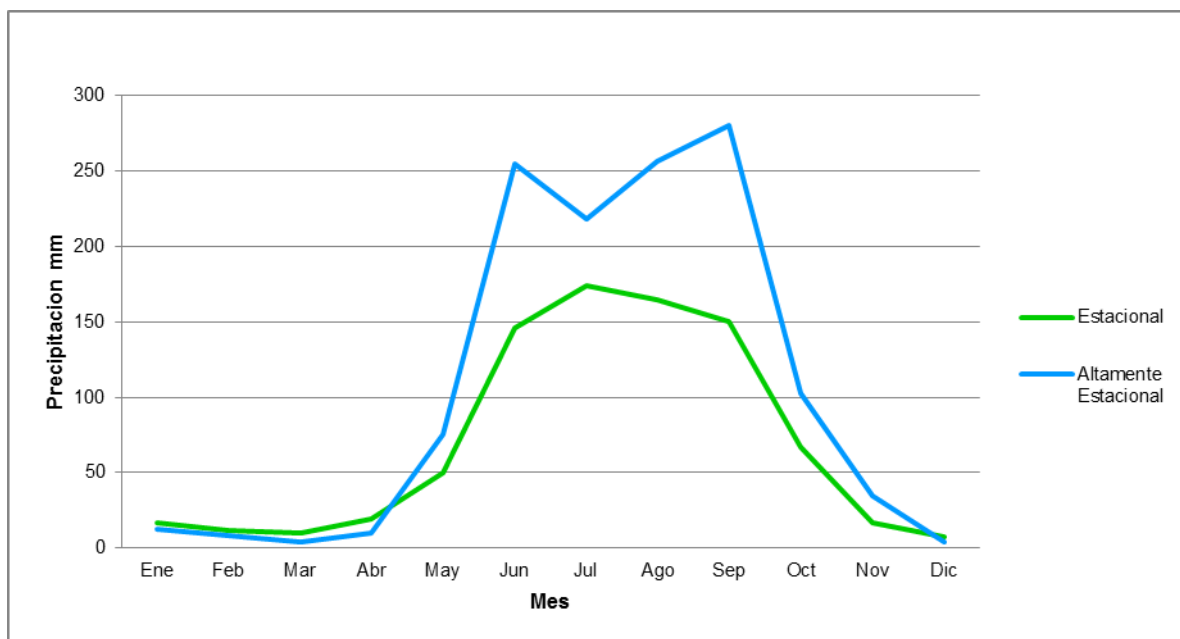


Figura 4.10. Comportamiento de la precipitación mensual promedio por categoría de índice ICP (promedio de las regiones identificadas en el mapa final de ICP)

El mapa de resultado del índice de ICP, ver figura 4.9, muestra que casi todo el territorio se caracterizó con distribución de lluvias estacionales, lo cual indica que la concentración de la precipitación sucede en un periodo determinado en toda la entidad, en la figura 4.10 se puede apreciar que el periodo húmedo es de junio a septiembre, sin embargo la distribución y concentración de la precipitación, varía para ambas categorías, esto es, que para el caso de las regiones con distribución de lluvias altamente estacional (pequeña región perteneciente al municipio de Zacualpan) la concentración de la lluvia es más fuerte en periodos más cortos: junio y septiembre, a comparación de la concentración de precipitación para la categoría estacional, que es más uniforme, comprendiendo un periodo más largo: de junio a septiembre.

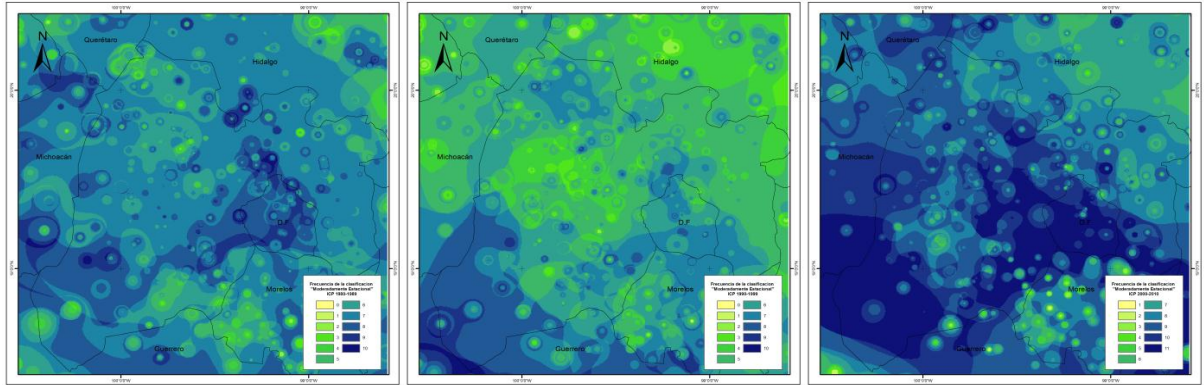
Haciendo un análisis de los mapas anuales de ICP, ver Anexo B, los años que presentan un alto índice de concentración son: 1987, 1988, 1993, 1999 y 2007 y aunque no son los años más húmedos se puede deber a que fue más corto y específico el tiempo en el que se concentró la mayor precipitación; y los años que menor índice de concentración tuvieron fueron: 1980, 1982, 1992 y 1997, como nos podemos dar cuenta 1982 es el año más seco, es decir se ubica un posible evento de sequía ya que esta se define por la

disminución del nivel normal de precipitación en un tiempo dado, y 1992 el año más húmedo por lo que los mapas indican que la poca o mucha precipitación que se presentó en estos años se distribuyó en más meses del año.

Observando los mapas anuales se aprecian los cambios en el comportamiento espacio-temporal de las categorías de ICP, los cuales pueden ser importantes para la valoración de la erosión del suelo, tal es el caso del año 1999 y 2008 en los que la distribución cambia de moderadamente estacional a estacional y altamente estacional. Otro caso que se observa es del año 1992 el cual se caracterizó en su mayoría como moderadamente estacional y para 1993 pasó a ser estacional, y en regiones del sur, centro y este de la entidad se catalogaron de moderadamente estacional a altamente, esto puede deberse que aunque 1992 fue un año muy húmedo pero con distribución más uniforme, 1993 fue más seco pero la concentración de precipitación fue mucho mayor en un mes.

Para complementar el análisis anterior en cuanto a las tendencias del comportamiento espacio-temporal de la distribución estacional de la precipitación en la entidad, se hicieron los mapas de frecuencias de clasificación "Estacional" por décadas y por los 31 años, en la figura 4.11 se puede apreciar que la tendencia de la frecuencia de la distribución estacional en al primer década prevaleció en casi todo el estado de 6 a 8 años, en la segunda década disminuyo la frecuencia de 3 a 4 años, pero, en la tercer década incremento mucho más la frecuencia, de 8 a 9 años con distribución estacional, en todo el estado principalmente en la zona sur y la zona centro colindante con el D.F., aunado a esto en la figura 4.12, se identifica que efectivamente las regiones en la zona sur y centro, han presentado frecuencia de 27 a 30 años con distribución estacional de la precipitación.

La concentración estacional de la precipitación puede suponer un mayor riesgo de intensificar la aridez o sequía, ya que cuando se presenta una época seca seguida de intensa precipitación, provocará la degradación de los suelos a un ritmo acelerado.



4.11a. Frecuencia ICP, categoría "estacional" para los años 1980-1989

4.11b. Frecuencia ICP, categoría "estacional" para los años 1990-1999

4.11c. Frecuencia ICP, categoría "estacional" para los años 2000-2010

Figura 4.11. Frecuencias para la categoría "estacional" por décadas 1980-2010

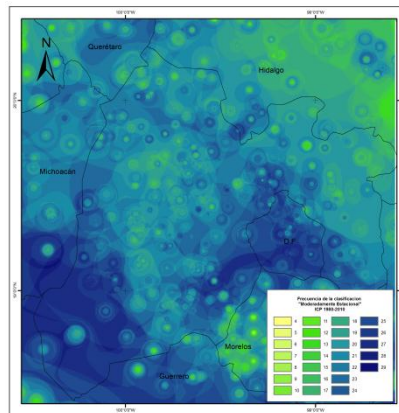


Figura 4.12. Frecuencias para la categoría "estacional" 1980-2010

Índice de De Martonne

En la Figura 4.14 se muestran el Índice de aridez De Martonne para el Estado de México, los resultados muestran cuatro categorías, siendo sólo tres las que caracterizan la aridez en la entidad. En el mapa se observa que las zonas húmedas corresponden a un 80% del territorio comprendiendo el noreste, la zona norte, noroeste, centro, sur, suroeste, oeste, y parte de territorio ubicado al este en colindancia con Puebla, Tlaxcala y Morelos, el 15 % corresponde a zonas subhúmedas que se encuentra en el Noreste y este de la entidad y algunas pequeñas regiones del noroeste que colindan con Querétaro e Hidalgo, el 5% restante es caracterizado como zonas muy húmedas ubicadas en pequeñas zonas de los municipios de Xalatlaco, Tianguistenco y Ocuilan, así como también zonas de Temascaltepec y algunas regiones del sur de los municipios de Toluca y Zinacantepec.

En las gráfica 4.13 y 4.15 se puede observar que el periodo de humedad para las tres categorías identificadas (subhúmedas, húmedas y muy húmedas) se comporta de la misma manera, ya que comienza en mayo y los meses más húmedos son de junio a septiembre y terminan en octubre, esto también se puede visualizar en los mapas mensuales del Índice De Martonne (ver en Anexo C), en donde se aprecian mejor los meses más secos y húmedos en todo el año.

Sin embargo, lo que marca la diferencia es la cantidad de precipitación y las temperaturas, es decir, que a mayor temperatura y mayor precipitación la región se caracteriza como húmeda, a mayor temperatura y menor precipitación la región se define como subhúmeda, y a menor temperaturas y mayor precipitación la región es identificada como muy húmeda, estas relaciones precipitación temperatura concuerdan con los tipos de climas presentes en el Estado de México, que se muestran en la figura 4.2, ya que la región identificada como muy húmeda cuenta con clima frío. Tomando en cuenta que la información utilizada para el cálculo de este índice es un promedio de los últimos 50 años, se puede decir que en ese periodo de tiempo, la mayor parte del territorio no presenta aridez.

De acuerdo con la Figura 4.13 y 4.15, los valores de Martonne se comportan en función de la precipitación, esto quiero decir, que a mayor precipitación mensual o anual de un

lugar es considerado su grado de humedad o aridez, por lo que no es muy sensible a los valores mínimos de precipitación, tal es el caso de la región que es considerada como subhúmeda, que presenta valor en su mes más húmedo de 100 mm, que corresponde a la clasificación climática establecida

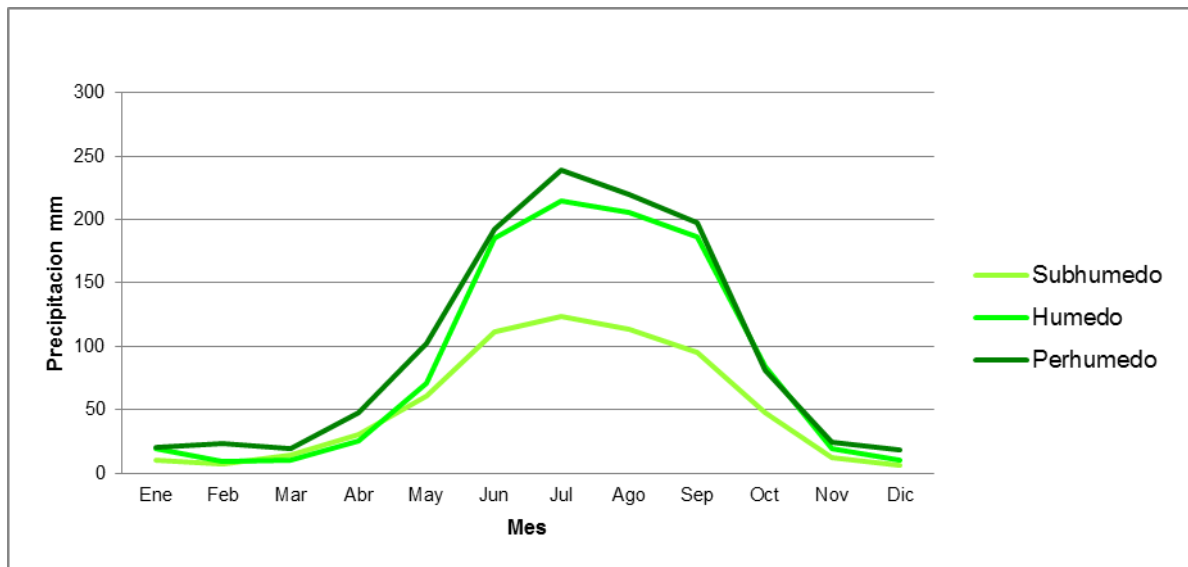


Figura 4.13. Comportamiento de la precipitación mensual promedio por categoría índice de Martonne

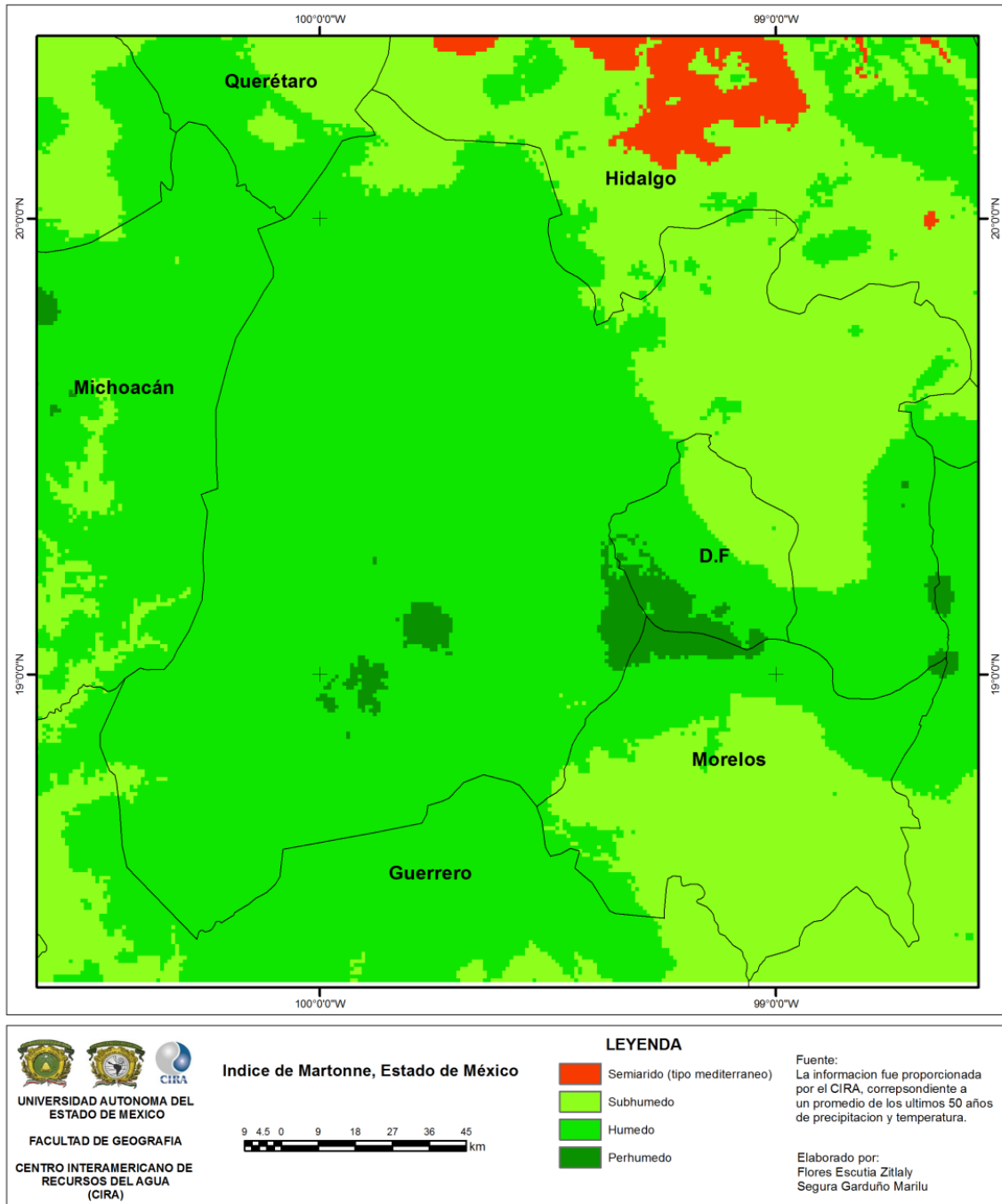


Figura 4.14. Índice de Aridez De Martonne para el Estado de México

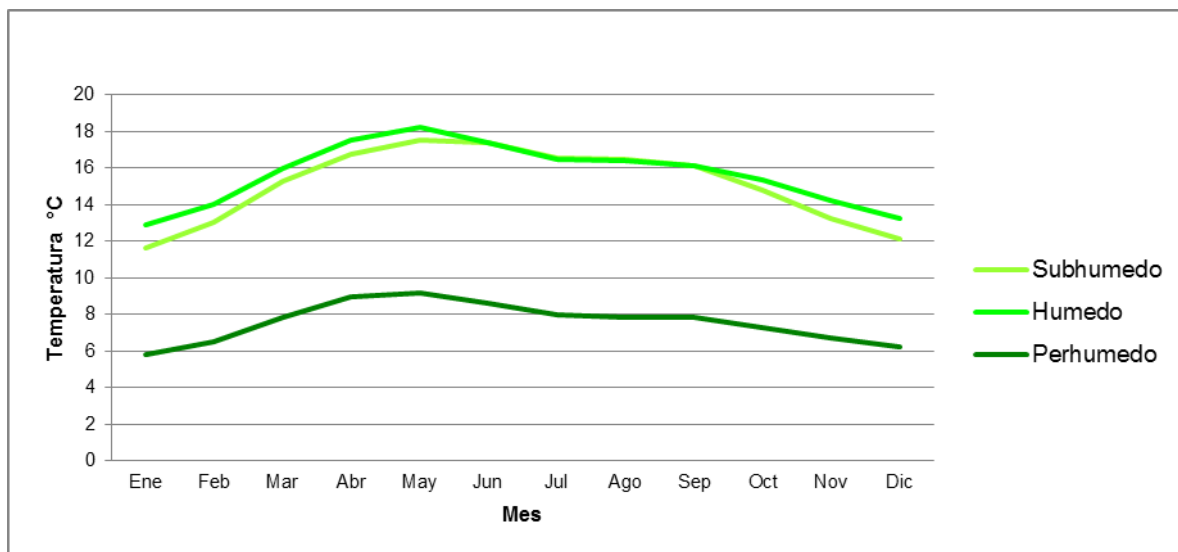


Figura 4.15. Comportamiento de la temperatura mensual promedio por categoría Índice De Martonne

Cuántiles de Precipitación

Para este índice en primera instancia se hicieron los cálculos anuales por deciles ya que es más detallado que los quintiles, posteriormente se hicieron los cálculos mensuales para los años identificados como más secos y húmedos.

Deciles anuales 1980 – 2010

Los mapas de deciles anuales, ver Anexo D, permitieron identificar los años más secos y más húmedos, siendo los más secos: *1982, 1987 y 2005* ya que los valores de los deciles se encuentran en la mayor parte del territorio con categorías 1, 2 y 3, las cuales indican que la precipitación estuvo mucho muy debajo de lo normal.

Seguidos de los años más secos, los años *1983, 1988, 1989, 1993, 1994, 1996, 1997, 1999 y 2000* se pueden considerar como poco secos ya que las categorías que predominan en toda la entidad son de la 1 – 4 lo que quiere decir que la distribución de la precipitación en esos años fue más baja de lo normal, el año más húmedo en casi toda la entidad fue *1992*, le siguen los años *1981, 2006 y 2010* en los cuales predominan las categorías 8 – 10 en la mayor parte del estado, lo cual indica que los valores de la precipitación estuvieron arriba del promedio. Para el resto de los mapas donde

predominan las categorías 4 – 7 se pueden considerar como años en los que la precipitación fue normal, según el registro histórico de los 31 años.

Para poder conocer la frecuencia con la que se presentaron los años secos en el estado, se obtuvo un mapa final de frecuencia de años secos, tomando como base la ocurrencia de categorías 1 y 2 ya que son los datos más bajos, el cual se muestra en la figura 4.12, en donde cada pixel contiene el número de años de ocurrencia de años secos, como se puede observar las zonas marcadas en amarillo y rojo son las que han tenido de 15 a 20 años secos en el periodo de años considerados.

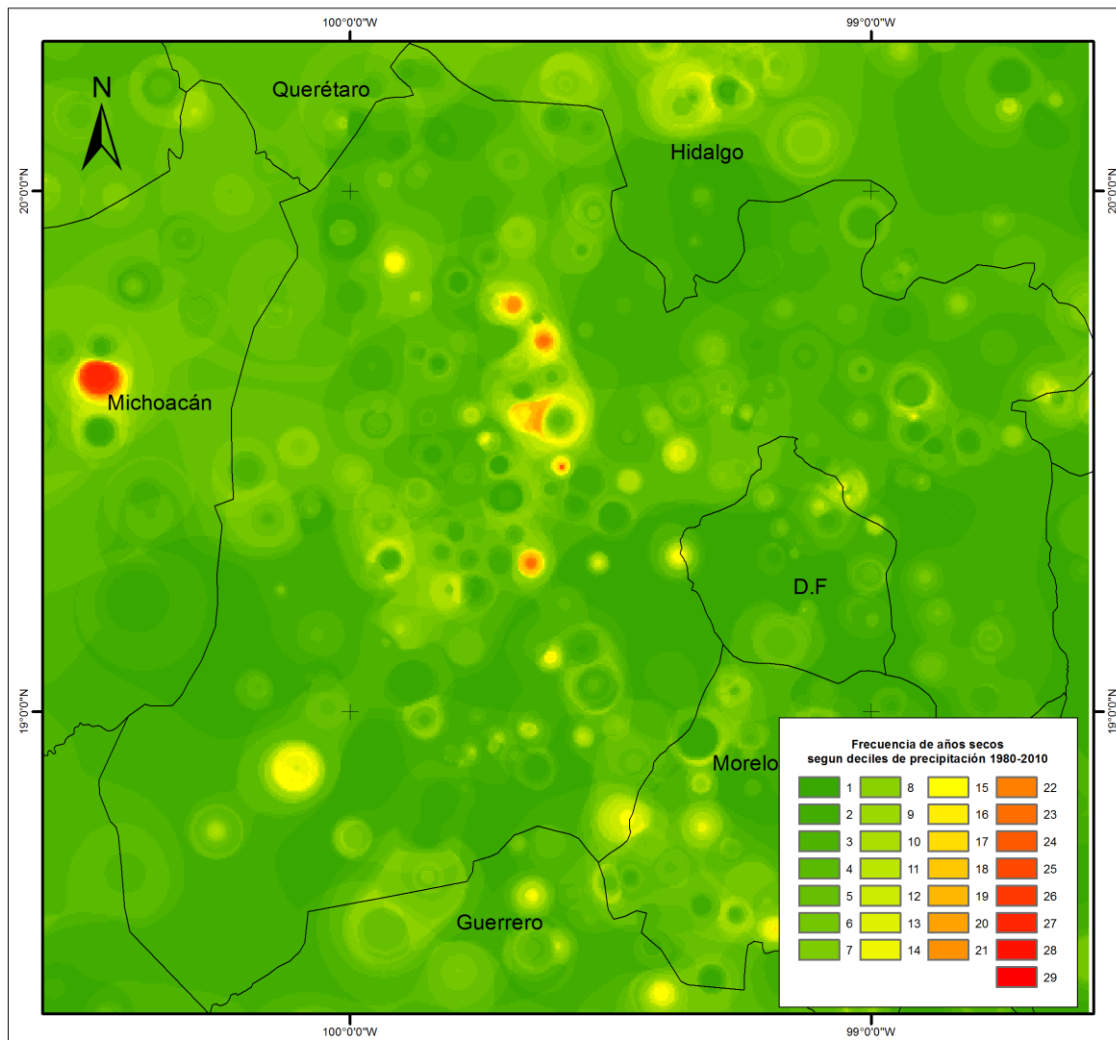


Figura 4.16. Frecuencia de años secos según deciles anuales 1980-2010 en el Estado de México

Deciles mensuales para los años 1982 -1992

Como se mencionó anteriormente de acuerdo con los valores de deciles, el año que fue más seco fue el de 1982 y el más húmedo fue 1992. Con los mapas mensuales que se obtuvieron, ver Anexo E, se puede ver el comportamiento espacio-temporal de los valores de los deciles por mes, lo que permite identificar periodos secos y húmedos en el año, de esta manera se concluye que para 1982 el periodo seco más largo fue de junio a septiembre (corresponde a la temporada de lluvias), su mes más húmedo fue mayo; marzo, abril y octubre fueron meses que se caracterizaron en la mayoría del territorio como normales con categorías de deciles de la 4 a la 7 y el resto de los meses fueron secos con categorías de la 1 a la 3.

Para el año 1992 que fue el más húmedo, los meses de junio y diciembre fueron los más secos ya que los valores de deciles que predominan son mucho muy bajos de lo normal, los meses más húmedos fueron enero, mayo, octubre y noviembre debido a que los valores de los deciles se encuentran muy y mucho muy arriba de lo normal, en este caso la temporada de lluvia y su periodo húmedo fue normal, puesto que las categorías van de la 4 a la 7.

Como se puede apreciar, los deciles mensuales nos permitieron corroborar por qué 1982 es considerado año muy seco, esto es debido a que hay presencia de más meses secos y la temporada de lluvias en este año fue seca, en comparación con 1992 que fue normal.

Para complementar el análisis anterior, también se elaboraron mapas de frecuencia de meses secos de 1982 y 1992, con el fin de identificar cuáles fueron las regiones más afectadas, con la presencia de meses secos en la entidad, de esta manera se puede apreciar en la figura 4.18 que la frecuencia de meses más secos con categorías 1 y 2 es más alta en la mayoría de la entidad para 1982, en cambio para 1992 que se muestra en la figura 4.19, las zonas que presentaron meses muy secos están resaltadas en tonalidades de amarillo a rojo (son muy pocas) con frecuencia de 6 a 12 meses secos, en esta última imagen se puede ver que hay una pequeña región ubicada en el municipio de Hueytopxtla que esta de color naranja e indica que en esa región hubo 9 meses secos, es decir en la mayor parte del año en esa región no llovió mucho.

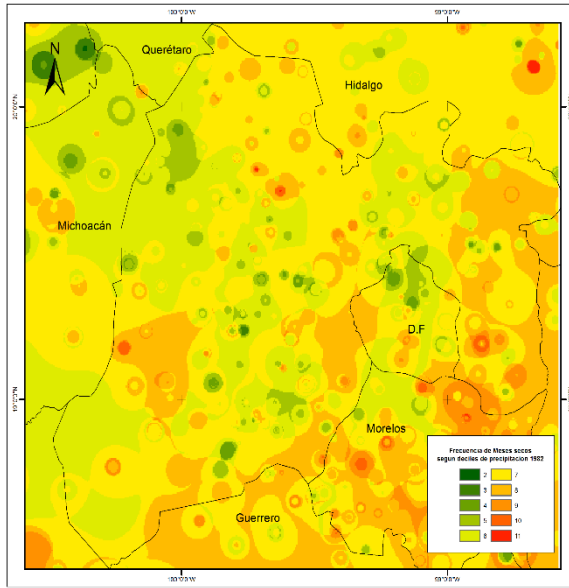


Figura 4.17. Frecuencia de meses secos según deciles de precipitación 1982

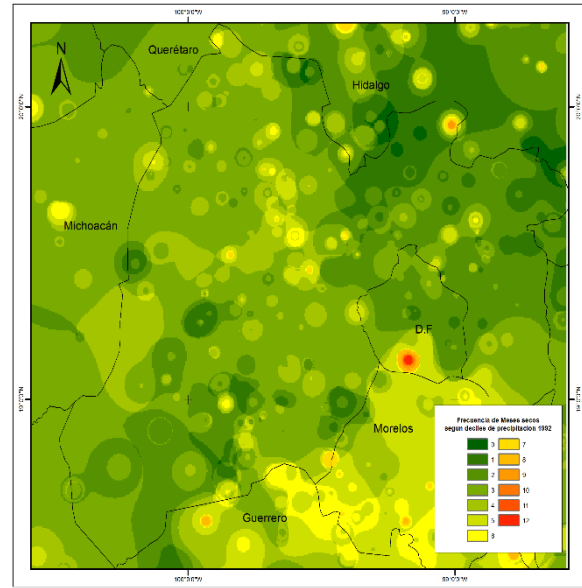
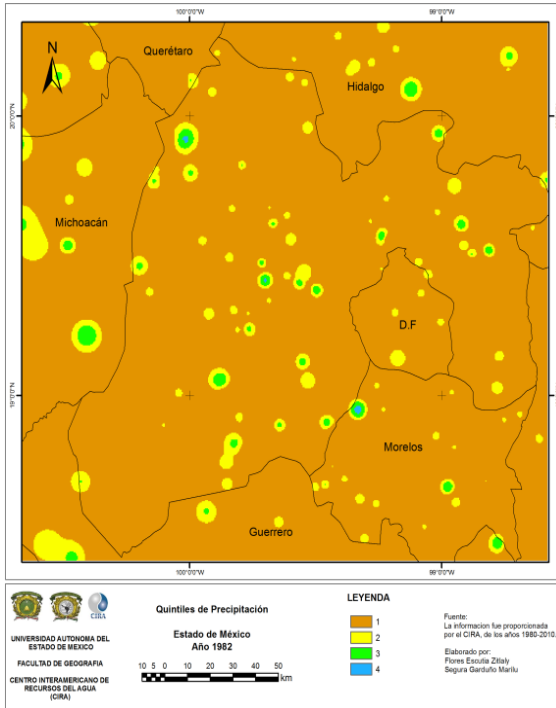
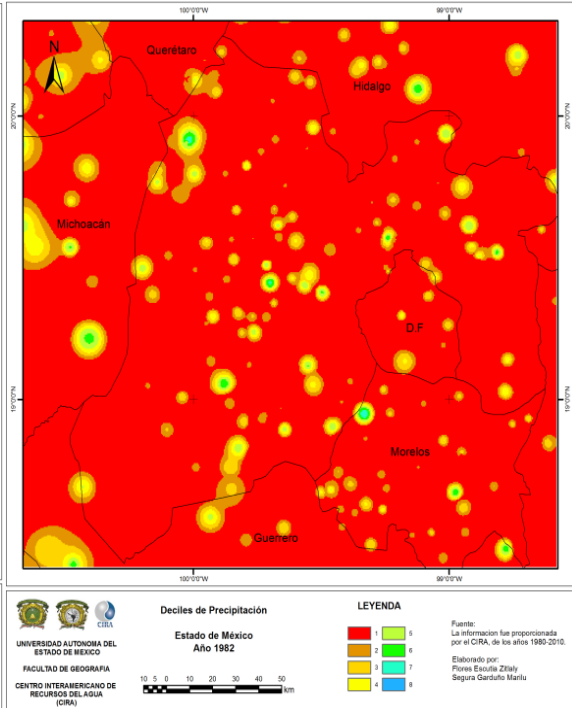


Figura 4.18. Frecuencia de meses secos según deciles de precipitación 1992

Otro tipo de cuántil que se puede calcular con el módulo son los quintiles, de los cuales se elaboraron ejemplos (quintiles y deciles) para dos años: 1982 y 2010, con el fin de ver la diferencia entre ambos. En la figura 4.19 se muestran los mapas de quintiles y deciles para el año 1982 y en la figura 4.20 para el año 2010, se observa que en ambos la distribución de los valores de los cuántiles tienen el mismo comportamiento, con la diferencia que en detalle los quintiles se manejan cinco clases y en los deciles diez clases, sin embargo la descripción es casi la misma. Por ejemplo en el año de 1982 ambos cuántiles indican que la mayor parte del territorio es seco en ese año pues para ambos es la categoría 1, como ya se mencionó la diferencia radica en el nivel de detalle, tal como se aprecia en los mapas del año 2010 las regiones en color café caracterizadas con clase 1 (muy secas) en el mapa de quintiles se ve más delimitada la zona que fue mucho más seca en el mapa de deciles con clase 1, esto es, los valores que están muy por debajo del primer quintil, lo cual es importante para la localización de zonas más críticas, por año, mes o estación.

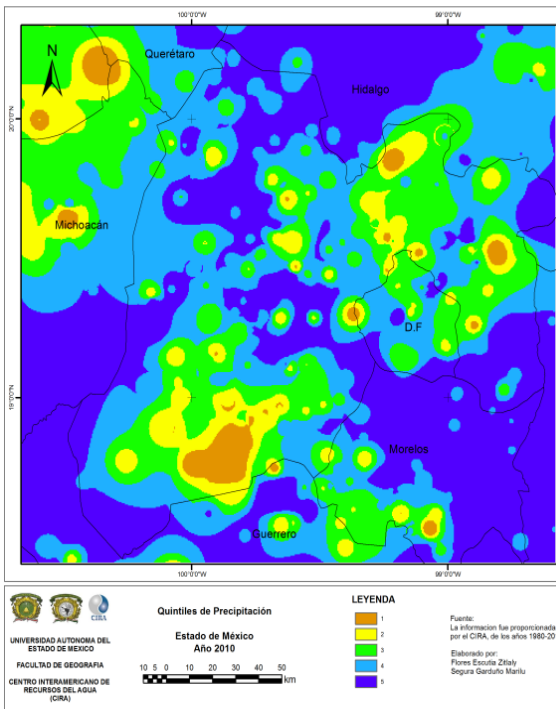


4.19a. Quintiles de precipitación año 1982

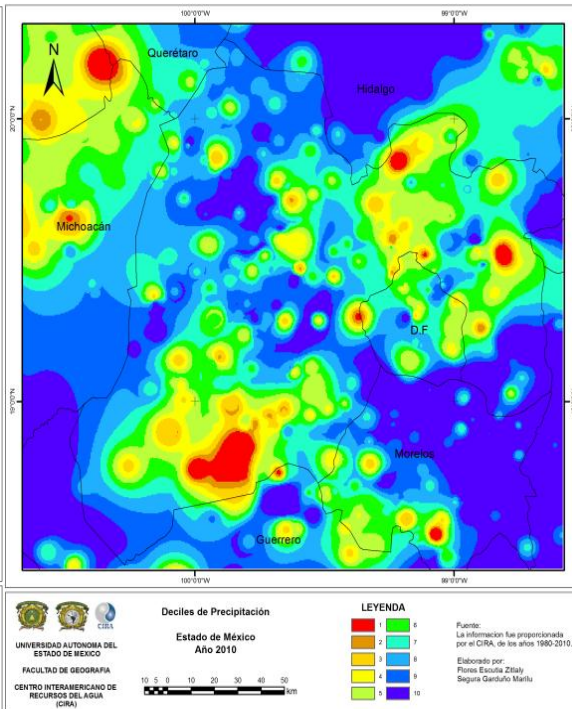


4.19b. Deciles de precipitación año 1982

Figura 4.19. Quintiles y deciles de precipitación año 1982



4.20a. Quintiles de precipitación año 2010



4.20b. Deciles de precipitación año 2010

Figura 4.20. Quintiles y deciles de precipitación año 2010

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El objetivo principal de la presente investigación fue diseñar e implementar un módulo geomático que permitiera el cálculo de índices de aridez y sequía, y su aplicación al Estado de México, considerando un periodo de 31 años (1960-2010); partiendo de la identificación de algunos índices, el análisis de requerimientos, así como el diseño de modelos geomáticos que permitieron la automatización de los mismos en un entorno SIG, dejando como pauta la inserción de nuevas funcionalidades para la mejora del mismo, como la implementación de más índices, la elaboración automatizada de gráficas, o para ser implementado en otro entorno SIG.

En cuanto a los objetivos específicos, estos fueron cumplidos al haber identificado y seleccionado los índices de aridez y sequía más aptos para automatizar siguiendo el criterio en cuanto a la disposición de la información en formato raster, la cual fue proporcionada por el CIRA como apoyo a este trabajo de tesis, se diseñó el modelo conceptual de los índices, así como de la base de Geodatos para el módulo, de acuerdo a las especificaciones de los modelos conceptuales se depuró y organizó la información para ser utilizada con el módulo a implementar y de esta manera poder evaluar el rendimiento del módulo geomático.

En cuanto a los resultados arrojados por el módulo, para los cuatro índices, se concluye lo siguiente:

- Los resultados obtenidos para el IFM muestran un alto riesgo a la erosión del suelo por agresividad de la precipitación en la región sur y centro del estado, la cual, se ha ido expandiendo y aumentando con el paso de los años hacia el nororiente de la entidad; también cabe mencionar que la región noreste y este que comprende el Valle de México presenta un riesgo moderado a la erosión por agresividad de precipitación.
- Para el ICP los resultados muestran que la distribución de la precipitación en todo el estado es estacional, sin embargo en regiones específicas como Zacualpan, muestran un alto índice de concentración de precipitación, por lo que esa pequeña zona es más vulnerable a la erosión del suelo puesto que la mayor cantidad de la

misma se presenta en dos meses. Este proceso de erosión del suelo por precipitación va provocando la eliminación de la cubierta vegetal, lo cual se presenta de una manera lenta, recurrente, progresiva e irreversible y trae como consecuencia la aridez.

Del análisis realizado para los índices IFM e ICP, se concluye que no evalúan directamente la aridez o sequía, sin embargo son indicadores que sirven de apoyo en el estudio, puesto que en un lugar árido el suelo es más vulnerable cuando la precipitación es muy intensa y se concentra en un periodo corto de tiempo después de un periodo seco, por lo que es importante saber el grado de erosión por agresividad y concentración de precipitación, aunado a esto la presencia de sequía en un suelo con procesos considerables de erosión, orillan a la sobreexplotación y degradación del mismo llegando en casos extremos, sin medidas de prevención, a la desertificación. Es por ello que en muchos estudios citados en este trabajo se consideraron estos índices, como apoyo para el análisis espacio-temporal, así como para identificar las zonas más susceptibles a la presencia de sequía e intensidad de la aridez.

- En cuanto a los resultados obtenidos por el índice de De Martonne, se muestra que en el estado de México no hay aridez, es importante mencionar que este índice aplicado a nuestra área de estudio, careció de sensibilidad a la identificación de regiones con valores bajos de precipitación al considerarlas con un clima subhúmedo y no como árido o semiárido, como la región noreste y este que está clasificada de acuerdo con Köppen como clima seco y de acuerdo a los resultados de De Martonne la clasificaron con clima subhúmedo, cuando sus valores máximos de precipitación en el mes más húmedo es de 100 mm, por lo que para la reducción de estos errores es necesario la aplicación de métodos estadísticos que ayuden a minimizar el error y por consiguiente delimitar de mejor manera los climas.
- Para los cuántiles los resultados obtenidos señalan que el estado de México ha tenido años muy secos en casi toda la entidad, el mapa de frecuencia de deciles de los 31 años, permitió identificar zonas con presencia de sequía en 29 años.

Los mapas de frecuencias sirvieron de apoyo para identificar zonas específicas con cambios y tendencias al incremento del riesgo o vulnerabilidad a la erosión del suelo o la persistencia de la sequía en todos los años del periodo considerado.

Habiendo identificado la vulnerabilidad de la zona de estudio a la erosión del suelo y presencia de sequía, así como el grado de aridez, es importante mencionar que para caracterizar del todo la aridez y sequía en un lugar, hacen falta elementos como la temperatura, la evapotranspiración, pérdida de vegetación, indicadores que permitan profundizar en la erosión del suelo, déficit hídrico, etc., ya que son problemáticas complejas, que implican tanto el cambio climático como las acciones antrópicas sobre los recursos naturales.

Es importante mencionar que la información disponible para la presente investigación fue una limitante para la selección de índices más complejos que permitieran caracterizar la sequía y aridez como tal.

Aridez y sequía son términos que van de la mano ya que el aumento de la aridez y la persistencia de la sequía agravan las condiciones medioambientales de una región, es por eso que una herramienta que permite el cálculo de estos índices en grandes extensiones de territorio, ayudan a ver el comportamiento espacial de las problemáticas e identificar zonas críticas y por consiguiente aplicar medidas de mitigación contra la erosión y sequía.

En cuanto al desarrollo del módulo geomático se concluye que la elaboración conceptual-lógica de los índices (macromodelos de Idrisi) permitió la identificación de las *entradas*, *procesos* y *salidas* necesarias para el cálculo de cada índice, lo que facilitó la automatización de los mismos en la plataforma de programación Delphi, por lo cual estos macromodelos ayudan a la aplicación en otras plataformas y programas SIG de tipo raster ya que estos están encaminados al manejo de información de este tipo, además en la actualidad la mayoría de los programas SIG cuentan con una herramienta para modelar lo que permite la inserción de estos modelos conceptuales-lógicos.

Por último, la aplicación del módulo a un área de estudio nos permitió verificar el rendimiento para el manejo de la información en cuanto a temporalidad y resolución, ya que éste módulo no se limita solo a evaluar 31 años de información, sino que pueden emplearse datos desde 1 o más de 31 años, de igual manera se pudo probar el manejo de la resolución al incorporar dos fuentes de información distintas. Para el presente trabajo se delimitó el área de estudio en base a una capa vector, sin embargo el módulo no está sujeto solo a calcular un área en específico, sino que puede ser aplicado para calcular los índices con información de otra región con problemáticas de aridez o sequía como lo son los estados del norte de nuestro país.

Como recomendaciones se tienen las siguientes:

- ✓ Agregar más índices de sequía haciendo uso de imágenes de satélite, ya que muchos índices de sequía utilizan estas fuentes de información, además dichas imágenes son actualizadas diariamente, lo que pudiera ayudar a obtener resultados en tiempo real.
- ✓ Agregar índices más complejos de aridez, como el índice de aridez entre otros que se emplean para América Latina.
- ✓ Agregar al módulo la opción de cargar los límites del área de estudio, es decir, un formato vectorial.
- ✓ Incorporar la automatización de procesos que interpolen datos alfanuméricos de precipitación y temperatura, o bien hacer uso de imágenes de precipitación tomadas por radar, para así obtener las imágenes raster que requiere el módulo.
- ✓ Usar fuentes de información con mejor resolución tanto espacial como temporal para darle mayor precisión a la delimitación de los resultados obtenidos por los índices.

BIBLIOGRAFÍA

- Barragán, M. C. et al., 2010. Variabilidad espacio-temporal de la precipitación en la cuenca Lerma Chapala. p. 4.
- Bravo, A.G., Salinas, H. y Rumayor, A., 2006. *Sequía: vulnerabilidad, impacto y tecnología para afrontarla en el Norte Centro de México*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias Centro de Investigación Regional Norte-Centro campo experimental Zacatecas. Libro Técnico Núm. 4. 2ª Edición.
- CENAPRED (2002), *Sequias*. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres
- Diouf, J., 2010. Tierra sedienta, Oportunidad sin explotar. *Nuestro Planeta, La revista del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente*. 17 (1), p. 8-10.
- Ebrahimi, M., Matkan, A. A. y Darvishzadeh, R., 2010. Remote Sensing Drought assessment in arid regions (a case study of central part of Iran, "shirkooh-yazd"). ISPRS. IAPRS Vol XXXVIII part 7B. pp. 199-203
- El Hassan, I., 2004. Desertification Monitoring Using Remote Sensing technology. King Saud University pp. 15. Disponible en <http://repository.ksu.edu.sa/jspui/handle/123456789/3120>. consultado el 20 de octubre de 2011.
- Fairbanks, M., Tennant D., Dracup M., Beard D, y cramb J., 2005, What are rainfall deciles?, Farmanotes, [en línea] disponible en: http://archive.agric.wa.gov.au/PC_91705.html?s=0 [consultado 02 septiembre de 2014].
- G. Tsakiris, A. Loukas, D. Pangalou, H. Vangelis, D. Tigkas, G.Rossi, and A. Cancelliere. Chapter 7. Drough characterization. Option Méditerranéennes, Series B, No. 58
- Geotux Soluciones Geoinformáticas libres. [en línea]. [Citado el 14 de mayo de 2013]. Disponible para World Wide Web en <http://geotux.tuxfamily.org/index.php/es/geo-blogs/item/318-sobre-python-modulos-espaciales-programas-sig-y-controversias>

- Gómez, R.J. Evidencias del efecto de “Isla de calor” en Morelia, Michoacán, México
- Guerra, J., 2003. Habitar el desierto: Transición Energética y Transformación del Proyecto Habitacional Colectivo en la Ecología del Desierto de Atacama, Chile. Tesis de doctorado. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Hasan, M., y Saiful, I., 2011. Drought assessment using remote sensing and GIS in North-west region of Bangladesh. P. 8.
- Herrera, G., 2000. Caracterización Geográfica de la Sequía en México. Tesis de Doctorado. UNAM.
- IMTA Instituto Mexicano de Tecnología del Agua: “Las sequías en México”. [en línea]. México. [Citado el 12 de enero de 2011]. Disponible para World Wide Web en http://www.imta.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=177:las-sequias-en-mexico&catid=52:enciclopedia-del-agua&Itemid=106
- ISDR (International Strategy for Disaster Reduction), 2002. Drought Living With Risk: An Integrated Approach to Reducing societal Vulnerability to Drought. ISDR Ad Hoc Discussion Group on Drought. p. 43.
- Legesse, H., 2010. Drought Risk Assessment Using Remote Sensing and GIS: a case study in southern zones, Tigray Region, Ethiopia. Tesis de Maestría. Addis Adaba University, Department of Earth Sciences.
- Lin, M.L., Chu, Ch. M. y Tsai, B. W., 2011. Drought Risk Assessment in Western Inner-Mongolia. Int. J. Environ. Res., winter, (5) 1, pp. 139-148.
- Madrigal J.M., López A.A. 2008. Modelo de desertificación utilizando imágenes multiespectrales en Cuatrociénegas, Coahuila, México. México
- Marcos, O., 2001. Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. Instituto Universitario de Geografía Universidad de Alicante, Investigaciones Geográficas. 26. pp. 59-80
- Mendoza, N. y Puche, M., 2003. Caracterización de la sequía meteorológica en Venezuela. Universidad Central de Venezuela.
- Mendoza N. y Puche M., 2007, Evaluación de la ocurrencia de sequía en localidades de Venezuela: Rev. Frac. Agron. (LUZ), 24, pp.661-678.
- Mercado, G. et al., 2010. Calibración y aplicación del índice de De Martonne para el análisis del déficit hídrico como estimador de la aridez y desertificación en zonas áridas. Universidad y ciencia, Trópico Húmedo. 26 (1). pp. 51-64.

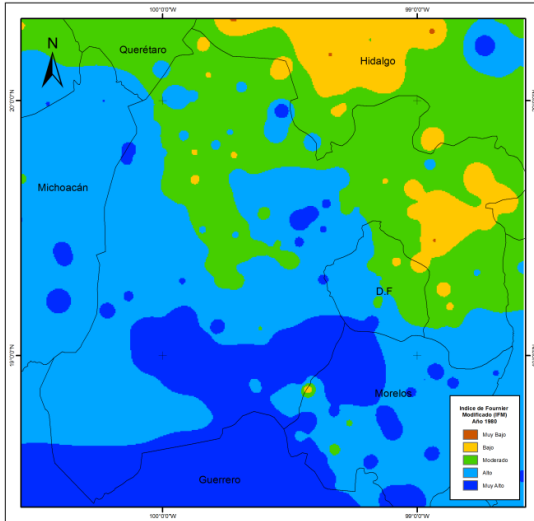
- Mercado, G., Troyo E., Aguirre-Gómez, A., Murillo-Amador, B., Beltrán-Morales, L.F., García-Hernández, J.L. Identificación de amenazas de sequías en regiones agropecuarias del Estado de Puebla, México.
- Morales, C. y Parada, S., 2005. *Pobreza, desertificación y degradación de los recursos naturales*. Santiago de Chile: CEPAL.
- NOAA National Weather service (2008) Drought. Public Fact Sheet, January, pp. 2.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). 1994. Convención Internacional de Lucha contra la Desertificación en los Países afectados por Sequía Grave o desertificación, en Particular en África.
- Quentin, E., C. Díaz-Delgado, M.A. Gómez-Albores, L.R. Manzano-Solís, R. Franco-Plata, 2007. Desarrollo Geomático para la Gestión Integrada del Agua. *XI Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica (XI CONFIBSIG), Universidad Nacional de Luján (UNLu) Argentina, Sociedad Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica (SIBSIG)*. Buenos Aires, Argentina. p. 21
- Rodríguez, G y Santos, V.A., 2007. Diseño e implementación de un módulo hidrogeomático para la estimación de parámetros fisiográficos de cuencas hidrográficas. Tesis de Licenciatura de la Facultad de Geografía. UAEM.
- Romero, A., 1995. Tendencia de Precipitación y Sequía en la Zona Noroeste del Estado de México. Tesis de licenciatura. UAEM.
- Ruiz, T. y Febles, G., 2004. La desertificación y la Sequía en el mundo. *Revista de Investigación y difusión científica (AIA)*. 8 (002). p. 12
- Stein, A., Bijker, W., Rulida, C., 2011. Predicting dynamics of vegetative drought clases using fuzzy markov chains. Enschede. pp. 64
- UNEMG, 2011. *Global Drylands: A Un Syste-wide response*. Primera edición. Switzerland: United Nations Environment Management Group (UNEMG)
- UNESCO, 2007. Memorias de la V Conferencia Mundial Proyecto FRIEND AMIGO para América Latina y el Caribe. Eduardo O. Planos Gutiérrez, Lorena Menéndez Fernández-Cueto, Erika Meerhoff
- UNESCO-PHI y Gobierno de Flandes (2010), "Proyecto elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas de América Latina y el Caribe", Uruguay.
- Vázquez *et al.* (2007), "Mapa de Aridez de Cuba" - Zonas Áridas, Centro de Investigaciones de Zonas Áridas, Universidad Nacional Agraria, La Molina, Lima-Perú, 11(1):101-109.

- Vigilancia y alerta temprana de la sequía: conceptos, progresos y desafíos futuros. 2006. (N° 1006). Suiza: OMM.

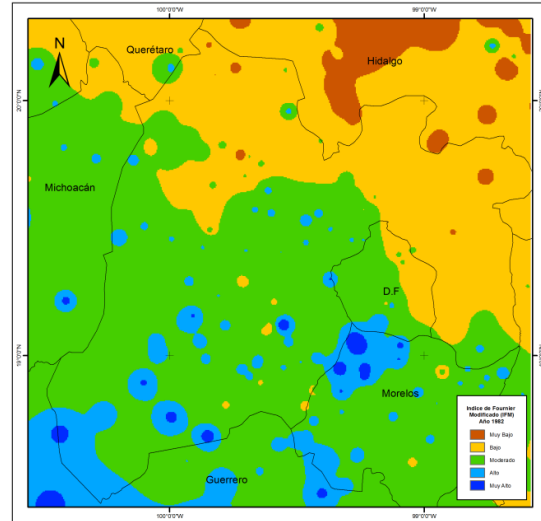
A N E X O S

ANEXO A. Mapas Anuales de Índice de Fournier Modificado (IFM)

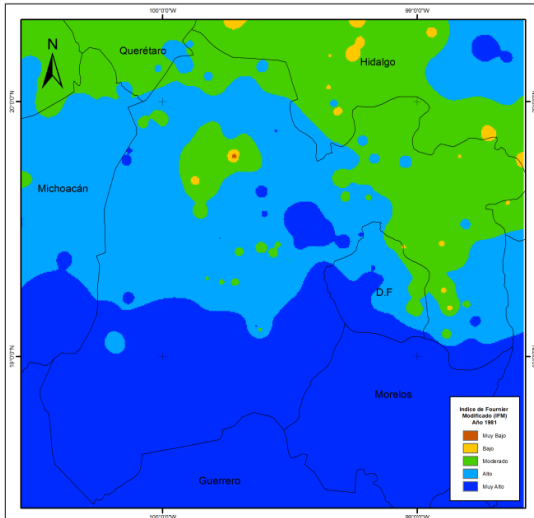
A.1. 1980



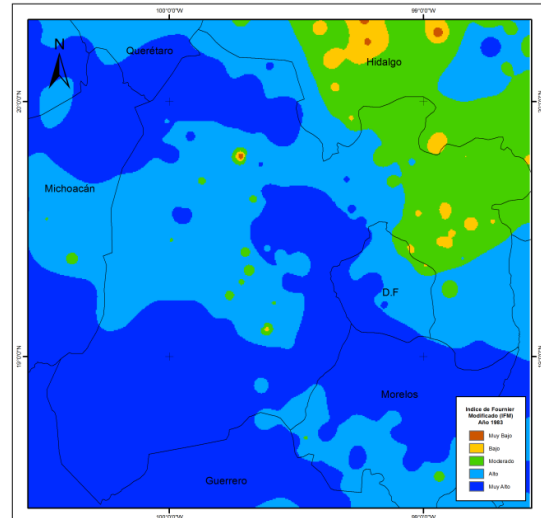
A.3. 1982



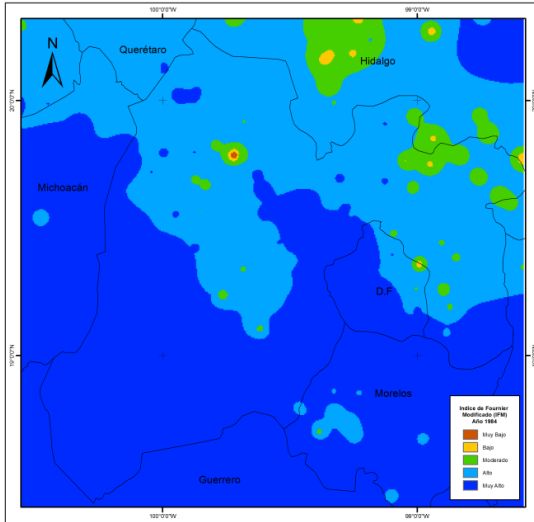
A.2. 1981



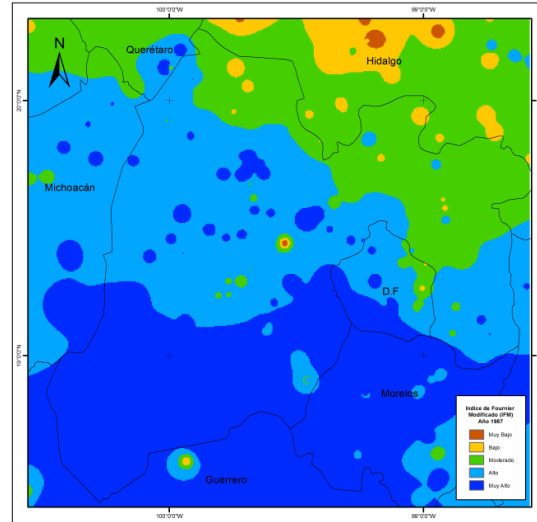
A.4. 1983



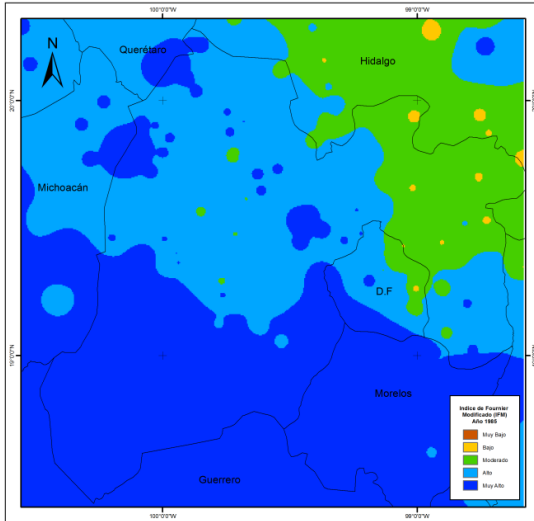
A.5. 1984



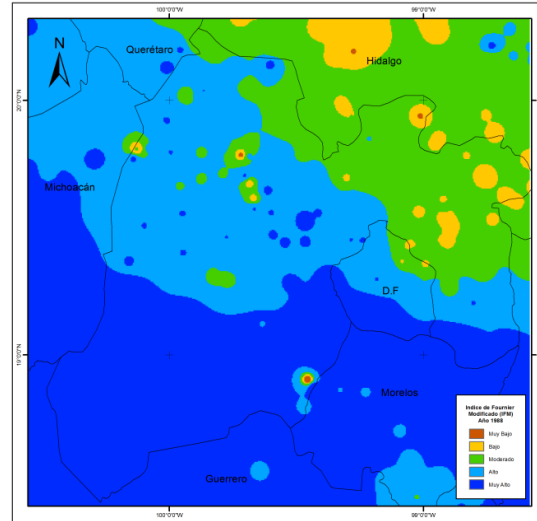
A.8. 1987



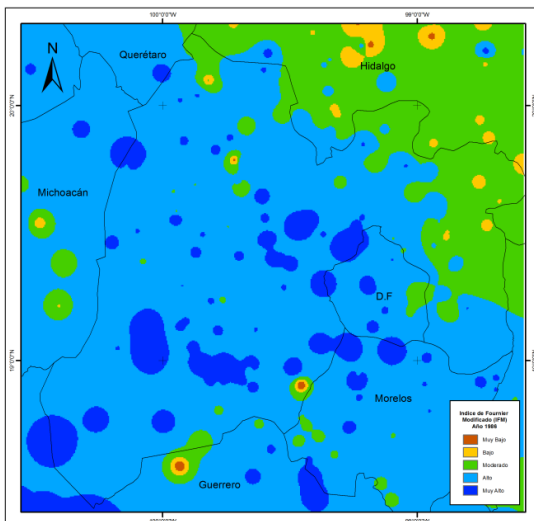
A.6. 1985



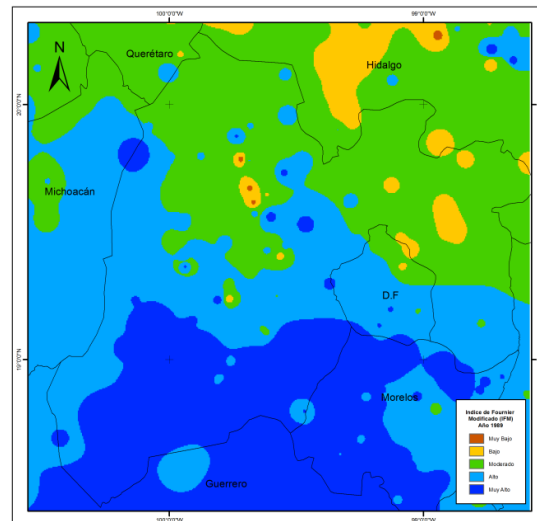
A.9. 1988



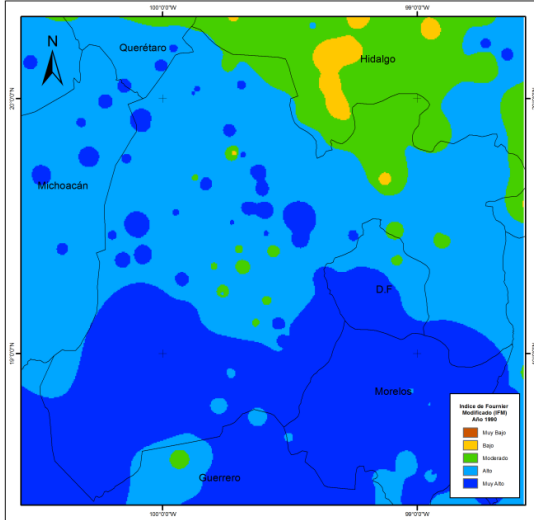
A.7. 1986



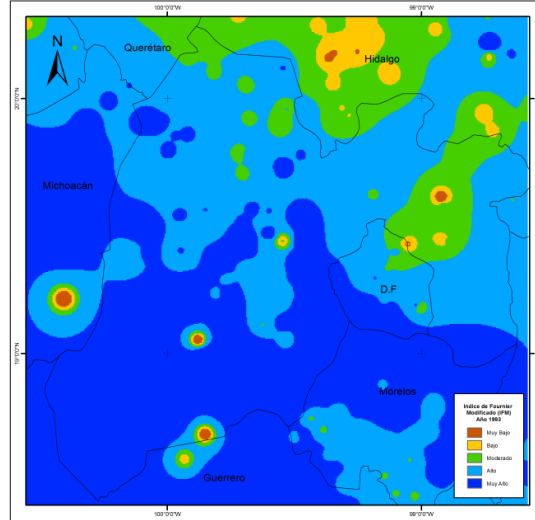
A.10. 1989



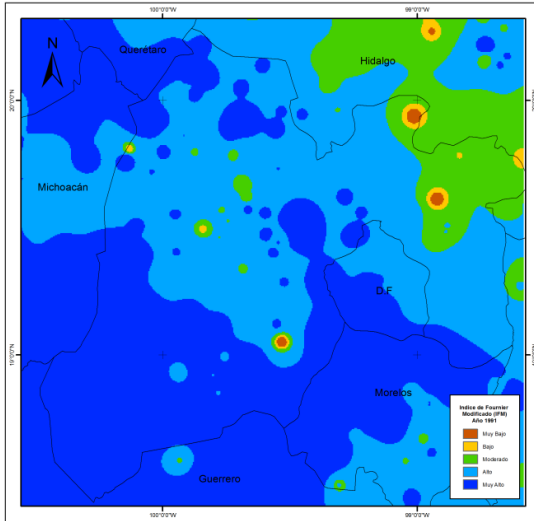
A.11. 1990



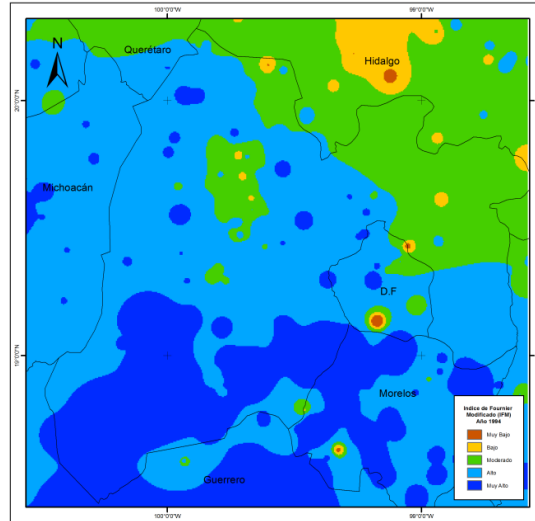
A.14. 1993



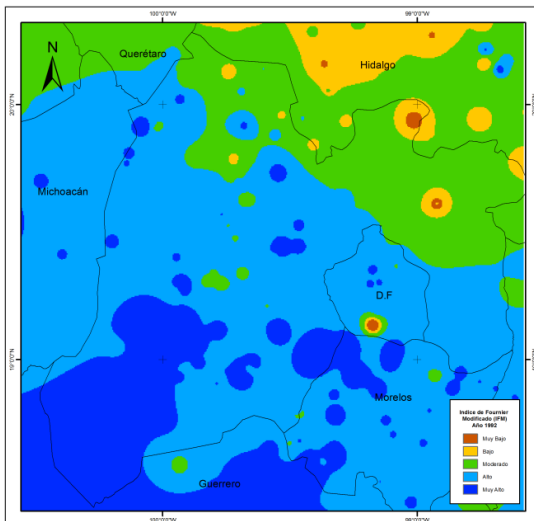
A.12. 1991



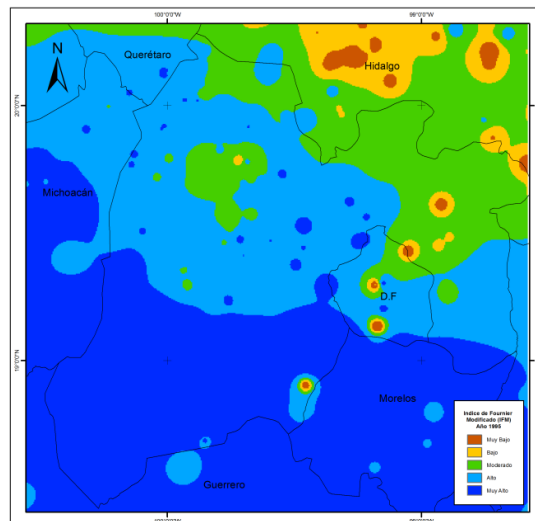
A.15. 1994



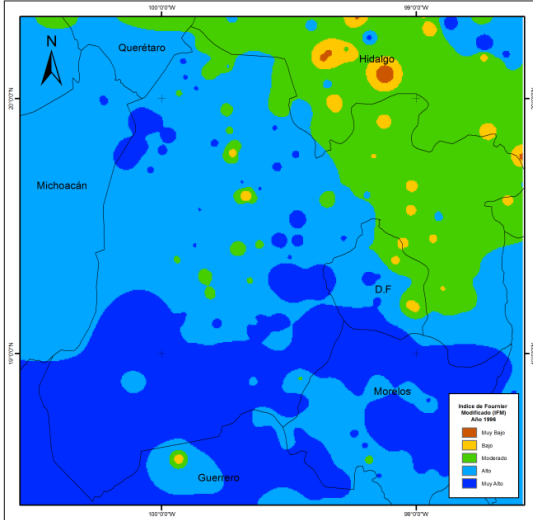
A.13. 1992



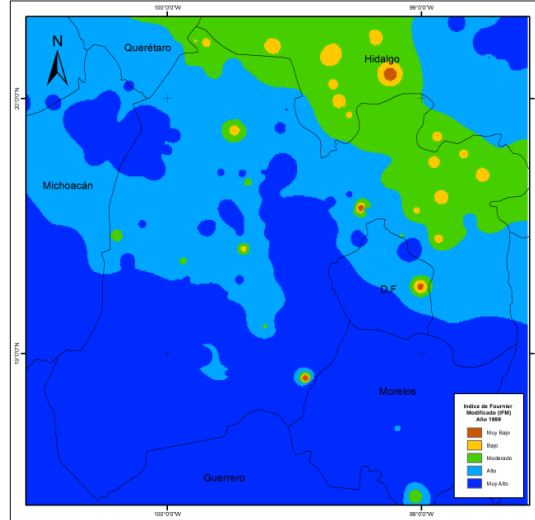
A.16. 1995



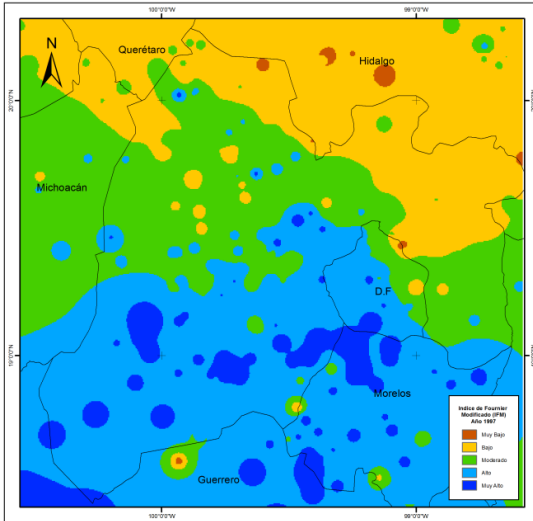
A.17. 1996



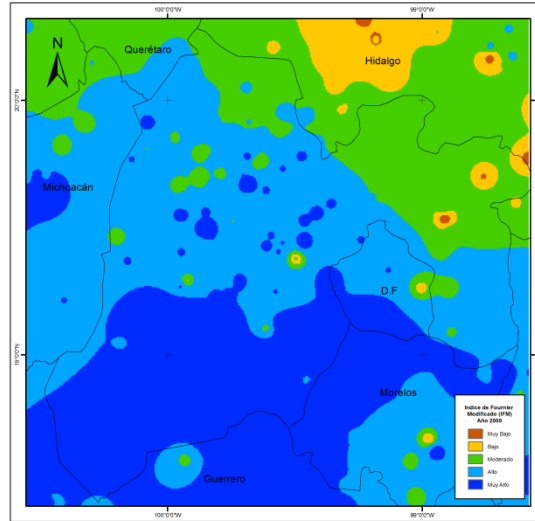
A.20. 1999



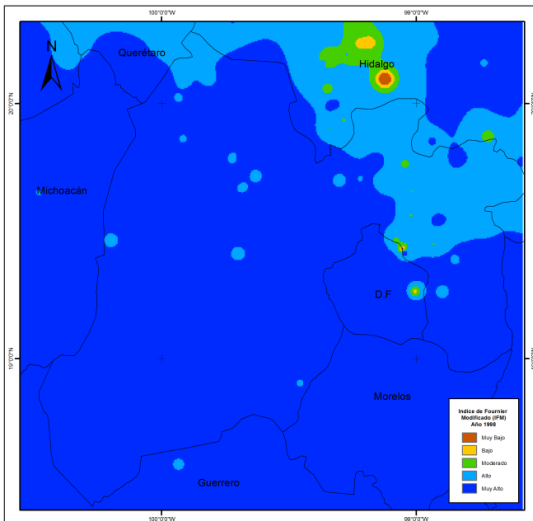
A.18. 1997



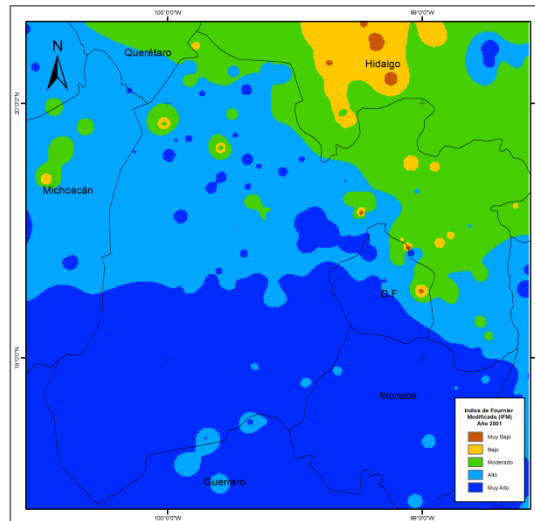
A.21. 2000



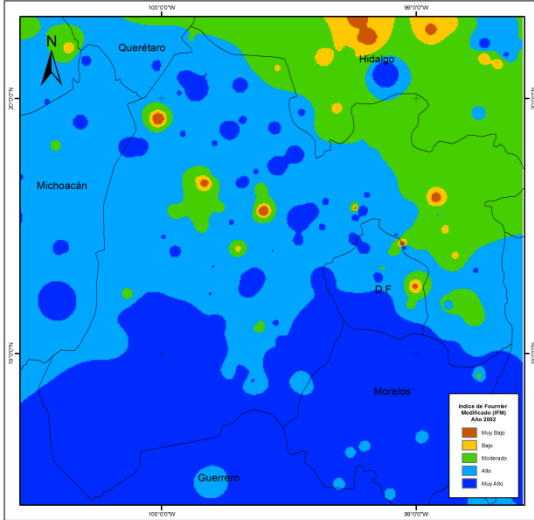
A.19. 1998



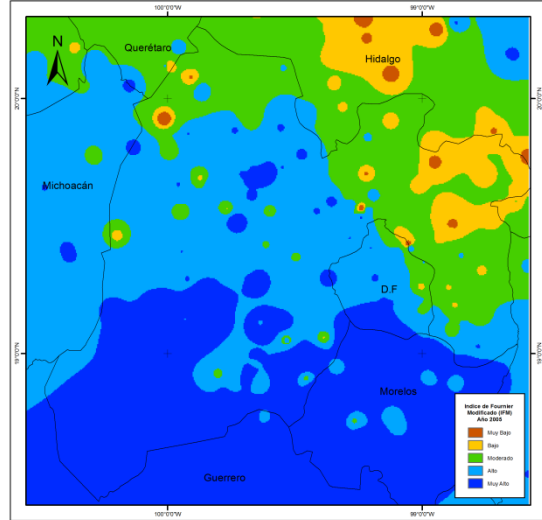
A.22. 2001



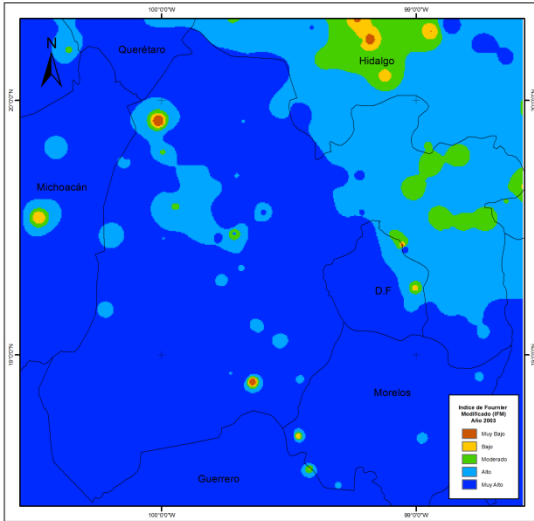
A.23. 2002



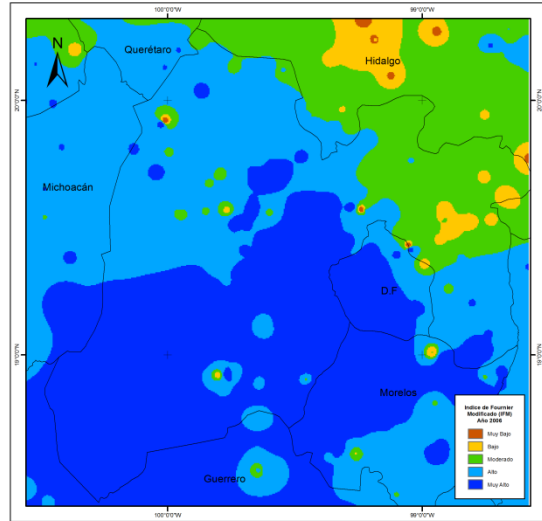
A.26. 2005



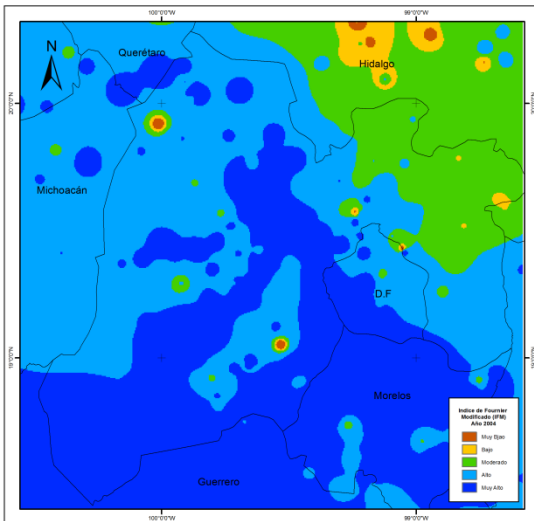
A.24. 2003



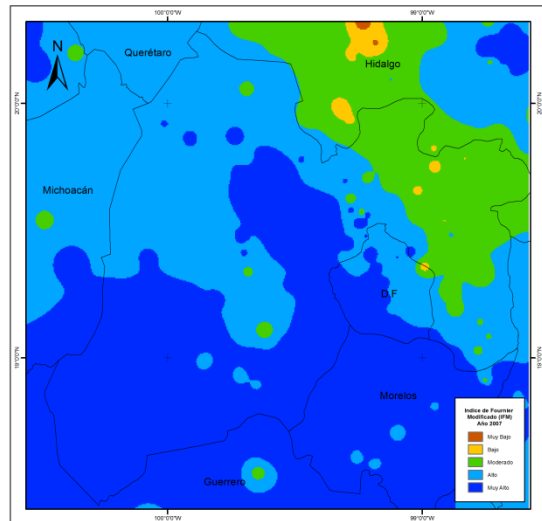
A.27. 2006



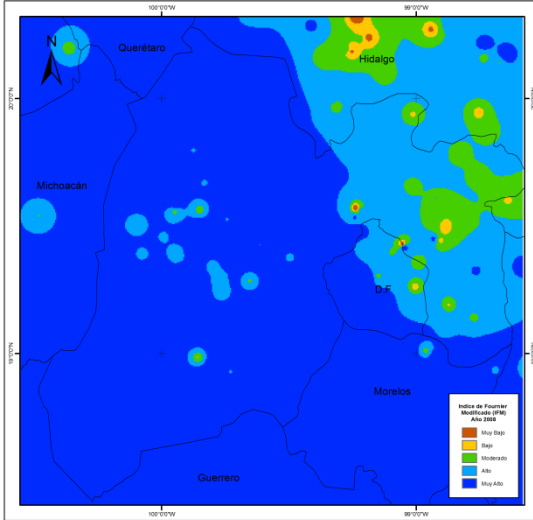
A.25. 2004



A.28. 2007



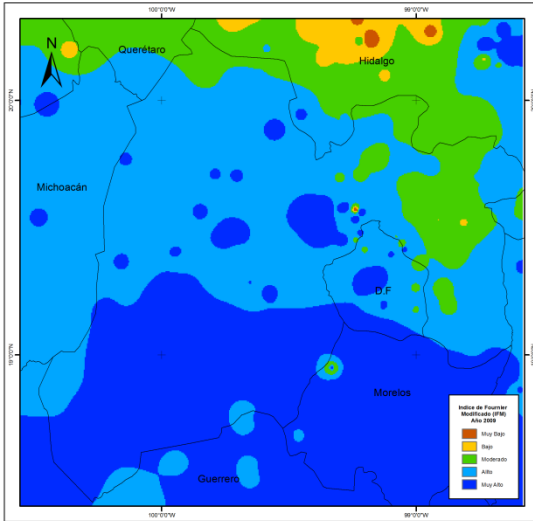
A.29. 2008



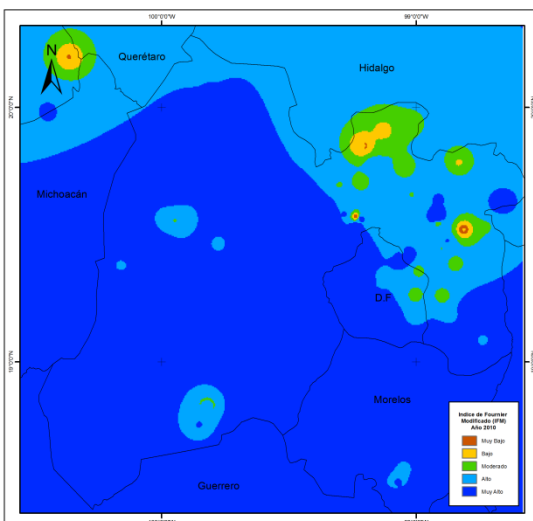
Clasificación

- Muy Bajo**
- Bajo**
- Moderado**
- Alto**
- Muy Alto**

A.30. 2009

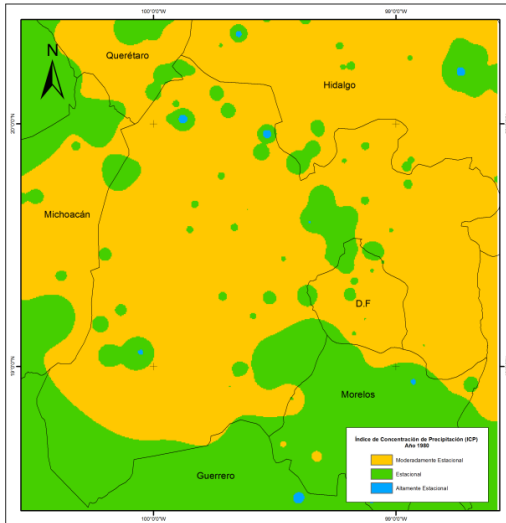


A.31. 2010

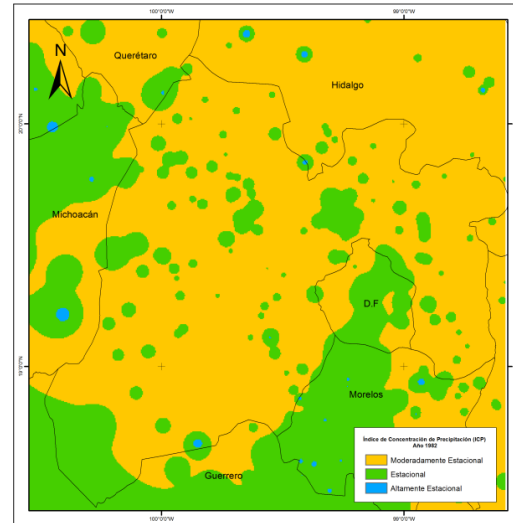


ANEXO B. Mapas Anuales de Índice de Concentración de Precipitación (ICP)

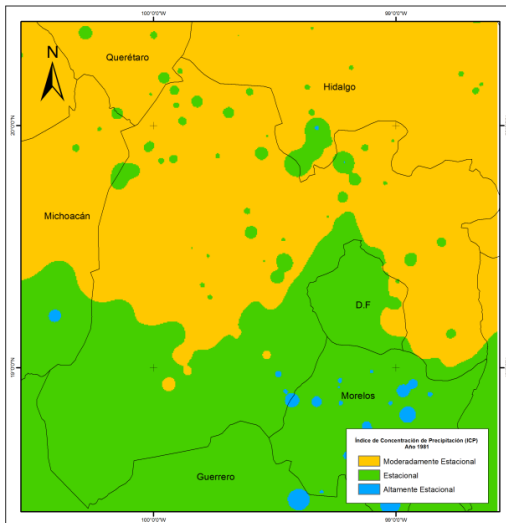
B.1. 1980



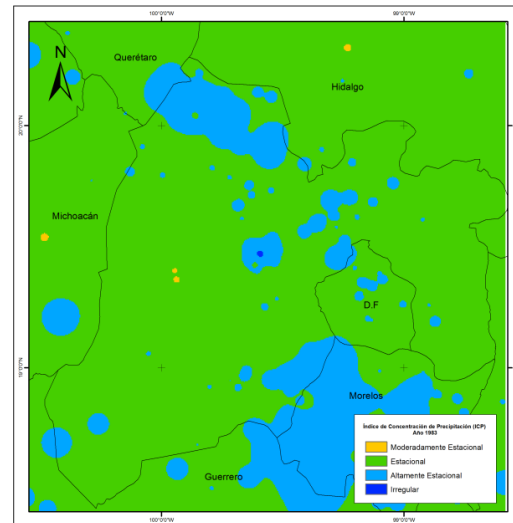
B.3. 1982



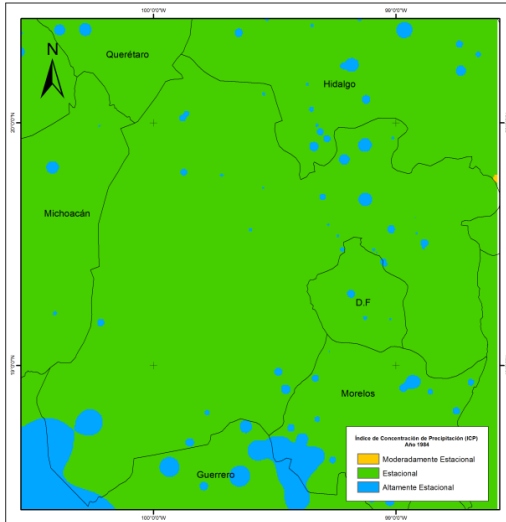
B.2. 1981



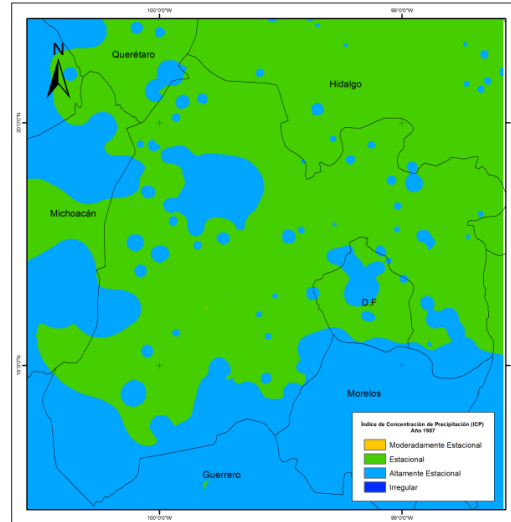
B.4. 1983



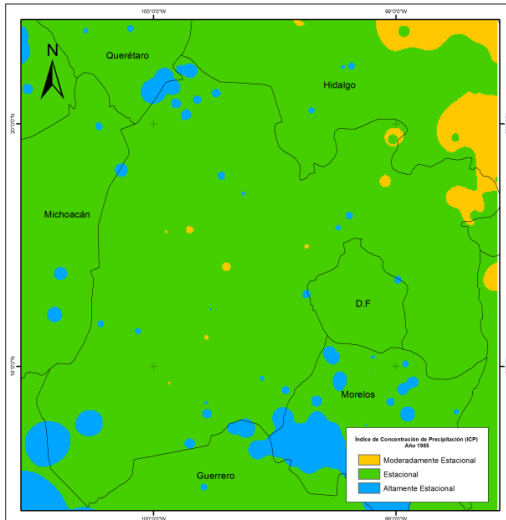
B.5. 1984



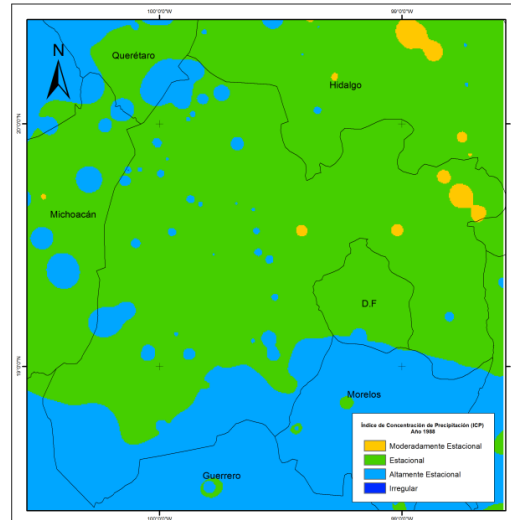
B.8. 1987



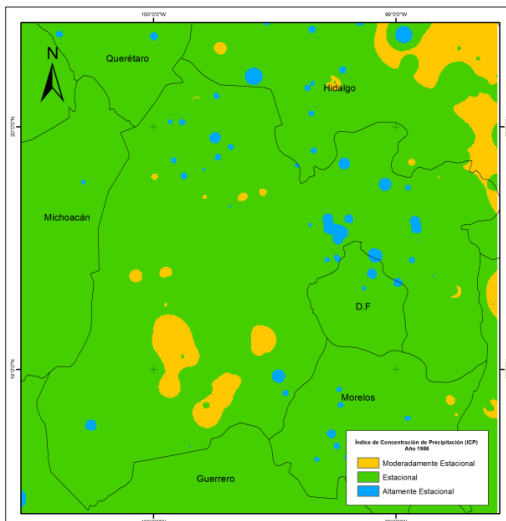
B.6. 1985



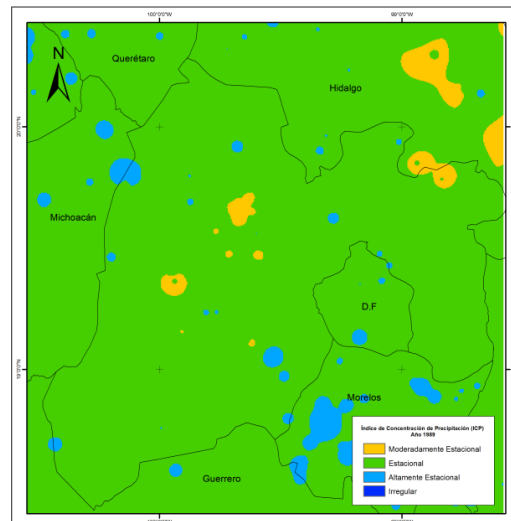
B.9. 1988



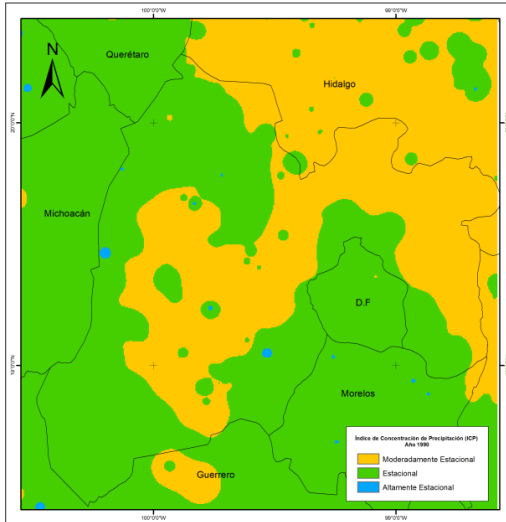
B.7. 1986



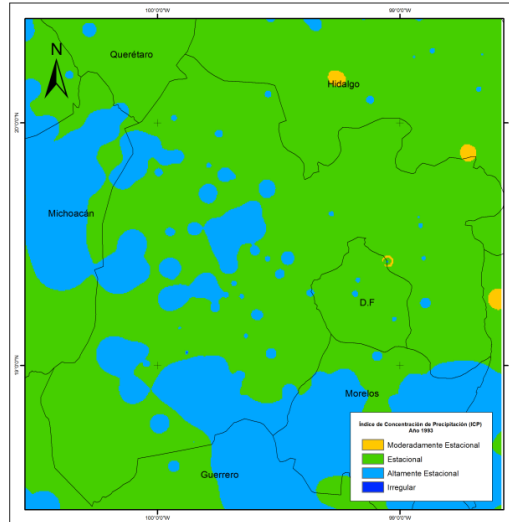
B.10. 1989



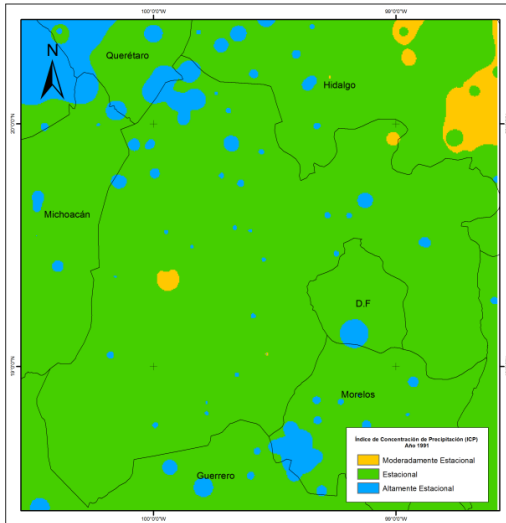
B.11. 1990



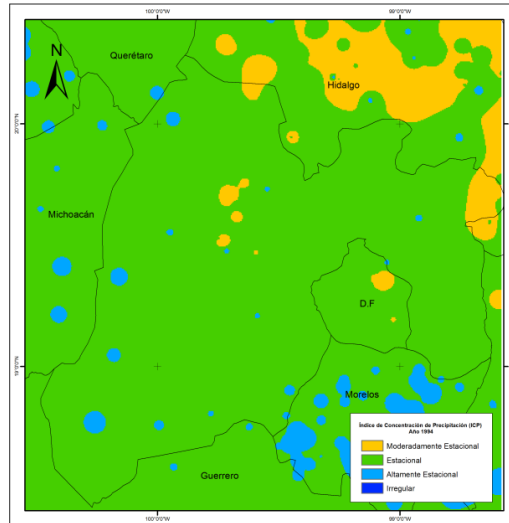
B.14. 1993



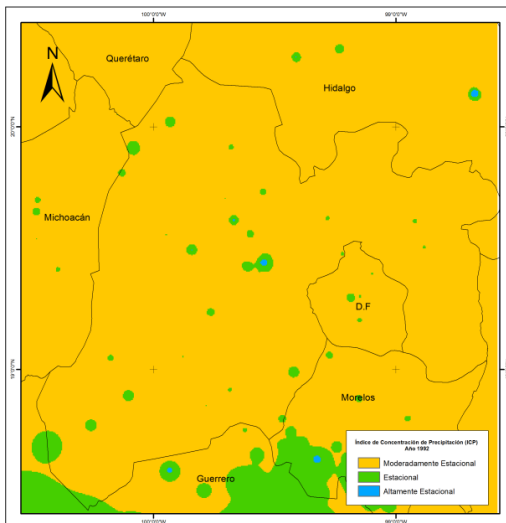
B.12. 1991



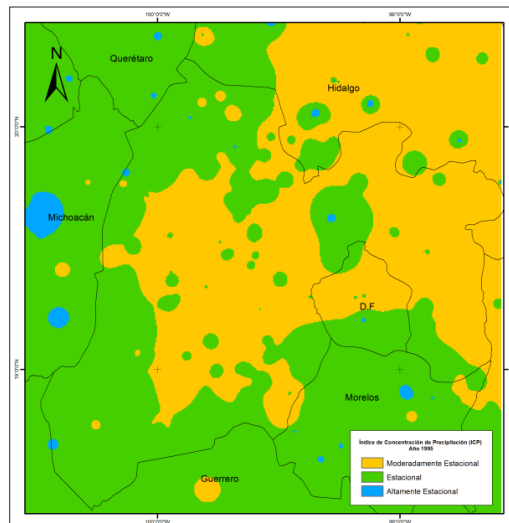
B.15. 1994



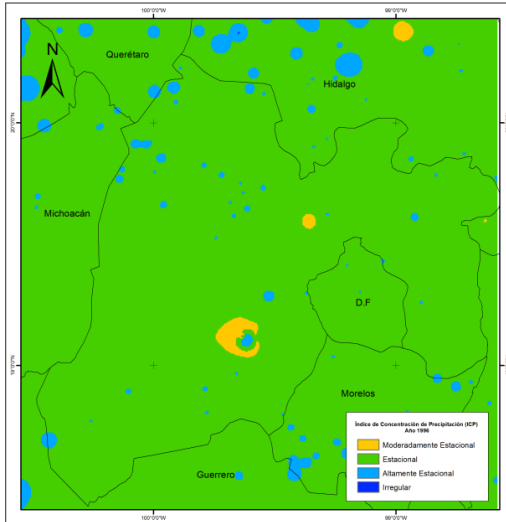
B.13. 1992



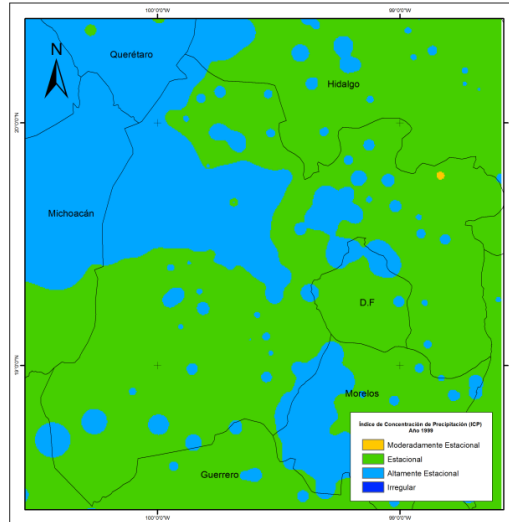
B.16. 1995



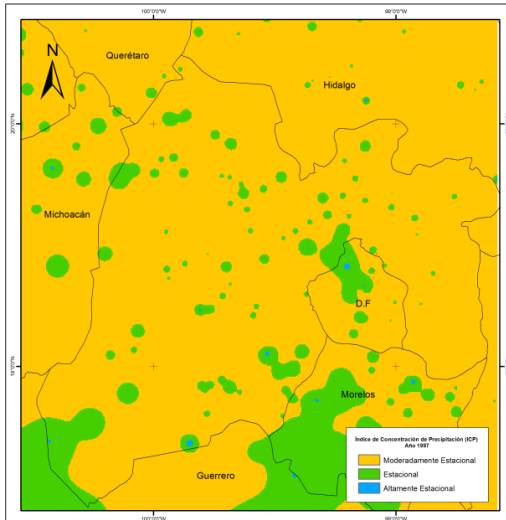
B.17. 1996



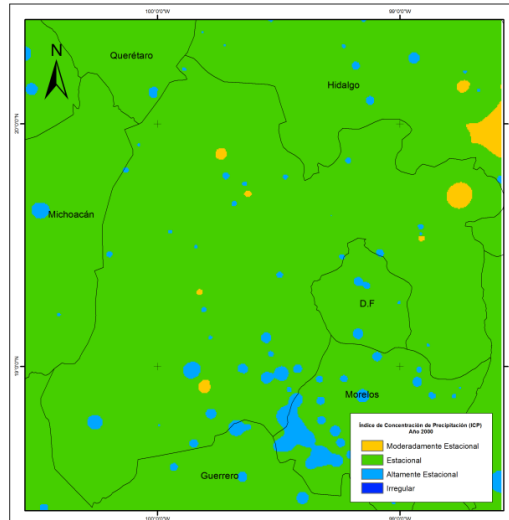
B.20. 1999



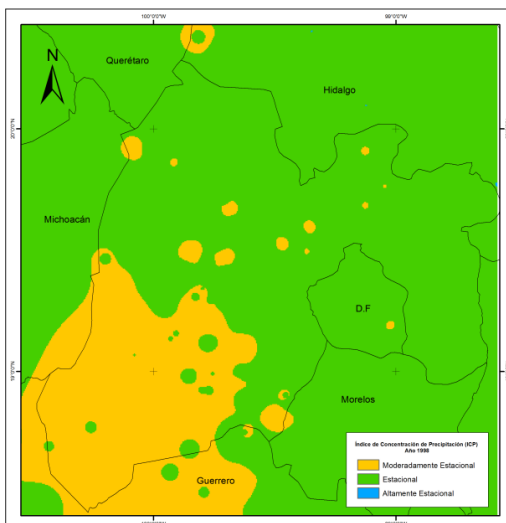
B.18. 1997



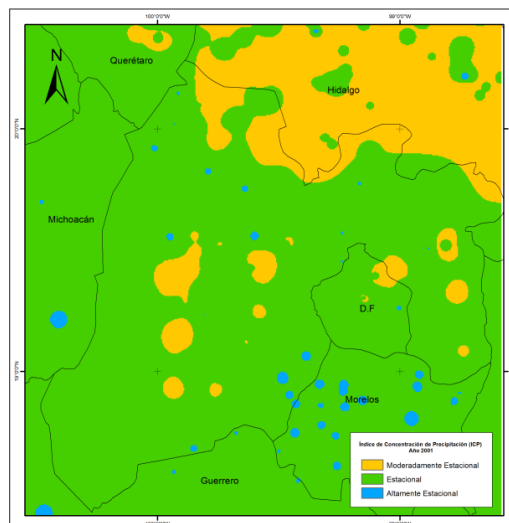
B.21. 2000



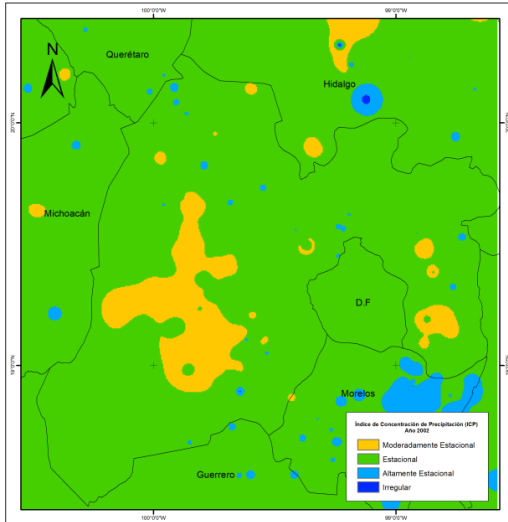
B.19. 1998



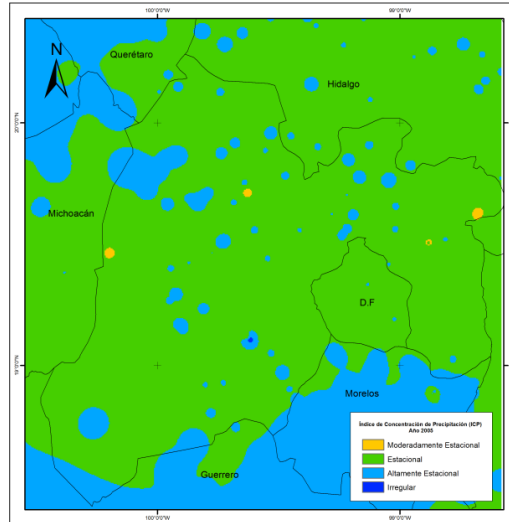
B.22. 2001



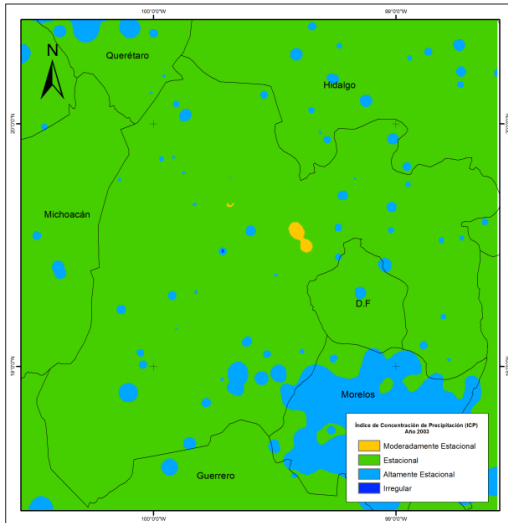
B.23. 2002



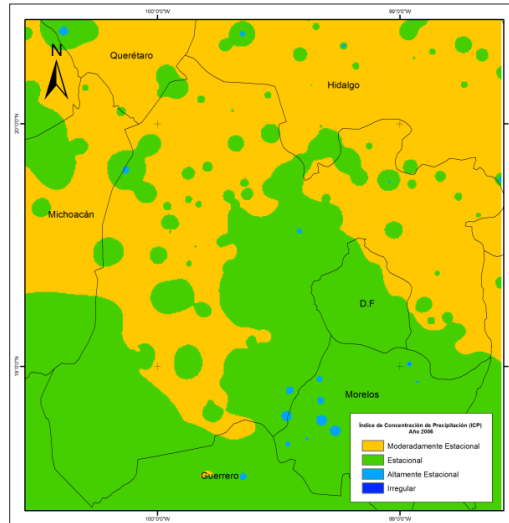
B.26. 2005



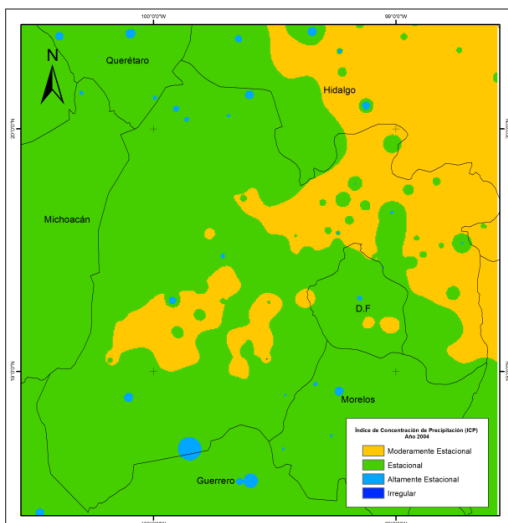
B.24. 2003



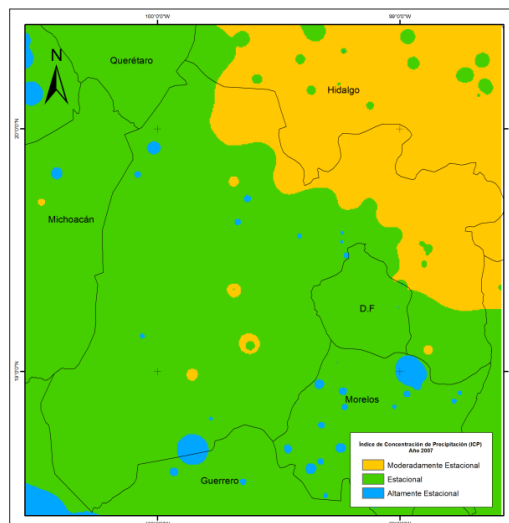
B.27. 2006



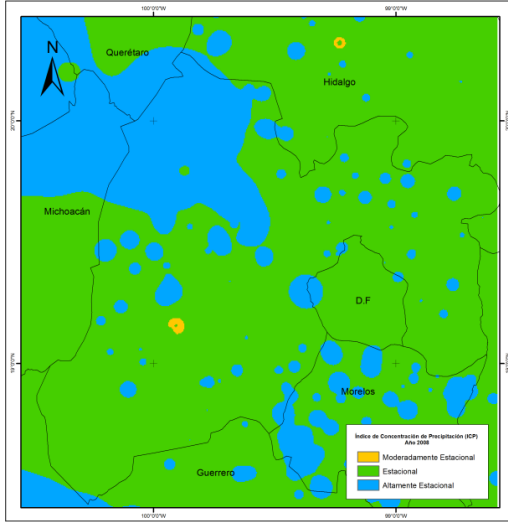
B.25. 2004



B.28. 2007



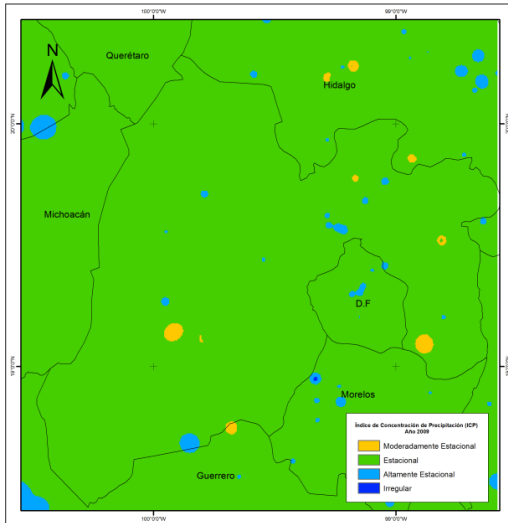
B.29. 2008



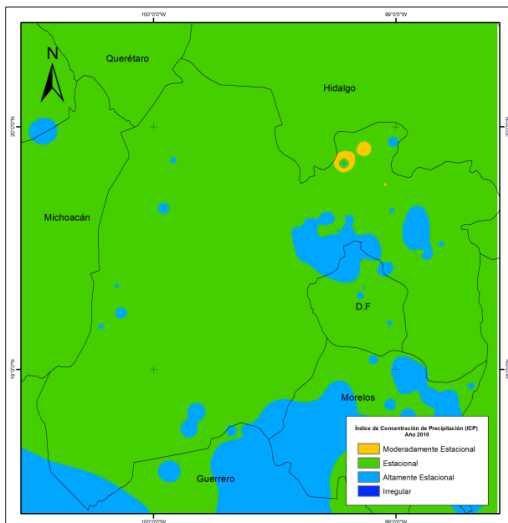
Clasificación

- Moderadamente Estacional
- Estacional
- Altamente Estacional

B.30. 2009

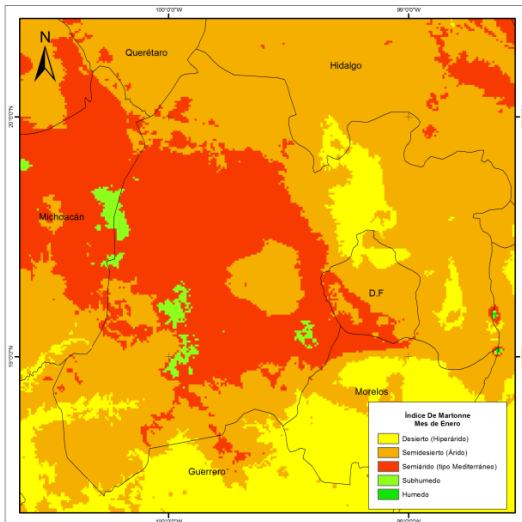


B.31. 2010

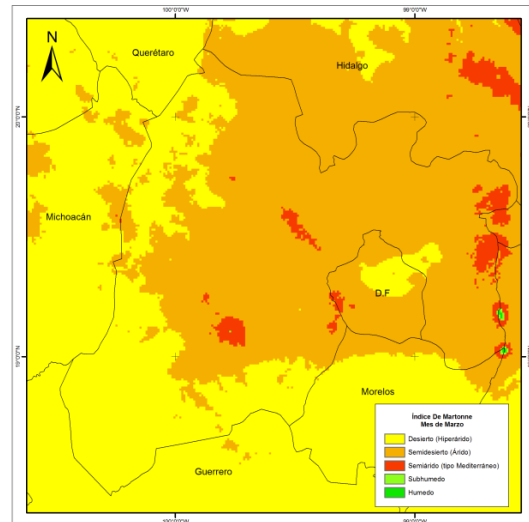


ANEXO C. Mapas de Índice de De Martonne mensual

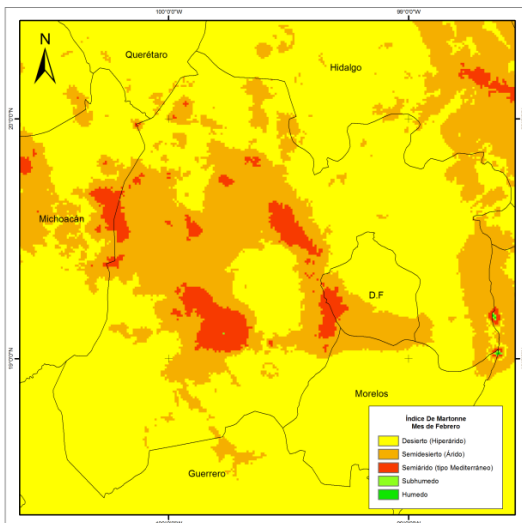
C.1. Enero



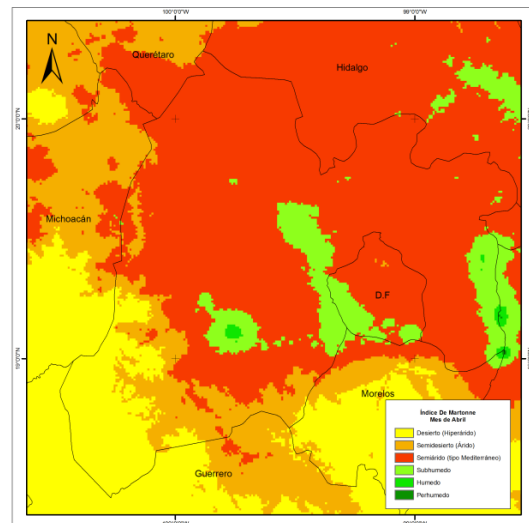
C.3. Marzo



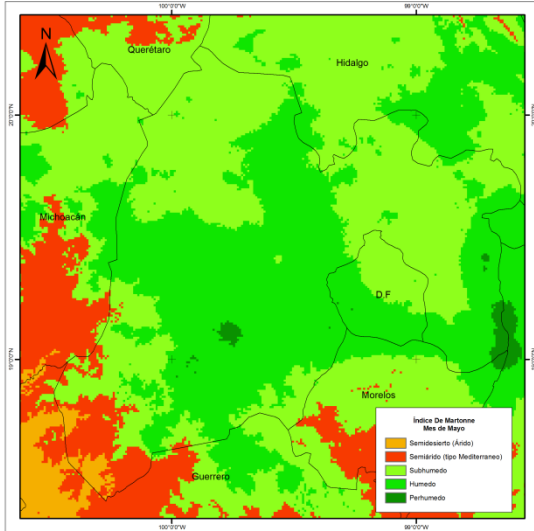
C.2. Febrero



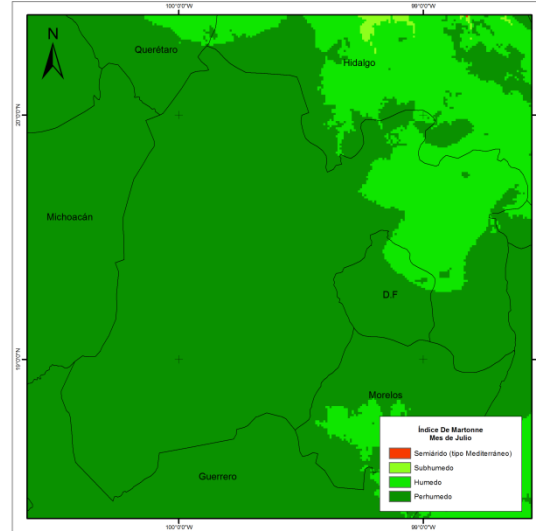
C.4. Abril



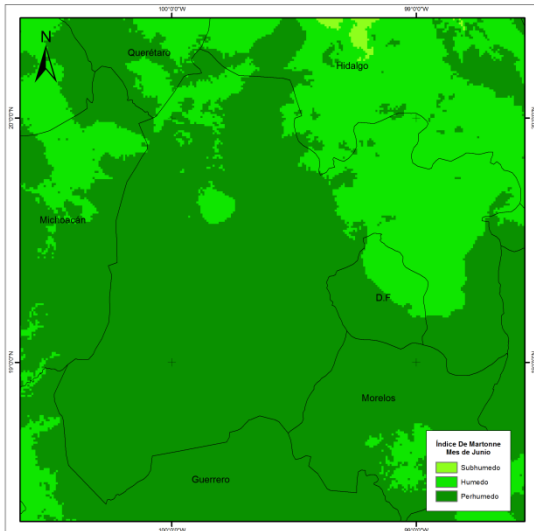
C.5. Mayo



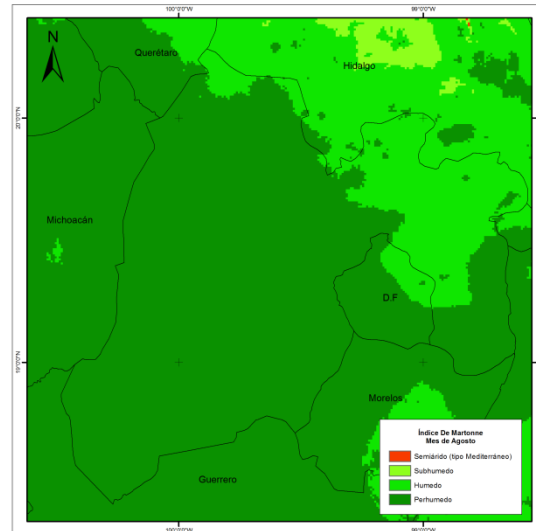
C.7. Julio



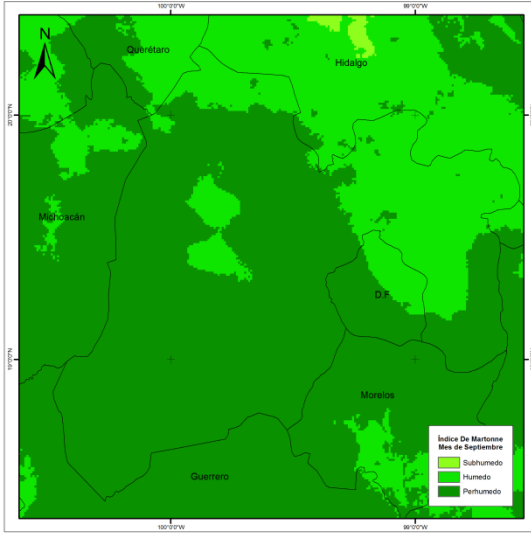
C.6. Junio



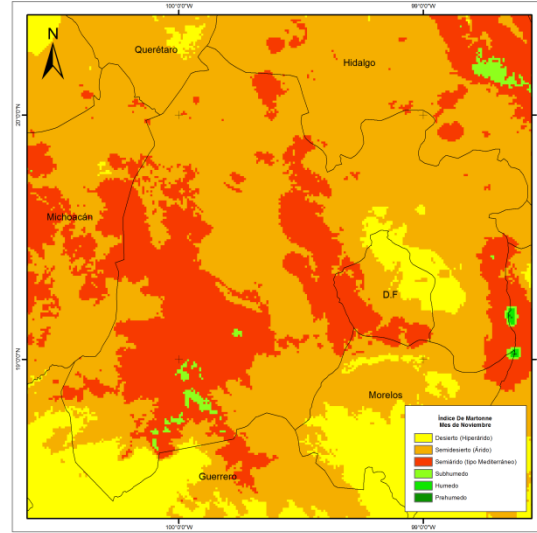
C.8. Agosto



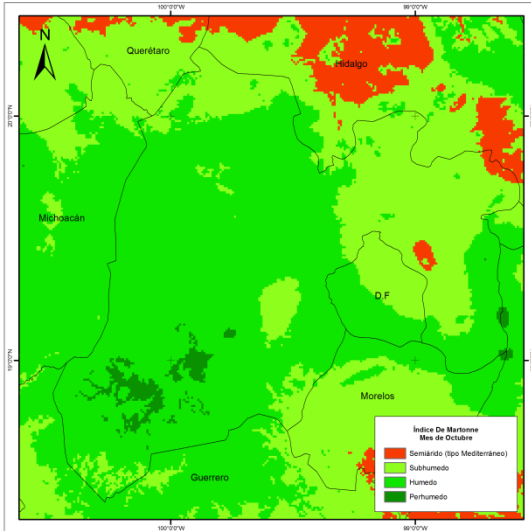
C.9. Septiembre



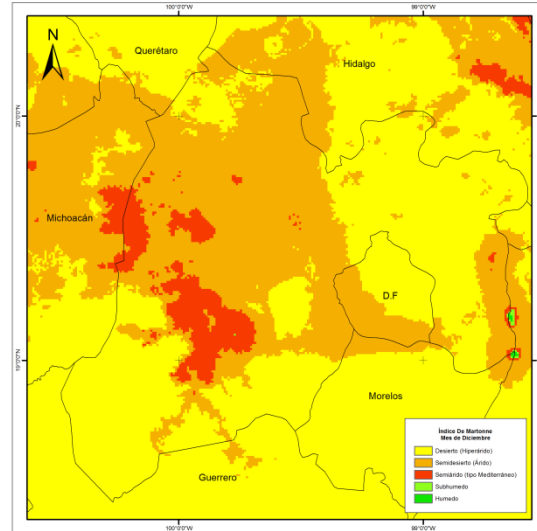
C.11. Noviembre



C.10. Octubre



C.12. Diciembre

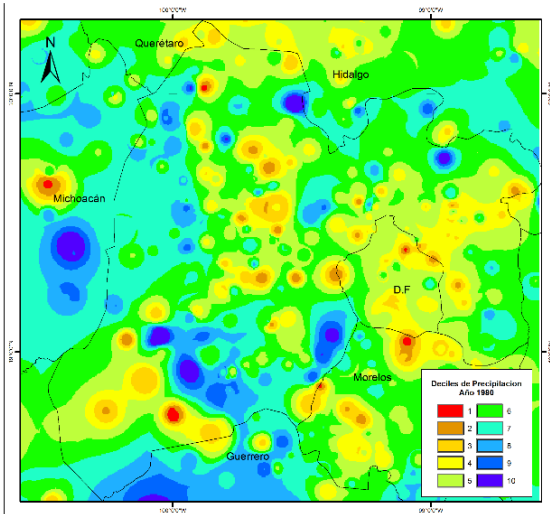


Clasificación

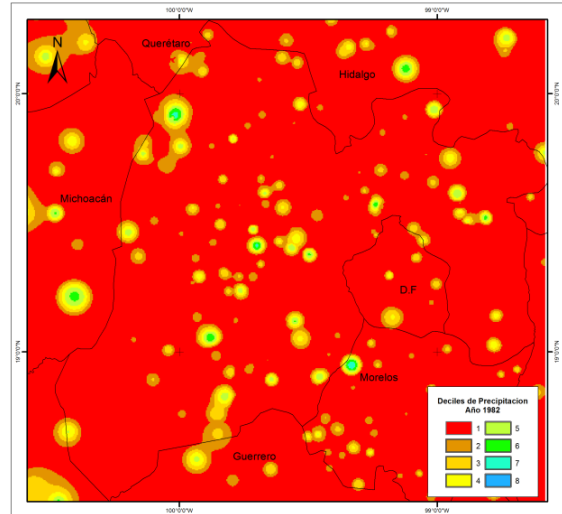
- Desierto (Hiperárido)**
- Semidesierto (Árido)**
- Semiárido (tipo Mediterráneo)**
- Subhúmedo**
- Húmedo**

ANEXO D. Mapas anuales de Deciles de precipitación

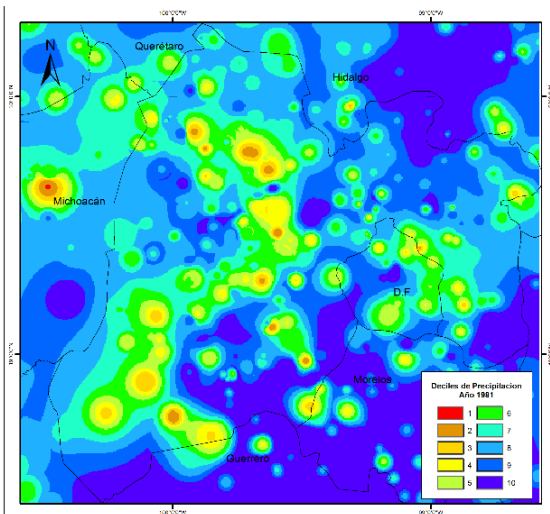
D.1. 1980



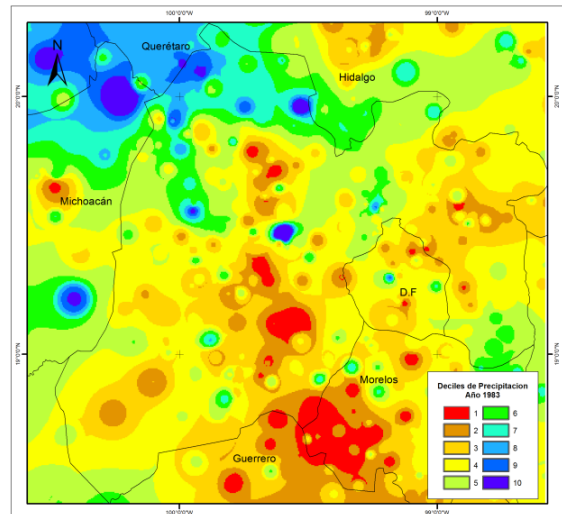
D.3. 1982



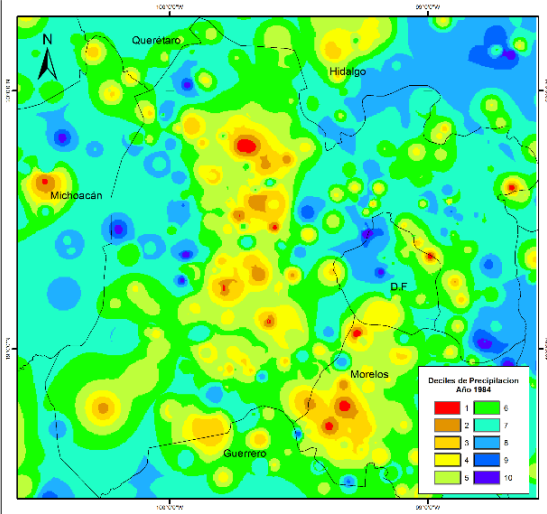
D.2. 1981



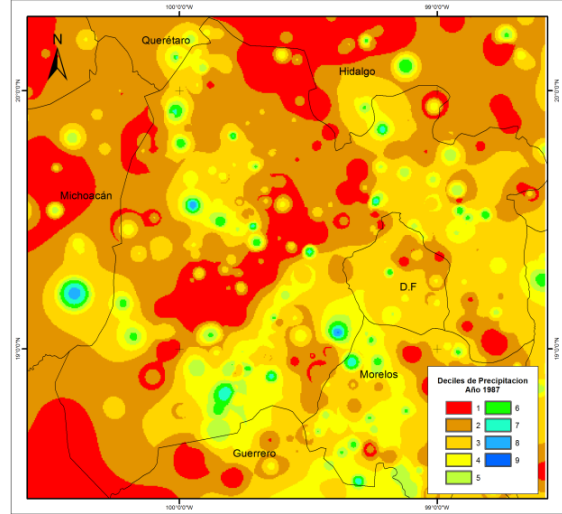
D.4. 1983



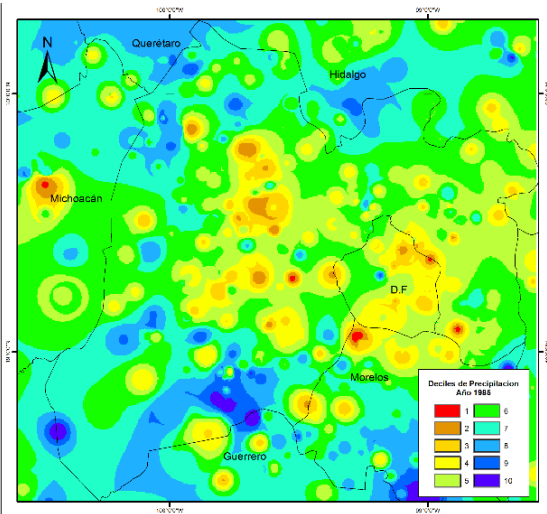
D.5. 1984



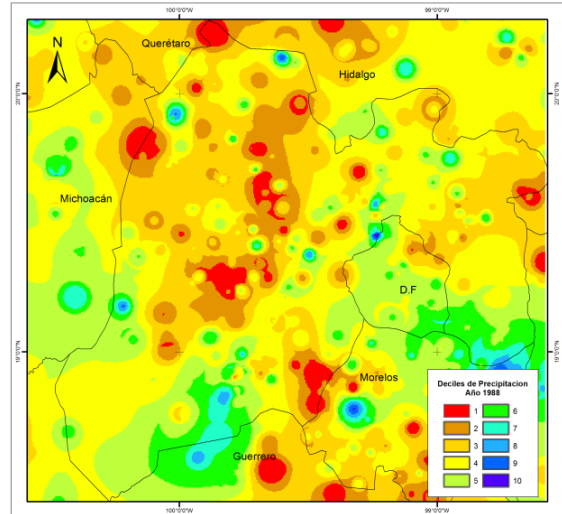
D.8. 1987



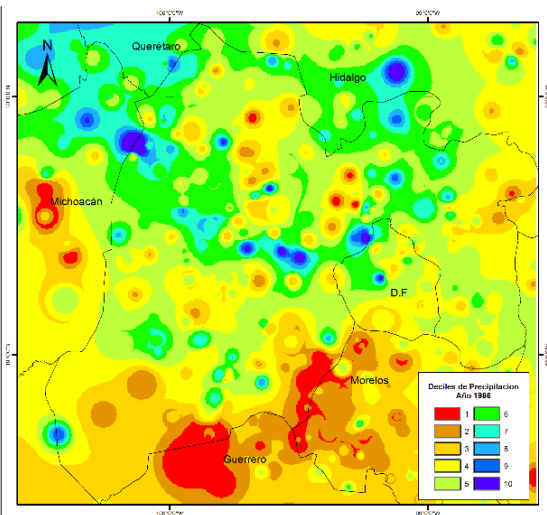
D.6. 1985



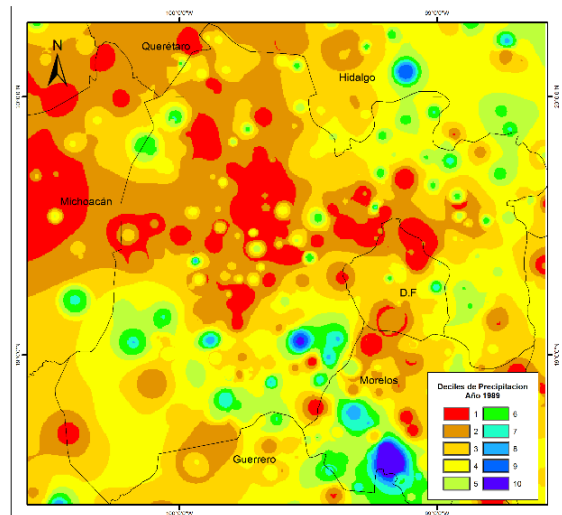
D.9. 1988



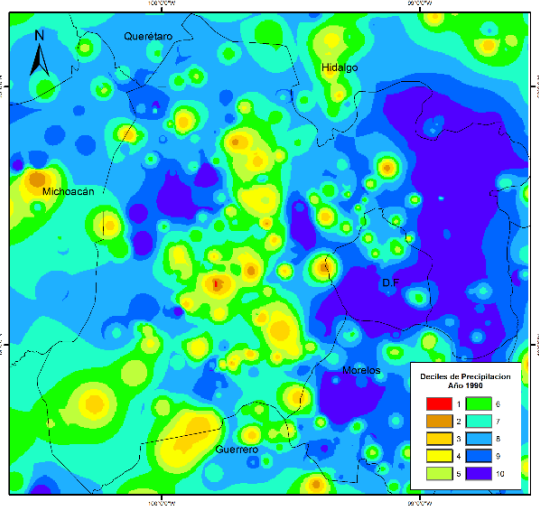
D.7. 1986



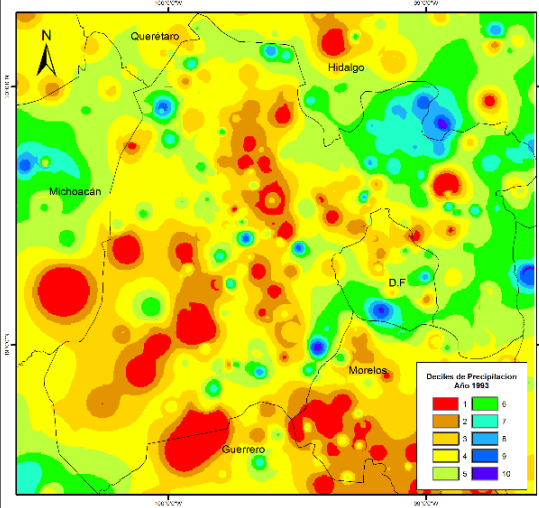
D.10. 1989



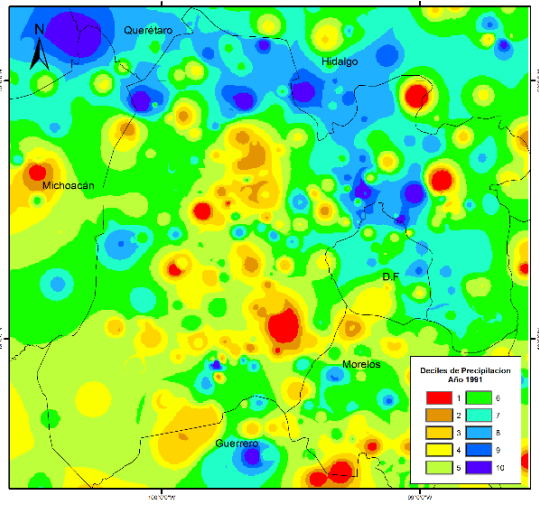
D.11. 1990



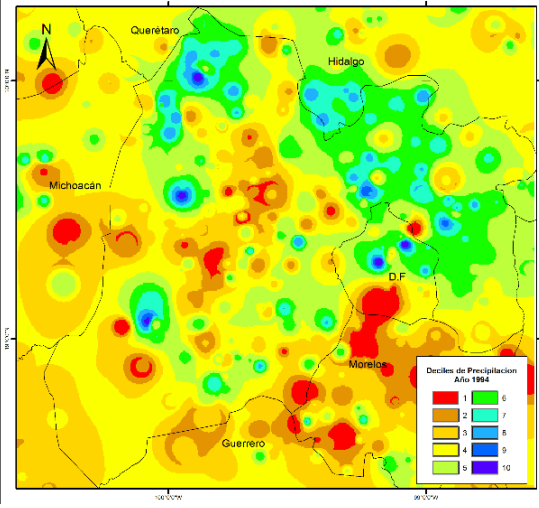
D.14. 1993



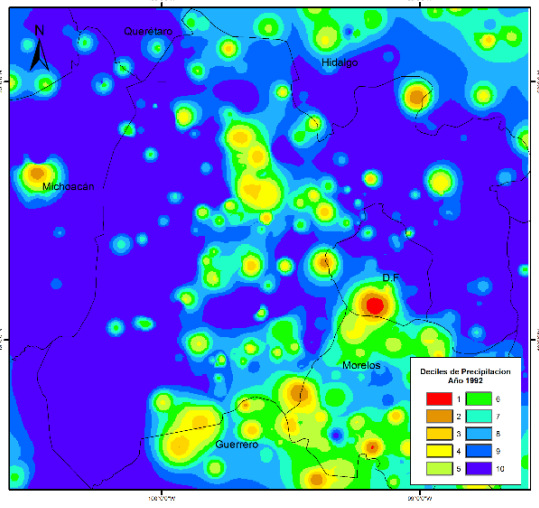
D.12. 1991



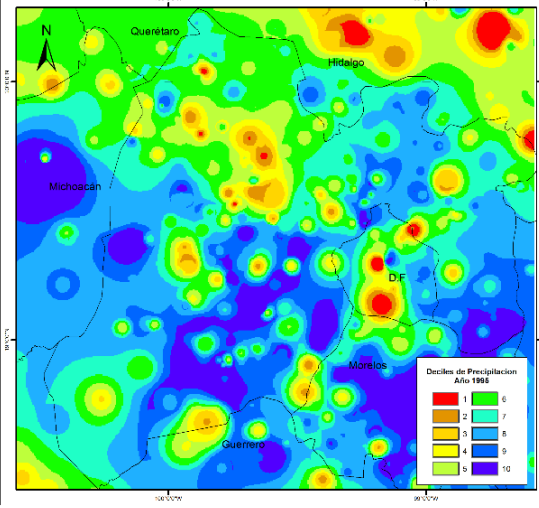
D.15. 1994



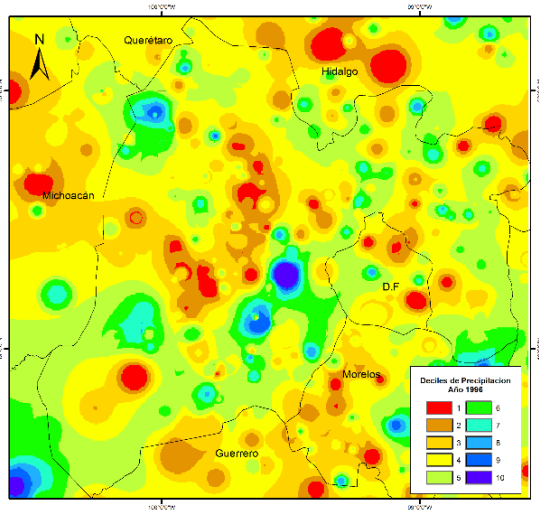
D.13. 1992



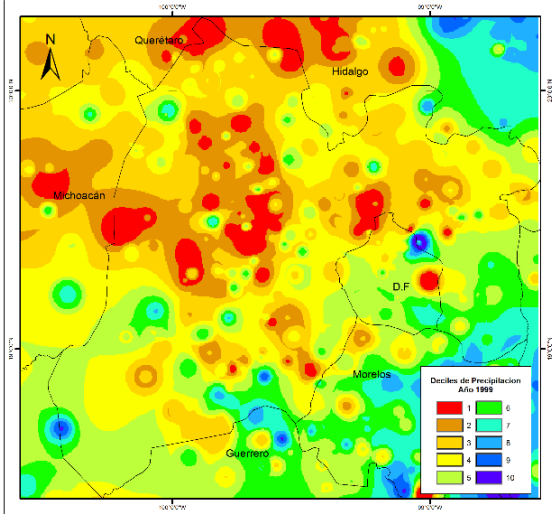
D.16. 1995



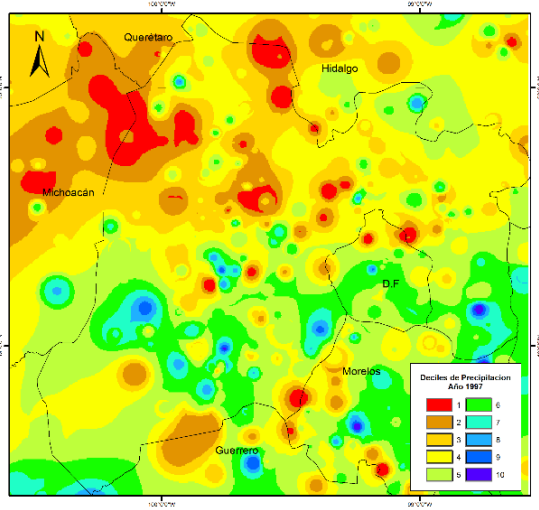
D.17. 1996



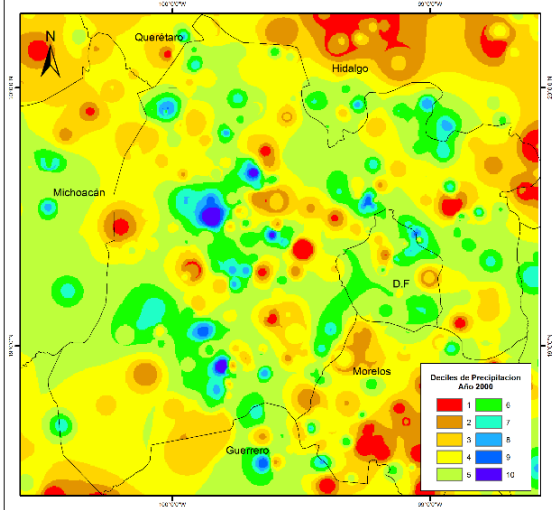
D.20. 1999



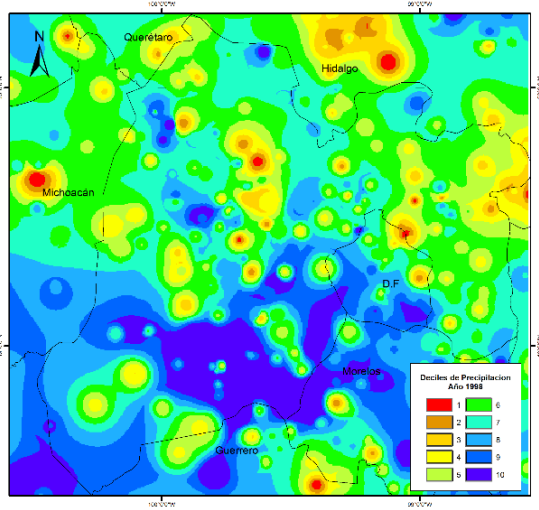
D.18. 1997



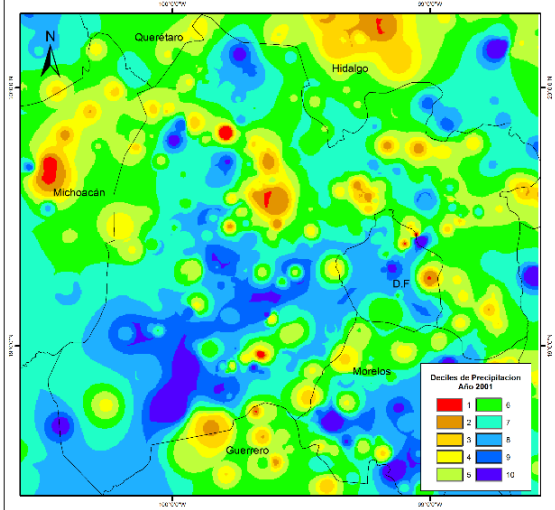
D.21. 2000



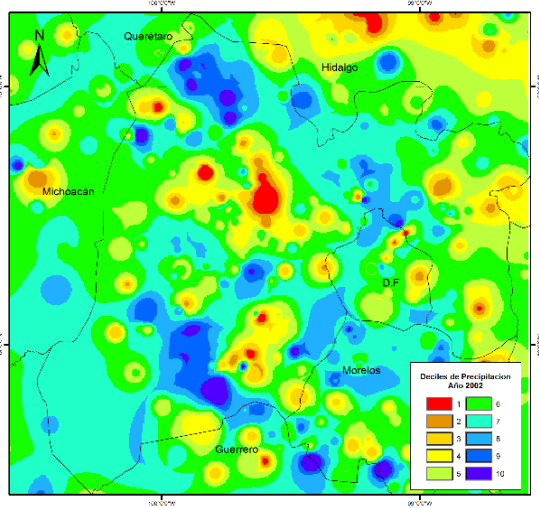
D.19. 1998



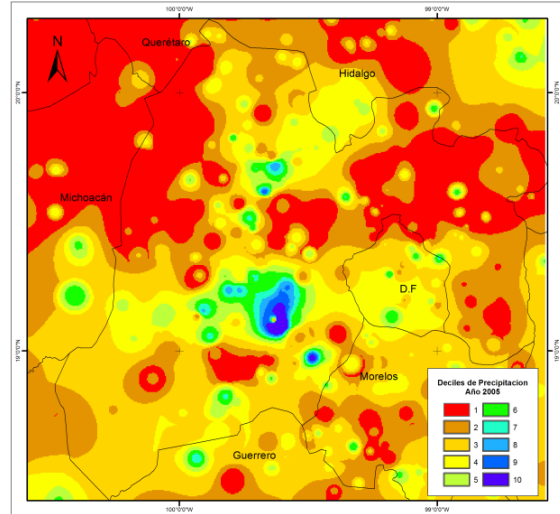
D.22. 2001



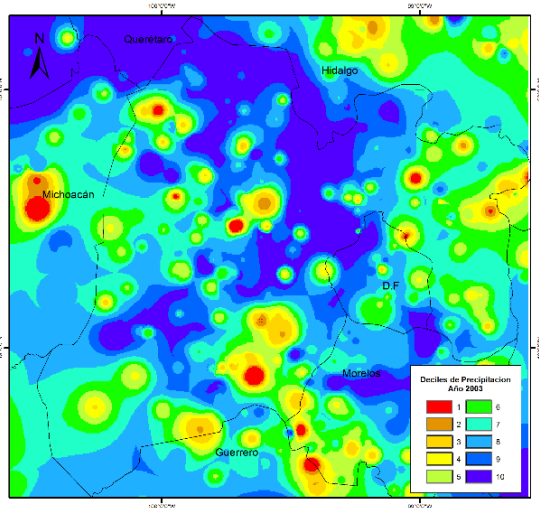
D.23. 2002



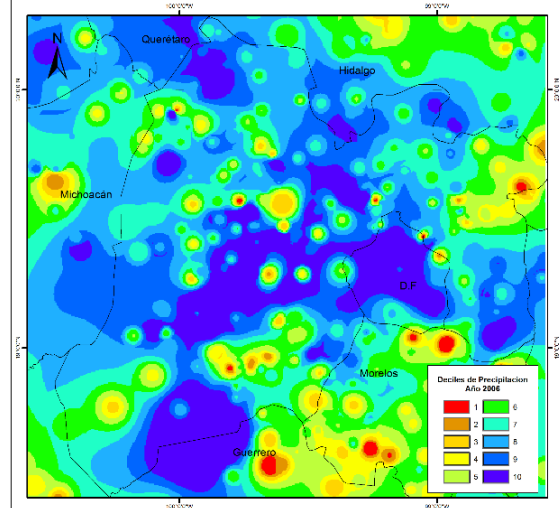
D.26. 2005



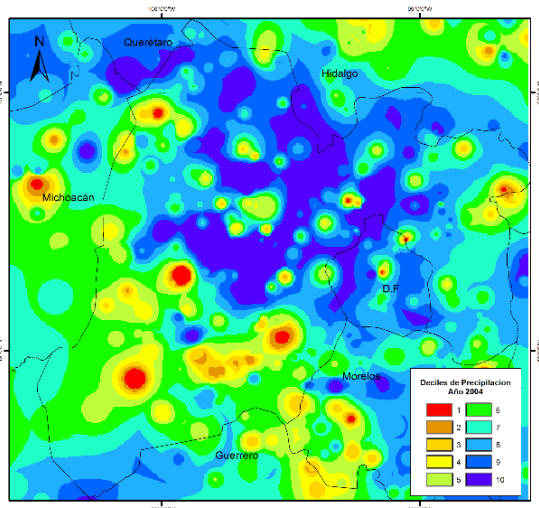
D.24. 2003



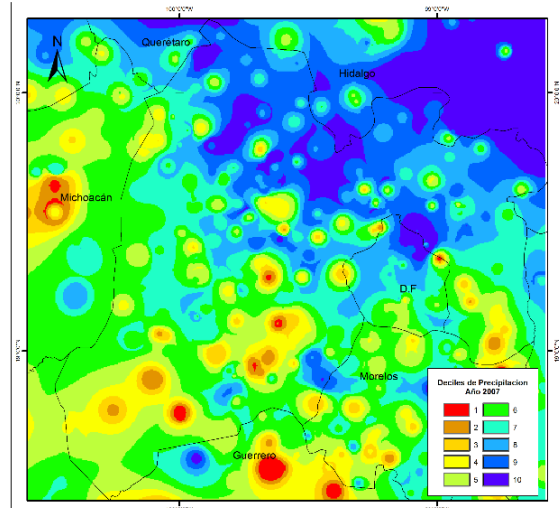
D.27. 2006



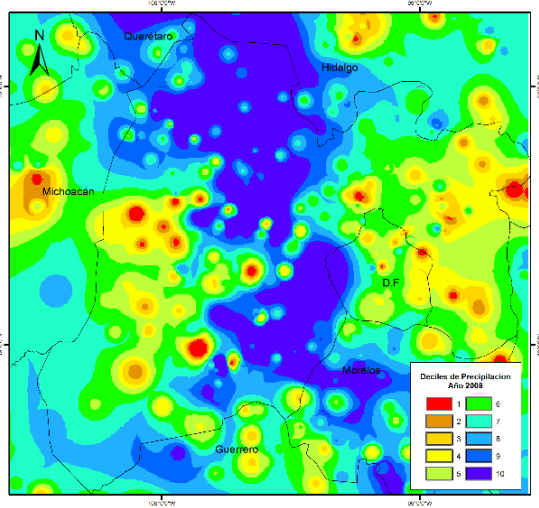
D.25. 2004



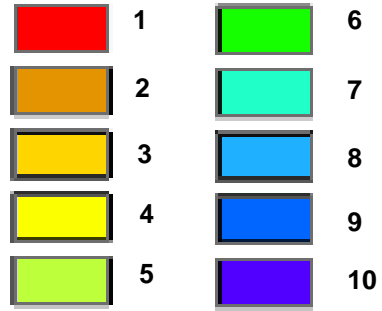
D.28. 2007



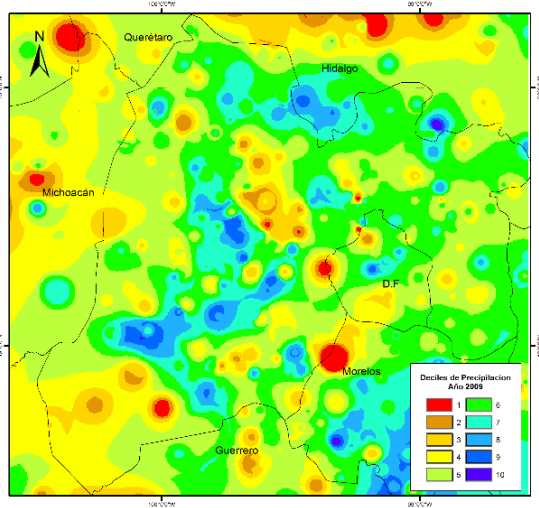
D.29. 2008



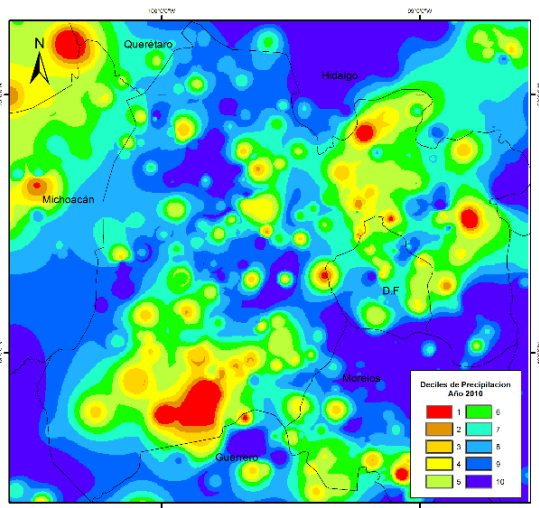
Clasificación



D.30. 2009

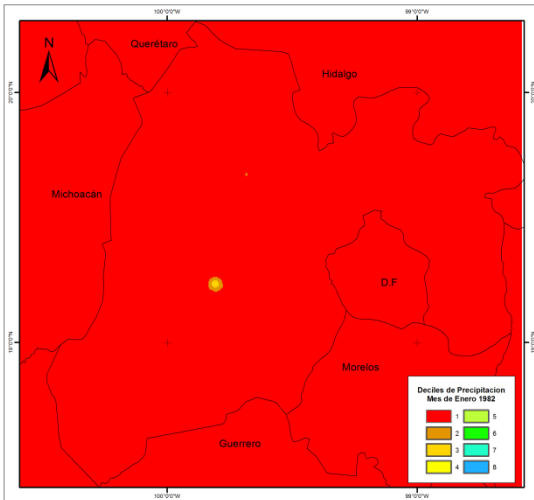


D.31. 2010

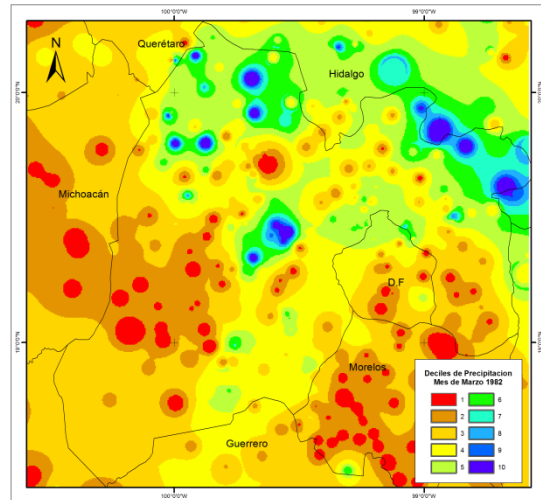


ANEXO E. Mapas mensuales de Deciles de precipitación años 1982 y 1992

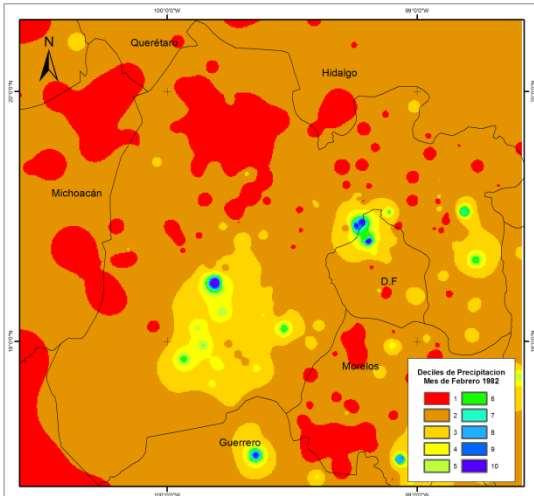
D.1. Enero, 1982



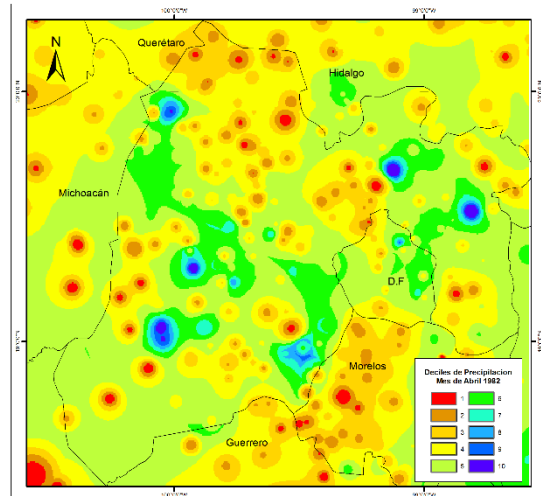
D.3. Marzo, 1982



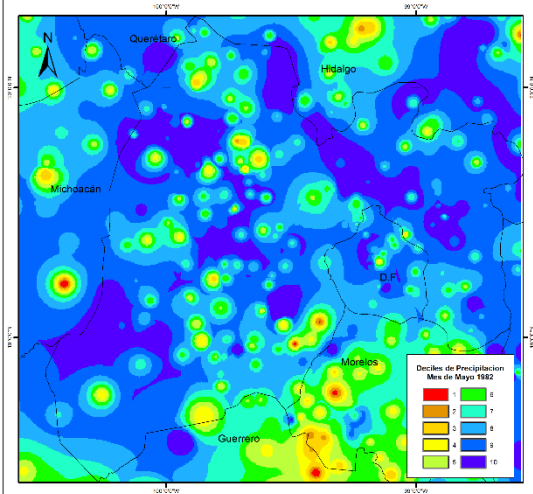
D.2. Febrero, 1982



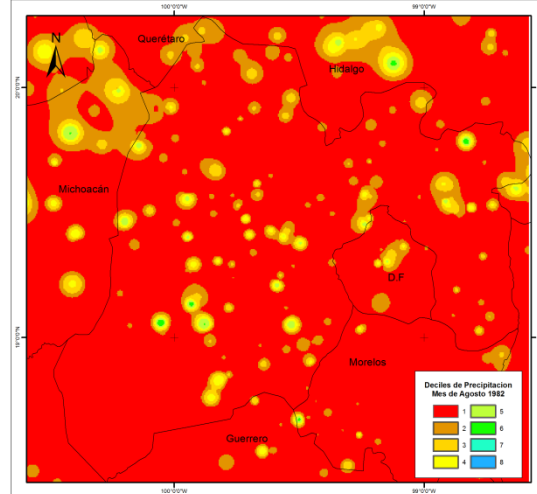
D.4. Abril, 1982



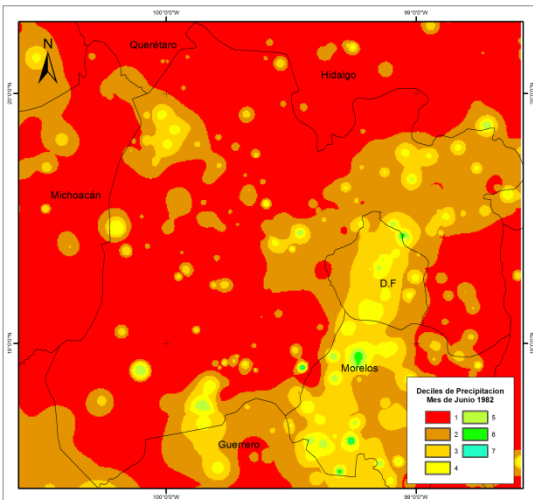
D.5. Mayo, 1982



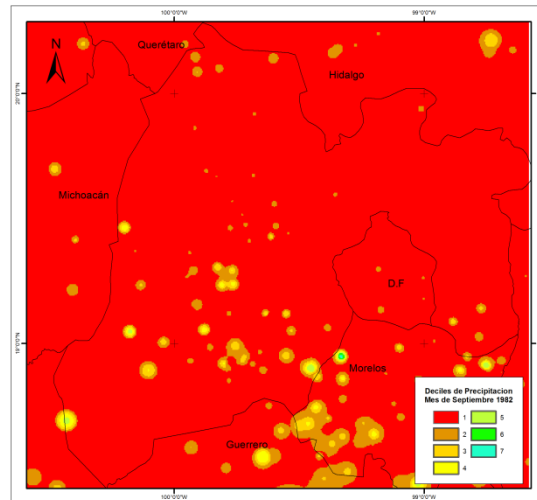
D.8. Agosto, 1982



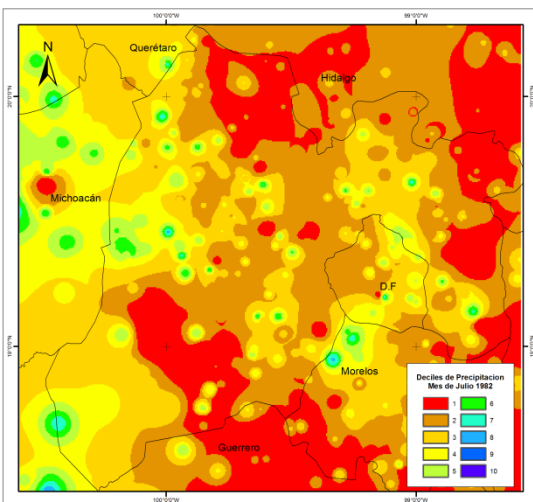
D.7. Junio, 1982



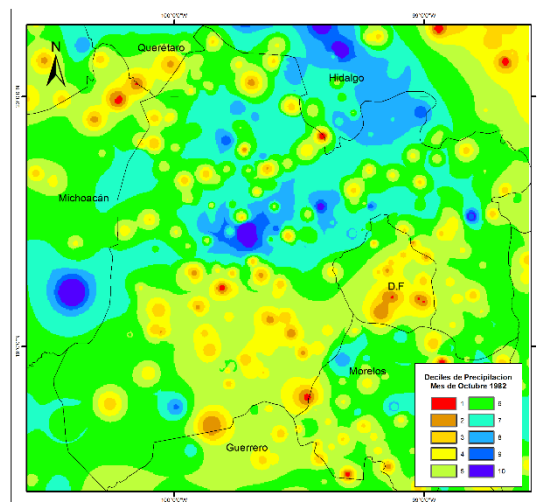
D.9. Septiembre, 1982



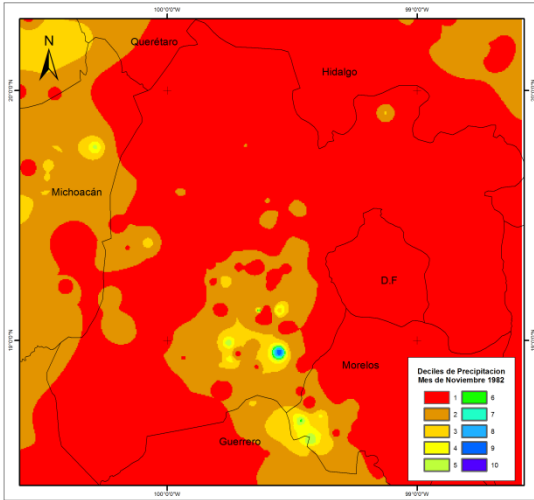
D.7. Julio, 1982



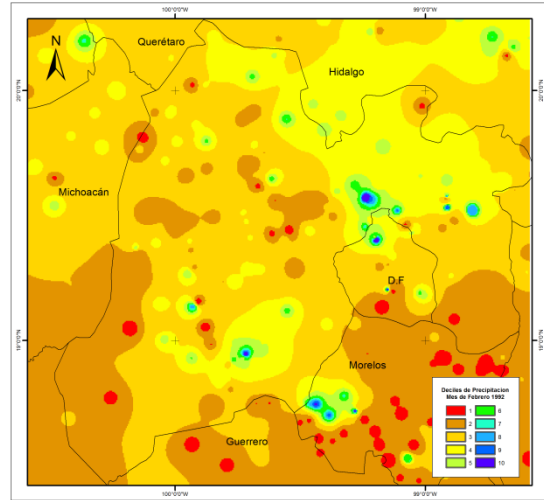
D.10. Octubre, 1982



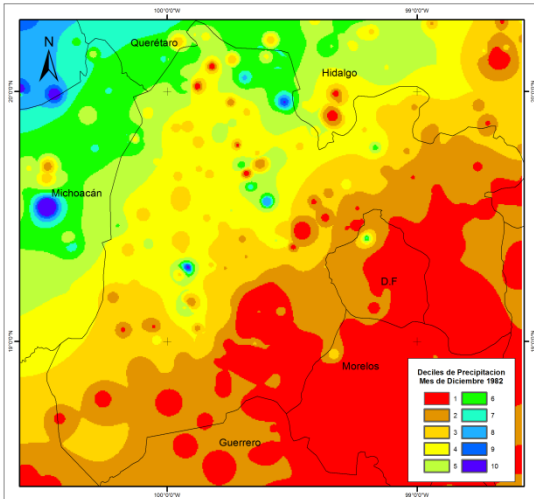
D.11. Noviembre, 1982



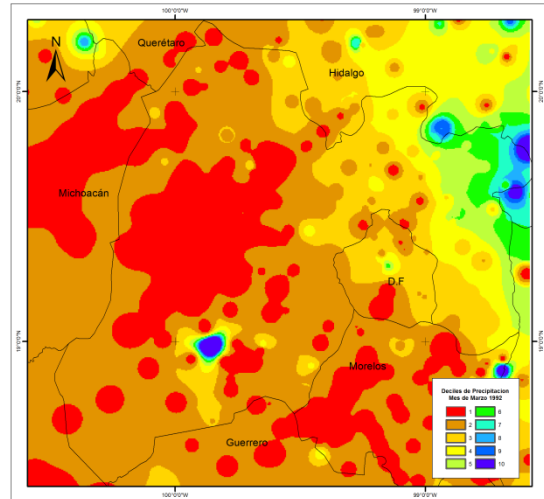
D.14. Febrero, 1992



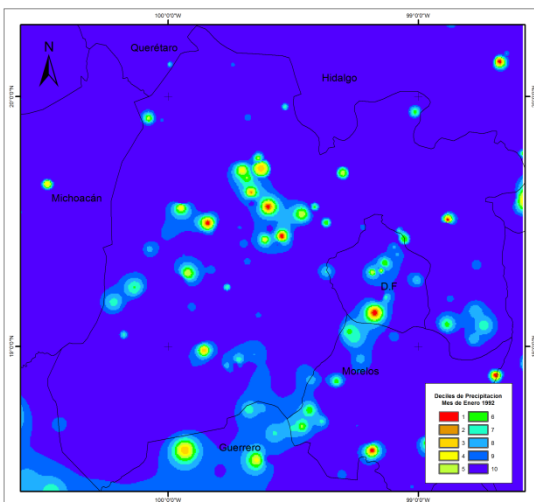
D.12. Diciembre, 1982



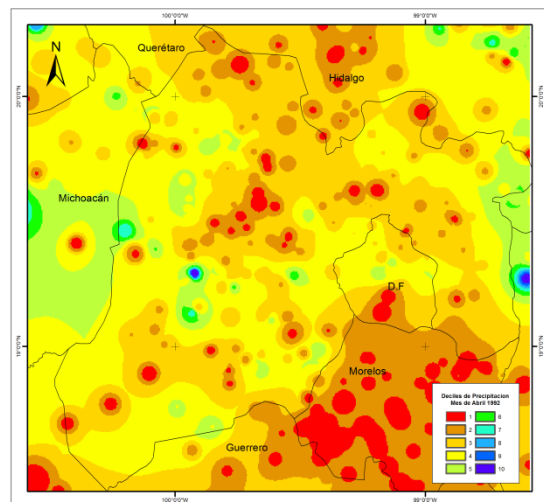
D.15. Marzo, 1992



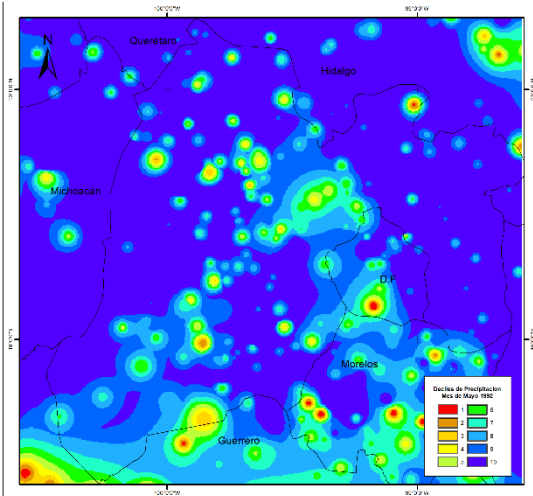
D.13. Enero, 1992



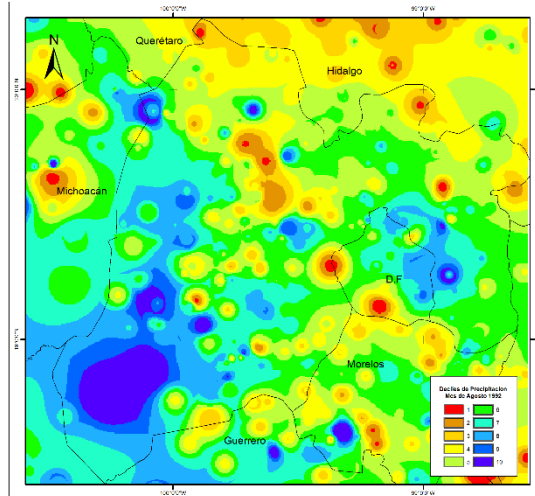
D.16. Abril, 1992



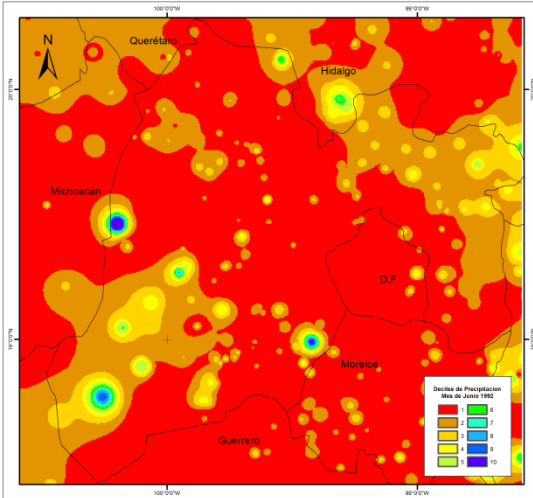
D.17. Mayo, 1992



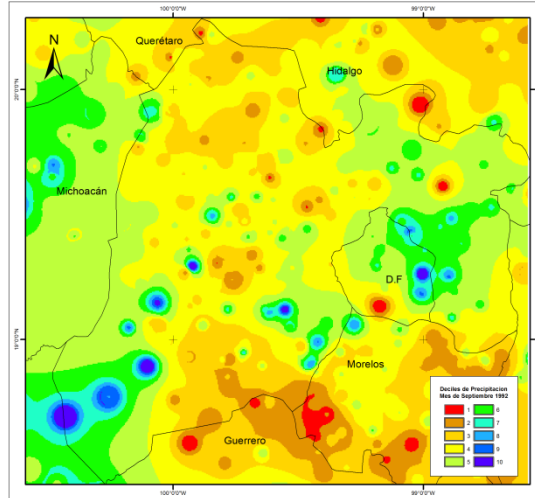
D.20. Agosto, 1992



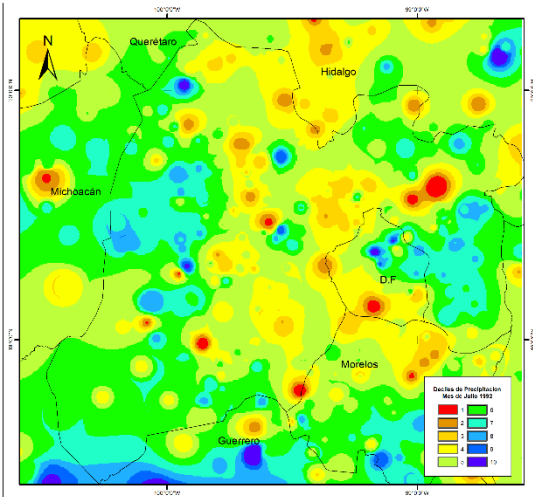
D.18. Junio, 1992



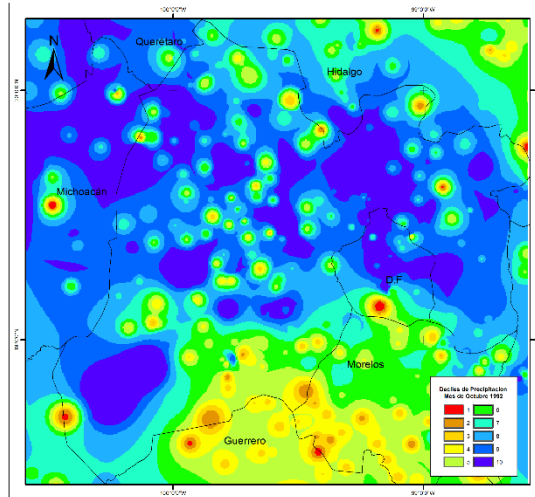
D.21. Septiembre, 1992



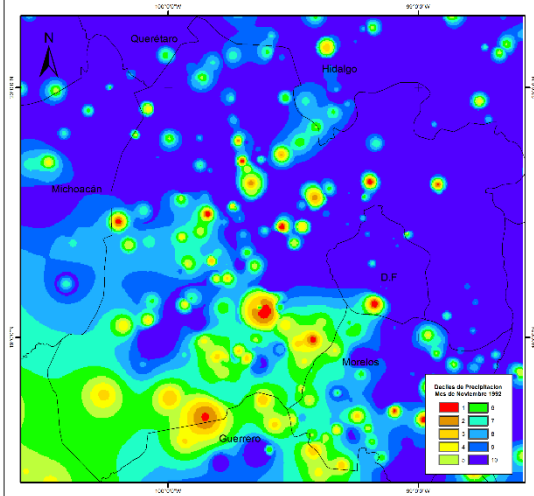
D.19. Julio, 1992



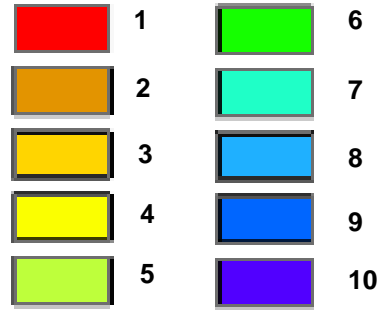
D.22. Octubre, 1992



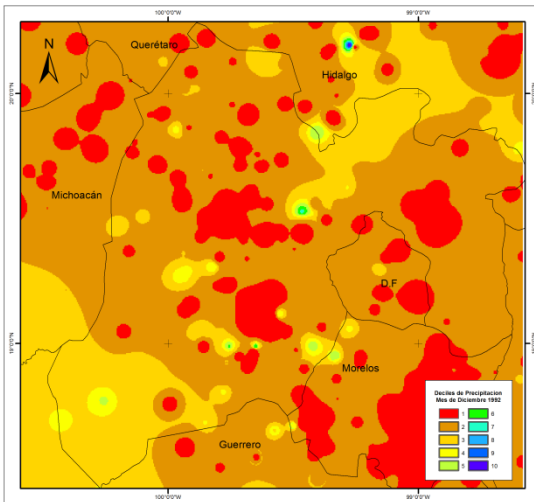
D.23. Noviembre, 1992



Clasificación



D.24. Diciembre, 1992



ANEXO F. Tabla de concentrado de índices encontrados de aridez y sequía

ID	ÍNDICE	CARACTERÍSTICAS	FÓRMULA	VARIABLES	AUTOR	AÑO
1	Índice de Sequía Perpendicular (PDI)	<ul style="list-style-type: none"> * Se calcula con la cantidad de lluvia y humedad del suelo. * Es eficaz para las aplicaciones de suelo desnudo o las etapas iniciales de crecimiento de la vegetación, pero no puede ser utilizado para superficies con vegetación. 	$PDI = \frac{1}{\sqrt{\alpha^2 + 1}} (R_{RED} + \alpha R_{NIR})$	<p>α es la pendiente de la línea de suelo, y R_{RED} y R_{NIR} se refiere a la reflectancia de las bandas rojo e infrarrojo cercano.</p>	Ghulam, A. J., Qin, Q. y Zhan, Z.	2006
2	Índice de Sequía Perpendicular Modificado (MPDI)	<p>Se basa en dos condiciones; estado de la vegetación y la humedad del suelo.</p>	$MPDI = \frac{R_{RED} + \alpha R_{NIR} - F_V (R_{V, RED} + \alpha R_{V, NIR})}{(1 - F_V) \sqrt{\alpha^2 + 1}}$ $F_V = 1 - \left(\frac{VI - VI_{MAX}}{VI_{MIN} - VI_{MAX}} \right)^k$	<p>$R_{V, RED} + \alpha R_{V, NIR}$ es la reflectancia de las bandas rojo e infrarrojo cercano. F_V es el porcentaje de cobertura de vegetación. VI_{MIN} - VI_{MAX} son los índices de vegetación para una superficie 100% vegetación. K es el valor de una constante que minimiza la estimación del RMSE.</p>	Ghulam, A., Qiming, Q., Tashpolat T., Zhao-Liang L.	2007
3	Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI)	<ul style="list-style-type: none"> * Fue creado para medir la pérdida de humedad, basándose en el concepto de oferta y demanda de la ecuación del balance hídrico, teniendo en cuenta otras variables además de la escasez de precipitaciones en lugares determinados. * Parte de un balance de humedad mensual. * Permite medir intensidad, duración y extensión de la sequía. * No está diseñado para grandes variaciones topográficas a través de una región y no considera la acumulación de nieve y su subsecuente escorrentía. * Proporciona medidas estandarizadas de condiciones de humedad, de tal forma que permita hacer comparaciones entre condiciones locales y entre duraciones. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Cálculo del balance hidrológico. 2. Cálculo de la evapotranspiración climática 3. Cálculo de la evapotranspiración por el método de Thornthwaite. 4. Ajuste de la ecuación: $X_i = \frac{\sum_{i=1}^i Z_i}{(a t + b)}$	<p>Z_i son los valores de la anomalía de la humedad en mm.</p>	Palmer	1965
4	Palmer Hydrological Drought Index (PHDI)	<ul style="list-style-type: none"> * Igual que el PDSI pero más exigente al considerar el término de una sequía. 			Palmer	1965
5	Índice de Humedad de Cultivos (CMI)	<ul style="list-style-type: none"> * Utiliza el balance hidrológico y las relaciones entre evapotranspiración real y potencial para hacer un seguimiento en forma semanal de las condiciones de los cultivos. * Monitorea las condiciones de humedad a corto plazo. 		<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura media. - Precipitación total. 	Palmer	1968

6	Índice de Condición de la Vegetación (VCI)	* Mide la densidad relativa de la vegetación usando mínimo y máximo de NDVI para varios años.	$VCI = \left(\frac{NDVI_i - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right) * 100$	NDVI	Kogan	1995
7	Índice de Condición de la Temperatura (TCI)	* Ofrece la oportunidad de identificar los cambios en la salud de la vegetación debido a los efectos térmicos como la sequía prolifera cuando la escasez de humedad es acompañada por alta temperatura.	$TCI = 100 * \left(\frac{BT_{max} - BT}{BT_{max} - BT_{min}} \right)$	BT; brillantes de la temperatura.		
8	Vegetación Health Index (VHI)	* Representa el efecto combinado de la humedad y el estrés térmico, el estrés en la salud de la vegetación y se encuentra que es un índice de sequía de supervisión efectiva.	$VHI = a * VCI + b * TCI$	VCI y TCI		
9	Índice temperatura-Vegetación (TVX)	*Considerada como una técnica o un algoritmo. * Se basa en la suposición de que la temperatura de la superficie de un dosel cerrado es igual a la temperatura del aire y así la temperatura del aire se puede derivar mediante la solución de la ecuación. LST= a + b * SVI	$TVX = \frac{LST}{NDVI}$	LST: Land Surface Temperature (obtenido de una imagen MODIS)		
10	EVI (Índice de Vegetación Mejorado)	* Obtiene la respuesta de las variaciones estructurales del dosel vegetal incluyendo el índice de área foliar LAI (Leaf Área Index), tipo y arquitectura del dosel y fisonomía de la planta. * Fue desarrollado para optimizar la señal de la vegetación con sensibilidad mejorada para altas densidades de biomasa, lográndose esto al separar la señal proveniente de la vegetación y la influencia atmosférica. *Este índice resulta más adecuado para zonas con poca cobertura vegetal y gran efecto del suelo desnudo. * Los valores del índice reflejan el estado de la vegetación y una diferencia negativa con respecto a la media se puede interpretar como resultado de una disminución de la biomasa fotosintéticamente activa.	$EVI = G * \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} - C_1 R_{RED} - C_2 R_{BLUE} + L}$	L: es la corrección al efecto del fondo del follaje. C ₁ y C ₂ : son coeficientes para la corrección del efecto del aerosol en las bandas rojo y azul.		

11	Porcentaje de Precipitación normal (PPN)	<p>* Permite observar la relación que existe entre la precipitación acumulada en un periodo de tiempo determinado y la precipitación media anual para una región, y se expresa de manera porcentual</p> <p>* Los valores porcentuales estimados para cada año indican el déficit (valores negativos) y el excedente (valores positivos) en la precipitación anual ocurrida. Por su parte, valores porcentuales próximos a cero corresponden a valores cercanos al promedio histórico.</p> <p>* La precipitación media anual se le conoce como precipitación normal y se obtiene a partir del valor promedio de las precipitaciones anuales ocurridas en un periodo no menor de 30 años.</p>	Se calcula dividiendo la precipitación actual entre la normal obtenida en un lapso no menor de 30 años y se multiplica por 100	Precipitación		
12	IRS (Índice de Riesgo de Sequía)	<p>* Se definió para poder determinar la severidad y duración de la sequía y para predecir el inicio y el final de este período</p> <p>* Es adaptable a cada región en particular y su principal fortaleza es la habilidad de tomar en cuenta tanto el clima como los factores de suministro de agua</p>		- Precipitación media anual corregida en función de la temperatura media anual. - Estacionalidad pluviométrica. - Variabilidad y persistencia de la sequía.		
13	China Z Index (CZI)	<p>* Se basa en el método de transformación de raíz cúbica de Wilson-Hilferty.</p> <p>* Supone que los datos de precipitación responden satisfactoriamente a la distribución teórica de probabilidad Pearson del tipo III.</p>				
14	Percent of Normal (PNI)	<p>* Es una de las medidas de desviación de las precipitaciones a largo plazo, más sencillas. Se toma como "Normal" al valor promedio de precipitación, en un lugar y para un período prolongado de tiempo. Puede ser calculado para un mes, una temporada o un año.</p>				
15	Effective Drought Index (EDI)	<p>* Este índice estima el inicio y fin de una sequía.</p> <p>* Se calcula la cantidad de precipitación necesaria para la recuperación del déficit acumulado desde el inicio de la sequía, debido a los datos diarios de precipitación.</p> <p>* Es un índice estandarizado con precipitación efectiva (PE), es decir el valor acumulado de precipitación diaria con una reducción en función del tiempo.</p>	$EDI = \frac{DEP}{ST (DEP)}$ $DEP = EP - MEP$ $EP_i = \sum_{n=1}^i \left[\left(\sum_{m=1}^n P_m \right) / n \right]$	<p>- EP: valor acumulado de precipitación diaria con una función de reducción en función del tiempo.</p> <p>- P_m: días de precipitación m antes</p> <p>- i: duración de la suma de los días (365 días)</p> <p>- DEP: desviación de la precipitación efectiva</p> <p>- MEP: media de la precipitación efectiva</p>	Byun y Wilhite	1999

16	Índice de déficit hídrico (WDI)	<p>* Se deriva de la interpretación del trapecioide basado en la relación entre la diferencia de temperatura superficial y temperatura del aire (LST-Ta) y el índice de vegetación.</p> <p>* Solamente requiere como dato de entrada Ta siendo factible su aplicación a nivel regional y cercano al tiempo real.</p> <p>* Puede aplicarse a zonas semiáridas cubiertas por superficies mixtas (vegetación y suelo desnudo).</p> <p>* Cuantifica la tasa relativa de flujo de calor latente (o evapotranspiración), presentando valor 0 para superficies completamente húmedas (evapotranspiración sólo limitada por la demanda atmosférica), y 1 para superficies secas donde no existe flujo de calor latente.</p>	$WDI = \frac{\Delta LST_{NDVI, \min} - \Delta LST_{NDVI, \max}}{\Delta LST_{NDVI, \min} - \Delta LST_{NDVI, \max}}$ <p>Mínima ET_{real} (o borde seco):</p> $\Delta LST_{NDVI, \max} = a + bNDVI$ <p>Máxima ET_{real} (o borde húmedo):</p> $\Delta LST_{NDVI, \min} = a' + b'NDVI$		Moran	1994
17	Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI)	<p>* Sirve para evaluar el estado de humedad del suelo.</p>	$TVDI = \frac{LST_{NDVI} - LST_{NDVI \min}}{LST_{NDVI \max} - LST_{NDVI \min}}$ $LST_{NDVI \max} = a + bNDVI$ $LST_{NDVI \min} = a' + b'NDVI$	LST (Land Surface Temperature) es la temperatura de la superficie terrestre.	Sandholt	2002
18	Vegetation Temperature Condition Index (VTCI)	<p>* Ampliamente utilizado para seguimiento de sequías en las planicies de EE.UU.</p>	$VTCI = \frac{LST_{NDVI \max} + LST_{NDVI}}{LST_{NDVI \max} - LST_{NDVI \min}}$	LST es la temperatura de la superficie terrestre.		
19	Normalized difference moisture index (NDMI)	<p>* Es sensible a los cambios en el contenido de agua líquida del margen (marquesina) de la vegetación.</p> <p>* Se ha demostrado mejoras sobre el NDVI para la detección de cambios en la cubierta forestal.</p>	$NDMI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{MIR})}{(\rho_{NIR} + \rho_{MIR})}$	<p>- MIR: infrarrojo medio</p> <p>- NIR: infrarrojo cercano</p> <p>- PMIR: es la superficie de reflectancia en el MIR (2105-2155 nm) de la región del espectro electromagnético</p>	Gao	1996
20	Anomaly of Normalized Difference Vegetation Index (NDVIA)	<p>* Es una desviación de la media a largo plazo de un mes específico que indica las condiciones de sequía en comparación con el rango promedio de tiempo.</p>	$NDVIA_{ijk} = \overline{NDVI_{ij}} - NDVI_{ijk}$	Donde el NDVI _{ij} y el NDVI _{ijk} son el promedio de varios años del NDVI para el pixel i en 8 días j, y 8 días NDVI por pixel para i en 8 días j por año k respectivamente.		

21	Anomaly of Normalized Difference Moisture Index (NDMIA)	<ul style="list-style-type: none"> * Es útil para medir la salida (variación o desviación) de la condición de humedad de la superficie en el área de estudio. * Tanto el NDVIA como el NDMIA son útiles para identificar la extensión espacial de la vegetación y las condiciones de sequía hidrológica. 	$NDMIA_{ijk} = \overline{NDMI}_{ij} - NDMI_{ijk}$			
22	Standardised Water-level Index (SWI)	<ul style="list-style-type: none"> * Evalúa el déficit de recarga de agua subterránea * Es útil para el análisis de la sequía hidrológica * Examina las estadísticas de los caudales 	$SWI = (W_{ij} - W_{im}) / \sigma$	<ul style="list-style-type: none"> - W_{ij}, es el nivel medio de agua para la i y la j observación. - W_{im} es la media estacional. - σ es la desviación estándar. 		
23	Standardized Vegetation Index (SVI)	* Basado en el cálculo de la puntuación z para cada ubicación del pixel AVHRR.	$SVI = P(Z < z_{ijk})$ $z_{ijk} = \frac{NDVI_{ijk} - \overline{NDVI}_{ij}}{\sigma_{ij}}$			
24	Drought Severity Index (DSI)		$DSI = 1 - R = \frac{H - H_{wet}}{H_{dry} - H_{wet}}$	R: relative plant/ available soil/water content		
25	Decile Index (DI)	<ul style="list-style-type: none"> *Cálculos simples y exactos. * Proporciona uniformidad en las clasificaciones de la sequía. * Requiere de un registro climático amplio. * Es un índice donde se construye la distribución de frecuencia acumulada a partir de los datos de precipitación total mensual de una amplia serie de tiempo. Dicha distribución es dividida en 10 deciles, para fijar los umbrales de caracterización de las sequías. 			Gibbs and Maher	1967
26	Índice de Suministro de Agua Superficial (ISAS/SWSI)	<ul style="list-style-type: none"> * Complementa al Índice de Palmer para condiciones de humedad. * Fue diseñado para ser un indicador de las condiciones de humedad de superficie, incluyendo la acumulación de nieve en la montaña * Incorpora tanto las características hidrológicas como climatológicas en un solo índice parecido al Índice de Palmer y se aplica a la mayoría de las cuencas de los ríos. * Sus valores están estandarizados para permitir la comparación entre cuencas. * Es dependiente de la estación del año; por lo tanto es calculado en el invierno y toma en cuenta la nieve acumulada, precipitación y reservorios de almacenaje. 		<ul style="list-style-type: none"> - Acumulación de nieve. - Flujo laminar. - Precipitación. - Reservorios de almacenaje. 	Shafer y Dezman	1982

27	<p align="center">Índice de Precipitación Estandarizado (ISP/ SPI/ IEP)</p>	<ul style="list-style-type: none"> * Clasifica en distintas categorías los periodos húmedos y secos. * Sirve para mejorar la detección del inicio de la sequias y su monitoreo. * Permite identificar déficits y excesos de precipitación. * Apto para el estudio de sequias cortas o prolongadas. * Permite estudiar diferentes escalas de tiempo (3, 6, 12, 24 y 48 meses) y se recomienda para registros de largo plazo. * Representa el número de desviaciones estándar que cada registro de precipitación se desvía del promedio histórico. * Se basa solamente en las probabilidades de ocurrencia de precipitación para un período dado. * La duración de la sequía es definida por el intervalo entre el comienzo y el final del período. La magnitud de la sequía se mide sumando los valores del índice durante los meses de la sequía. * Expresa las precipitaciones en unidades que corresponden a la normalidad o curva de distribución estándar; esto da un sentido inmediato de las sequías recientes en comparación con el histórico 	<p>Se utiliza una función matemática para transformar la distribución de los datos históricos de una distribución típica a una normal, o una curva de distribución estándar. Una vez que los datos son presentados en una distribución normal, el valor en el centro de esta distribución, 0, corresponde al promedio, y las desviaciones estándar (DE) o diferencias estadísticas respecto del promedio podrán ser utilizados para expresar rangos de valor en dicha distribución</p>	Precipitación	Tom McKee, Nolan Doesken y Jonh Kleist	1993
28	<p align="center">Reclamation Drought Index (RDI) (Recoinnaisance Drought Index, Tsakiris, 2004).</p>	<ul style="list-style-type: none"> * Al igual que el SWSI se calcula a nivel de cuenca fluvial, la incorporación de la temperatura, precipitación, nieves, caudales y niveles * Fue recientemente desarrollado como una herramienta para evaluar la gravedad y la duración de la sequía, y para predecir el inicio y el final de los períodos de sequía. * Sirve para la detección operacional de los eventos de sequía y para la activación del relieve, si se ha alcanzado un nivel severo. *Se basa en precipitación y evapotranspiración potencial. * Apropiado para escenarios de cambio climático. 			Weghorst	1996

ÍNDICES DE ARIDEZ

ID	ÍNDICE	CARACTERÍSTICAS	FÓRMULA	VARIABLES	AUTOR	AÑO
1	Índice de Concentración de Precipitación (ICP)	* Permite estimar la distribución de la precipitación * Estima la agresividad de las lluvias, a partir de la variabilidad temporal de las precipitaciones mensuales.	$ICP = 100 \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{P^2}$	P _i es la precipitación mensual en mm. P es la precipitación anual en mm	Oliver	1980
2	Índice de Aridez de De Martonne	* Permite la estimación de la condición hídrica a partir de un coeficiente de aridez	Cálculo anual: $I_a = \frac{P}{T + 10}$ Cálculo mensual: $I_m = \frac{12 \cdot P}{T + 10}$	P es la precipitación media anual en mm. T es la temperatura media anual en °C.	Takahashi y Wang	1999
3	Índice de Fournier Modificado (IFM)	* Permite identificar la agresividad de las lluvias	$IFM = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P}$	P _i es la precipitación del mes i en mm. P es la precipitación total anual en mm.	Arnoldus propuso una corrección del Índice de Fournier (IF)	1980