



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



FACULTAD DE GEOGRAFÍA

Automatización de la clasificación climática de Köppen-Geiger en un SIG

Trabajo terminal en modalidad de tesis que para obtener el grado de
Maestro en Análisis Espacial y Geoinformática

Presenta:

Lic. en Geog. Humberto Omar Colín Cruz

Tutor académico:

Dr. en C.A. Luis Ricardo Manzano Solís

Tutores adjuntos:

*Dr. en G. Noel Bonfilio Pineda
Jaimes*

*Dr. en C.A. Miguel Ángel Gómez
Albores*

Toluca, Estado de México

Noviembre, 2021

RESUMEN

El objetivo de esta investigación consistió en la elaboración de un módulo de SIG para generar capas ráster y vector de clasificación climática de manera automatizada utilizando el método de Köppen-Geiger para uno o varios períodos de tiempo, a partir de ingresar grupos de capas ráster de temperatura media mensual y precipitación total mensual.

Las fases de este estudio consistieron en el diseño y desarrollo de una interfaz de usuario de fácil manejo para los usuarios potenciales del módulo; en la programación de un algoritmo que realice la clasificación de los climas de Köppen-Geiger mediante operaciones de imágenes ráster; en la verificación y validación de los procesos; en la integración del módulo al menú principal del software; en la aplicación de la herramienta en un estudio de caso; y en la discusión de los resultados y las recomendaciones.

Entre los principales productos que se generaron en esta investigación se tiene la elaboración de un mapa de clasificación climática de la república mexicana, la validación de los resultados mediante una muestra aleatoria sistematizada con la cual se corroboró la veracidad de estos, la comparación con un mapa reciente de clasificación climática de otro autor y la comparación de dos períodos de 20 años para identificar cambios entre categorías climáticas.

El módulo desarrollado clasificó correctamente los climas, permitió hacer clasificaciones de uno y varios períodos, presentó un correcto funcionamiento con el software de SIG, además, es sencillo de entender y usar.

ABSTRACT

The objective of this research consisted in the development of a GIS module to generate raster layers and climatic classification vector in an automated way using the Köppen-Geiger method for one or several time periods, from entering groups of raster layers of monthly mean temperature and total monthly precipitation.

The phases of this study consisted of the design and development of an easy-to-use user interface for potential users of the module; in programming an algorithm that performs the Köppen-Geiger classification of climates using raster image operations; in the verification and validation of the processes; in the integration of the module to the main menu of the software; in the application of the tool in a case study; and in the discussion of the results and recommendations.

Among the main products that were generated in this research is the elaboration of a climate classification map of the Mexican Republic, the validation of the results through a systematized random sample with which the veracity of these was corroborated, the comparison with a map recent climate classification by another author and the comparison of two 20-year periods to identify changes between climate categories.

The developed module correctly classified the climates, allowed to make classifications of one and several periods, presented a correct operation with the GIS software, in addition, it is easy to understand and use.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
ANTECEDENTES.....	7
ESTUDIOS QUE HAN UTILIZADO LA CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE KÖPPEN-GEIGER	7
ESTUDIOS QUE HAN AUTOMATIZADO PROCESOS	9
ESTUDIOS SOBRE CLIMA Y ANÁLISIS DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	10
OBJETIVO GENERAL.....	14
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
JUSTIFICACIÓN	15
CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO	16
1.1 TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS Y GEOGRAFÍA SISTÉMICA	18
1.2 RELACIÓN ENTRE GEOGRAFÍA FÍSICA Y GEOGRAFÍA CUANTITATIVA.....	19
1.3 ANÁLISIS ESPACIAL POR MEDIO DE SIG Y SU APORTE A LA GEOGRAFÍA APLICADA	20
1.4 EL ENFOQUE GEOGRÁFICO DE LA CLIMATOLOGÍA	22
1.5 LAS CLASIFICACIONES CLIMÁTICAS Y EL SISTEMA KÖPPEN-GEIGER.....	23
CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
2.1 DISEÑO DE UNA INTERFAZ DE USUARIO.....	27
2.2 IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS CARTOGRÁFICOS.....	30
2.3 PROGRAMACIÓN DE ALGORITMOS.....	35
2.3.1 API DE TERRSET.....	36
2.3.2 CARGA DE LOS ARCHIVOS DE GRUPO RASTER.....	36
2.3.3 IDENTIFICACIÓN DE PERÍODOS.....	37
2.3.4 SECCIÓN DE SALIDAS.....	38
2.3.5 ASIGNACIÓN DE LAS CATEGORÍAS CLIMÁTICAS EN LA CAPA DE SALIDA	38
2.4 DESCARGA DE IMÁGENES RÁSTER DE ELEMENTOS CLIMÁTICOS	39
2.5 ANÁLISIS COMPARATIVO	43
CAPÍTULO 3 RESULTADOS	50
3.1 MÓDULO DE SIG CON LA CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA.....	51
3.2 EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL MÓDULO DE SIG	53
3.2.1 VERIFICACIÓN.....	54
3.2.2 VALIDACIÓN	55
3.3 ESTUDIO DE CASO	56

3.3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	57
3.3.2 CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE KÖPPEN-GEIGER DE LA REPÚBLICA MEXICANA. PERÍODO 1980-2019.....	61
3.3.3 ANÁLISIS DE LA TRANSICIÓN EN LAS CATEGORÍAS CLIMÁTICAS DE KÖPPEN-GEIGER ENTRE LOS PERÍODOS 1980-1999 Y 2000-2019.	64
CAPÍTULO 4 DISCUSIÓN	81
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I.1. DECLARATORIAS POR EMERGENCIA HIDROMETEOROLÓGICA.....	4
TABLA I.2. DECLARATORIAS POR CONTINGENCIA CLIMATOLÓGICA.....	5
TABLA I.3. DECLARATORIAS POR DESASTRE HIDROMETEOROLÓGICO.....	5
TABLA 1.1. PARÁMETROS DE LA CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE KÖPPEN-GEIGER.....	34
TABLA 3.1. CATEGORÍAS CLIMÁTICAS DE LA REPÚBLICA MEXICANA, PERÍODO 1980 -2019.	62
TABLA 3.2. PERSISTENCIA DE LAS CATEGORÍAS CLIMÁTICAS CONSIDERANDO EL CLIMA PRINCIPAL, PERÍODO 1980-2019.....	63
TABLA 3.3. CAMBIOS DE LAS CATEGORÍAS CLIMÁTICAS, PERÍODOS: 1980-1999 Y 2000-2019.....	64
TABLA 3.4. PERSISTENCIA DE LAS CATEGORÍAS CLIMÁTICAS ENTRE LOS PERÍODOS 1980-1999 Y 2000-2019.....	69
TABLA 3.5. CAMBIOS DE CATEGORÍA CLIMÁTICA CONSIDERANDO EL CLIMA PRINCIPAL ENTRE EL PERÍODO 1980-1999 Y 2000-2019.....	70
TABLA 3.6. PERSISTENCIA DEL CLIMA PRINCIPAL ENTRE LOS PERÍODOS 1980-1999 Y 2000-2019.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
TABLA 3.7. CAMBIOS DE CATEGORÍAS CLIMÁTICAS CONSIDERANDO EL RÉGIMEN DE HUMEDAD ENTRE LOS PERÍODOS 1980-1999 Y 2000-2019.....	73
TABLA 3.8. PERSISTENCIA DE LAS CATEGORÍAS CLIMÁTICAS CONSIDERANDO EL RÉGIMEN DE HUMEDAD ENTRE LOS PERÍODOS 1980-1999 Y 2000-2019.....	75
TABLA 3.9. CAMBIOS DE CATEGORÍA CLIMÁTICA CONSIDERANDO EL RÉGIMEN TÉRMICO ENTRE LOS PERÍODOS 1980-1999 Y 2000-2019.....	78
TABLA 3.10. PERSISTENCIA DE LAS CATEGORÍAS CLIMÁTICAS CONSIDERANDO EL RÉGIMEN TÉRMICO ENTRE LOS PERÍODOS 1980-1999 Y 2000-2019.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1. ESTRUCTURA TEÓRICO-METODOLÓGICA	17
FIGURA 2.1. PROTOTIPO DE MÓDULO PARA EXPLICAR SU APARIENCIA Y FUNCIONAMIENTO. 28	
FIGURA 2.2. DISEÑO DE INTERFAZ DE USUARIO.	30
FIGURA 2.3. MODELO CONCEPTUAL DE LA CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE KÖPPEN-GEIGER.32	
FIGURA 2.4 MODELO GENERAL PARA CLASIFICAR LOS CLIMAS POR EL MÉTODO DE KÖPPEN-GEIGER.....	35
FIGURA 2.5. MENÚ PRINCIPAL DEL PORTAL DAYMET.	39
FIGURA 2.6. MENÚ DE DESCARGA DE CAPAS RÁSTER MENSUALES DEL PORTAL <i>DAYMET</i>	40
FIGURA 2.7. EJEMPLO DE DEFINICIÓN DE COORDENADAS EXTREMAS Y TIPO DE ARCHIVO DE DESCARGA.	41
FIGURA 2.8. MÓDULO <i>GDAL CONVERSION UTILITY</i> DE TERRSET PARA IMPORTAR Y CONVERTIR IMÁGENES A FORMATO RST.	41
FIGURA 2.9. CREACIÓN DE GRUPOS DE CAPAS RÁSTER.	42
FIGURA 2.10. EJEMPLO DE MACROMODELO DE TERRSET PARA CALCULAR EL PROMEDIO MENSUAL DE LOS GRUPOS DE 480 CAPAS RÁSTER.	42
FIGURA 2.11. ESQUEMA DEL MUESTREO.....	44
FIGURA 3.1. COMPONENTES DEL MÓDULO DE CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA.	51
FIGURA 3.2. DESPLIEGUE DE LA INTERFAZ DE USUARIO DESDE EL MENÚ PRINCIPAL DE TERRSET.	53
FIGURA 3.3. MUESTRA DE 385 CELDAS CON SU RESPECTIVA CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA.....	54
FIGURA 3.4. CAPA DE CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE KÖPPEN-GEIGER GENERADA CON EL MÓDULO DE SIG.	55
FIGURA 3.5. CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE KÖPPEN-GEIGER DEL PERÍODO 1980-2016.	56
FIGURA 3.6. UBICACIÓN DE LA REPÚBLICA MEXICANA.....	57
FIGURA 3.7. ECORREGIONES DE LA REPÚBLICA MEXICANA.	58
FIGURA 3.8. PROVINCIAS BIOGEOGRÁFICAS DE LA REPÚBLICA MEXICANA.	59
FIGURA 3.9. PRINCIPALES TIPOS DE VEGETACIÓN DE LA REPÚBLICA MEXICANA.....	61
FIGURA 3.10. PERSISTENCIA Y CAMBIOS DE LAS CATEGORÍAS CLIMÁTICAS ENTRE LOS PERÍODOS 1980-1999 Y 2000-2019.....	68
FIGURA 3.11. GANANCIAS Y PÉRDIDAS DE LOS CLIMAS PRINCIPALES EN DOS PERÍODOS.....	70
FIGURA 3.12. CAMBIOS DE LAS CATEGORÍAS CLIMÁTICAS PRINCIPALES ENTRE LOS PERÍODOS 1980-1999 Y 2000-2019.	71

FIGURA 3.13. PERSISTENCIA DE LAS CATEGORÍAS CLIMÁTICAS PRINCIPALES ENTRE LOS PERÍODOS 1980-1999 Y 2000-2019.....	72
FIGURA 3.14. GANANCIAS Y PÉRDIDAS CONSIDERANDO EL RÉGIMEN DE HUMEDAD.....	75
FIGURA 3.15. PERSISTENCIA Y CAMBIOS DE LAS CATEGORÍAS CLIMÁTICAS CONSIDERANDO EL RÉGIMEN DE HUMEDAD ENTRE LOS PERÍODOS 1980-1999 Y 2000-2019.....	76
FIGURA 3.16. PERSISTENCIA DE LAS CATEGORÍAS CLIMÁTICAS ENTRE LOS PERÍODOS 1980-1999 Y 2000-2019.	76
FIGURA 3.17. GANANCIAS Y PÉRDIDAS CONSIDERANDO EL RÉGIMEN TÉRMICO.	77
FIGURA 3.18. CAMBIOS DE LAS CATEGORÍAS CLIMÁTICAS CONSIDERANDO EL RÉGIMEN TÉRMICO ENTRE LOS PERÍODOS 1980-1999 Y 2000-2019.	79
FIGURA 3.19. PERSISTENCIA DE LAS CATEGORÍAS CLIMÁTICAS CONSIDERANDO EL RÉGIMEN TÉRMICO ENTRE LOS PERÍODOS 1980-1999 Y 2000-2019.	80

DICCIONARIO DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

BID: Banco Interamericano de Desarrollo.

CENAPRED: Centro Nacional de Prevención de Desastres (México).

CIGA: Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental de la Universidad Nacional Autónoma de México.

CMIP5: Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5 del IPCC.

CONABIO: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (México).

GCE: Grupo Consultivo de Expertos sobre Ciencia Climática de la Cumbre sobre el Clima de las Naciones Unidas.

INE: Instituto Nacional de Ecología (actualmente Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC], México).

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México).

IPCC: Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

MCG: Modelos de Circulación Global.

MODIS: *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (Espectroradiómetro de imágenes de resolución moderada).

OMM: Organización Meteorológica Mundial.

PRECIS: *Providing Regional Climates for Impacts Studies* (Proveedor de climas regionales para estudios de impactos).

PND: Plan Nacional de Desarrollo.

RCP: *Representative Concentration Path* (trayectoria de concentración representativa de gases de efecto de invernadero).

RCP 4.5: Escenario RCP donde las emisiones de gases de efecto de invernadero alcanzan su punto máximo en 2040, luego disminuyen.

RCP 8.5: Escenario RCP donde las emisiones de gases de efecto de invernadero siguen aumentando durante todo el siglo XXI.

SEMARNAT: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (México).

INTRODUCCIÓN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el presente documento se explican los procedimientos llevados a cabo para generar un módulo que permitió automatizar la clasificación climática de Köppen-Geiger en un ambiente de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

En la actualidad los SIG han alcanzado un desarrollo considerable en su capacidad de realizar análisis complejos en prácticamente todas las áreas relacionadas con las ciencias de la Tierra y la atmósfera, estos avances han permitido profundizar hacia el entendimiento y una mejor administración del territorio.

La tendencia actual es un rápido desarrollo en el campo de estas tecnologías, la incorporación de soluciones basadas en SIG y herramientas geoinformáticas facilitan el monitoreo, análisis y comprensión de los datos de forma dinámica para abordar las diversas problemáticas del medio geográfico y en consecuencia proponer soluciones basadas en el análisis de los datos que den mayor certeza a la toma de decisiones.

Por otra parte, el clima ha cobrado gran relevancia en los últimos años, las tendencias de investigación actual del clima se centran en la variabilidad y el cambio climático. Se prevé que las condiciones meteorológicas que determinan el clima se están tornando adversas y se han extendido a nivel global con efectos como tormentas más severas, huracanes más intensos, mareas más altas y temperaturas más extremas que tendrán efectos importantes en la población y los ecosistemas.

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés, 2020), estima que habrá un incremento del promedio anual de la

temperatura ambiente para 2100 de 1.4 °C, lo cual producirá sequías más intensas y olas de calor. De acuerdo con este reporte, las olas de calor fueron el peligro meteorológico más mortífero durante el período 2015-2019, afectando a todos los continentes y contribuyendo a que se registrasen récords de temperatura.

El cambio climático también amenaza cada vez más la seguridad y la paz internacional. Los desastres naturales desplazan tres veces más personas que los conflictos armados, las tensiones crecen sobre los recursos y los desplazamientos de población entre países. La salinización del agua y los cultivos pone en peligro la seguridad alimentaria y tiene un efecto cada vez mayor en la salud pública (Parker, 2015).

El reporte de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2019) elaborado por el *Consultative Group of Experts* (CGE, por sus siglas en ingles), menciona que, desde 2016, los valores mínimos de la extensión de los hielos marinos se han venido observando muy inferiores respecto al promedio correspondiente al período 1981-2010, lo cual es un indicativo de que se ha acelerado el aumento del nivel del mar, por lo que se prevé una reducción abrupta de la cubierta de hielo en los polos.

Derivado del deshielo en los polos, se prevé que los niveles crecientes del mar provoquen perturbaciones profundas a lo largo de la línea costera, con efectos como playas arenosas erosionadas, inundaciones frecuentes, mares más altos e intrusión de agua salada en los suministros de agua potable (Parker, 2015).

Tomando en consideración que los océanos almacenan más del 90 % del exceso de calor provocado por el cambio climático, el reporte del GCE indica que, en 2018 sobre la base de mediciones realizadas hasta los 700 metros de profundidad se registraron los

valores más elevados de contenido calorífico de los océanos, y 2017 y 2015 ocuparon el segundo y tercer lugar respectivamente.

Los océanos absorben aproximadamente el 30 % de las emisiones antropógenas anuales de CO₂, evitando así un mayor calentamiento. Esto supone un alto costo ecológico para los océanos ya que el CO₂ que absorben reacciona con el agua de mar, modificando así la acidez de los océanos. Al respecto, el nivel de acidez de los océanos ha aumentado en un 26 % desde los comienzos de la revolución industrial (Parker, 2015).

En el escenario nacional, de acuerdo con el Programa Nacional de Desarrollo (PND) 2003-2008, las características geográficas de México, como su localización entre dos océanos, su latitud y su relieve lo hacen estar expuesto a diferentes fenómenos hidrometeorológicos, lo cual lo coloca como un país vulnerable a los efectos del cambio climático.

De acuerdo con el PND (2003), desde la década de los años sesenta, México se ha vuelto más cálido, se han reducido la cantidad de días más frescos y han aumentado las noches cálidas. Las temperaturas promedio a nivel nacional han aumentado 0.85°C, sin embargo, la parte norte del país es la zona con mayor incremento, de 0.25°C a 0.50°C por década, entre 1960 a 2010. En tanto que las temperaturas invernales han aumentado en 1.3°C. Por otra parte, la precipitación ha disminuido en el sureste del país desde hace medio siglo (PND, 2003).

De acuerdo con el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2019), en México se han registrado 14,726 casos por emergencia hidrometeorológica (Tabla I.1), 5,194 casos por contingencia climatológica (Tabla I.2) y 9,130 casos por desastre hidrometeorológico (Tabla I.3) en el período 2000-2019. Si se consideran las

declaratorias de contingencia que se han dado en México entre los años 2000 a 2019, se tiene que, de los 2,459 municipios de México, el 83.4% sufrieron fenómenos hidrometeorológicos vinculados con el cambio climático.

Tabla I.1. Declaratorias por emergencia hidrometeorológica.

Declaratoria	No de eventos
Bajas temperaturas	664
Ciclón tropical	4,563
Ciclón tropical y lluvias	13
Fuertes vientos	156
Fuertes vientos y ciclón tropical	14
Granizadas	39
Granizadas, nevadas y heladas	1
Heladas	1,144
Heladas, granizadas y nevadas	4
Inundación	392
Inundación y ciclón tropical	1
Lluvias	4,150
Lluvias y ciclón tropical	86
Lluvias e inundación	5
Nevadas	152
Nevadas, granizadas y heladas	1
Nevadas y heladas	84
Nevadas, heladas y granizadas	1,861
Sequía	23
Temperatura extrema	1,363
Tormenta severa y lluvias	6
Tornado	4
Total	14,726

Fuente: CENAPRED (2019).

Tabla I.2. Declaratorias por contingencia climatológica.

Declaratoria	No de eventos
Bajas temperaturas	42
Ciclón tropical	198
Fuertes vientos	4
Granizadas	19
Heladas	119
Inundación	151
Lluvias	903
Lluvias y ciclón tropical	34
Nevadas, heladas y granizadas	884
Sequía	3
Tormenta severa	2,837
Total	5,194

Fuente: CENAPRED (2019).

Tabla I.3. Declaratorias por desastre hidrometeorológico.

Declaratoria	No de eventos
Bajas temperaturas y ciclón tropical	15
Ciclón tropical	2,103
Ciclón tropical y lluvias	19
Fuertes vientos	34
Granizadas	9
Heladas	50
Incendio forestal	133
Inundación	367
Inundación y ciclón tropical	3
Lluvias	4,401
Lluvias y ciclón tropical	99
Nevadas, heladas y granizadas	57
Sequía	3
Tornado	9
Sequía y heladas	1,828
Total	9,130

Fuente: CENAPRED (2019).

De acuerdo con Köppen (1936), las clasificaciones climáticas se emplean como una herramienta de análisis en el estudio del clima actual y su evolución a lo largo del tiempo, su principal finalidad consiste en la formación del resumen sinóptico de numerosos datos de difícil manejo de manera que se distingan entre sí con mayor claridad. Köppen, fundamentó esta clasificación de acuerdo a la relación que guardan los límites de los grandes biomas con los límites climáticos, ya que desde su perspectiva, la combinación de temperaturas y precipitaciones determinan en gran medida la distribución de la vegetación.

Por otra parte, los SIG cuentan con herramientas que son capaces de modelar aspectos del mundo real basándose en un lenguaje estadístico y matemático. De esta manera, tenemos que la clasificación de Köppen-Geiger al utilizar valores de temperatura y precipitaciones es susceptible de expresarse en un lenguaje matemático, y por lo tanto, de implementarlo en una herramienta de modelación en SIG.

En la actualidad existe una gran disponibilidad de datos climáticos, por lo que, para este estudio se han utilizado imágenes ráster de temperatura y precipitaciones para generar insumos que permitan alimentar un módulo de SIG que genere capas de clasificación climática de Köppen-Geiger de manera automatizada.

En este contexto se ha elaborado la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué características deberá tener un módulo de SIG con un enfoque de análisis espaciotemporal para que agilice el procesamiento de capas de series temporales de temperatura y precipitación mensual de la clasificación climática de Köppen-Geiger?

ANTECEDENTES

ESTUDIOS QUE HAN UTILIZADO LA CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE KÖPPEN-GEIGER

Zeroual et al. (2018), analizaron el ritmo de los cambios climáticos en Argelia de acuerdo con la clasificación de Köppen-Geiger para el período de 1951 a 2098, utilizando datos climáticos de observación y simulaciones climáticas regionales. Los cambios futuros en el siglo XXI se estimaron en base a dos escenarios de la trayectoria de concentración representativa (RCP, por sus siglas en inglés) llamados RCP4.5 y RCP8.5. El análisis de la tasa de cambio de las zonas climáticas de 1951 a 2005 encontró una expansión gradual y significativa de la superficie de la zona desértica y una disminución abrupta en aproximadamente un 30% de la superficie de la zona de clima templado cálido.

Chan et al. (2016), realizaron un estudio para proyectar cambios de tipo de climas de Köppen-Geiger en China para 2100. Ese estudio identificó los cambios climáticos desde 1990 hasta 2100 a partir de un modelo de multisalidas llamado *Coupled Model Intercomparison Project, Phase 5 (CMIP5)*. Bajo el escenario más severo del modelo RCP8.5, el clima seco invernal continental subpolar sobre el noreste de China desaparecería en 2040–50, el clima de tundra (ET) desaparecería en 2070 de la meseta tibetana, y entre 35.9% y 50.8% de los tipos de clima en la superficie terrestre de China cambiarían de 2050 a 2100. Los resultados presentados indicaron los impactos imperativos del cambio climático antropogénico en las ecorregiones de China en las próximas décadas.

Deliege y Nicolay (2016), utilizaron el concepto de regularidad de Hölder (la dimensión fractal local o exponente como límite definido punto a punto para ciertas medidas definidas sobre un espacio métrico y que pueden ser usado para caracterizar dichas medidas) aplicado

a datos de temperatura superficial del aire para recapturar la clasificación climática de Köppen-Geiger en Europa. Demostraron que los exponentes de Hölder de los datos de temperatura del aire superficial están estadísticamente relacionados con anomalías de presión. Al respecto, establecieron una clasificación climática basada en estos exponentes que permitió recuperar la clasificación climática de Köppen-Geiger. Demostraron que las dos clasificaciones coincidían para una gran mayoría de estaciones, y corroboraron esas observaciones mediante una prueba de confirmación. Compararon los resultados con los obtenidos con otro conjunto de datos de otro proyecto de re-análisis con lo cual demostraron que la adaptación de la nueva clasificación es adecuada.

Brugger y Rubel (2013), realizaron un estudio sobre la distribución de mosquitos del género *Culicoides spp.* (*Diptera ceratopogonidae*) en Europa y su relación con la clasificación climática de Köppen-Geiger para proporcionar un mapa de la composición de estas especies. De acuerdo al estudio se estimaron fracciones climáticas y se asignaron porcentajes de distribución de las diferentes especies de *Culicoides spp.* Al respecto, un coeficiente de asociación altamente significativo de 0.64 confirmó la correlación entre *Culicoides spp* y las zonas climáticas.

Rubel y Kottek (2010), presentaron una serie de mapas mundiales digitales para el período 1951-2100 donde se representaron las tendencias mundiales en el clima según Köppen-Geiger y se proyectaron escenarios de cambio climático. Generaron mapas mundiales del período de observación 1901-2002 para lo cual se basaron en conjuntos de datos recientes de precipitación y temperatura. Asimismo, generaron mapas mundiales para el período 2003–2100 basados en proyecciones de conjuntos de modelos climáticos globales proporcionados por el *Centro Tyndall para la Investigación del Cambio*

Climático. Los principales resultados mostraron una estimación de los cambios en las zonas climáticas dentro del siglo XXI al considerar diferentes escenarios. Los cambios más significativos entre las principales clases de clima en áreas terrestres globales se estimaron en 2.6% a 3.4% de clima polar (E) a continental (D), 2.2% a 4.7% de continental (D) a templado (C), 1.3% a 2.0% de templado (C) a seco (B) y 2.1% a 3.2% de templado (C) a tropical (A).

Jylhä et al. (2009), desarrollaron una encuesta de un sitio web cuyo propósito fue determinar si los mapas que ilustran los cambios proyectados de las zonas climáticas de Köppen-Geiger son una herramienta de visualización efectiva para diseminar información sobre el cambio climático. La clasificación climática se basó en ciclos estacionales de temperatura y precipitación medias mensuales y dividió a Europa y sus áreas terrestres adyacentes en tipos de clima de tundra, boreal, templado y seco. Las proyecciones de cambios futuros en las zonas climáticas se integraron usando proyecciones medias multimodelo basadas en simulaciones realizadas con 19 modelos climáticos globales. Las proyecciones estimaron que aproximadamente la mitad o posiblemente dos tercios del dominio del estudio se verán afectados por cambios hacia un tipo de clima más cálido o seco durante este siglo.

ESTUDIOS QUE HAN AUTOMATIZADO PROCESOS

Beck et al. (2018), realizaron una automatización utilizando el software estadístico *Matlab* para generar nuevos mapas globales de la clasificación climática de Köppen-Geiger a una resolución de 1 km para el periodo 1980–2016 y proyectaron condiciones futuras bajo el cambio climático en un periodo de 2071–2100. Entre sus aportaciones, destaca la elaboración de un mapa actualizado derivado de un conjunto de cuatro mapas climáticos de

alta resolución corregidos topográficamente, derivados a su vez de 32 proyecciones de modelos climáticos. Sus resultados exhibieron una mayor precisión de clasificación y sustancialmente más detalles que mapas anteriores, particularmente en regiones con gradientes espaciales o de elevación agudos. Asimismo, los mapas generados son útiles para numerosas aplicaciones, incluyendo modelos de distribución de especies y vegetación.

Manzano et al. (2017), automatizaron en el software *Idrisi* la clasificación climática de Köppen modificada por Enriqueta García utilizando un módulo SIG. Dicha automatización se aplicó en un estudio de caso de la cuenca Lerma-Chapala-Santiago para comparar datos de series de tiempo sobre el clima de 1960 a 1989, de 1981 a 2010 y de 1960 a 2010. El modelo generado tuvo un grado perfecto de compaginación de los climas al compararlo con un estudio no automatizado previo. Los datos climáticos del período 1960 a 2010 se utilizaron para crear un mapa climático de la cuenca. Un análisis comparativo del comportamiento climático entre 1960 y 1989 y entre 1981 y 2010 mostró cambios en la temperatura media y en las temperaturas extremas en ciertas áreas de la cuenca. El módulo desarrollado se puede utilizar para clasificar los climas y se pueden ingresar al módulo datos de resolución y cobertura espacial variables.

ESTUDIOS SOBRE CLIMA Y ANÁLISIS DE CAMBIO CLIMÁTICO

La aplicación *Climate Engine* (2020) utiliza el *Earth Engine* de *Google* para el procesamiento bajo demanda de datos climáticos y satelitales a través de un navegador web. Permite a los usuarios crear una interfaz donde muestra datos climáticos a base de series temporales como los datos del portal *Modelate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)*, entre otros. Permite procesar y visualizar de forma rápida observaciones satelitales de la tierra y datos meteorológicos en cuadrículas para el

monitoreo ambiental y para mejorar la alerta temprana de sequía, incendios forestales y riesgo de pérdida de cultivos ya que se concentra en el descubrimiento de datos y sus respuestas. Los resultados generados pueden ser descargados en formatos geotiff, csv y xls (Google Earth Engine, 2020).

La Clasificación Climática en el software SAGA GIS es una herramienta que aplica un esquema de clasificación climática utilizando datos mensuales de temperatura media y precipitación. Los esquemas de clasificación implementados actualmente son: Köppen-Geiger, Thornthwaite, Wissman y Troll-Paffen (Conrad, 2018).

Magaña et al. (2018), identificaron el grado de consistencia en las tendencias de la precipitación mensual y las temperaturas media, máxima y mínimas mensuales en un periodo de 1960–2015 y el grado de correspondencia con las zonas forestales del estado de México, el estudio se realizó a nivel de subcuencas y la finalidad fue identificar las subcuencas más propensas al cambio climático mediante modelación espacial y técnicas de evaluación multicriterio.

Wu et al. (2018), estudiaron el desplazamiento hacia el norte de las zonas de temperatura mediante un estudio ecogeográfico en China, en un escenario climático futuro, para analizar los efectos del cambio climático global en los rangos de especies terrestres de diversos climas y ecosistemas a nivel de regiones ecogeográficas a escala regional, para lo cual, analizaron el cambio de las zonas de temperatura. Proyectaron datos climáticos a alta resolución durante el periodo 1961-2080, utilizando el modelo climático *Providing Regional Climates for Impacts Studies (PRECIS)*. Los resultados indicaron que los rangos de las zonas tropicales, subtropicales y templadas cálidas se ampliarían y los rangos de las zonas templadas frías, templadas y mesetas frías se reducirían.

Barredo et al. (2018), presentaron una evaluación de los cambios en el rango espacial del clima mediterráneo en Europa y la conversión en clima árido bajo diferentes forzamientos de gases de efecto invernadero utilizando modelos RCP4.5 y RCP8.5, con los cuales realizaron 11 simulaciones en dos períodos futuros de 30 años. Los resultados indicaron que para finales de siglo bajo RCP8.5 se proyecta que la zona climática mediterránea actual se contraería en un 16%, (un área de 157,000 km²). Esto se comparó con el escenario menos severo RCP4.5 que proyectaba solo una reducción del 3%. Además, se proyectó que la zona climática mediterránea se expandirá a otras zonas en un área equivalente al 24% y 50% de su extensión actual bajo RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente.

El Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA) de la UNAM, desarrolló el software Clic-MD que tiene la capacidad de analizar millones de datos climatológicos. Su objetivo es ayudar a tener una idea de las tendencias y registros extremos de la temperatura en el entorno local, regional y nacional. Funciona en cualquier plataforma informática. El software almacena datos mensuales de temperatura máxima, media y mínima, así como de precipitación pluvial, de esta manera se calculan índices agroclimáticos y tendencias para detectar posibles cambios a futuro (CIGA, 2017).

Nojarov (2017), utilizó datos de presión al nivel del mar para el período 1950-2012 en 61 estaciones meteorológicas ubicadas dentro de la Península Balcánica y sus alrededores. Su estudio demostró que hay varios cambios importantes en la circulación atmosférica sobre los Balcanes en ese período. Las mediciones demostraron tres aumentos de la presión atmosférica en la región de los Azores Altos en el período enero-marzo, en la parte noroeste en el periodo de monzón de junio a septiembre, y en la Alta Siberia en el período de octubre a diciembre que cubre la parte central y oriental de la península.

Fernández et, al. (2015) desarrollaron escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación para México y Centroamérica, consideraron 15 diferentes modelos generales de circulación a partir de datos de temperatura promedio, máxima y mínima, así como de precipitación anual y mapas interactivos de alta resolución espacial. Finalmente, incorporaron las bases de datos generadas en el estudio a un nuevo servidor de mapas para su visualización a través de internet.

En 2014, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), llevó a cabo un diagnóstico integrado como parte de un programa de adaptación a las consecuencias del cambio climático en la provisión de servicios de las cuencas de los ríos Grijalva y Usumacinta. Para su estudio, utilizaron las proyecciones de 15 Modelos de Circulación Global (MCG) proporcionados por la Red Mexicana de Modelación del Clima del periodo 1961-2000, así como proyecciones para los períodos 2015-2039 y 2075-2099 bajo escenarios de forzamiento radiativo bajo, medio, y alto, con lo cual delinearon áreas geográficas prioritarias de atención de esta cuenca.

Los antecedentes presentados expresan la relevancia del estudio de la variabilidad climática, y específicamente del uso de las clasificaciones climáticas como herramienta de análisis. Si bien existen esfuerzos de automatización tanto en software libre como en software comercial, se carece de esta propuesta para el sistema de monitoreo y modelación geoespacial TerrSet, el cual da énfasis al análisis de series temporales.

OBJETIVO GENERAL

Automatizar el método de clasificación climática de Köppen-Geiger en un SIG, con la finalidad de que el usuario pueda generar clasificaciones a partir de datos de temperatura y precipitación propios, definiendo sus periodos temporales de análisis y para la zona de estudio de su interés.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1.** Diseñar una interfaz de usuario del módulo que sea intuitiva para usuarios familiarizados con el SIG al que se integre, con la finalidad de facilitar el aprendizaje de su uso.
- 2.** Implementar modelos cartográficos de la clasificación climática de Köppen-Geiger, mediante su automatización, para facilitar su uso con una interfaz de usuario.
- 3.** Validar los resultados generados por el módulo, para asegurar la certidumbre de dichos resultados.
- 4.** Realizar un caso de estudio aplicando el módulo de clasificación climática Köppen-Geiger, para validar su funcionamiento y utilidad.

JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de la tecnología ha beneficiado el conocimiento científico en sus distintas ramas, en el caso de la Geografía, los SIG han potenciado la investigación aplicada hacia el análisis espacial y hacia el desarrollo de aplicaciones y herramientas que permitan hacer los procesos de análisis de forma mucho más rápida y eficiente.

En este sentido, la automatización de un procedimiento tiene múltiples ventajas, por ejemplo, permite la reducción del tiempo dedicado al procesamiento de los datos, tiempo que bien se puede dedicar a otras tareas específicas en el desarrollo de la investigación. Además, permite la reducción de la probabilidad de error en el procesamiento de los datos, sobre todo cuando se trata de un gran volumen de éstos en tareas repetitivas.

Al generar esta automatización se pretende ofrecer una herramienta que fomente los estudios espaciotemporales, es decir, aquellos que estudian el comportamiento de un proceso a través del espacio durante periodos largos y continuos de tiempo, ya que anteriormente, por el avance tecnológico y la poca disponibilidad de datos que existía, sólo se hacían estudios para cortes temporales específicos.

Como se mencionó, en la actualidad la Geografía sigue estando vigente en gran medida gracias a la aparición y el progreso constante de las geotecnologías, por lo que, la herramienta aquí generada es una aportación a este segmento, su utilidad se verá reflejada en la agilización de los procesos y en la confiabilidad de sus resultados.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

La Geografía es una ciencia holística cuyo objeto de estudio es el espacio geográfico, su carácter multidisciplinario le permite abordar problemáticas diversas del espacio geográfico con un enfoque integrador, situación que le confiere los mejores fundamentos para hacer análisis espacial del comportamiento de un determinado suceso en el espacio geográfico, para cual se apoya en gran medida de la Cartografía, la cual le permite plasmar de una forma práctica y entendible estos análisis en un ambiente gráfico.

El presente estudio se ubica dentro del área de la Climatología, ya que esta es una ciencia auxiliar de la Geografía Física, se aborda desde la perspectiva de la Geografía Sistemática que se fundamenta en la Teoría General de Sistemas, la cual ha demostrado ser apropiada para los estudios del área física de la Geografía. Se puede categorizar como un estudio de tipo cuantitativo y cualitativo dentro del área de la Geografía Aplicada, dado que desarrolla una herramienta geoinformática desde el paradigma de los SIG (Figuras 1.1 y 1.2).

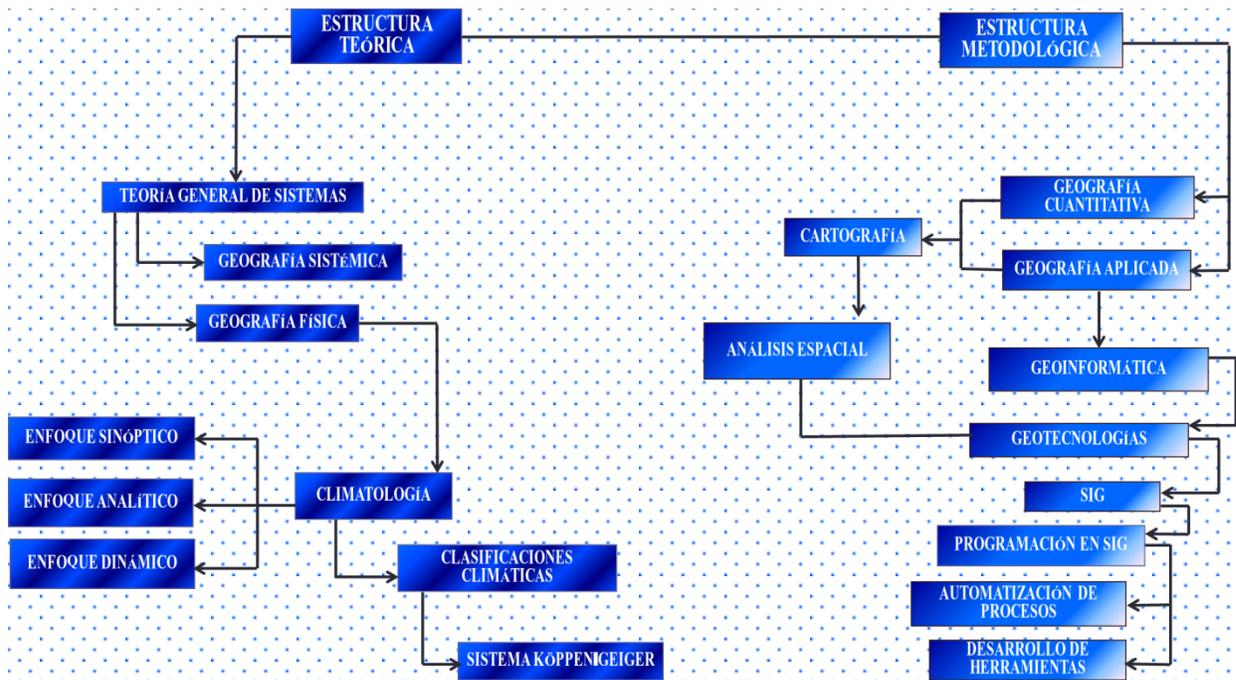


Figura 1.1. Estructura teórico-metodológica

1.1 TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS Y GEOGRAFÍA SISTÉMICA

Los antecedentes de una visión sistémica dentro de la geografía se remontan al siglo XIX con el naturalista Alexander Von Humboldt, que a partir de sus observaciones y cuestionamientos acerca de los movimientos cíclicos de la naturaleza en diferentes proporciones del tiempo y el espacio, propuso sistematizar el método de estudio de la Geografía en 1874 bajo una visión que trataba de describir el paisaje y de explicar de forma simple los nexos entre dos a más elementos que lo constituyen (Espinosa, 2001).

La Teoría General de Sistemas se presenta como una forma sistemática y científica de aproximación y representación de la realidad, se caracteriza por su perspectiva holística e integradora, en donde lo importante son las relaciones y los conjuntos que a partir de ella emergen (Arnold y Osorio, 1998). Por su parte, la Geografía Sistémica tuvo como contexto a la Teoría General de Sistemas, la cual logró afianzarse en los años ´70 en las ciencias naturales y exactas logrando una importante aceptación en las ramas física y ambiental (Edin, 2014).

El pensamiento sistémico contribuye a estructurar el entendimiento de las realidades, a constituir las bases para estudios posteriores de modelamiento y a definir los comportamientos de los sistemas (Liévano y Londoño, 2012). Desde un punto de vista sistémico, la Geografía es la ciencia que estudia las leyes que rigen las pautas de la distribución espacial (Buzai, 2011).

Para Espinoza (2001), los estudios geográficos y sus derivaciones que se apoyan sobre una base sistémica y holística de la realidad, consideran la configuración del espacio geográfico como unidades ordenadas en una estructura jerárquica compuesta por diferentes sistemas que se encuentran relacionados entre sí, los cuales a su vez se encuentran

constituidos por subsistemas subordinados, existiendo el permanente flujo de materia, energía e información. Así, el análisis geográfico por medio de sistemas permite definir fronteras e interrelaciones de acuerdo con la naturaleza de estos, así como su capacidad de carga y amortiguamiento, además, de conocer la función específica de cada una de las partes que constituyen dicho espacio a través de la identificación de sus elementos.

Por su parte Buzai (2011), menciona que, una gran cantidad de estudios realizados con SIG pueden utilizarse para corroborar modelos espaciales y tomar referencia de diferentes leyes del comportamiento espacial, por lo que, los modelos son un elemento clave en el desarrollo de las ciencias, ya que están en la base de la comprobación crítica de las teorías científicas.

1.2 RELACIÓN ENTRE GEOGRAFÍA FÍSICA Y GEOGRAFÍA CUANTITATIVA.

La base fundamental de la Geografía Física se encuentra en la obra de Humboldt (en Sala y Batalla, 1999), quien describió las formas del relieve y condiciones climáticas, indicando con precisión y acierto las relaciones entre estos factores físicos y la distribución de animales y plantas. Más adelante, Karl Ritter (en Sala y Batalla, 1999) en base a los trabajos de sus predecesores (como Humboldt y otros), estableció la moderna Geografía Física Científica, fundamentada en la sistematización de sus amplios campos, principalmente, al introducir el estudio de las relaciones del medio físico y el humano y su actividad, al considerar a éste un componente más del sistema Tierra.

La Geografía Física se enfoca en el estudio del espacio abstracto dentro del área de las ciencias empírico-analíticas, por lo tanto, es una Geografía de tipo Cuantitativa. El espacio abstracto tiene dos vertientes para su estudio: la parte científica y la aplicada. La

Geografía Aplicada analiza el espacio abstracto a través del lenguaje científico matemático, apoyándose en la elaboración de modelos cartográficos (Pillet, 2014).

La Geografía Cuantitativa surge como alternativa a la visión regional que tenía la Geografía hasta inicios del siglo XX, retoma los planteamientos del enfoque neopositivista para explicar los fenómenos geográficos (Buzai y Santana, 2019). El paradigma cuantitativo apoya y fundamenta su razón de ser y sus métodos en el positivismo lógico, que considera que a la lógica formal, las matemáticas y la evidencia de los sentidos como las únicas fuentes seguras del conocimiento.

De acuerdo con Burton (1963) (en Fuenzalida et al. 2015), las técnicas cuantitativas son quizás el método más apropiado para el desarrollo de la teoría en la Geografía, ya que cualquier rama de esta ciencia que pretenda ser científica necesita desarrollar la teoría, para lo cual requiere de técnicas cuantitativas. Buzai y Santana (2019), refieren que, la corriente neopositivista aportó a la Geografía Cuantitativa un estricto sentido del lenguaje matemático que le permitió facilitar la modelación de los procesos geográficos y su entendimiento a través de la formalización matemática y estadística.

1.3 ANÁLISIS ESPACIAL POR MEDIO DE SIG Y SU APORTE A LA GEOGRAFÍA APLICADA

La Geografía Automatizada aparece como la revalorización de la Geografía Cuantitativa en el ambiente computacional, en la que la realidad se transforma en un modelo digital de tratamiento y análisis, y que sugiere un campo de aplicación técnico que se presenta como ventajoso respecto de los métodos de trabajo tradicional y por lo tanto manifiesta una transición hacia una nueva etapa de la Geografía Aplicada, la cual se centra en el Análisis Espacial Cuantitativo (Buzai, 2011)., entendido este como, el conjunto de

procedimientos de estudio de los datos geográficos, en los que se considera de alguna manera, sus características espaciales (Bosque, 1992, en Madrid y Ortiz, 2005), realizado mediante tecnologías digitales, de las cuales sobresalen los SIG como núcleo de las aplicaciones geoinformáticas (Buzai, 2011).

La automatización aplicada a la Geografía ha sido capaz de introducir en el Análisis Espacial una síntesis teórica-metodológica basada en los conceptos fundamentales de la disciplina geográfica. El avance tecnológico logrado por los SIG y los procedimientos cuantitativos asociados a ellos amplían las potencialidades del mapa para la realización de un Análisis Espacial objetivo, con procedimientos automatizados cada vez más precisos para la investigación aplicada (Buzai y Santana, 2019).

La Geografía como una ciencia integradora tiende a favorecer el desarrollo de una inteligencia espacial en la que se utilizan herramientas y modelos de otras ciencias, en el caso de los modelos de Análisis Espacial, se apoyan en las matemáticas como lenguaje de la ciencia y en la trigonometría como lenguaje de la forma espacial (Sala y Batalla, 1999).

Por su parte, los SIG permiten hacer operativos los conceptos fundamentales del Análisis Espacial, los cuales tienen amplia correspondencia con los principios geográficos fundamentales que se integran en el núcleo disciplinario de la Geografía (Fuenzalida, et al., 2015): localización, causalidad, correlación y aplicación (Carreto y González, 2016).

Goodhild et al. (1992) (en Madrid y Ortiz, 2005) define el Análisis Espacial dentro del SIG, como un conjunto de técnicas basadas en la localización de los objetos o hechos geográficos que analizan, requiriendo el acceso simultáneo al componente locacional y temático de la información. Para Madrid y Ortiz (2005), el principal aporte de los SIG al

Análisis Espacial, es el conjunto de funciones para captación, almacenamiento y recuperación, manipulación y análisis, y representación de los datos.

1.4 EL ENFOQUE GEOGRÁFICO DE LA CLIMATOLOGÍA

La Climatología se define conceptualmente como la ciencia que se ocupa del estudio de la distribución de los climas sobre la superficie terrestre y de sus relaciones con los restantes componentes del medio geográfico mediante el estudio característico de la atmósfera sobre los distintos lugares de la tierra a partir de la sucesión de combinaciones atmosféricas efímeras y coyunturales (Cuadrat y Pita, 2004). Por lo que, el clima sería la síntesis del tiempo, representando la unión provechosa de los principios meteorológicos y los hechos de la Geografía (Whittow y Whittow, 2000).

De acuerdo con Sala y Batalla (1999), el surgimiento de la Climatología tiene una marcada esencia geográfica, ya que, su interés de representar y analizar los climas espacialmente mediante clasificaciones climáticas le confirió un enfoque esencialmente geográfico, si bien, marcadamente descriptivo. Más adelante, la aparición de la Climatología Moderna ha estado marcada por su interés hacia la aplicación en términos físicos y matemáticos de las causas que determinan los climas y estos análisis han ido mejorando sustancialmente al introducir técnicas estadísticas sofisticadas.

La Climatología Moderna cuenta con tres fuentes de trabajo esenciales para comprender los rasgos básicos de los tiempos y climas mundiales: analíticas, sinópticas y dinámicas. El enfoque analítico se orienta hacia el estudio de los elementos climáticos por separado y su distribución en la superficie terrestre a través de la recopilación de largas series de datos de estaciones meteorológicas sobre cada uno de los elementos climáticos. El enfoque sinóptico se basa en la estadística y se interesa en la descripción de los climas

locales, trata de relacionar las condiciones climáticas locales con la circulación atmosférica. El enfoque dinámico está fundamentado en el reconocimiento de la atmósfera como una unidad física, trata de explicar los climas de nuevas formas en función de los movimientos y estados del aire en la atmósfera y su relación con los parámetros climáticos (Sala y Batalla, 1999).

1.5 LAS CLASIFICACIONES CLIMÁTICAS Y EL SISTEMA KÖPPEN-GEIGER

El primer avance sobre las clasificaciones climáticas fue introducido por Alexander Supan en el siglo XIX, que realizó una zonificación con base en temperaturas reales, estableciendo tres categorías distribuidas en grandes franjas latitudinales: el ecuador térmico, los trópicos de Cáncer y Capricornio y los polos boreal y austral (Sánchez y Garduño, 2014).

Los valores medios de los elementos atmosféricos condicionan la pertenencia de un territorio a una determinada región climática (Sala y Batalla, 1999). Las clasificaciones de los sistemas climáticos comprenden a aquellas basadas en su origen y aquellas basadas en sus efectos. Las primeras incluyen métodos basados en la frecuencia relativa de diferentes tipos de masa de aire, o bien, ubicaciones dentro de perturbaciones meteorológicas sinópticas. Las segundas son definidas por la resistencia de las plantas, o por la evapotranspiración (Farmer y Cook, 2013).

Actualmente, existe un gran número de clasificaciones climáticas, entre las principales se encuentran: la clasificación de Bergeron, que se basa en áreas de origen de las masas de aire; la clasificación de Thornthwaite, que está basada en las interacciones físicas entre la humedad local y la temperatura; el sistema de Köppen-Geiger, que se basa en la relación entre el clima y la distribución de la vegetación de los grandes biomas.

La primera clasificación cuantitativa de los climas mundiales fue presentada por Wladimir Köppen en 1900 y estuvo disponible posteriormente como mapa mundial actualizado en 1954 y 1961 por Rudolf Geiger (Sánchez y Garduño, 2014).

Köppen concibió la idea de que las plantas constituyen indicadores climáticos y su distribución define las regiones climáticas. (Kottek et al., 2006). Este sistema se basa en cinco conjuntos de límites de temperatura los cuales se desarrollaron a partir de su categorización de zonas térmicas adecuadas para diversos tipos de vegetación (Farmer y Cook, 2013). Estas categorías climáticas se definen de acuerdo con los valores de las temperaturas medias mensuales y precipitaciones mensuales y anuales, diferenciando entre estación húmeda de verano e invierno.

Los cinco climas principales de las que se compone este método de clasificación se representan con las cinco primeras letras del alfabeto, estas categorías presentan dos subdivisiones más, de acuerdo con distintos rangos de temperatura y humedad, diferenciando en total 31 categorías climáticas.

Cabe resaltar que, una deficiencia común de los esquemas de clasificación es que producen límites distintos entre las zonas que definen, en lugar de la transición gradual de las propiedades climáticas como se ve y sucede en la naturaleza. En tal sentido, para García (2004), la clasificación de Köppen-Geiger suele funcionar para describir las grandes zonas climáticas a nivel mundial, sin embargo, no es la más adecuada para representar superficies relativamente pequeñas con alta heterogeneidad, de ahí que se le han realizado diversas modificaciones de acuerdo con la finalidad del uso y la zona geográfica a representar, como las modificaciones que propuso esta autora para representar con un mayor nivel de detalle la gran diversidad de climas de la república mexicana.

Es importante mencionar que la descripción detallada de las categorías climáticas y sus criterios de clasificación no se abordan en este apartado debido a que se detallan en el capítulo siguiente de materiales y métodos.

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y

MÉTODOS

2.1 DISEÑO DE UNA INTERFAZ DE USUARIO

Para el cumplimiento del objetivo uno de la presente investigación, se diseñó una interfaz de fácil manejo para los usuarios potenciales del módulo, para lo cual se implementó la metodología Sprint (Knapp, 2017), ya que, permite reducir riesgos, tomar mejores decisiones, encontrar el lugar adecuado desde el cuál empezar, progresar de forma eficiente hacia la meta, planificar en base a decisiones fundamentadas y descubrir si una solución no funciona, de esta manera se puede hacer un eficiente uso del tiempo. Para lo cual se llevaron a cabo cinco pasos que se describen a continuación.

- 1) Como punto de partida se eligió el problema a solucionar. Se consideró la elaboración de un módulo de SIG que clasifique de forma correcta el tipo de clima de cualquier área geográfica, que sea intuitivo y de fácil manejo para los usuarios potenciales.
- 2) Se fijó una meta a largo plazo, para lo cual, se consideró que el módulo generado debería tener aplicabilidad, operatividad y ser susceptible de mejorarse y ampliarse.
- 3) Se creó un mapa (esquema) con los pasos fundamentales, en tal sentido, se consideraron las instrucciones totales para la correcta utilización del módulo como los pasos fundamentales, mismas que consisten en:
 - a) Abrir *TerrSet* y establecer un ambiente de trabajo.
 - b) Buscar y ejecutar el módulo de clasificación climática.
 - c) Preparar los conjuntos de capas de 12 meses de temperatura media y precipitación total por cada periodo que el usuario desee analizar.
 - d) Presionar un botón para buscar el archivo de grupo ráster de temperatura media, seleccionar dicho archivo y cargarlo en el módulo.

- e) Presionar un botón para buscar su archivo de grupo ráster de precipitación, seleccionar dicho archivo y cargarlo en el módulo.
 - f) Definir el número de periodos a analizar.
 - g) Dar un nombre a la capa de salida con la clasificación climática para guardarlo en la carpeta de trabajo o presionar un botón para buscar una ubicación específica en la que desee guardar el resultado.
 - h) Presionar un botón para comenzar a procesar las capas de entrada y generar la capa de salida.
 - i) Después de que la aplicación genera y despliega la capa de salida el usuario verifica el resultado obtenido.
- 4) Se compartieron los conocimientos y opiniones, para lo cual, se presentó un prototipo del módulo (Figura 2.1) para conocer la opinión de expertos y posibles usuarios, sus observaciones enriquecieron la propuesta inicial de la interfaz y de esta manera se llegó a un mejor producto.

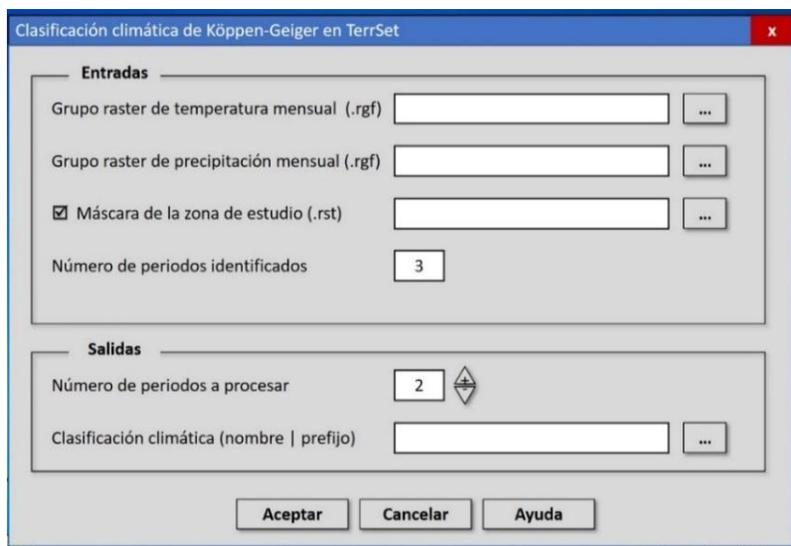


Figura 2.1. Prototipo de módulo para explicar su apariencia y funcionamiento.

5) Implementación del prototipo. Una vez que se tuvo la certeza del diseño, se comenzó con su desarrollo formal.

La lógica del funcionamiento del módulo requiere de dos archivos *Raster Group File* (rgf, por sus siglas en inglés), de temperatura media mensual y precipitación total mensual, a partir de estos, la interfaz hace los cálculos correspondientes para obtener la clasificación de los climas. Es importante señalar que el programa toma la capa uno como correspondiente al mes de enero, la capa dos a febrero y así sucesivamente con cada una de las capas hasta llegar a la capa 12, que correspondería al mes de diciembre. El proceso general que sigue el módulo se describe a continuación y se apoya de la figura 2.2:

- a) El módulo pide ingresar los rgf de temperatura media mensual y precipitación acumulada mensual en formato rst (ráster) (Figura 2.2a).
- b) En dado caso que se requiera aplicar una máscara para delimitar una zona específica, se selecciona la opción *Mascara de la zona de estudio* (Figura 2.2b) y el módulo permite ingresar un archivo ráster de tipo booleano.
- c) El módulo permite identificar diferentes períodos de tiempo, si el algoritmo detecta que hay más de doce archivos, clasificará los periodos correspondientes, es importante hacer mención que clasifica períodos completos, esto es, que los archivos sean múltiplos de doce (Figuras 2.2c y 2.2d).
- d) Se cuenta con la opción de asignar una dirección y un nombre para la capa de clasificación climática, en dado caso de que sea más de un período a clasificar se tiene la opción de asignar un prefijo para los archivos de salida (Figura 2.2e).
- e) Finalmente, el diseño presenta tres botones para el procesamiento (Figura 2.2f):
 - I) Aceptar: para llevar a cabo el proceso de clasificación.

II) Cancelar: en dado caso que se decida cancelar el proceso.

III) Ayuda: muestra de forma general el funcionamiento del módulo.

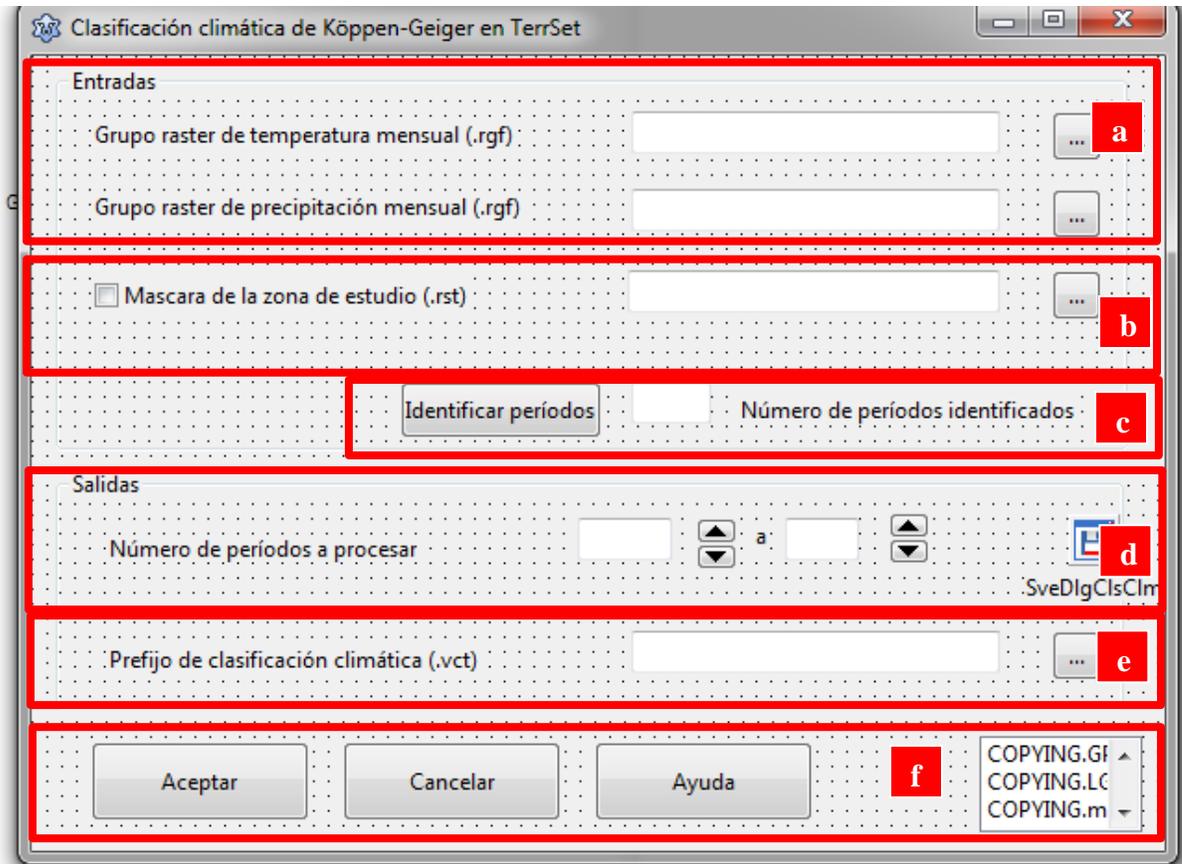


Figura 2.2. Diseño de Interfaz de usuario.

2.2 IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS CARTOGRÁFICOS

Para el cumplimiento del objetivo dos señalado en la sección de objetivos específicos de este documento, se buscó implementar los modelos cartográficos de la clasificación climática de Köppen-Geiger elaborados por Colín (2019), mediante su automatización para facilitar su uso con una interfaz de usuario en SIG. Para esta actividad se utilizó el Método Clásico para el desarrollo de sistemas, pero aplicado en este caso a un SIG.

Como primer paso se analizó la estructura de clasificación de los climas del método Köppen-Geiger, este paso es fundamental para entender cómo es que se diferencian los diferentes climas que manejan los autores.

La clasificación de Köppen-Geiger se diseñó para identificar los climas asociados a ciertos biomas, bajo el supuesto de que la vegetación natural constituye un indicador del clima. Está construida sobre la base de cinco tipos de vegetación, es decir, distingue la vegetación de las zonas ecuatoriales, las zonas áridas, las zonas templadas, las zonas frías y las zonas polares. A continuación, se describen las generalidades de la clasificación climática de Köppen-Geiger, mismas que se toman de Kottek, et al. (2006).

Los valores medios anuales y mensuales de las temperaturas y las precipitaciones diferencian los criterios de los diferentes grupos y subgrupos climáticos que se identifican mediante un código de letras (Figura 2.3).

La clasificación de Köppen-Geiger comprende cinco grupos de vegetación principales identificadas con una primera letra: zona ecuatorial (A), zona árida (B), zona templada cálida (C), zona de nieve (D) y zona polar (E).

Las cinco clasificaciones primarias se pueden dividir en clasificaciones secundarias identificadas con una segunda letra que considera la precipitación, lluvioso todo el año (f), clima monzónico (m), estación seca en verano (s), estación seca en invierno (w), semidesértico (S) y desértico (W).

En tanto que, una tercera letra distingue la temperatura del aire, la temperatura del mes más cálido es mayor a 22°C (a), la temperatura del mes más cálido es menor a 22°C (b), la temperatura del mes más cálido es menor a 22°C y la temperatura media del mes

más frío es mayor a -38°C (c), la temperatura del mes más cálido es menor a 22°C y la temperatura media del mes más frío es menor a -38°C (d).

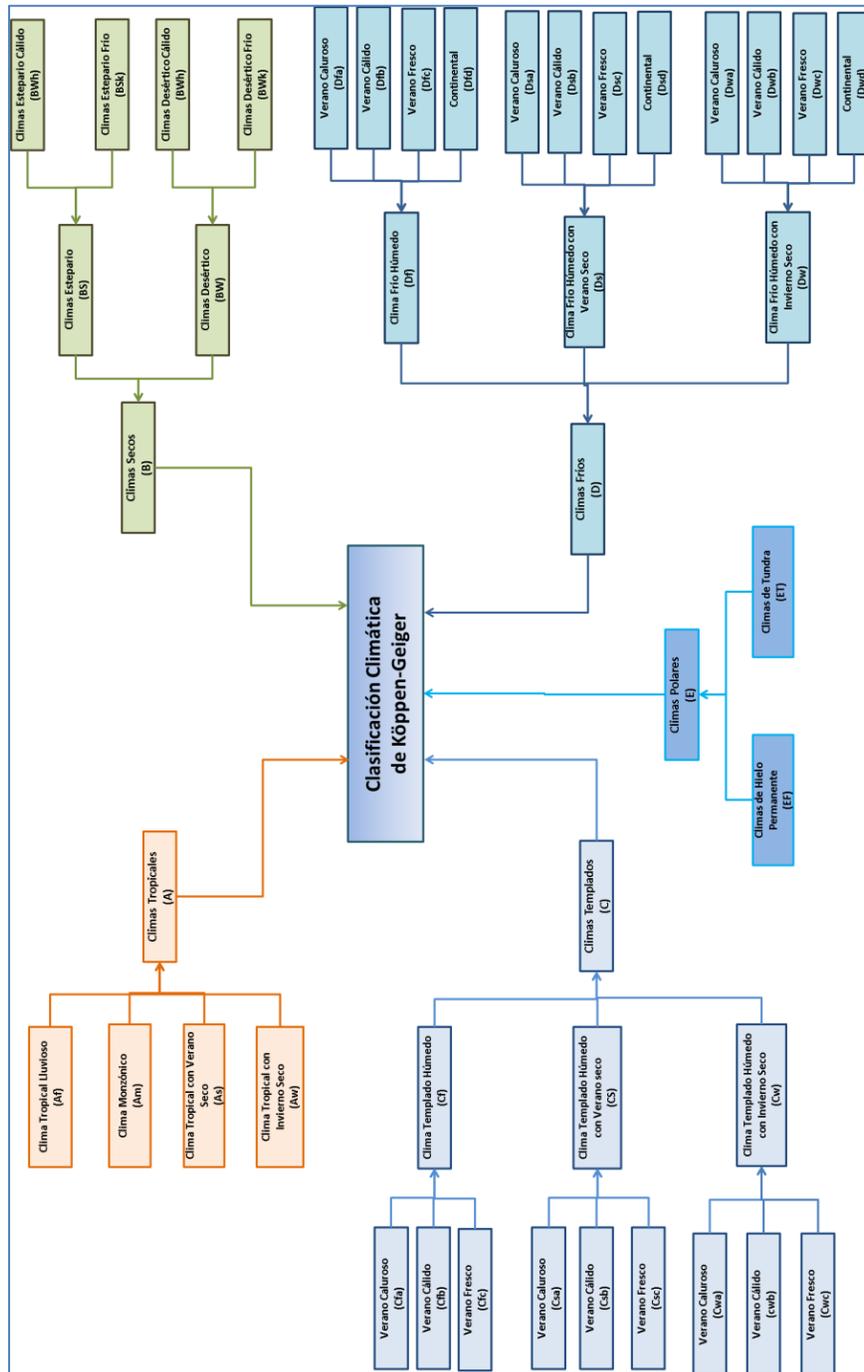


Figura 2.3. Modelo conceptual de la clasificación climática de Köppen-Geiger.

El rango de temperatura de 18°C separa los climas ecuatoriales o tropicales (A) de los climas templados (C). Una evapotranspiración mayor a la precipitación es el parámetro que separa los climas áridos y semiáridos (B) del resto de los climas. En tanto que el parámetro de 10°C de la temperatura máxima y de -3°C en la temperatura mínima separa los climas templados (C) de los fríos (D). Finalmente, los climas polares (E) presentan temperaturas promedio por debajo de los 10°C durante todo el año (Tabla 2.1).

Como segundo paso, se llevó a cabo la implementación del modelo lógico en el Macromodelador de TerrSet, y consistió en separar primero los cinco grupos principales de climas (primera letra), estos grupos de climas principales se fueron reclasificando para identificar la segunda clasificación (segunda letra), posteriormente, se calculó el régimen de calor (terceras letras) a los climas que llevan esta tercera clasificación y finalmente se hizo una sobreposición de capas (Figura 2.4).

De acuerdo con Colín (2019), la lógica para ir generando los diferentes tipos de climas utilizando el Macromodelador de TerrSet consiste en hacer operaciones de suma, resta, multiplicación, división, escalamiento, coberturas y reclasificaciones de capas, de esta manera se van clasificando los climas de acuerdo a los valores de las temperaturas medias mensuales y precipitaciones totales mensuales y a los parámetros del modelo lógico de Koppen-Geiger (Figura 2.4).

Tabla 1.1. Parámetros de la clasificación climática de Köppen-Geiger.

Clima	Subclima	Parámetros
A	Temperatura media del mes más frío > 10°C.	
	<i>Af</i>	No tiene estación seca; $P_{min} \geq 60\text{mm}$ en el mes más seco.
	<i>Am</i>	Mes más seco $P_{ann} \geq 25(100 - P_{min})$.
	<i>As</i>	Estación seca en verano; $P_{smin} < 60\text{mm}$.
	<i>Aw</i>	Estación seca en invierno; $P_{wmin} < 60\text{mm}$.
B	Evapotranspiración mayor a la precipitación.	
	<i>BS</i>	$10 P_{th} > P_{ann} > 5 P_{th}$.
	<i>BW</i>	$P_{ann} < 5 P_{th}$.
C	Temperatura media del mes más frío entre -3°C y 10 °C.	
D	Temperatura media del mes más frío menor a -3°C y temperatura media del mes más cálido mayor a 10°C.	
C y D	<i>s</i>	$P_{smin} < 40\text{mm}$; $P_{wmax} > 3 P_{smin}$; $P_{smin} < P_{wmin}$.
	<i>w</i>	$P_{smax} > 10 P_{wmin}$; $P_{wmin} < P_{smin}$.
	<i>f</i>	Si no se cumple ninguna de las dos anteriores.
E	Temperatura media del mes más cálido menor a 10°C.	
	<i>ET</i>	Temperatura media del mes más cálido $> 0^\circ\text{C}$.
	<i>EF</i>	Temperatura media del mes más cálido $< 0^\circ\text{C}$.
Régimen térmico (tercera letra)	<i>a</i>	Temperatura del mes más cálido superior a 22°C.
	<i>b</i>	Temperatura del mes más cálido inferior a 22°C y temperaturas medias superiores a 10°C en al menos 4 meses.
	<i>c</i>	Menos de cuatro meses con temperatura media superior a 10°C.
	<i>d</i>	El mes más frío está por debajo de -38°C.
	<i>h</i>	Temperatura media anual superior a 18°C.
	<i>k</i>	Temperatura media anual inferior a 18°C.
	Abreviaturas	
<i>P_{min}</i> = Precipitación mínima mensual.		
<i>P_{ann}</i> : Precipitación acumulada anual.		
<i>P_{th}</i> : Índice de sequedad.		
<i>P_{smin}</i> = Precipitación mínima en verano.		
<i>P_{wmax}</i> = Precipitación máxima en invierno.		
<i>P_{wmin}</i> = Precipitación mínima en invierno.		
<i>P_{smax}</i> = Precipitación máxima en verano.		
<i>T_{ann}</i> = Temperatura media anual.		

Fuente: Elaboración propia con base en Kotték et al. (2006).

2.3.1 API DE TERRSET

Para acceder a la API (término en inglés para referirse a una Interfaz de Programación de Aplicaciones), el primer paso fue cargar la librería de TerrSet a la IDE mediante la opción *Import Type Library*. Una vez que se importó la librería, esta se llama para hacer la conexión con TerrSet. Este procedimiento se llevó a cabo en tres pasos:

- 1) En el editor de código fuente se declaró la variable `Idrisi32_1_0_tlb` dentro de la sección de usos.
- 2) En la sección de variables generales, se declaró la variable `Trr18` de tipo *IdrisiApiServer* (propio de TerrSet. El nombre `Trr18` es opcional y el desarrollador puede elegir el nombre que desee. En este caso se utilizó ese nombre para referirse a la versión 18 de TerrSet).
- 3) En la sección de inicio de un formulario se llamó a la variable con la instrucción `Trr18=CoIIdrisiApiServer.Create`, para crear la conexión con ese programa en específico.

2.3.2 CARGA DE LOS ARCHIVOS DE GRUPO RASTER

Es la sección correspondiente donde se programan los eventos para acceder a los archivos de grupo ráster (*Raster Group File* o *rgf*, en la figura 2.2a) de temperatura y precipitación. Para realizar esta actividad se tomó en cuenta el recuperar la ruta completa y el nombre del archivo del *rgf*, y mostrar el nombre corto del archivo, con la finalidad de hacer más fácil su lectura.

Para que el módulo funcione adecuadamente, un *rgf* debe enlistar los meses del año, correspondiendo el primer renglón con el mes de enero, el segundo con febrero, el tercero con marzo y así sucesivamente hasta el mes doce del período, que correspondería a

diciembre de este. Si el rgf tiene más de un período, el módulo lee el archivo trece como enero del segundo período, el catorce como febrero y así sucesivamente hasta el archivo 24 que considera como diciembre del segundo período. Esta misma lógica se mantiene por cada período adicional que incluya el rgf (buscando que el número total de archivos sea múltiplo de 12).

Posteriormente, se programó el evento para acceder de forma opcional a un archivo rst de máscara, en dado caso de que se requiera un polígono de delimitación. Este paso consistió en activar los controles de edición y el botón de búsqueda del archivo en la interfaz de usuario diseñada (Figura 2.2 b).

2.3.3 IDENTIFICACIÓN DE PERÍODOS

Para que la aplicación lea correctamente el número de períodos identificados se basa en la estructura del rgf de entrada de precipitación como de temperatura. De esta manera la validación de este archivo tiene que cumplir dos condiciones:

- 1) Que cada rgf contenga un número de capas que sea múltiplo de doce, ya que son doce archivos por cada período.
- 2) Que el número de archivos de temperatura sea igual al número de archivos de precipitación.

Una vez validado que el número de archivos cumplen con las dos especificaciones anteriores, se muestra el número de periodos identificados en la figura 2.2 d. En caso contrario, se despliega un mensaje de que no hay periodos completos para clasificar, o bien, que el número de capas de temperatura y precipitación es diferente. Finalmente, el control del incremento/decremento (figura 2.2 d) no deja pasar del máximo de períodos que se

tienen identificados. Este control se diseñó para que el usuario elija el número de periodos que desee procesar, en caso de que haya archivos para más de un período.

2.3.4 SECCIÓN DE SALIDAS

La sección de salidas (Figura 2.2d y 2.2e) aparece una vez que se tiene la validación de entradas completa y correcta. El usuario no puede activar el botón de aceptar antes de que cumpla con todas las entradas, salidas y parámetros solicitados, esto es, que no se pueda iniciar la clasificación climática hasta que el módulo este adecuadamente requisitado.

El espacio para dar nombre a la capa de salida (caja de edición de texto) se diseñó para que cuando se active el botón de guardado la captura del archivo de salida cambie dependiendo del número de periodos procesados, esto es, para un solo período que corresponde a una sola salida, pide el nombre de archivo, si son varias salidas (por tratarse de varios períodos) entonces pide un prefijo para agregarlo al nombre de archivo de salida.

La extensión por default que se da al archivo de salida es rst (por tratarse de un archivo ráster). De manera predeterminada la ruta de salida es la carpeta de trabajo de TerrSet; pero el usuario tiene la libertad de guardar sus resultados en cualquier ruta que desee.

2.3.5 ASIGNACIÓN DE LAS CATEGORÍAS CLIMÁTICAS EN LA CAPA DE SALIDA

La capa de salida es un archivo ráster con una clave numérica que corresponde a la clasificación climática identificada, por lo que, fue necesario vincular dicha clave con la descripción del clima, y así presentarla al usuario. Por lo tanto, la última parte de la programación consistió en editar de forma automatizada el archivo de documentación de la

capa ráster de salida (rdc) para agregar los nombres de las categorías climáticas y que estos se vean cuando se despliegue la capa.

El procedimiento para trabajar con el rdc consistió en generar un archivo de valores de atributo (avl) que contiene la clave numérica de todos los climas identificados. Internamente el programa les asigna la categoría a estas claves y las plasma en el rdc de la capa final.

2.4 DESCARGA DE IMÁGENES RÁSTER DE ELEMENTOS CLIMÁTICOS

Este procedimiento consistió en realizar la descarga correspondiente de imágenes ráster de la república mexicana desde el portal *DayMet* (Figura 2.5). El portal *DayMet* genera, para América del Norte, capas interpoladas de superficie cuadrículada de 1 km a partir de datos diarios de temperaturas máximas y mínimas, precipitaciones, presión de vapor, radiación y equivalente de agua de nieve, mediante software y algoritmos especializados para tal fin (*DayMet*, 2020).

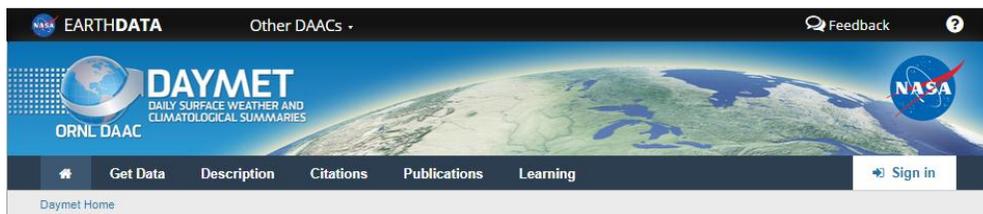


Figura 2.5. Menú principal del portal DayMet.

Fuente: DayMet (2020).

La serie de tiempo que se consideró fue 1980-2019, que comprende un período de 40 años. Las descargas correspondieron a capas mensuales de temperatura máxima y mínima, y a precipitación total (Figura 2.6). El sistema de coordenadas y los parámetros de proyección fueron los siguientes:

- 1) Sistema de proyección Cónica Conforme de Lambert.
- 2) Unidades de proyección en metros.
- 3) Esferoide WGS 84.
- 4) Primer paralelo estándar a 25° norte.
- 5) Segundo paralelo estándar a 60° norte.
- 6) Meridiano central a -100° oeste.
- 7) Latitud de origen a 42.5° norte.
- 8) Falso este = 0.
- 9) Falso norte = 0.

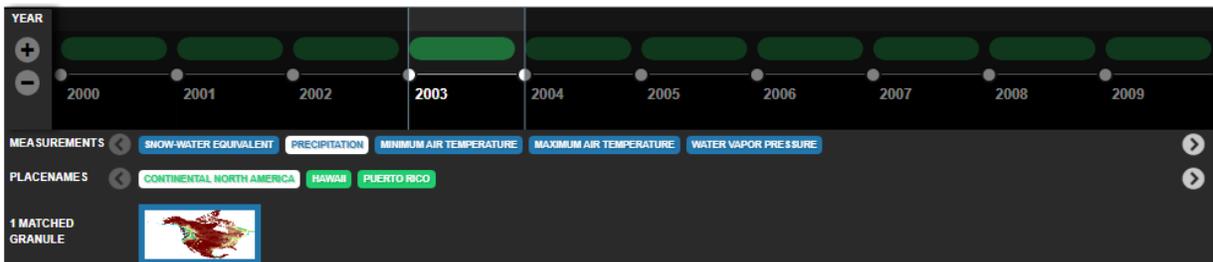


Figura 2.6. Menú de descarga de capas ráster mensuales del portal *DayMet*.

Fuente: *DayMet* (2020).

El total de imágenes mensuales descargadas fue de 1,440. De éstas, 480 fueron de temperatura máxima, 480 de temperatura mínima y 480 de precipitación total. Los parámetros de descarga (Figura 2.7) fueron los siguientes:

- 1) Sistema de proyección: WGS 84.
- 2) Formato: NetCDF (flotante)
- 3) Tiempo: Series mensuales de 1980-2019.
- 4) Método de interpolación: vecino más cercano.
- 5) Coordenadas Extremas:
 - Latitud Sur: 21.500
 - Latitud Norte: 17.800
 - Longitud Este -96.300
 - Longitud Oeste -105.700

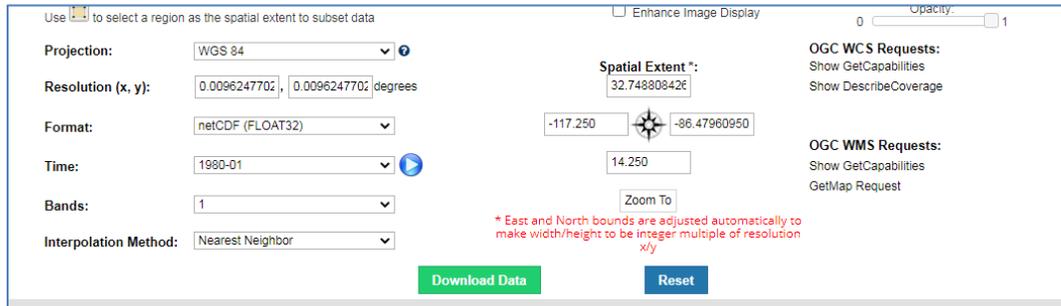


Figura 2.7. Ejemplo de definición de coordenadas extremas y tipo de archivo de descarga.

Fuente: DayMet (2020).

Una vez que se concluyó con la descarga de imágenes, éstas se importaron a TerrSet y se convirtieron a formato rst.

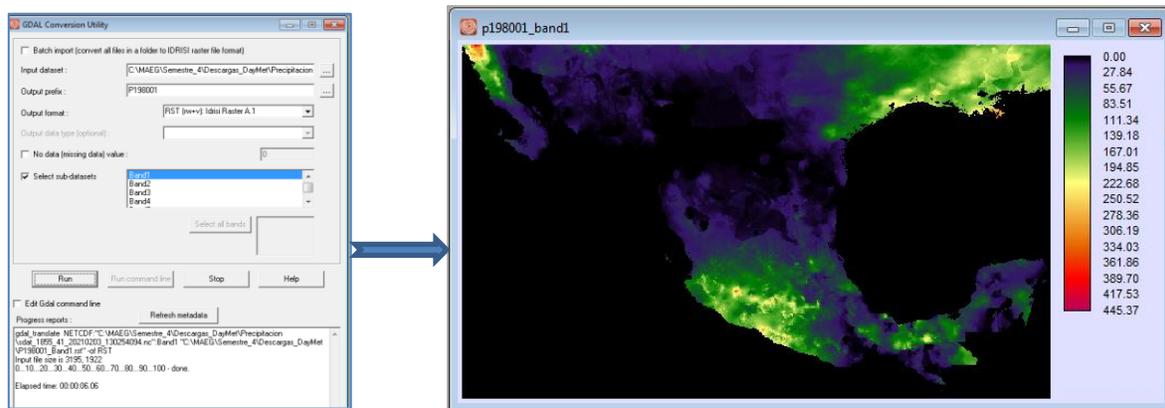


Figura 2.8. Módulo *GDAL Conversion Utility* de TerrSet para importar y convertir imágenes a formato rst.

El siguiente proceso consistió en agrupar cada una de las capas de acuerdo con sus meses correspondiente, de esta forma se generaron los 12 rgf correspondientes a cada uno de los meses del año, esto es, todos los meses de enero se agruparon en un rgf, febrero en otro rgf, y así sucesivamente hasta diciembre. Adicionalmente, se generaron tres períodos diferentes para cada uno de los rgf, esto es, un rgf de 40 capas (período 1980-2019) y dos rgf de 20 capas (períodos 1980-1999 y 2000-2019) (Figura 2.9).

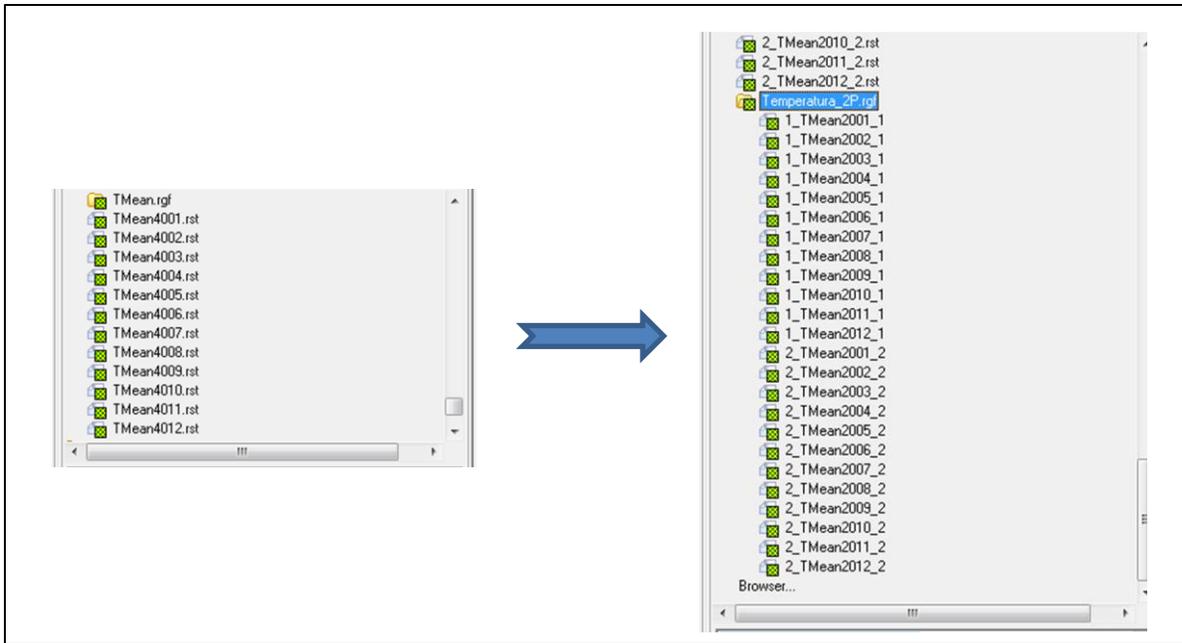


Figura 2.9. Creación de grupos de capas ráster.

El paso siguiente, y de acuerdo con la recomendación de la OMM (2011), consistió en promediar la temperatura máxima y mínima para obtener la temperatura media mensual. Una vez que se contó con este parámetro se hicieron los cálculos para tener las medias de los períodos, para lo cual, cada grupo de capas se dividió entre 40 y 20 respectivamente (para generar tres períodos distintos) (Figura 2.10), de esta manera se generaron los insumos necesarios para abastecer las entradas del módulo de clasificación climática.

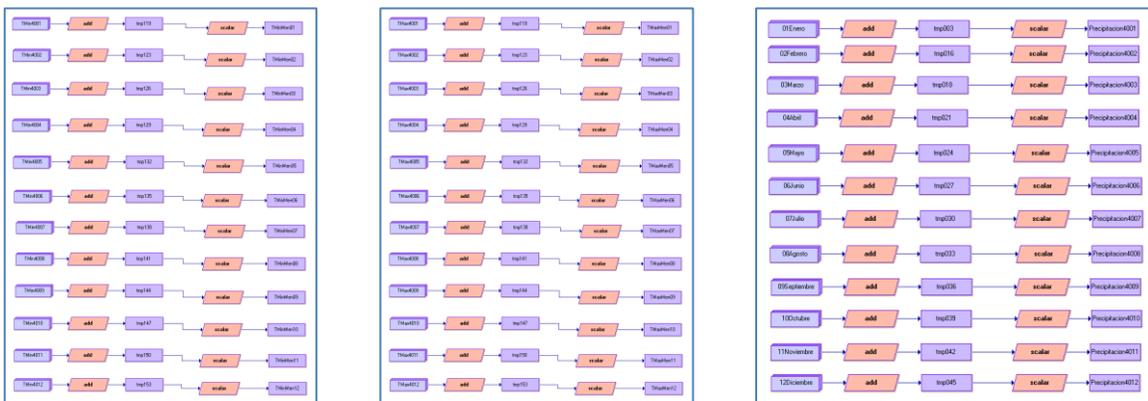


Figura 2.10. Ejemplo de macromodelo de TerrSet para calcular el promedio mensual de los grupos de 480 capas ráster.

2.5 ANÁLISIS COMPARATIVO

El objetivo específico tres de esta investigación consistió en hacer una evaluación de los resultados generados por el módulo de SIG. Para ello, se comparó la clasificación climática de Köppen-Geiger de puntos aleatorios distribuidos uniformemente sobre el territorio, obtenida por un lado con un procedimiento manual, y, por otro lado, obtenida con el módulo automatizado. Dicho procedimiento se explica a continuación.

Tomando como referencia una de las capas de temperatura, se generó una capa ráster con la máscara de la República Mexicana (capa booleana). A continuación, se contabilizó el número de celdas con datos (valor 1) y sin datos (valor 0) para de esta manera tener un universo de trabajo (celdas representando al país) y en base a éste determinar el tamaño de la muestra.

El total de celdas con datos fue de 2,745,078 cifra que se ocupó para el cálculo del tamaño la muestra. Dado que se trata de una población finita, y que se conoce el tamaño del universo, se aplicó la ecuación 1 (*Question Pro*, 2021):

$$n = \frac{N}{1} + N (e^2) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Dónde:

- 6) n : es el número representativo de la población (la muestra).
- 7) N : es el número total de la población donde se pretende realizar el estudio.
- 8) e : es el nivel de precisión con el que se pueden generalizar los resultados.

Al ser un tipo de estudio exploratorio, el nivel de confianza de la muestra se fijó en un 95%, con un margen de error del 5%. El tamaño del universo, el nivel de confianza y el margen de error se emplearon en la herramienta proporcionada por *Question Pro* (2021). De acuerdo con lo anterior, el total de celdas para la muestra fue de 385 celdas.

Para seleccionar las celdas de la muestra, se usó como base la máscara de la república mexicana generada previamente, usando el módulo *Sample* de TerrSet utilizando el método sistemático, esto es, que las distancias sean proporcionales entre cada una de las celdas seleccionadas para la muestra (Figura 2.11).

Para calcular el tipo de clima de manera manual, se siguió la lógica presentada en la tabla 1.1, misma que se implementó en *Excel*.

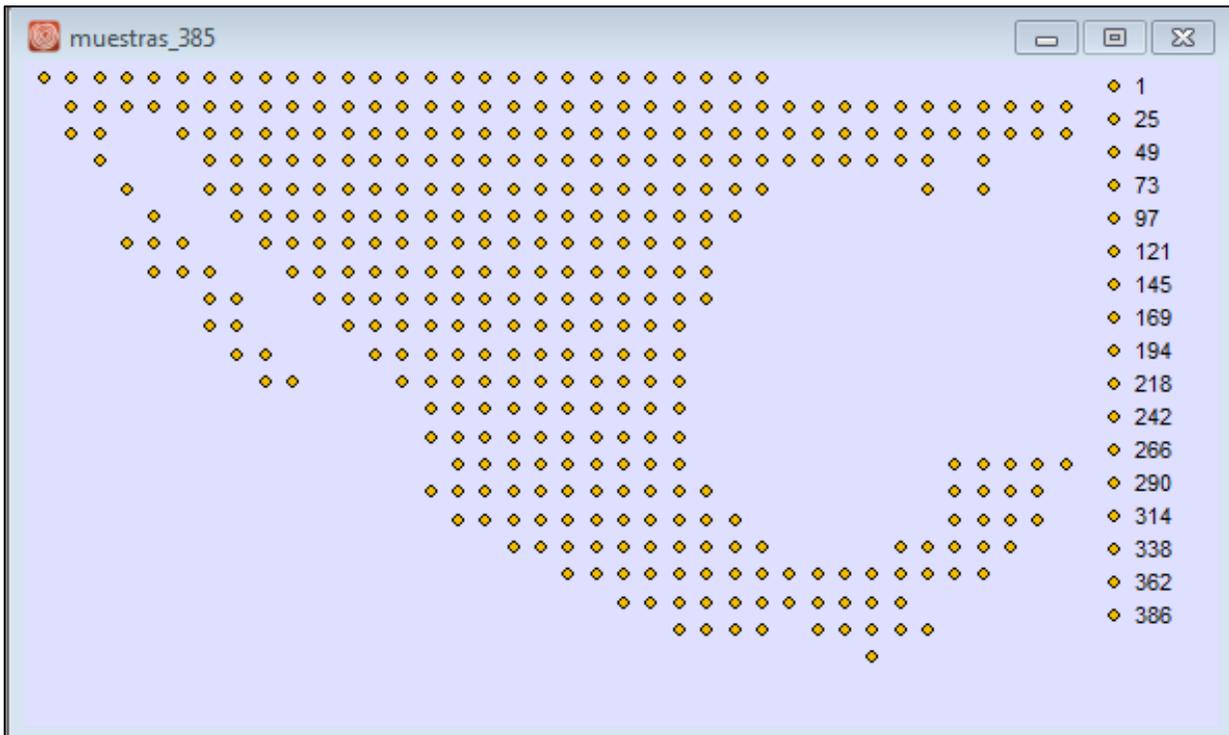


Figura 2.11. Esquema del muestreo.

El primer paso consistió en calcular 14 parámetros de temperatura y precipitación para cada una de las celdas de la muestra:

- Temperatura Media Anual (Tann).
- Temperatura Máxima (Tmax).
- Temperatura Mínima (Tmin).
- Índice de Resequead (Pth).

- Precipitación Anual (Pann).
- Precipitación Total en Verano (Psann).
- Precipitación Total en Invierno (Pwann).
- Precipitación Máxima (Pmax).
- Precipitación Mínima (Pmin).
- Precipitación Máxima en Verano (Psmax).
- Precipitación Mínima en Verano (Psmín).
- Precipitación Máxima en Invierno (Pwmin).
- Precipitación Mínima en Invierno (Pwmin).
- Temperatura Media Mensual Mayor a 10° C (Tmm > 10).

Posteriormente se calcularon los tipos de climas por el método de Köppen-Geiger en *Excel*. El primer cálculo se realizó en base a la Temperatura Mínima (Tmin), si esta es superior a 18° C corresponde a clima tropical, si es menor a 18° C pero superior a -3° C corresponde a climas templados cálidos, y si es inferior a -3° C corresponde a climas templados fríos. La Temperatura Máxima (Tmax) separa a los climas polares del resto, si esta es inferior a 10° C se considera como clima polar:

- Tropicales (A): $T_{ann} > 18^{\circ}\text{C}$;
- Templados Cálidos (C): $-3^{\circ}\text{C} > T_{min} > 18^{\circ}\text{C}$;
- Templados Fríos (D): $T_{min} < -3^{\circ}\text{C}$;
- Polares (E): $T_{max} < 10^{\circ}\text{C}$.

Para calcular los climas B, fue necesario primero calcular el índice de sequedad (IR), para lo cual se requirió comparar la temperatura con la precipitación para determinar los niveles de evapotranspiración:

- Si dos terceras partes de la precipitación anual ocurren en invierno, entonces el

IR quedaría como en la ecuación 2:

$$IR = 2 T_{ann} \quad (\text{Ecuación 2})$$

- Si dos terceras partes de la precipitación anual ocurren en verano, entonces el IR quedaría como en la ecuación 3:

$$IR = 2 T_{ann} + 28 \quad (\text{Ecuación 3})$$

- Si es diferente a los dos casos anteriores, entonces el IR quedaría como en la ecuación 4:

$$IR = 2 T_{ann} + 14 \quad (\text{Ecuación 4})$$

Una vez que se calculó el índice de sequedad, si este es inferior a diez veces la precipitación anual (P_{ann}) se clasifica como clima árido. Este tipo de clima tiene dos variantes, el clima seco estepario, el cual va del rango de 5 a 10 veces menor a la precipitación anual respecto del índice de sequedad, y el seco desértico que es menor a 5:

- BS: $P_{ann} > 5 P_{th}$
- BW: $P_{ann} \leq 5 P_{th}$

Una vez diferenciados los cinco tipos de climas principales, el siguiente cálculo se realizó con base a los parámetros de las precipitaciones, siendo estas necesarias para clasificar cuatro climas tropicales que corresponden a las segundas letras de la clasificación. Para lo cual fue necesario separar la Precipitación Mínima (P_{min}) en el rango de los 60 mm de lluvias, parámetro que separa el régimen lluvioso del seco. De esta manera se pudo clasificar los climas:

- Lluvioso todo el año (f) cuando $P_{min} \geq 60\text{mm}$.
- Clima monzónico (m) cuando $P_{ann} \geq 25 (100 - P_{min})$.
- Régimen de sequía en verano (s) cuando $P_{min} < 60\text{mm}$ en verano.
- Régimen de sequía en invierno (w) cuando $P_{min} < 60\text{mm}$ en invierno.

Para clasificar la segunda letra para los climas Templados (C y D) fue necesario obtener las diferencias entre las precipitaciones, de esta forma se pudo clasificar los tipos de clima:

- **s:** período seco en verano cuando $P_{smin} < P_{wmin}$, $P_{wmax} > 3 P_{smin}$ y $P_{smin} < 40$ mm.
- **w:** período seco en invierno cuando $P_{wmin} < P_{smin}$ y $P_{smax} > 10 P_{wmin}$.
- **f:** lluvia uniforme durante todo el año, si no es s o w.

Para calcular el nivel de calor o régimen térmico (terceras letras de la clasificación) fue necesario hacer rangos de temperaturas que permitieron diferenciar los tipos h y k para climas áridos (B):

- **h:** caluroso, cuando $T_{ann} \geq 18^{\circ}\text{C}$
- **h:** frío, cuando $T_{ann} < 18^{\circ}\text{C}$

Los climas a, b y c para climas templados C, así como los a, b, c y d para climas templados D, se clasificaron de acuerdo con los siguientes criterios:

- **a:** verano caluroso, cuando $T_{max} \geq 22^{\circ}\text{C}$
- **b:** verano cálido, si no es a y por lo menos 4 meses presentan temperaturas medias mayores a 10°C
- **c:** verano frío, si no es b y $T_{min} > -38^{\circ}\text{C}$
- **d:** continental, si no es b y $T_{min} \leq -38^{\circ}\text{C}$

Una vez calculados los parámetros anteriores se pudo determinar el clima para cada celda de *excel*. En la clasificación de Köppen-Geiger los climas tropicales (A) y polares (E) no llevan terceras letras, caso contrario a los climas templados (C y D) y secos (B) que si las utilizan.

El siguiente paso fue calcular la clasificación climática de las mismas muestras con el módulo de SIG desarrollado en esta investigación. De esta forma se estuvo en condición

de comparar los resultados de Excel con los del módulo, expresándose de manera cuantitativa mediante la proporción de coincidencia (ecuación 5).

$$PC = 100 \frac{NC}{TM} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Dónde:

PC = porcentaje de coincidencia;

NC = número de muestras coincidentes;

TM = total de muestras.

Es importante señalar que la ecuación 5 se utilizó para validar que haya automatizado de forma correcta el método de clasificación climática, por lo que se buscó que PC fuera igual al 100%. Este porcentaje meta no se logró en primera instancia, por lo que fue necesario realizar varios ajustes tanto a los parámetros como al procedimiento general del módulo hasta que se alcanzó la coincidencia total. De esta manera este indicador ayudo a asegurar la calidad del procedimiento programado.

Para complementar la medición de la eficiencia dada por el indicador anterior, también se midió la eficacia del resultado que arroja el módulo. Para esto, se descargó una capa de clasificación climática de Köppen-Geiger con datos del período 1980-2016 (Beck et al., 2018) de aproximadamente 1 km de resolución con la cobertura de todo el país. A la par se empleó el módulo de SIG para realizar la clasificación climática de todo el país usando las capas de *DayMet* del período 1980-2019 y con una resolución aproximada de 1 km. De ambas capas se obtuvo la clasificación climática de los mismos puntos muestreados en el procedimiento anterior, de tal manera que con la ecuación 5 se pudo comparar el nivel de coincidencia entre ambas fuentes de la clasificación climática.

Una vez validada la aplicación, se desarrollaron dos casos de estudio. El primero de ellos fue la clasificación climática de un período de 40 años para todo el país. Adicionalmente, se elaboró una caracterización geográfica del país y se analizó la distribución del clima con base en dichas características.

La caracterización geográfica abarcó los temas de localización, hidrología, ecorregiones, uso de suelo y vegetación y población. Las capas para elaborar la caracterización se obtuvieron de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), en formato vectorial (shapefile) de todo el país.

Para el segundo caso de estudio, el conjunto de capas mensuales de *DayMet* de los 40 años se dividió en dos grupos de 20 años cada uno (período 1: 1980-1999 y período 2: 2000-2019). Para cada uno de estos períodos se realizó la clasificación climática usando el módulo de SIG creado. El propósito de este caso de estudio fue probar la utilidad del módulo de SIG para realizar estudios de la evolución del clima, por lo que las dos clasificaciones climáticas de Köppen-Geiger se compararon en la herramienta *Land Change Modeler* de *Terrset*, con la finalidad de realizar una tabulación cruzada que permitiera conocer espacialmente los cambios y las persistencias de las categorías climáticas en la república mexicana entre dos períodos (1980-1999 y 2000-2019).

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

3.1 MÓDULO DE SIG CON LA CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA.

En la figura 3.1 se expone la interfaz principal del módulo logrado para clasificar el clima por Köppen-Geiger. A partir de esta misma figura se explica el llenado de la interfaz de usuario:

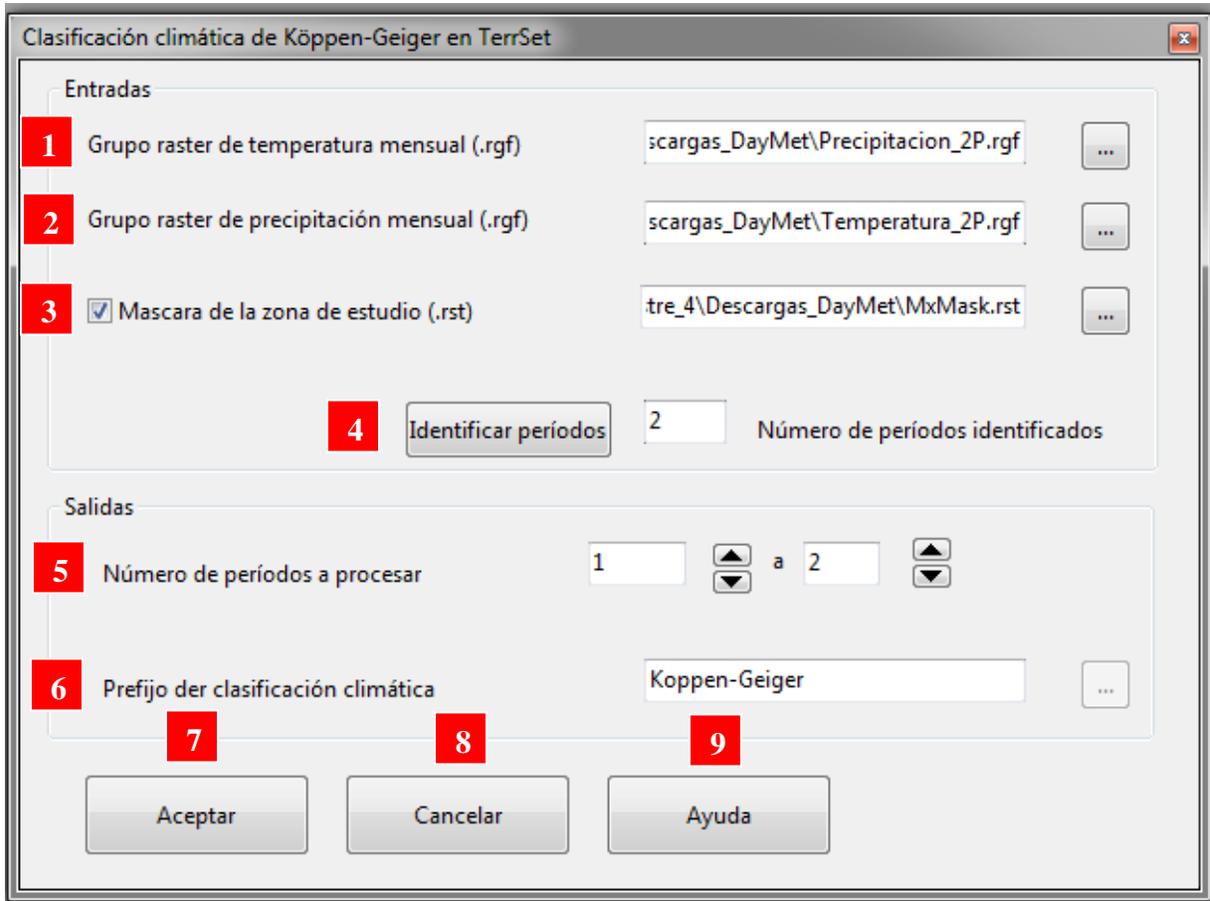


Figura 3.1. Componentes del módulo de clasificación climática.

- 1) Se ingresa el archivo de grupo ráster (*rgf*) de 12 capas ráster de temperatura media mensual (una capa por cada mes) por cada período que se desee clasificar (en el caso de un período se leerán 12 nombres de archivo, con dos períodos 24 nombres de archivo, con tres períodos 36 nombres de archivo y así sucesivamente).

- 2) Se ingresa el archivo de grupo ráster (rgf) de 12 capas ráster de precipitación mensual (una capa por cada mes) por cada período que se desee clasificar (en el caso de un período se leerán 12 nombres de archivo, con dos períodos 24 nombres de archivo, con tres períodos 36 nombres de archivo y así sucesivamente).
- 3) Opcionalmente se puede ingresar un archivo ráster con una máscara de una zona específica, con la finalidad de limitar la clasificación a dicha zona.
- 4) Se presiona el botón de Identificar períodos para conocer el número de clasificaciones climáticas que podría realizar el módulo.
- 5) Se indica el número de períodos que se desean procesar respecto del total de períodos disponibles (por ejemplo, si son cinco períodos se pueden elegir los cinco, los primeros tres, sólo el último o sólo el tercero).
- 6) Se indica el nombre del archivo con el resultado de la clasificación climática. Se generarán tres archivos con los resultados, un ráster, un vectorial y uno de atributos. En el caso de que se procese más de un período, el nombre dado se usará como un prefijo.
- 7) Se presiona el botón de Aceptar para ejecutar el proceso de clasificación climática.
- 8) Se presiona el botón de Cancelar en caso de que se desee suspender el proceso.
- 9) Se presiona el botón de Ayuda para visualizar una explicación del funcionamiento del módulo.

En la figura 3.2 se puede apreciar la ejecución del módulo en el entorno de TerrSet, interactuando con funciones como el buscado de archivos (*Pick list* de TerrSet) y mostrando en la barra de estado del propio SIG las herramientas empleadas por el nuevo módulo y el nivel de avance en su ejecución.

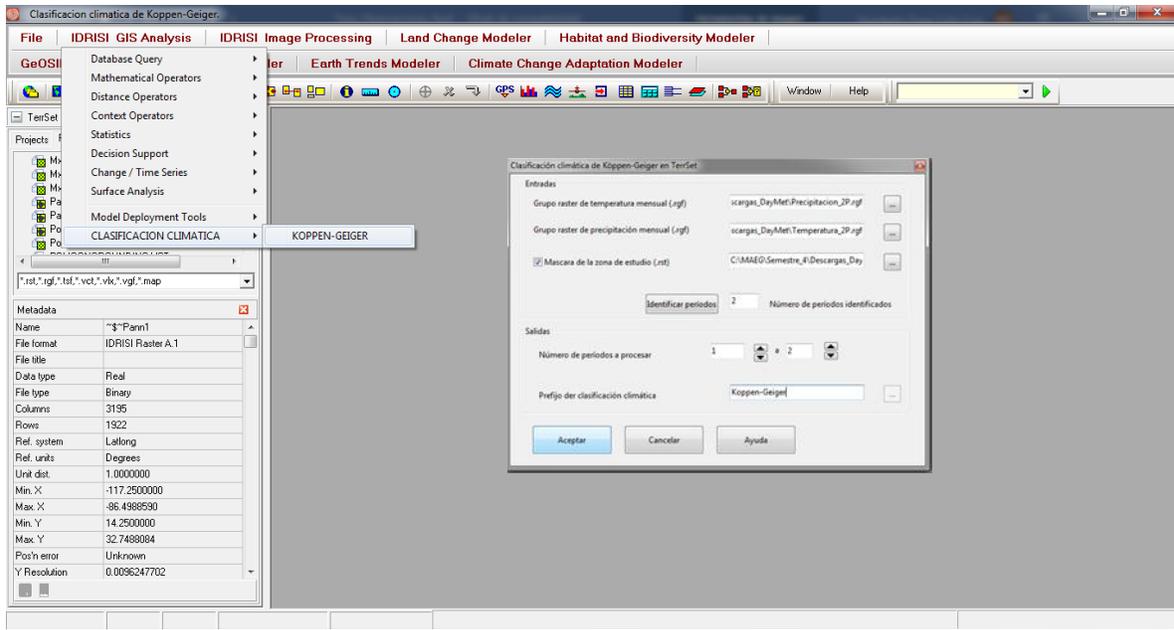


Figura 3.2. Despliegue de la interfaz de usuario desde el menú principal de TerrSet.

3.2 EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL MÓDULO DE SIG

El correcto funcionamiento del módulo se realizó aplicando tres parámetros para constatar la correcta funcionalidad del módulo y el grado de veracidad de los resultados arrojados:

- 1) Verificación por medio de un análisis comparativo de los resultados del módulo, contrastando con resultados obtenidos de manera manual.
- 2) Validación de la correcta clasificación de los climas.
- 3) Un caso de estudio aplicando el módulo para una serie de 40 años, y luego dividiendo esa serie en dos períodos de 20 años cada uno para analizar los cambios en las categorías climáticas de los dos cortes temporales.

3.2.1 VERIFICACIÓN

Consistió en comprobar que el módulo de clasificación climática garantice la correcta clasificación de los climas, esto es, que de un valor a cada celda y este corresponda a un clima específico, asimismo; que los climas no presenten sobreposición y sus límites encajen perfectamente; que no se generen valores nulos y que la máscara cumpla su función de delimitar un área específica. En este sentido se logró un 100% de coincidencia en los 385 puntos seleccionados como muestra para realizar la clasificación climática automatizada y manual (Figura 3.3).

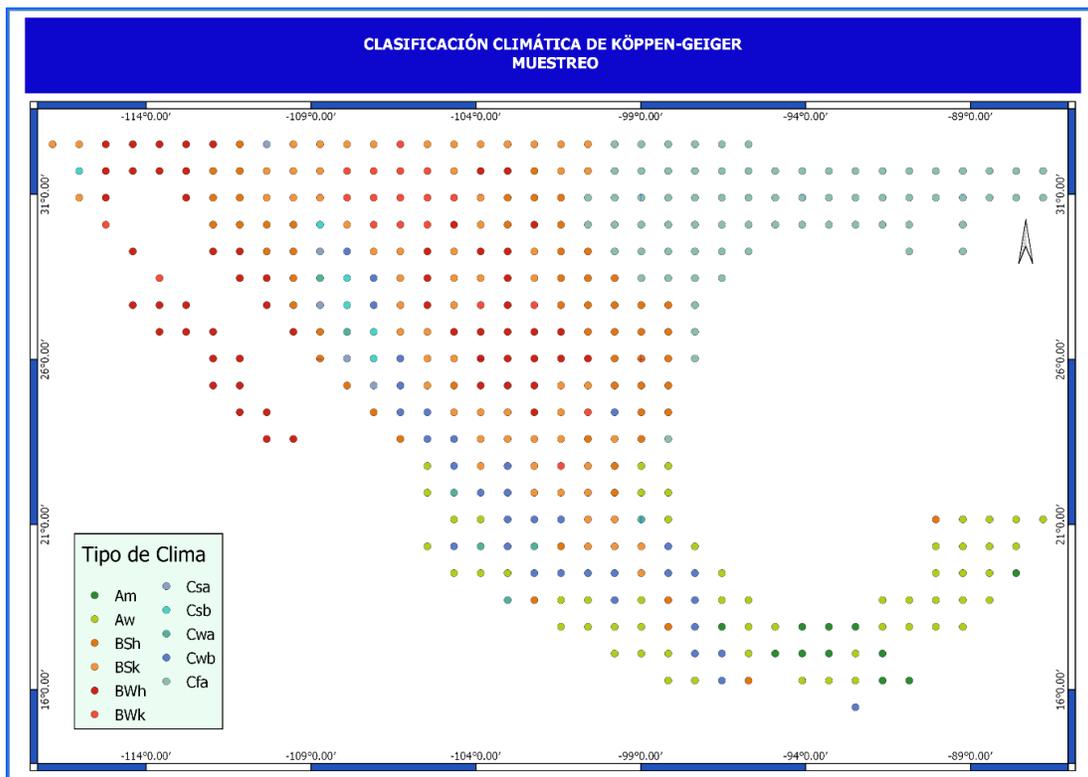


Figura 3.3. Muestra de 385 celdas con su respectiva clasificación climática.

3.2.2 VALIDACIÓN

Adicionalmente, al comparar la muestra indicada en la sección anterior (Figura 3.3) con un mapa de clasificación de Köppen-Geiger elaborado por Beck et al. (2018) para el período 1980-2016 (Figura 3.5), y considerando todos los parámetros de la clasificación (clima principal, humedad y temperatura), se obtuvo una coincidencia entre ambos del 78.5% de los puntos de muestra. En tanto que, considerando el grupo de cinco climas principales, esta incrementó al 90.9%. Para analizar estas diferencias se hizo una sobreposición entre ambos mapas (Figuras 3.4 y 3.5), en donde se pudo constatar que las mismas se deben en su gran mayoría a los límites entre los climas, es decir, ambos mapas guardan gran similitud, sin embargo, las fronteras entre climas varían. Diversos factores como el método de interpolación, el período de los datos utilizados y la resolución de pixel influyen en la variación entre ambos mapas.

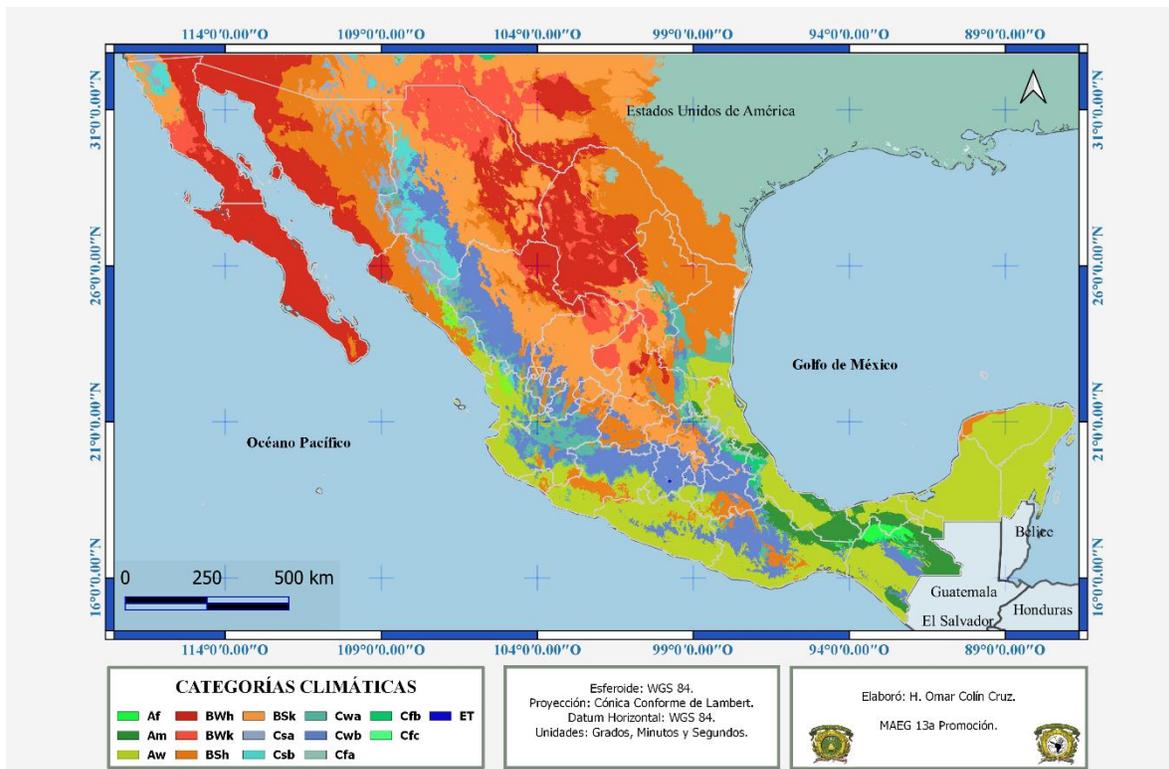


Figura 3.4. Capa de clasificación climática de Köppen-Geiger generada con el módulo de SIG.

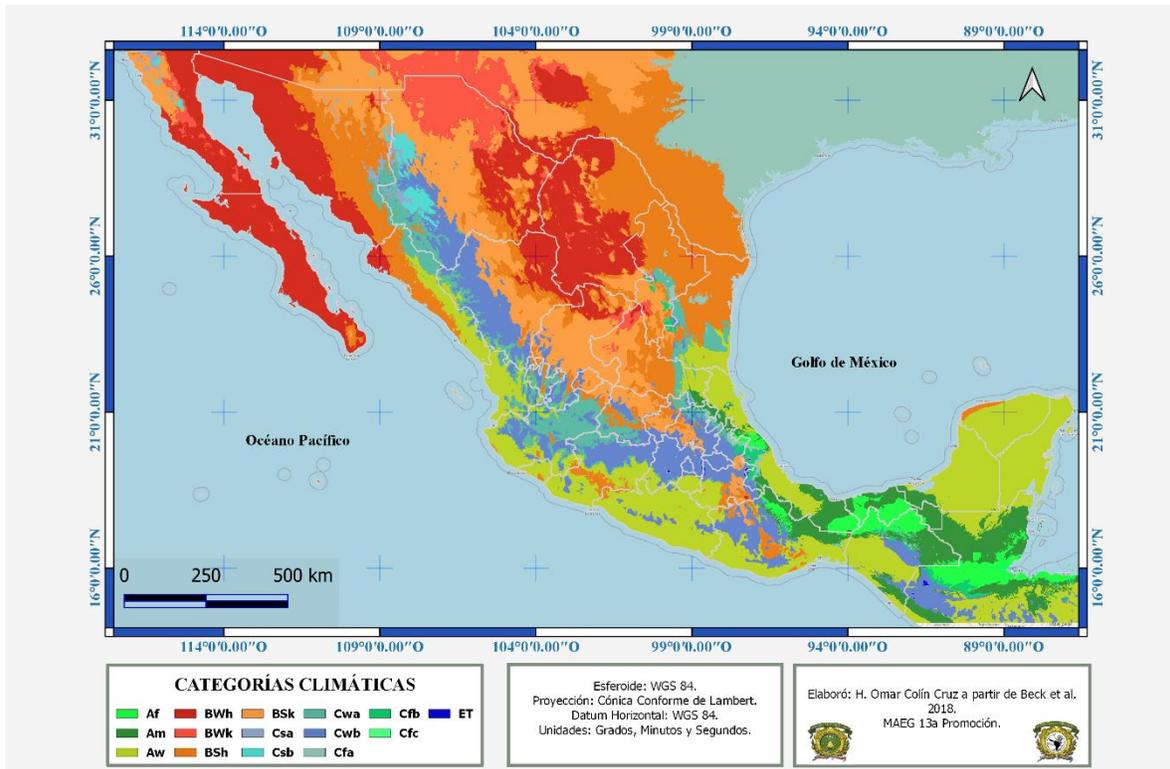


Figura 3.5. Clasificación climática de Köppen-Geiger del período 1980-2016.

Fuente: Elaboración propia a partir de Beck et al. (2018).

3.3 ESTUDIO DE CASO

En esta sección se presentan resultados de la aplicación del módulo de SIG para la clasificación climática de Köppen-Geiger de la república mexicana para tres períodos, uno de 40 años (1980-2019) y dos de 20 años (1980-1999 y 2000-2019). En el caso del primer período, se describe la localización de los climas y su correspondencia con las regiones bióticas y tipos de vegetación, mientras que los dos últimos períodos se emplearon para conocer los principales cambios y persistencias de las categorías climáticas entre esos dos momentos.

3.3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Los resultados del censo de población y vivienda 2020 del INEGI, muestran que México tiene una población de 126,014,024 de habitantes (INEGI, 2020), lo cual lo posiciona como el décimo país más poblado de la Tierra, en tanto que, su territorio continental tiene una superficie de 1,960,189 km², que lo ubica en el lugar 14 en extensión territorial (Figura 3.6), sus coordenadas extremas son (INEGI, 2021): 11° 58' 07" Latitud Norte y 32° 43' 06" Latitud Norte, así como 94° 26' 02" Longitud Oeste y 122° 10' 13" Longitud Oeste.

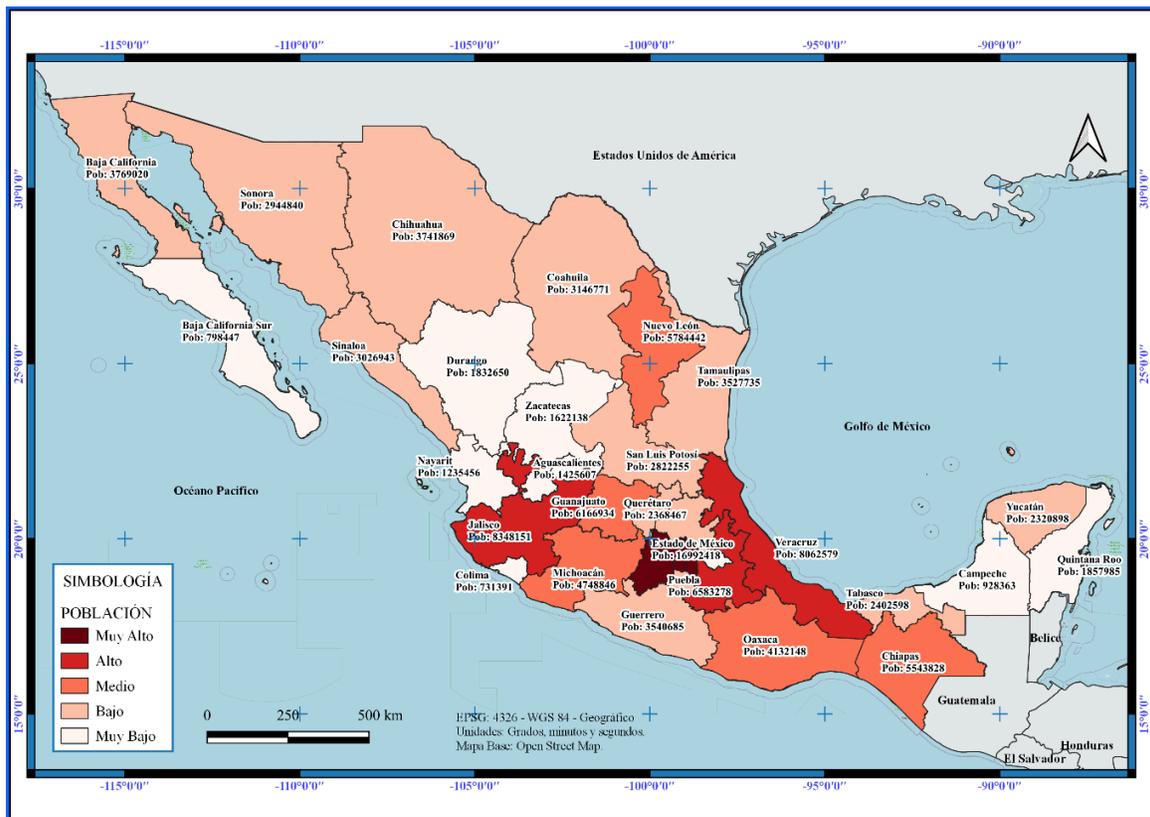


Figura 3.6. Ubicación de la república mexicana.

Fuente: Elaboración propia a partir de INEGI (2021).

México presenta seis ecorregiones terrestres principales (CONABIO, 2021) considerando criterios de vegetación, climas, edafología y topografía: Grandes planicies, Desiertos de América del Norte, California mediterránea, Elevaciones semiáridas meridionales, Sierras templadas, Selvas cálido-secas y Selvas cálido-húmedas (Figura 3.7).

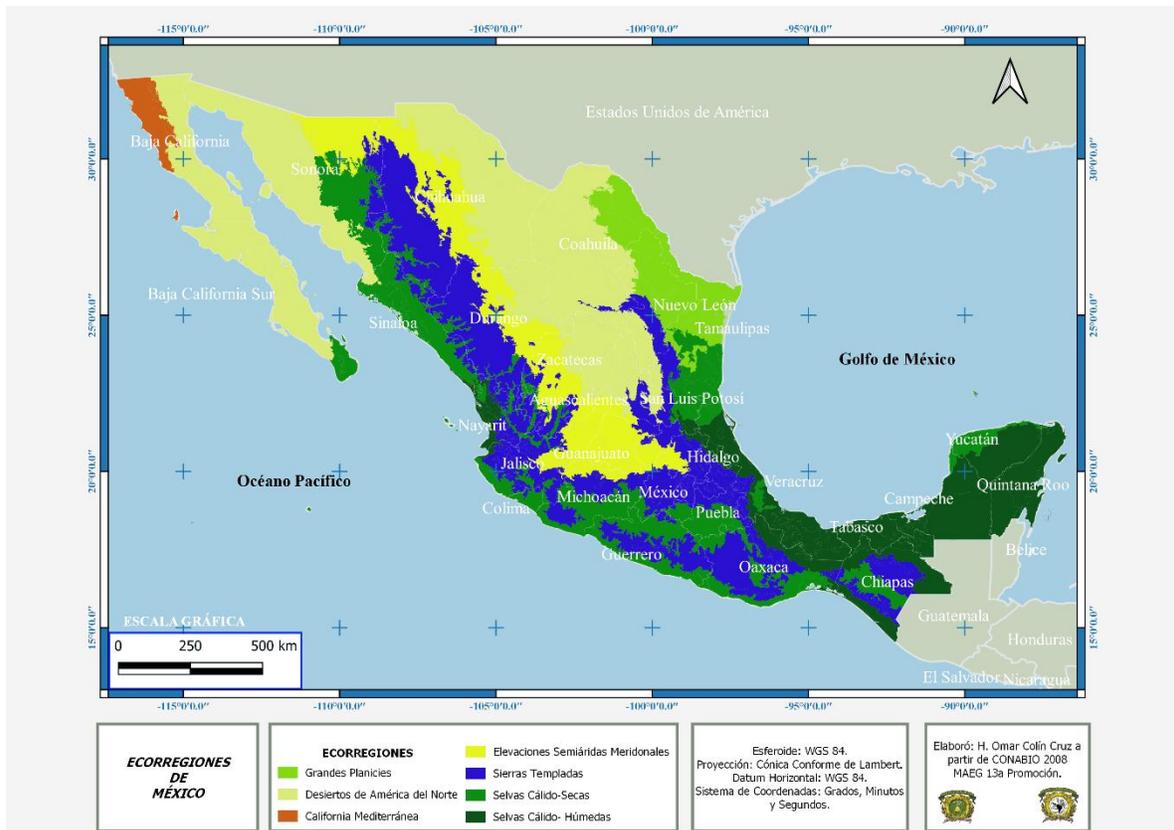


Figura 3.7. Ecorregiones de la república mexicana.

Fuente: Elaboración propia a partir de CONABIO (2008).

De acuerdo con la CONABIO (2011), el territorio mexicano se divide en 19 provincias bióticas delimitadas con base en criterios biogeográficos (plantas vasculares, anfibios, reptiles y mamíferos) y rasgos morfotectónicos. Estas provincias biogeográficas conforman 88 regiones naturales si se consideran criterios fisiográficos como subprovincias y discontinuidades fisiográficas (Figura 3.8).

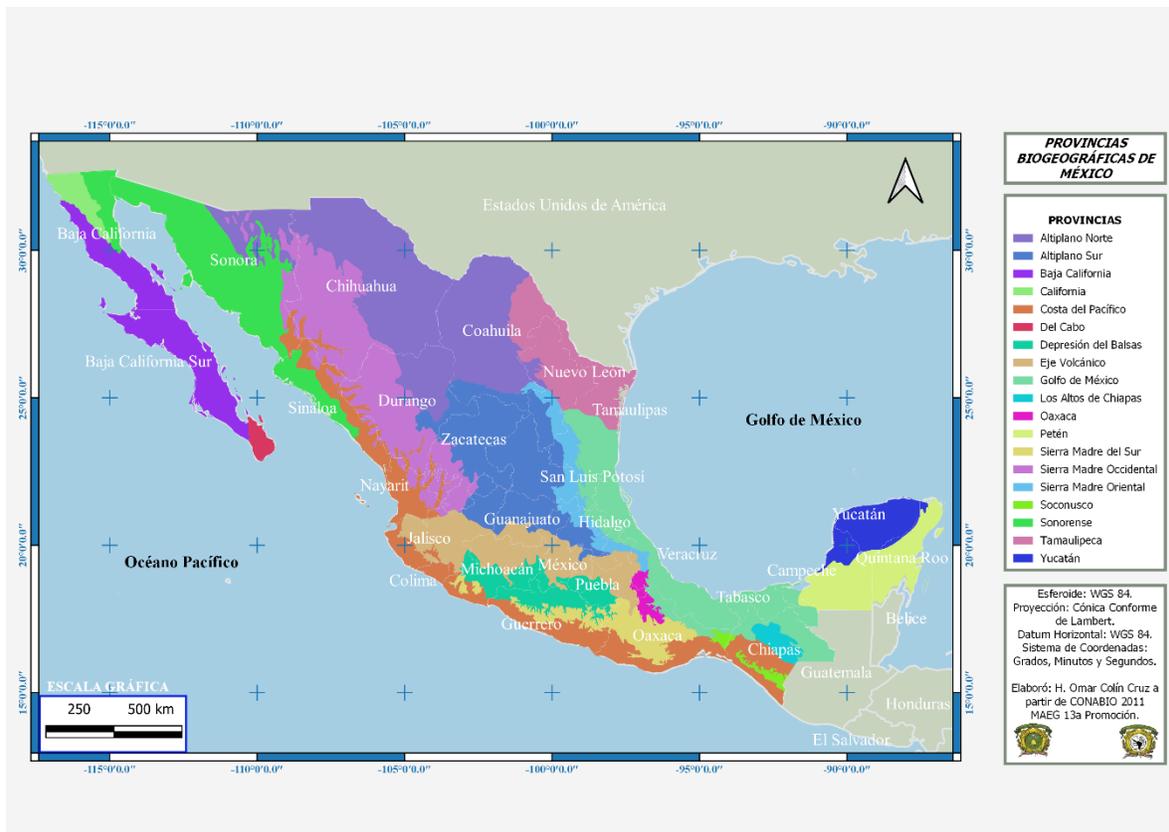


Figura 3.8. Provincias biogeográficas de la república mexicana.

Fuente: Elaboración propia a partir de CONABIO (2011).

Factores como la topografía, el clima y una intrincada historia geológica y biológica hacen posible que México tenga una amplia diversidad biológica que lo ubica dentro del grupo de países considerados como megadiversos. Al respecto, autores como Rzedowky (2006) y Toledo (2009) han delimitado y clasificado regiones que presentan rasgos homogéneos.

Rzedowky (2006) identifica 17 provincias florísticas agrupadas en cuatro regiones generales relacionadas a su vez con dos regiones reinas: Neotropical y Holártica. Por su parte, Toledo (2009) reconoce 45 tipos diferentes de vegetación que conforman seis grandes zonas ecológicas terrestres: árida y semiárida, tropical cálido-húmeda, tropical

cálido-subhúmeda, templada húmeda, templada subhúmeda y transición mar-tierra o zona inundable.

De acuerdo con las zonas de vida de Holdridge (en Meda, 2014), que es un esquema para la clasificación de las diferentes áreas terrestres según su comportamiento global bioclimático, en México se localizan 11 regiones biogeográficas: desierto, tundra, estepa espinosa, estepa, matorral desértico, bosque espinoso, bosque muy seco, bosque seco, bosque subhúmedo, bosque húmedo y bosque lluvioso (Maeda, 2014).

Considerando el criterio fisionómico de la vegetación, la SEMARNAT (2013) clasifica 11 tipos principales de vegetación: bosque mesófilo de montaña, bosque templado, selva húmeda, selva subhúmeda, manglar, matorral xerófilo, vegetación hidrófila, pastizal natural, vegetación halófila y gipsófila, pastizal inducido o cultivado y otros tipos de vegetación.

Por su parte, el INE (1997) con base en las cartas de uso de suelo y vegetación de INEGI de 1980-1996, distingue cinco tipos principales de vegetación: pastizal, humedales, bosque, vegetación seca y selva. Asimismo, distingue tres usos de suelo: desprovisto de vegetación, urbano y agrícola. La combinación de vegetación y usos de suelo genera 15 categorías para la república mexicana (Figura 3.9).

En cuanto a la parte climática, el sistema Köppen-García identifica 61 climas para México, en tanto que, el método de clasificación de Köppen-Geiger identifica cuatro de los cinco climas principales (CONABIO, Portal de Geoinformación 2021, 2001): tropical (A), árido (B), templado cálido (C) y polar (E).

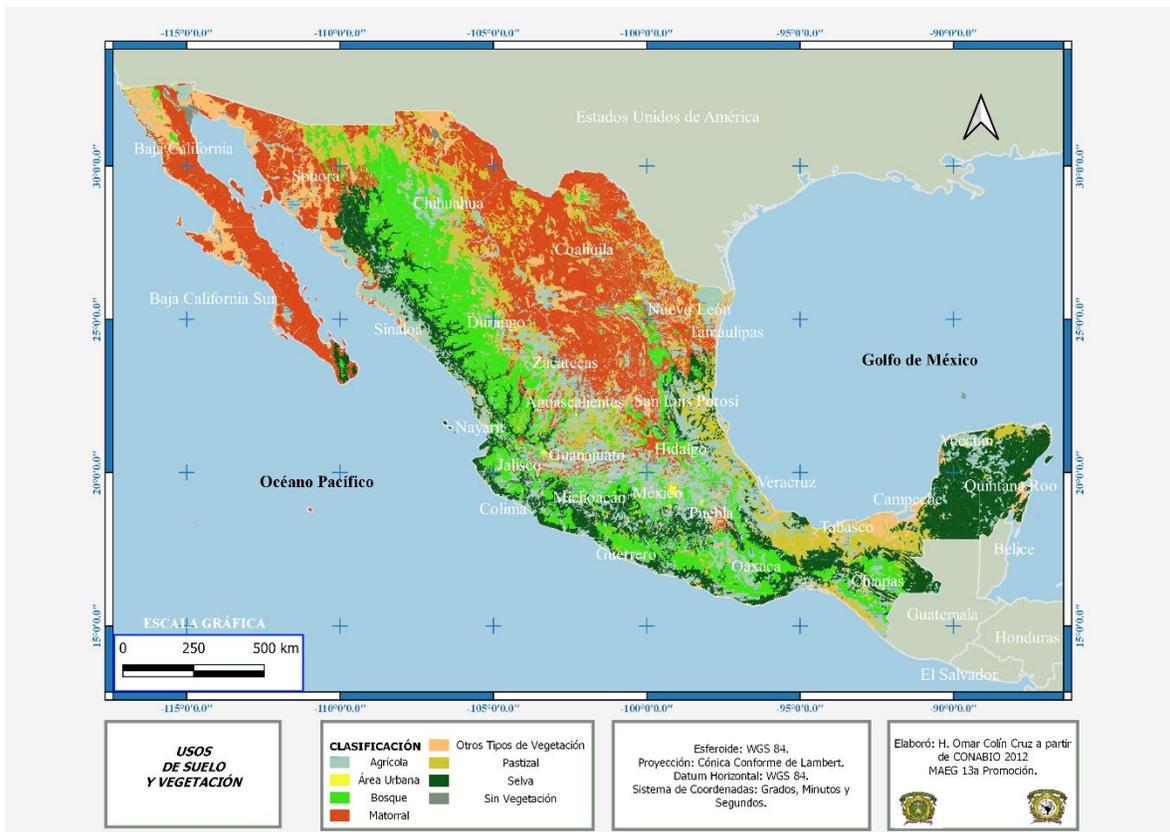


Figura 3.9. Principales tipos de vegetación de la República Mexicana.

Fuente: Elaboración propia a partir de CONABIO (2012).

3.3.2 CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE KÖPPEN-GEIGER DE LA REPÚBLICA MEXICANA.

PERÍODO 1980-2019

Los resultados arrojados para este período mostraron que en la república mexicana están presentes 17 de los 31 climas que componen la clasificación de Köppen-Geiger. Con la herramienta *Land Change Modeler* de TerrSet se analizaron dichos resultados, como se muestra en la tabla 3.1, el clima tropical con régimen seco en invierno (Aw) es el que más se hace presente, cubriendo una superficie de 409,273.8 km², correspondiente al 20.9% del territorio; el clima seco desértico con régimen térmico cálido (BWh) tiene presencia en 342,555 km², equivalente al 17.5% del país (ocupando el segundo lugar); el clima seco

estepario con régimen térmico cálido (BSh) abarca una superficie de 336,408 km², que equivale al 17.2% y es el tercero en cobertura; el clima seco estepario con régimen térmico frío (BSk) cubre una superficie de 272,290 km², correspondiente al 13.9% del país y es el cuarto con más presencia; finalmente, el clima templado cálido con invierno seco y verano cálido (Cwb) cubre una superficie de 227,184 km², que representa el 11.6% de la superficie total de México.

Asimismo, en la tabla 3.1 se puede apreciar que el clima templado cálido sin régimen seco y verano frío (Cfc) es casi inexistente en el país, ya que solo 18.3 km² presentan este clima, lo que equivale al 0.001% del territorio; el clima de tundra (ET) solo se hace presente en 243.3 km² que corresponde al 0.012% del territorio, situándose en las principales altitudes del Sistema Volcánico Transmexicano; el clima templado cálido con invierno seco y verano frío (Cwc) representa solo el 0.021%, es decir, 407.5 km². Otros climas que presentan poca superficie son el tropical siempre húmedo (Af) con el 0.42%, el templado cálido sin régimen seco y verano cálido (Cfb) con el 0.46% y el tropical con verano seco (As) con el 0.5%.

Tabla 3.1. Categorías climáticas de la república mexicana, período 1980 -2019.

Clima	Hectáreas	Km2	Porcentaje
Aw	40,927,380.8	409,273.8	21.0
BWh	34,255,575.3	342,555.8	17.6
BSh	33,640,861.4	336,408.6	17.2
BSk	27,229,012.0	272,290.1	14.0
Cwb	22,718,489.4	227,184.9	11.6
BWk	9,918,608.3	99,186.1	5.1
Cwa	8,002,074.5	80,020.7	4.1
Am	6,669,224.2	66,692.2	3.4
Csb	3,853,987.4	38,539.9	2.0
Csa	3,793,273.5	37,932.7	1.9
Cfa	1,292,456.8	12,924.6	0.7

Tabla 3.1. Categorías climáticas de la república mexicana, período 1980 -2019 (Continuación).

Clima	Hectáreas	Km2	Porcentaje
As	978,363.6	9,783.6	0.5
Cfb	903,517.0	9,035.2	0.5
Af	826,389.2	8,263.9	0.4
Cwc	40,753.6	407.5	0.02
ET	24,326.7	243.3	0.01
Cfc	1,832.6	18.3	0.001
Total	195,076,127.5	1,950,761.3	100

Si se considera únicamente el clima principal, la tabla 3.2 indica que un poco más de la mitad del país presenta clima árido (B), ya que el 53.8% del territorio corresponde a alguno de estos climas, en tanto que, el clima tropical (A) está representado en un 25.3% del territorio. Por su parte, el clima templado cálido (C) también cuenta con una importante presencia ya que el 20.8% del territorio corresponde a este clima.; en contraparte, el clima polar de tundra (ET) solo se hace presente en los picos más altos de México, con una presencia de tan solo 0.01%.

Tabla 3.2. Categorías climáticas considerando el clima principal, período 1980-2019.

Clima	Hectáreas	Km2	Porcentaje de persistencias
B	105,044,058.0	1,050,440.6	53.8
A	49,401,357.8	494,013.6	25.3
C	40,606,384.9	406,063.8	20.8
E	24,326.7	243.3	0.01
Total	195,076,127.5	1,950,761.3	100

3.3.3 ANÁLISIS DE LA TRANSICIÓN EN LAS CATEGORÍAS CLIMÁTICAS DE KÖPPEN-GEIGER ENTRE LOS PERÍODOS 1980-1999 Y 2000-2019.

Se registraron un total de 117 transiciones climáticas entre ambos períodos, los cuales representan un total de 608,102 km², lo que corresponde al 31.1% del territorio mexicano (Tabla 3.3). El principal cambio registrado equivale a una superficie de 56,800 km² que de clima seco estepario con invierno cálido (BSh) en el primer período pasó a ser clima seco desértico con invierno frío (BWh) en el segundo período. El segundo cambio en importancia corresponde a una superficie de 50,552 km² que de clima tropical de monzón (Am) pasó a clima tropical con invierno seco (Aw) (Tabla 3.3 y Figura 3.10).

Tabla 3.3. Cambios de las categorías climáticas, períodos: 1980-1999 y 2000-2019.

1980-1999	2000-2019	Hectáreas	Km ²	Porcentaje de cambios
BSh	BWh	5,680,027.3	56,800.3	9.34
Am	Aw	5,055,280.7	50,552.8	8.31
Csa	BSh	3,391,263.2	33,912.6	5.57
BWk	BWh	3,376,459.3	33,764.6	5.55
BWk	BSk	3,207,884.0	32,078.8	5.27
BSk	BSh	2,923,210.7	29,232.1	4.80
Csb	Cwb	2,745,260.1	27,452.6	4.51
Aw	As	2,664,976.8	26,649.8	4.38
Cwb	BSk	2,610,980.8	26,109.8	4.29
BSk	BWk	2,155,993.4	21,559.9	3.54
Aw	BSh	1,757,985.4	17,579.9	2.89
BWh	BSh	1,556,562.2	15,565.6	2.55
Cwa	Aw	1,552,191.5	15,521.9	2.55
BSk	Cwb	1,433,891.2	14,338.9	2.35
Af	Am	1,428,598.8	14,286.0	2.34
Csb	BSk	1,363,544.8	13,635.4	2.24
Cwa	BSh	1,208,532.7	12,085.3	1.98
BSh	Aw	1,186,812.6	11,868.1	1.95
BSk	BWh	1,149,924.3	11,499.2	1.89
Csa	BSk	1,110,094.3	11,100.9	1.82
BSh	Cwa	953,224.7	9,532.2	1.56

Tabla 3.3. Cambios de las categorías climáticas, períodos: 1980-1999 y 2000-2019 (Continuación).

1980-1999	2000-2019	Hectáreas	Km ²	Porcentaje de cambios
Csa	Cwa	951,122.8	9,511.2	1.56
Cwb	Cwa	942,308.9	9,423.1	1.54
As	BSh	770,388.5	7,703.9	1.26
BWk	BSh	684,427.7	6,844.3	1.12
Cfb	Cwb	656,778.1	6,567.8	1.08
Af	Aw	628,649.6	6,286.5	1.03
Cfa	BSh	604,654.6	6,046.5	0.99
Cwb	Csb	596,861.2	5,968.6	0.98
BSh	Cwb	533,202.0	5,332.0	0.87
Cfa	Cwa	514,353.7	5,143.5	0.84
Cfa	Aw	471,907.5	4,719.1	0.77
Cfb	Cfb	357,938.0	3,579.4	0.58
Cwa	Cwb	348,292.4	3,482.9	0.57
Aw	Cwa	344,081.5	3,440.8	0.56
Cwb	Aw	314,230.4	3,142.3	0.51
Csb	Csa	314,068.8	3,140.7	0.51
BSh	Cfa	267,247.9	2,672.5	0.43
Cwa	Csa	253,130.8	2,531.3	0.41
Csb	Cwa	229,430.3	2,294.3	0.37
Cwb	BSh	226,346.3	2,263.5	0.37
BWh	BWk	223,430.8	2,234.3	0.36
Aw	Cwb	203,754.4	2,037.5	0.33
BSh	BSk	186,540.5	1,865.4	0.30
Cfa	Am	133,854.4	1,338.5	0.22
Cwa	Cfa	128,202.6	1,282.0	0.21
Cwa	As	124,910.7	1,249.1	0.20
Cfb	Cwa	101,070.4	1,010.7	0.16
Cfb	Cfa	97,053.1	970.5	0.15
Csb	Cfb	83,050.2	830.5	0.13
As	Aw	71,742.9	717.4	0.11
Cwb	Cfb	63,081.4	630.8	0.10
Cwb	Csa	62,906.8	629.1	0.10
Cfb	BSk	54,479.0	544.8	0.08
Am	Cwb	43,137.5	431.4	0.07
Cbc	Cwb	41,978.9	419.8	0.0690
Cfa	BSk	39,229.8	392.3	0.0645
Cfb	Csb	36,374.4	363.7	0.0598
Am	Cwa	35,504.5	355.0	0.0584

Tabla 3.3. Cambios de las categorías climáticas, períodos: 1980-1999 y 2000-2019 (Continuación).

1980-1999	2000-2019	Hectáreas	Km ²	Porcentaje de cambios
BSh	BWk	35,301.0	353.0	0.0581
Csa	Csb	34,966.5	349.7	0.0575
Cfb	Am	31,267.5	312.7	0.0514
Cfb	Aw	30,605.9	306.1	0.0503
Csa	As	28,725.4	287.3	0.0472
Csb	BSh	27,364.6	273.6	0.0450
BSh	As	27,259.9	272.6	0.0448
Aw	Am	25,572.9	255.7	0.0421
BSh	Csa	25,124.1	251.2	0.0413
BSk	Csa	22,084.6	220.8	0.0363
Cfa	Cwb	21,384.7	213.8	0.0352
ET	Cwb	20,035.9	200.4	0.0329
Cwa	BSk	17,201.9	172.0	0.0283
BSk	Cwa	14,718.3	147.2	0.0242
Cwa	Am	14,491.0	144.9	0.0238
Cfa	Cfb	13,202.7	132.0	0.0217
ET	Cwc	12,958.7	129.6	0.0213
Aw	Cfa	12,594.3	125.9	0.0207
Cwb	Cwc	12,471.3	124.7	0.0205
As	Cwa	9,594.4	95.9	0.0158
BWh	BSk	8,597.1	86.0	0.0141
BSk	Csb	8,408.4	84.1	0.0138
BSk	Cfb	7,987.0	79.9	0.0131
Csa	Aw	7,240.7	72.4	0.0119
Cfc	Cwb	7,018.1	70.2	0.0115
Aw	Csa	6,976.9	69.8	0.0115
Cwb	Cfa	6,670.2	66.7	0.0110
Af	Cwa	5,796.2	58.0	0.0095
Cfa	Af	5,349.8	53.5	0.0088
Csa	Cfb	5,260.5	52.6	0.0087
Cwb	ET	5,100.6	51.0	0.0084
Af	Cfa	4,697.8	47.0	0.0077
Cwc	ET	4,662.9	46.6	0.0077
As	Csa	4,275.8	42.8	0.0070
Csa	Cwb	3,690.3	36.9	0.0061
Af	Cfb	3,606.4	36.1	0.0059
Cwa	Csb	3,484.2	34.8	0.0057
BSk	Cfa	3,207.2	32.1	0.0053

Tabla 3.3. Cambios de las categorías climáticas, períodos: 1980-1999 y 2000-2019 (Continuación).

1980-1999	2000-2019	Hectáreas	Km ²	Porcentaje de cambios
Cwa	Cfb	3,163.5	31.6	0.0052
Cwb	Am	2,738.9	27.4	0.0045
Cfa	Csb	2,140.6	21.4	0.0035
Am	Cfb	1,858.4	18.6	0.0031
Cfb	Af	1,746.7	17.5	0.0029
Am	Cfa	1,311.6	13.1	0.0022
Csa	Cfa	996.2	10.0	0.0016
Cfc	ET	757.1	7.6	0.0012
Aw	Cfb	655.9	6.6	0.0011
Cfb	Cwc	645.1	6.5	0.0011
BSh	Csb	526.9	5.3	0.0009
Cfb	ET	433.8	4.3	0.0007
Cfb	Csa	389.0	3.9	0.0006
Cfa	Csa	291.8	2.9	0.0005
Csb	Aw	215.8	2.2	0.0004
Csb	Cwc	215.6	2.2	0.0004
Cfc	Cwc	215.6	2.2	0.0004
Cwb	As	215.2	2.2	0.0004
Csc	Csb	205.7	2.1	0.0003
Csc	Cwc	107.8	1.1	0.0002
Total		60,810,208.8	608,102.1	100

De acuerdo con la figura 3.10, la parte norte de la Sierra Madre Occidental es la región donde más se observan transiciones de categorías climáticas. Asimismo, el litoral norte del Golfo de México también presenta una zona considerable de transiciones, otras zonas con transiciones importantes se encuentran en porciones de la Sierra Madre Oriental, el sur del estado de Puebla, la parte occidental del estado de Oaxaca y el resto está dispersa en pequeñas superficies.

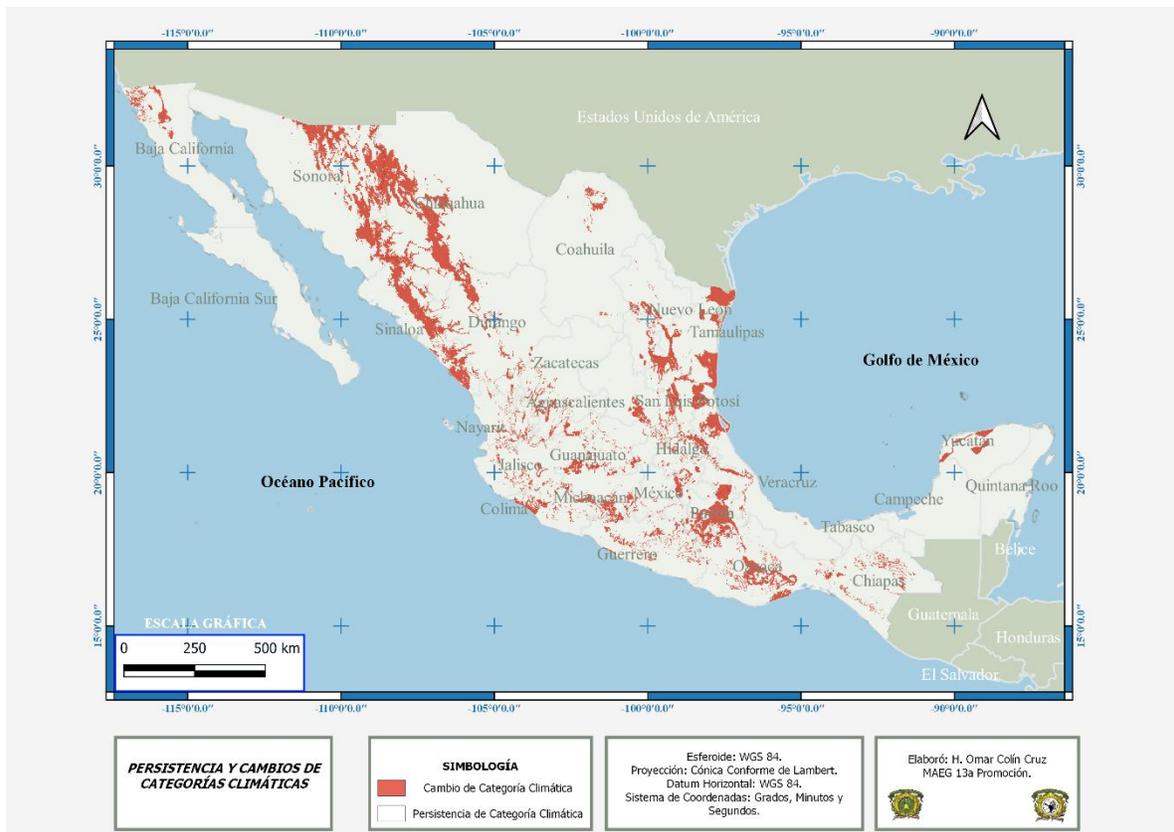


Figura 3.10. Persistencia y cambios de las categorías climáticas entre los períodos 1980-1999 y 2000-2019.

En cuanto a persistencia climática, en 1,343,327 km² del país no se presentó algún cambio de categorías climáticas, esto equivale al 68.9% del territorio mexicano. El clima tropical con estación seca en invierno (Aw) fue el más persistente ya que tiene el 24.3% del total anterior, seguido del clima seco desértico con régimen térmico cálido (BWh) con el 21.4%, asimismo, otros climas que mostraron alta persistencia fueron el seco estepario con régimen térmico cálido (BSh) con el 17%, el seco estepario con régimen térmico frío (BSk) con el 13.7% y el templado cálido con invierno seco y verano cálido (Cwb) con el 12.4%, a partir de estos cinco climas hay un sesgo considerable respecto del resto de las categorías climáticas (Tabla 3.4).

Tabla 3.4. Persistencia de las categorías climáticas entre los períodos 1980-1999 y 2000-2019.

Categoría Climática	Hectáreas	Km2	Porcentaje de persistencias
Aw	32,673,502.3	326,735.0	24.3
BWh	28,747,754.3	287,477.5	21.4
BSh	22,868,644.4	228,686.4	17.0
BSk	18,410,526.4	184,105.3	13.7
Cwb	16,691,338.1	166,913.4	12.4
BWk	4,753,382.2	47,533.8	3.54
Cwa	4,588,561.6	45,885.6	3.42
Am	2,248,028.6	22,480.3	1.67
Csa	1,361,215.9	13,612.2	1.01
Csb	1,138,180.5	11,381.8	0.85
Cfa	411,203.9	4,112.0	0.31
Af	250,618.1	2,506.2	0.19
As	175,371.4	1,753.7	0.13
ET	10,803.3	108.0	0.008
Cwc	3,564.1	35.6	0.003
Total	134,332,695.1	1,343,326.8	100

Para facilitar el análisis de resultados, a continuación se presentan los cambios y persistencias separando la categoría climática en clima principal, régimen de humedad y régimen térmico.

Comparando únicamente el clima principal en ambos períodos, 106,536 km² pasaron de clima templado cálido (C) en el primer período a clima árido (B) en el segundo, este cambio es el más significativo ya que equivale al 50.5% del total de los cambios. Asimismo, 32,696 km² que tenían clima árido (B) en el primer período pasaron a clima templado cálido (C) en el segundo período, el equivalente a 15.5%. Otro cambio significativo se dio con el clima templado cálido (C), que pasó a ser clima tropical (A) en una superficie de 27,196 km², que representa el 12.9% del total de los cambios. Finalmente,

25,283 km² que correspondían a clima tropical (A) en el primer período, pasaron a ser clima árido (B) en el segundo período, es decir, el 11.9% (Tabla 3.5).

En cuanto a cambios, el clima árido (B) fue el que más superficie ganó, con un total de 131,820 km² que pasaron a tener ese clima respecto del primer período; pero al mismo tiempo también perdió 44,837 km² que pasaron a otra categoría, dejando un balance final de 86,983 km² como ganancia. El clima templado cálido (C) fue el que más pérdidas tuvo con una superficie de 94,038.8 km², destacando que la mayor parte de este clima pasó a ser de clima árido (B) (Tabla 3.5 y Figura 3.11). La expresión espacial de los datos de la tabla 3.5 y la figura 3.11 se muestra en la figura 3.12.

Tabla 3.5. Cambios de categoría climática considerando el clima principal entre el período 1980-1999 y 2000-2019.

Período 1	Período 2	Hectáreas	Km	Porcentaje
Templado Cálido (C)	Árido (B)	10,653,695.0	106,536.9	50.5
Árido (B)	Templado Cálido (C)	3,269,623.3	32,696.2	15.5
Templado Cálido	Tropical (A)	2,719,692.1	27,196.9	12.9
Tropical (A)	Árido (B)	2,528,374.7	25,283.7	12.0
Árido (B)	Tropical (A)	1,214,072.8	12,140.7	5.8
Tropical (A)	Templado Cálido (C)	677,845.8	6,778.5	3.2
Polar (E)	Templado Cálido (C)	32,994.6	329.9	0.2
Templado (C)	Polar (E)	10,954.4	109.5	0.1
Total		21,107,252.7	211,072.5	100

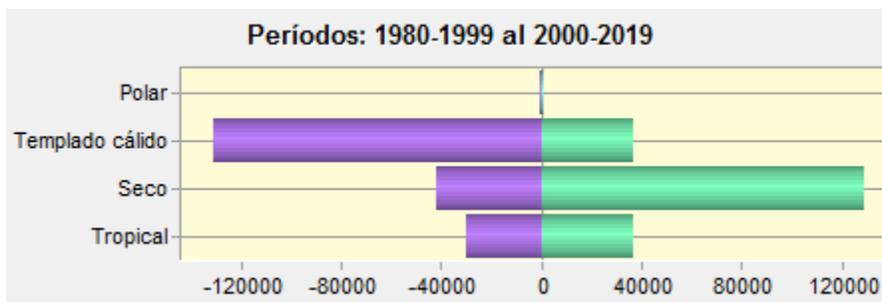


Figura 3.11. Ganancias y pérdidas de los climas principales en dos períodos.

Como se muestra en la figura 3.12, la región norte de la Sierra Madre Occidental, que corresponde a los estados de Sonora y Chihuahua principalmente, presentó el cambio de clima templado a árido. En tanto que, en la parte central de la Sierra Madre Oriental se presentó el cambio de templado a tropical, asimismo, hay zonas considerables, si bien dispersas a lo largo del territorio nacional, en donde se da un cambio de tropical a árido.

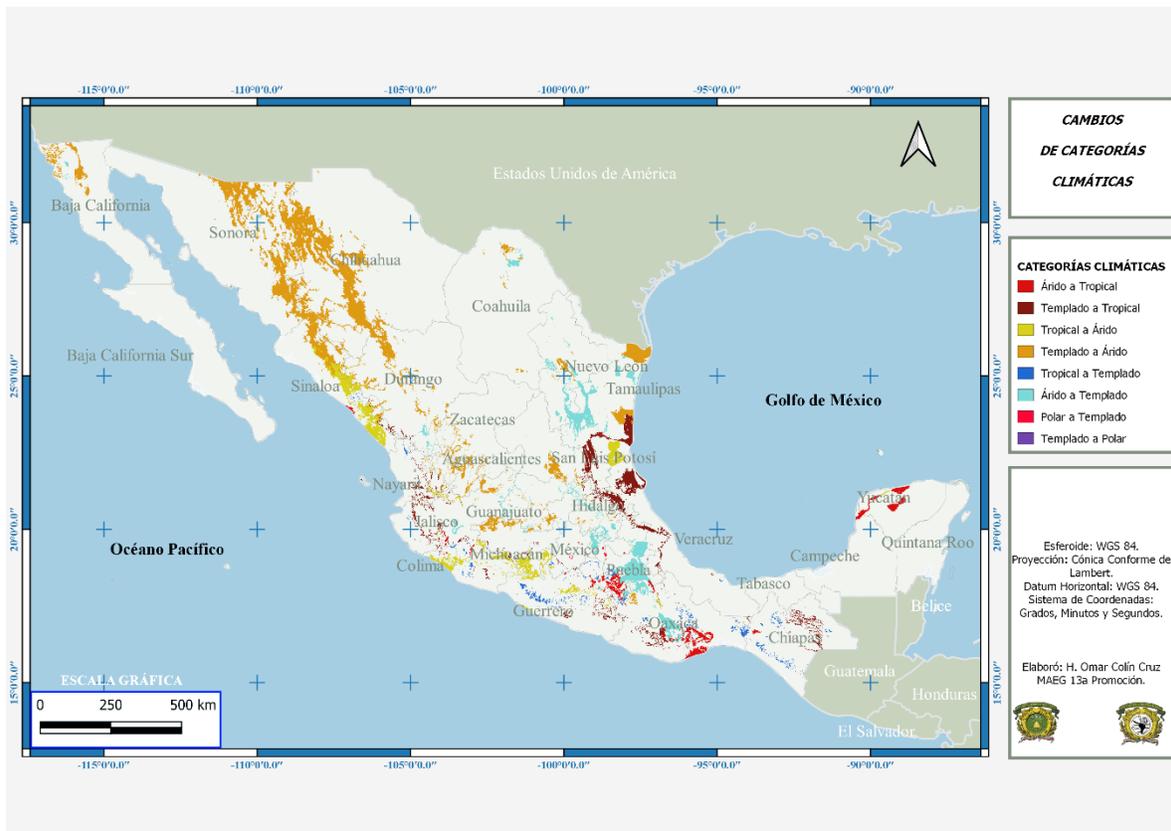


Figura 3.12. Cambios de las categorías climáticas principales entre los períodos 1980-1999 y 2000-2019.

En contraste con lo anterior, al comparar el clima principal entre ambos períodos, la superficie que no presentó cambios en su categoría climática principal fue de 1,740,357 km², que representa el 88.8% del territorio, en tanto que, la superficie que si presentó

cambios fue de 211,072.5 km² correspondiente al 10.9% del territorio (Tabla 3.6 y Figura 3.13).

Tabla 3.6. Persistencia del clima principal entre los períodos 1980-1999 y 2000-2019.

Clima	Hectáreas	Km2	Porcentaje de persistencias
B	95,968,692.6	959,686.9	55.1
A	45,222,355.1	452,223.6	26.0
C	32,833,855.8	328,338.6	18.9
E	10,803.3	108	0.01
Total	174,035,706.8	1,740,357.1	100

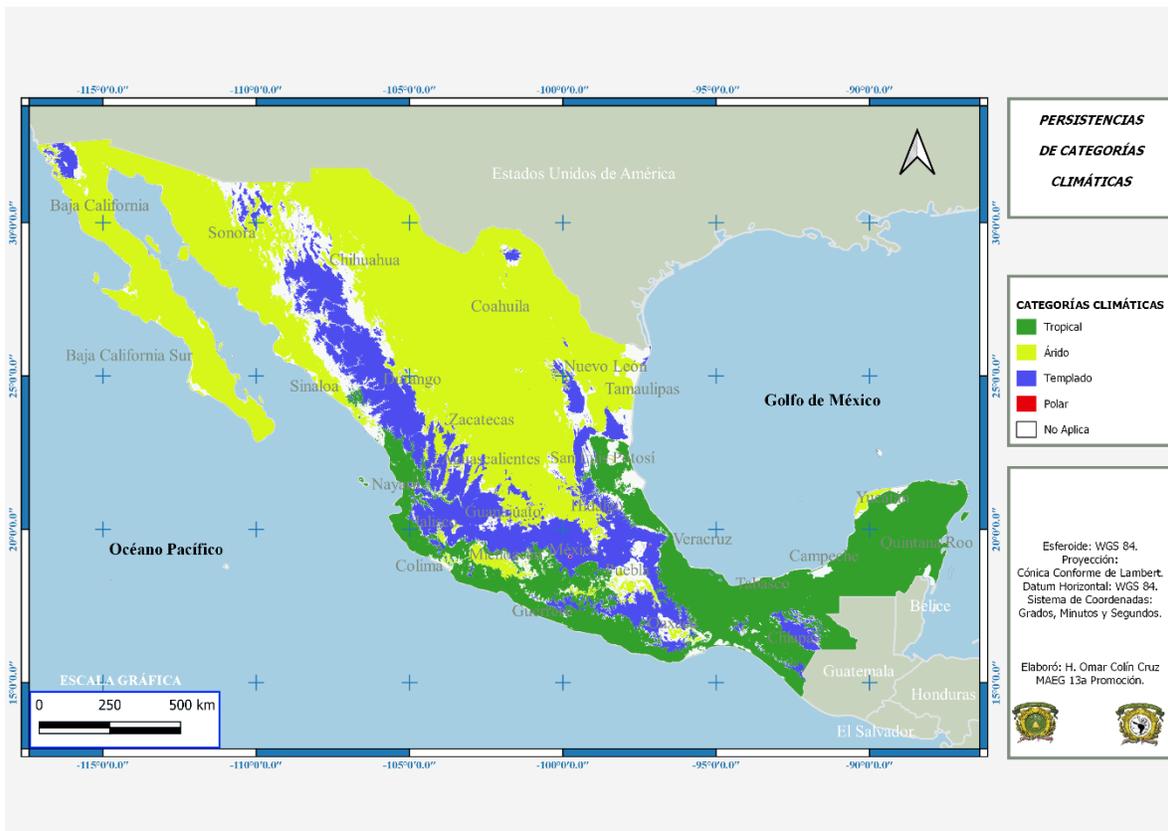


Figura 3.13. Persistencia de las categorías climáticas principales entre los períodos 1980-1999 y 2000-2019.

De forma complementaria, y si se considera únicamente el régimen de humedad de la categorización Köppen-Geiger, el total de cambios corresponde a una superficie de

519,381 km², equivalente al 26.6% del territorio mexicano. Al respecto, los mayores cambios registrados se dieron de clima estepario a desértico con 90,212.5 km² equivalente al 17.4% del total de los cambios. Una superficie de 58,922.7 km² equivalente al 11.4% cambió de templado cálido con verano seco en el primer período a clima estepario en el segundo. Adicionalmente, 54,574.7 km² pasaron de clima desértico a estepario, lo que equivale al 10.5% de la superficie que cambió de categoría climática. Finalmente, destaca el cambio de tropical de monzón a tropical de invierno seco con 50,552.8 km² equivalente al 9.7% de la superficie que cambió. (Tabla, 3.7).

Tabla 3.7. Cambios de categorías climáticas considerando el régimen de humedad entre los períodos 1980-1999 y 2000-2019.

1980-1999	2000-2019	Hectáreas	Km2	Porcentaje de cambios
Estepario	Desértico	9,021,248.5	90,212.5	17.4
Verano Seco C	Estepario	5,892,268.5	58,922.7	11.3
Desértico	Estepario	5,457,472.5	54,574.7	10.5
De Monzón	Invierno Seco A	5,055,282.2	50,552.8	9.7
Invierno Seco C	Estepario	4,063,062.9	40,630.6	7.8
Verano Seco C	Invierno Seco C	3,929,828.0	39,298.3	7.6
Estepario	Invierno Seco C	2,935,037.1	29,350.4	5.7
Invierno Seco A	Verano Seco A	2,664,977.6	26,649.8	5.1
Invierno Seco C	Invierno Seco A	1,866,422.4	18,664.2	3.6
Invierno Seco A	Estepario	1,757,985.9	17,579.9	3.4
Siempre Húmedo	De Monzón	1,428,599.2	14,286.0	2.8
Sin Estación Seca	Invierno Seco C	1,301,466.0	13,014.7	2.5
Estepario	Invierno Seco A	1,186,813.0	11,868.1	2.3
Invierno Seco C	Verano Seco C	916,383.3	9,163.8	1.8
Verano Seco A	Estepario	770,388.8	7,703.9	1.5
Sin Estación Seca	Estepario	698,363.6	6,983.6	1.3
Siempre Húmedo	Invierno Seco A	628,649.8	6,286.5	1.2
Invierno Seco A	Invierno Seco C	547,836.1	5,478.4	1.1
Sin Estación Seca	Invierno Seco A	502,513.5	5,025.1	0.97
Estepario	Sin estación Seca	278,442.3	2,784.4	0.54
Invierno Seco C	Sin estación Seca	201,117.9	2,011.2	0.39

Tabla 3.7. Cambios de categorías climáticas considerando el régimen de humedad entre los períodos 1980-1999 y 2000-2019 (Continuación).

1980-1999	2000-2019	Hectáreas	Km2	Porcentaje de cambios
Sin Estación Seca	De Monzón	165,121.9	1,651.2	0.32
Invierno Seco C	Verano Seco A	125,125.9	1,251.3	0.24
Verano Seco C	Sin estación Seca	89,306.9	893.1	0.17
De Monzón	Invierno Seco C	78,642.0	786.4	0.15
Verano Seco A	Invierno Seco A	71,742.9	717.4	0.14
Estepario	Verano Seco C	56,144.0	561.4	0.11
Sin Estación Seca	Verano Seco C	39,195.8	392	0.075
Tundra	Invierno Seco C	32,994.6	329.9	0.064
Verano Seco C	Verano Seco A	28,725.4	287.3	0.055
Estepario	Verano Seco A	27,259.9	272.6	0.052
Invierno Seco A	De Monzón	25,572.9	255.7	0.049
Invierno Seco C	De Monzón	17,229.9	172.3	0.033
Invierno Seco A	Sin estación Seca	13,250.3	132.5	0.026
Invierno Seco C	Tundra	9,763.5	97.6	0.019
Verano Seco A	Invierno Seco C	9,594.4	95.9	0.018
Siempre Húmedo	Sin estación Seca	8,304.2	83	0.016
Sin Estación Seca	Siempre Húmedo	7,096.5	71	0.014
Verano Seco C	Invierno Seco A	7,456.6	74.6	0.014
Invierno Seco A	Verano Seco C	6,976.9	69.8	0.013
Siempre Húmedo	Invierno Seco C	5,796.2	58	0.011
Verano Seco A	Verano Seco C	4,275.8	42.8	0.008
De Monzón	Sin estación Seca	3,169.9	31.7	0.006
Sin Estación Seca	Tundra	1,190.9	11.9	0.002
Total		51,938,096.1	519,381.0	100

Si se toma en consideración las ganancias y las pérdidas considerando únicamente el régimen de humedad, de acuerdo con la figura 3.14, los tipos desértico (35,637.8 km²), estepario (51,346 km²) y tropical con invierno seco (43,155.1 km²), fueron los climas que mayor ganancia de superficie tuvieron, en tanto que, el clima templado cálido con estación seca en verano fue el que más superficie perdió con 89,246.2 km².

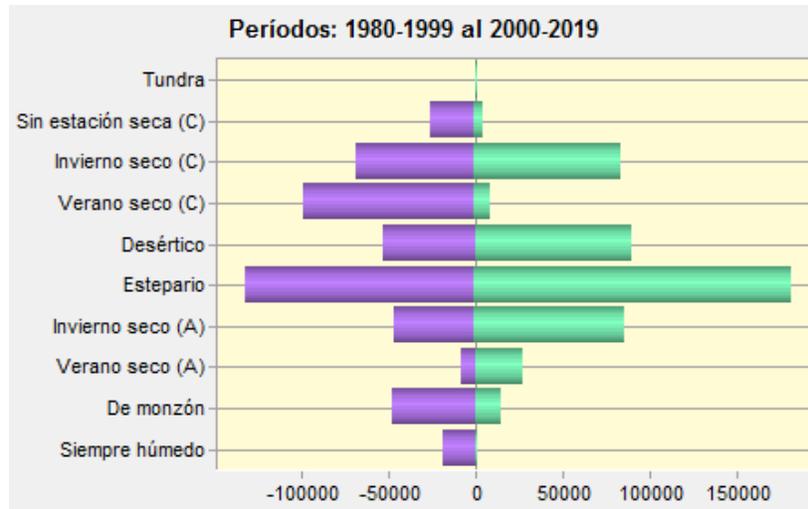


Figura 3.14. Ganancias y pérdidas considerando el régimen de humedad.

A manera de conclusión en cuanto al régimen de humedad y de acuerdo con la tabla 3.7, se puede decir que éste tuvo una persistencia en sus categorías climáticas de 1,432,048.6 km² (que equivale al 73.4% de la superficie total del territorio mexicano). En cuanto a los cambios (Tabla 3.8, Figuras 3.15 y 3.16).

Tabla 3.8. Persistencia de las categorías climáticas considerando el régimen de humedad entre los periodos 1980-1999 y 2000-2019.

Categoría Climática	Hectáreas	Km ²	Porcentaje de persistencias
Estepario	44,388,934.6	443,889.3	31
Desértico	37,101,037.0	371,010.4	25.91
Invierno Seco A	32,673,511.7	326,735.1	22.82
Invierno Seco C	22,628,521.7	226,285.2	15.8
Verano Seco C	2,848,638.2	28,486.4	1.99
De Monzón	2,248,029.2	22,480.3	1.57
Sin Estación Seca	879,398.0	8,794.0	0.61
Siempre Húmedo	250,618.2	2,506.2	0.18
Verano Seco A	175,371.5	1,753.7	0.12
Tundra	10,803.3	108	0.01
Total	143,204,863.30	1,432,048.60	100

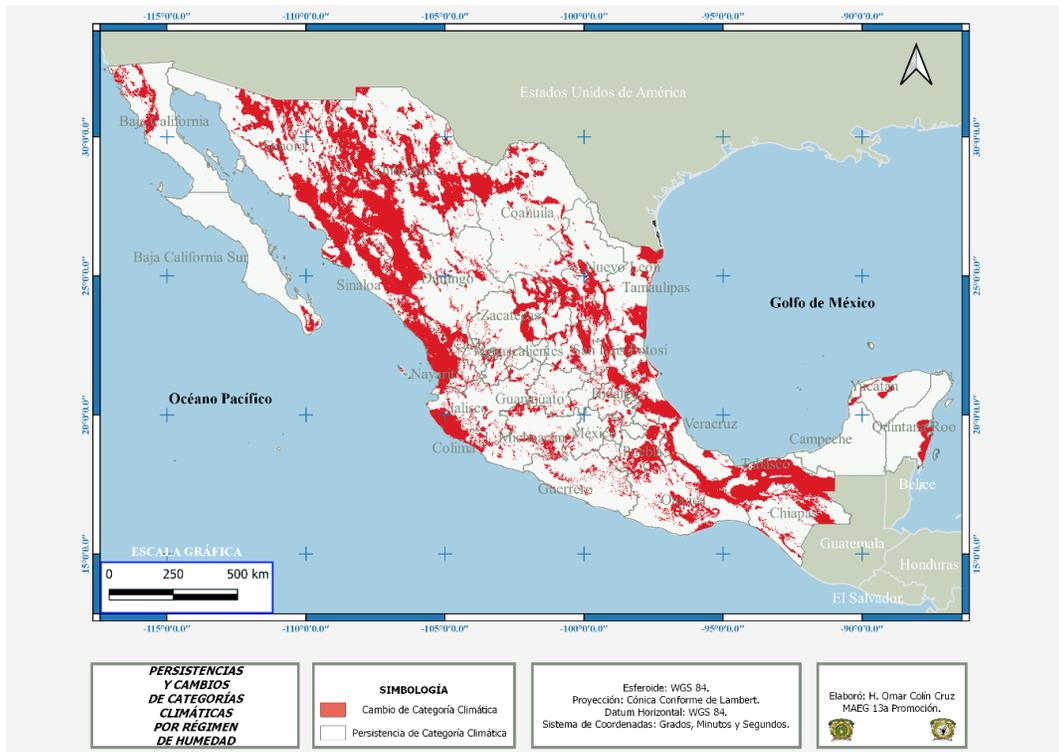


Figura 3.15. Persistencia y cambios de las categorías climáticas considerando el régimen de humedad entre los períodos 1980-1999 y 2000-2019.

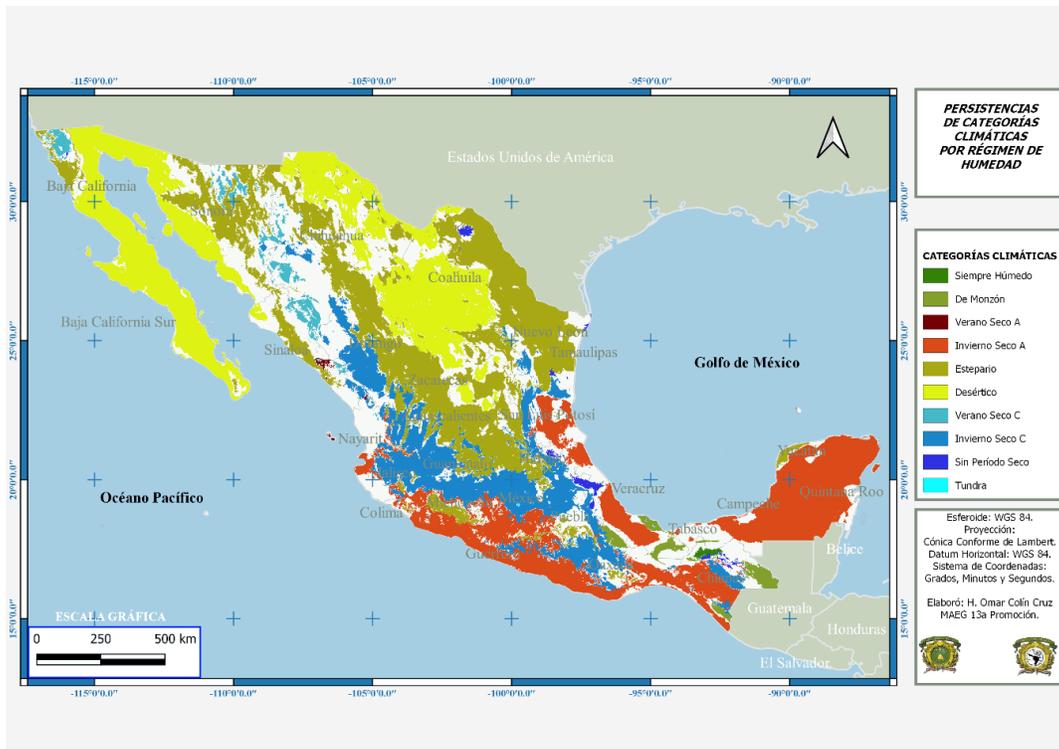


Figura 3.16. Persistencia de las categorías climáticas considerando el régimen de humedad entre los períodos 1980-1999 y 2000-2019.

Finalmente, si sólo se considera el régimen térmico, los resultados mostrados en la tabla 3.9, exponen que, el total de los cambios de categorías climáticas entre ambos períodos ocurrieron en una superficie de 319,471 km², el equivalente al 16.2% del territorio nacional. El clima árido de verano frío que pasó a clima árido de verano cálido es el que presentó el mayor cambio, con una superficie de 81,340 km², equivalente al 25.4% de la superficie total de cambio; mientras que el clima templado con verano muy cálido pasó a ser clima árido con verano cálido con una superficie de 52,044 km² equivalente al 16.2% de la superficie total de cambio; en tanto que, el clima templado cálido y verano cálido pasó a templado cálido y verano frío en 40,290 km² equivalente al 12.6% de la superficie total de cambio.

Considerando únicamente el régimen térmico, el clima árido con verano cálido es el que tuvo una mayor superficie ganada al comparar ambos períodos, ya que en total ganó 126,769 km². En contraparte, el clima templado cálido con régimen térmico de verano muy cálido perdió una superficie de 56,709 km², en tanto que, el clima árido con régimen térmico de verano frío perdió 39,749 km² (Figura 3.17 y Tabla 3.9).

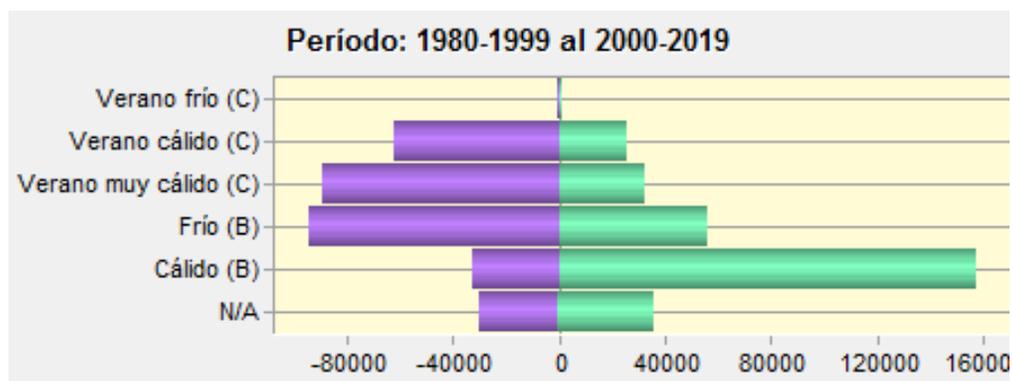


Figura 3.17. Ganancias y pérdidas considerando el régimen térmico.

Tabla 3.9. Cambios de categoría climática considerando el régimen térmico entre los períodos 1980-1999 y 2000-2019.

1980-1999	2000-2019	Hectáreas	Km ²	Porcentaje de cambios
Verano Frío B	Verano Cálido B	8,134,024.3	81,340.2	25.4
Verano Muy Cálido	Verano Cálido B	5,204,452.0	52,044.5	16.2
Verano Cálido C	Verano Frío B	4,029,005.7	40,290.1	12.6
NA	Verano Cálido B	2,528,374.7	25,283.7	7.9
Verano Muy Cálido	N/A	2,338,671.6	23,386.7	7.3
Verano Cálido C	Verano Muy Cálido	1,753,898.1	17,539.0	5.4
Verano Frío B	Verano Cálido C	1,450,287.1	14,502.9	4.5
Verano Cálido B	Verano Muy Cálido	1,245,597.1	12,456.0	3.8
Verano Cálido B	N/A	1,214,072.8	12,140.7	3.8
Verano Muy Cálido	Verano Frío B	1,166,526.3	11,665.3	3.6
Verano Cálido B	Verano Cálido C	533,729.0	5,337.3	1.6
Verano Cálido B	Verano Frío B	453,869.4	4,538.7	1.4
Verano Muy Cálido	Verano Cálido C	435,585.7	4,355.9	1.3
NA	Verano Muy Cálido	424,833.1	4,248.3	1.3
Verano Cálido C	N/A	386,554.8	3,865.5	1.2
NA	Verano Cálido C	273,048.6	2,730.5	0.8
Verano Cálido C	Verano Cálido B	253,711.0	2,537.1	0.7
Verano Frío C	Verano Cálido C	49,202.7	492.0	0.13
Verano Frío B	Verano Muy Cálido	40,010.1	400.1	0.12
NA	Verano Frío C	12,958.7	129.6	0.04
Verano Cálido C	Verano Frío C	13,332.0	133.3	0.04
Verano Frío C	N/A	5,420.0	54.2	0.01
Total		31,947,164.8	319,471.6	100

A manera de síntesis, y considerando la totalidad del territorio nacional, la persistencia de las categorías climáticas al considerar por separado el régimen térmico (que corresponde a la tercera letra de la clasificación de Köppen-Geiger) fue de 1,631,957 km², equivalente al 83.6% de la superficie del país (Tabla 3.9 y Figuras 3.18 y 3.19).

Tabla 3.10. Persistencia de las categorías climáticas considerando el régimen térmico entre los períodos 1980-1999 y 2000-2019.

Categoría climática	Hectáreas	Km2	Porcentaje de persistencias
Verano Cálido B	58,853,004.8	588,530.0	36.1
N/A	45,233,158.4	452,331.6	27.7
Verano Frío B	28,527,794.1	285,277.9	17.5
Verano Cálido C	22,368,868.3	223,688.7	13.7
Verano Muy Cálido	8,209,081.7	82,090.8	5.03
Verano Frío C	3,887.5	38.9	0.002
Total	163,195,794.60	1,631,957.90	100

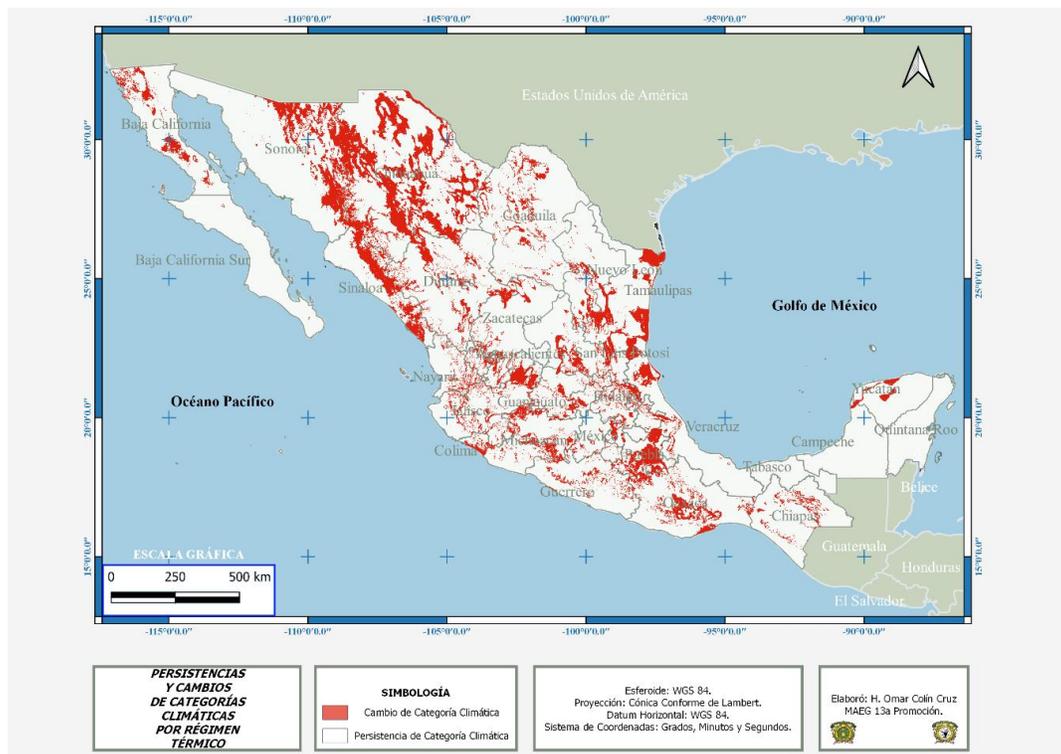


Figura 3.18. Cambios de las categorías climáticas considerando el régimen térmico entre los períodos 1980-1999 y 2000-2019.

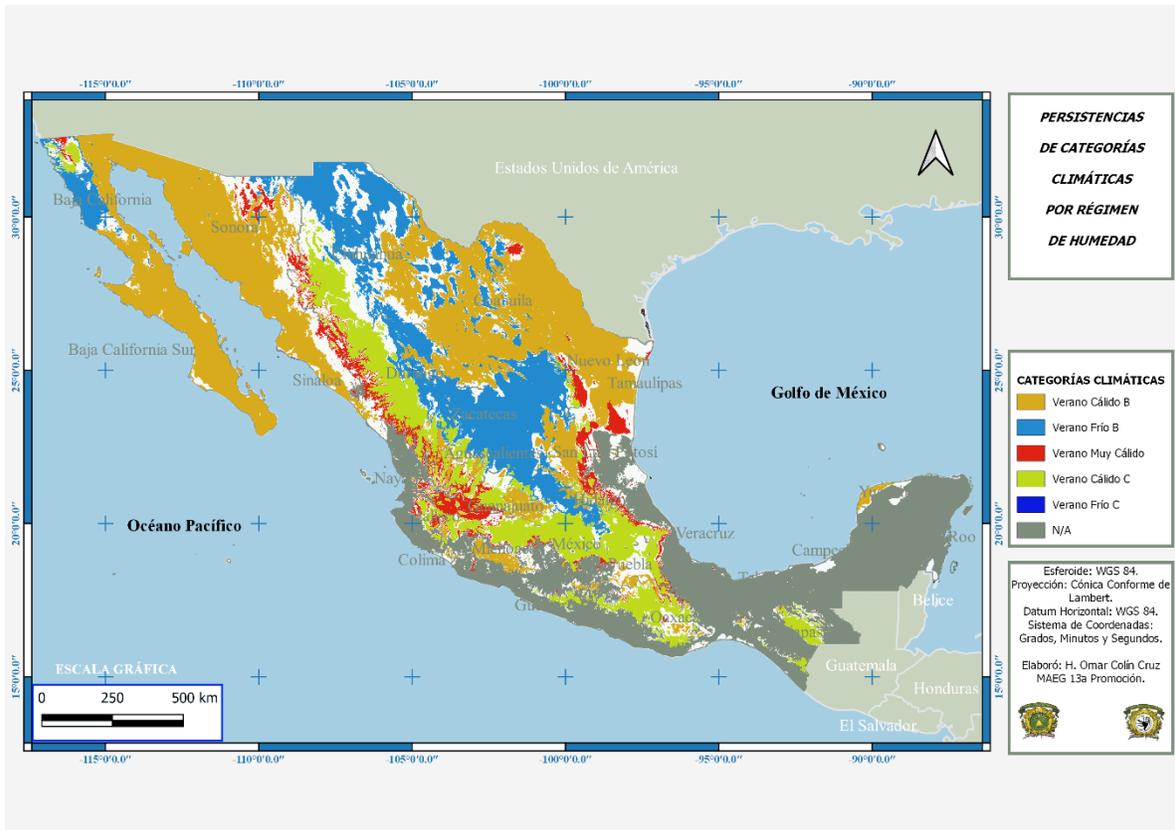


Figura 3.19. Persistencia de las categorías climáticas considerando el régimen térmico entre los períodos 1980-1999 y 2000-2019.

CAPÍTULO 4

DISCUSIÓN

Respecto al módulo de SIG con la clasificación climática de Köppen-Geiger, se puede decir que se logró la integración del módulo en *TerrSet*. Específicamente, se siguieron los convencionalismos de *TerrSet* y fue posible integrar el módulo al programa principal. De esta manera se podría ofrecer el módulo en el sitio de *Centro de Recursos Idrisi México* como se han ofrecido otros (*Köppen-García, Gestión Integrada del Agua [Salud, Población y Ciclo Hidrológico], Desarrollos de Ecuador y Módulo Emergy*) para que cualquier usuario pueda hacer uso de éste.

A diferencia de los módulos referidos previamente, el módulo desarrollado en esta investigación permite ingresar como entradas los datos para generar resultados de diferentes momentos en el tiempo; es decir, si el usuario cuenta con datos para hacer tres clasificaciones climáticas de un mismo lugar pero de tres tiempos distintos (por ejemplo 1930-1960, 1961-1990 y 1991-2020), bastará con que proporcione un archivo de grupo ráster (.rgf) una sola vez y el módulo realizará tres clasificaciones en una sola ejecución.

En lo que se refiere a la evaluación del funcionamiento del módulo de SIG, destaca que con la verificación realizada se aseguró la correcta aplicación del método de clasificación climática de Köppen-Geiger, eliminando errores en la lógica de los procesos internos del módulo, en la escritura del código, en la interpretación y aplicación del método y en el tratamiento de las entradas, tal como se estipula para la generación de software eficiente, efectivo y confiable.

Relacionado con la evaluación de los resultados del módulo de SIG, al validar los resultados de esta investigación con la clasificación climática de Köppen-Geiger elaborada por Beck et al. (2018), y dado que se obtuvo un 21.5% de diferencia entre ambos productos, esta diferencia se podría explicar por los siguientes hechos: (1) la resolución de las

imágenes ráster fue parecida pero no la misma en cada caso (~1 km), lo que influye en la representatividad del clima tanto en una celda simple como en un conjunto de ellas; (2) las capas ráster de temperatura y precipitación mensual necesarias para la clasificación se generaron con diferentes métodos de interpolación, lo que influye en la configuración espacial de dichos elementos climáticos; (3) relacionado con el punto anterior, se tiene la posibilidad de que las estaciones meteorológicas consideradas y sus períodos de recopilación de datos hayan sido distintas en la interpolación realizada por cada uno de los proyectos (*DayMet*, 2020 y Beck et al. 2018); finalmente, (4) el redondeo de cifras significativas en cada proyecto pudo ser distinto, lo que influye en la categorización climática de cada celda (por ejemplo, una celda con valor de 18°C puede pertenecer a una categoría climática tropical, pero la misma celda con un valor de 17.953°C puede pertenecer a la categoría templado).

Debido a lo anterior, las diferencias entre la clasificación climática de este trabajo y la de Beck et al. (2018) se aprecian principalmente entre los límites de climas y no tanto al interior de la categoría climática. De hecho, al considerar solamente el clima principal, la diferencia se reduce a 9.1% de la superficie del país, ya que se dejan de considerar las condiciones de humedad y térmicas que diversifican la clasificación climática; pero manteniéndose la diferencia en las zonas limítrofes de los climas.

Pasando a otro de los resultados, se discute la capa de clasificación climática Köppen-Geiger del período 1980-2019 generado con el módulo de SIG desarrollado en esta investigación. Específicamente se contrastan las categorías climáticas resultantes respecto a otros productos que manifiestan la distribución de los climas en el país a través de la presencia de vegetación, ecorregiones y regiones biogeográficas.

Los límites y la distribución de los climas del módulo de clasificación climática de Köppen-Geiger se corresponden en gran medida con la distribución de las ecorregiones. Los climas áridos de Köppen-Geiger (figura 3.4) abarcan una amplia zona que se extiende desde el centro del país hasta el norte y que guardan coincidencia espacial con cuatro ecorregiones denominadas: Desiertos de América del Norte, Elevaciones semiáridas meridionales, California mediterránea y Grandes planicies (figura 3.7).

Al comparar la distribución de los climas áridos con las regiones bióticas (figura 3.8) estas coinciden en gran medida con las regiones denominadas: Del Cabo, Baja California, California, Sonorense, Sierra Madre Occidental, Altiplano Norte, Altiplano Sur y Tamaulipeca.

En tanto que, al comparar la distribución de los climas áridos con los tipos de vegetación (figura 3.9), se pudo constatar que guardan una alta correspondencia con los tipos de vegetación arbustiva, matorral xerófilo, pastizales y en menor medida selva baja caducifolia (en el norte de Sinaloa).

En cuanto a los climas templados de Köppen-Geiger (Figura 3.4), estos guardan gran correspondencia con la ecorregión denominada Sierras Templadas. En cuanto a las regiones biogeográficas (figura 3.8), los climas tienen una alta correspondencia con las regiones denominadas: Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental, Eje Volcánico, Sierra Madre del Sur, Oaxaca, Altos de Chiapas y Soconusco. En tanto que guardan correspondencia con el tipo de vegetación de Bosques, además de que, la mayor superficie agrícola del país se ubica en este clima.

Referente a los climas tropicales de Köppen-Geiger (Figura 3.4), estos abarcan la mayoría de las ecorregiones denominadas: Selvas cálido-secas y Selvas cálido-húmedas.

Asimismo, las regiones biogeográficas Costa del Pacífico, Depresión del Balsas, Costa del Golfo de México, Peten y Yucatán coinciden en gran medida con estos climas (figura 3.7). Finalmente, y al hacer la comparación entre el tipo de vegetación y el clima, los diferentes tipos de selva guardan gran similitud en su distribución con el clima tropical.

Por último, el clima polar de tundra se limita a las grandes elevaciones del Sistema Volcánico Transmexicano, por ende, tiene una representación muy escasa.

En síntesis, las provincias bióticas y ecorregiones guardan una estrecha correlación con las provincias florísticas y con las zonas de vida de Holdrich, por lo que, es posible inferir que estas se corresponden con la delimitación climática generada en este estudio.

Por otra parte, considerando la población total por estado y la distribución de los climas, los estados del norte generalmente tienen menos población (excepto Nuevo León) y se caracterizan por tener mayoritariamente climas áridos; los estados del centro y el occidente suelen tener una alta población y se ubican en zonas templadas; los estados sureños cuentan con poblaciones medianas a bajas (excepto Veracruz) y se encuentran influenciados por los climas tropicales.

En cuanto a las zonas metropolitanas, de las diez más pobladas, seis están en el clima árido: Monterrey, Juárez, Tijuana, La Laguna, León y Querétaro; mientras que cuatro se localizan en el clima templado: Valle de México, Guadalajara, Puebla-Tlaxcala y Toluca.

Finalmente, se presenta la discusión del análisis de la transición en las categorías climáticas de Köppen-Geiger entre los períodos 1980-1999 y 2000-2019 de México. Lo anterior contrastando las transiciones significativas con los resultados obtenidos por otros autores.

En primer lugar, destacaron cambios como el paso de clima templado a árido en el noroeste del país, lo cual implica un posible incremento en la severidad de las sequías que ya ocurren en la zona, como las presentadas en las décadas 1950 y 2000 y que Esquivel et al. (2019) catalogaron como severas en la cuenca alta del río Nazas.

De forma independiente, pero con la misma orientación, Del Toro y Kretschmar (2017), observaron una reducción del índice de precipitación estandarizado y de la tasa de precipitación anual estacional. Determinaron un aumento en las tasas de temperatura media anual estacional, una alza en la temperatura máxima y un aumento en los períodos secos estacionales, todos estos eventos se asocian hacia una tendencia árida en la región noroeste de Baja California. Los resultados del módulo de clasificación climática de Köppen-Geiger, indican que en esa región hay una superficie considerable que presentó el cambio de categoría climática de templado a árido, lo cual ratifica esas tendencias identificadas.

Por su cuenta, Mendoza y Vázquez (2017), mencionan que en el estado de Guerrero se muestra una tendencia alta del cambio climático sobre las zonas del noroeste, oeste, sur y suroeste del estado que impacta principalmente en la zona sur de la cuenca del río Balsas y la zona norte de la Sierra Madre del Sur. Específicamente, identificaron incremento de los períodos cálidos. Al respecto, con los resultados del módulo de Köppen-Geiger, se pudo determinar que en zonas del noroeste del estado de Guerrero se presenta un cambio de tropical a árido, en el oeste hay zonas que presentan cambios de templado a tropical y en la *Depresión del Balsas* hay zonas que presentan el cambio de tropical a árido. No obstante, en el norte de la Sierra Madre del Sur se presentan cambios de tropical a templado. Esta última situación también se podría deber una importante tendencia al incremento de la

precipitación y la humedad en general en la región, como lo indica un estudio realizado por Mendoza y Vásquez (2017).

Los resultados arrojados por el módulo de clasificación climática mostraron que pequeñas zonas de la Sierra Madre del Sur, en Chiapas, presentan un cambio de categoría climática de tropical a templado, lo cual se relaciona a una disminución de la temperatura media; sin embargo, Arellano y Ruíz (2019), durante el período 1961-2013, registraron un aumento en la precipitación anual, en la temperatura media anual y en la evaporación anual de la cuenca del río Zanatenco, en la misma zona de Chiapas, lo que contrasta con el resultado de esta investigación. La diferencia en los resultados se puede deber a que los autores analizaron tendencias diarias o anuales, mientras que en este trabajo solo se comparan dos períodos de 20 años cada uno. Adicionalmente, Arellano y Ruíz (2019), además de la zona montañosa, consideraron una porción de zona costera en su cuenca de estudio, donde sin duda las temperaturas son más cálidas, lo que influye en los valores promedio de toda la cuenca.

Analizando otra porción del país, se tiene que en la investigación llevada a cabo por Behzadi et al. (2020) en la Ciudad de México, se detectó una tendencia hacia el aumento de la temperatura media de invierno, que también influye en un aumento de la temperatura invernal y la precipitación de verano, especialmente en el noroeste de la ciudad. A diferencia de lo anterior, los resultados del módulo de clasificación climática de Köppen-Geiger, no expresan cambios significativos en las zonas señaladas. Y en cambio, sí se tuvieron cambios significativos en el este y noreste de la ciudad, pasando de la categoría climática de árido a templado, lo que implica que se dio un aumento de las precipitaciones. Las diferencias entre ambos resultados pueden deberse al método utilizado, ya que la

investigación de Behzadi et al. (2020), se hizo de forma puntual con datos de estaciones meteorológicas de la zona a nivel mensual, mientras que en el caso del módulo de clasificación climática se hizo con imágenes interpoladas de dos períodos de 20 años cada uno.

También se contrastaron los resultados del módulo de clasificación climática de Köppen-Geiger con los de la investigación desarrollada por Báez et al. (2018), en la cual identificaron tendencias significativas de cambio climático en los llanos de la *Meseta Zacatecano-Potosino* donde se ha registrado una mayor intensidad en las precipitaciones, así como mayor presencia de intervalos secos más prolongados. Asimismo, una ecorregión adyacente, llamada Sierra con Bosques, muestra tendencias hacia inviernos más cálidos, veranos con menos días con temperaturas mínimas altas y precipitaciones menores en cantidad e intensidad. Al respecto, el módulo no identificó cambios significativos de categorías climáticas en dichas regiones. Se puede atribuir a que en la investigación de Báez et al. (2018), se usaron los datos puntuales de estaciones meteorológicas y posteriormente se realizó una interpolación de los valores, así como, a la temporalidad que abarca de 1910-2009, y a que las tendencias de los extremos climáticos de temperatura y precipitación se determinaron a partir de cuatro y dos estaciones meteorológicas, respectivamente, para toda la zona y que estas tendencias aunque significativas, aún no alcanzan el valor que separa una categoría climática de otra.

Por último, Barón (2020), identificó las transiciones climáticas en la Meseta Comiteca-Tojolobal por el método Köppen-García entre los períodos 1956-1985 y 1986-2015, en donde los principales cambios en cuanto a condiciones térmicas fueron de semicálido templado a templado y de semicálido templado a seco semiárido. Mientras que,

respecto de las transiciones de humedad, identificó que los tipos subhúmedo y seco han ganado superficie respecto a las otras categorías. Mientras que con los resultados de la clasificación climática de Köppen-Geiger, en esta investigación se detectó en esta región la transición climática de templado a tropical, lo cual es un indicativo de que aumentaron las condiciones térmicas y posiblemente ha disminuido la humedad.

Como principal conclusión de la discusión de los resultados que genera el módulo de clasificación climática Köppen-Geiger para comparar dos períodos de tiempo, se tiene que, a diferencia de los análisis de series de tiempo mensuales o anuales que identifican tendencias, con la comparación de la categorización climática de dos o más tiempos distintos (que representa cada una de las condiciones medias de cada período) es factible identificar cambios en dicha categorización desde los puntos de vista térmico y de humedad.

De esta forma, y respecto a lo aquí discutido, se puede decir que, si bien todos los métodos de tendencias a partir de series temporales mensuales o anuales han detectado variabilidad en el comportamiento de elementos climáticos, en algunos casos dicha variabilidad no ha implicado cambios en las categorías climáticas de Köppen-Geiger.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

Tras el desarrollo de la investigación se presentan las siguientes conclusiones:

Considerando que la clasificación climática representa un resumen sinóptico para interpretar el comportamiento de las condiciones climáticas de una región, que el método de Köppen-Geiger es el más aceptado para representar los climas a nivel mundial y que existe una amplia disponibilidad de datos para analizar el clima en forma espacial y temporal, en esta investigación se apreció como área de oportunidad el desarrollo de un módulo de SIG para automatizar la clasificación climática de Köppen-Geiger.

Se identificó que las principales características para un módulo de SIG como el planteado en el párrafo anterior son: (1) procesar capas ráster de precipitación y temperatura mensual para generar imágenes de superficie continua de las categorías climáticas, con la finalidad de representar espacialmente la distribución de los climas, (2) solicitar como únicas entradas las capas de precipitación y temperatura mensual (y opcionalmente el límite de la zona de estudio), con la finalidad de tener una interfaz gráfica de usuario de fácil uso, (3) tener la capacidad de realizar en una sola corrida más de una clasificación climática cuando se cuente con capas de dos o más períodos de tiempo distintos, con la finalidad de facilitar el análisis de la evolución de las categorías climáticas.

En cuanto al diseño de la interfaz de usuario del módulo de SIG (primer objetivo específico de la investigación), éste se ajustó al diseño general de otros módulos de TerrSet, que fue el SIG en el que se implementó. Con lo anterior se busca facilitar su empleo intuitivo a usuarios que previamente ya hayan trabajado con TerrSet. Adicionalmente, se elaboró un videotutorial que tiene la finalidad de facilitar el entendimiento y aprendizaje en el uso del módulo.

Por otro lado, y con relación al segundo objetivo específico de la investigación, con el módulo de SIG desarrollado se implementaron los modelos cartográficos de la clasificación climática de Köppen-Geiger desarrollados por Colín (2019), con algunas modificaciones y ajustes. De esta manera se ofrece al usuario un módulo para aplicar de forma automatizada dichos modelos en TerrSet.

En cuanto al correcto funcionamiento del módulo de SIG desarrollado, se hizo una verificación de la correcta implementación del método de Köppen-Geiger, ello al comparar resultados automatizados con aquellos procesados manualmente en 385 puntos de muestreo repartidos aleatoriamente en todo el país, y logrando una coincidencia del 100% entre ambos resultados. Para la validación de los resultados que genera el módulo, estos se compararon con la clasificación climática generada por otros autores (Beck et al. 2018). En este sentido se alcanzó una coincidencia del 78.5% considerando toda la descripción climática, y del 90.9% considerando solo el clima principal. No se puede concluir si estos porcentajes son adecuados para la validación (lo ideal habría sido alcanzar el 100%), ya que la diferencia se puede deber a las condiciones en que fue desarrollado cada producto (resolución, método de interpolación, período de los datos, redondeo de cifras significativas) más que a la aplicación del método mismo. Por lo anterior, aquí se considera como aceptable el resultado. De esta forma se da como cumplido el tercer objetivo específico de la investigación.

Para el cuarto y último objetivo específico de la investigación, se realizó un caso de estudio multitemporal de la república mexicana que permitió demostrar el uso del módulo de SIG para generar, por un lado, una capa de clasificación climática de Köppen-Geiger del período 1980-2019 y, por otro lado, dos capas de clasificación climática de los períodos

1980-1999 y 2000-2019, mismas que se compararon entre sí para identificar las principales transiciones entre las categorías climáticas. Con lo anterior se validó el funcionamiento y utilidad del módulo desarrollado en esta investigación.

Considerando todos los puntos anteriores, se demuestra que se dio cumplimiento al objetivo general de esta investigación, ya que se automatizó el método de clasificación climática de Köppen-Geiger en un SIG, permitiendo al usuario generar clasificaciones a partir de datos de temperatura y precipitación propios, definiendo sus periodos temporales de análisis y para la zona de estudio de su interés.

En cuanto a los resultados y su discusión, se implementó el módulo desarrollado en *TerrSet*, de tal manera que es posible acceder a él a través de la barra de menús. Adicionalmente, el módulo interactúa con todos los elementos de *TerrSet* como son los diálogos para abrir archivos, los formatos de archivo y el diseño de la interfaz gráfica de usuario. De esta forma el usuario trabaja totalmente dentro del ambiente de *TerrSet*.

En cuanto al resultado relacionado con la clasificación climática del país para el período 1980-2019, se identificó la presencia de 17 de los 31 climas de la clasificación Köppen-Geiger. Es de llamar la atención que el 48.6% de la superficie del país tenga una categoría seca (ya sea seco desértico con régimen térmico cálido [BWh], seco estepario con régimen térmico cálido [BSh] o seco estepario con régimen térmico frío [BSk]).

En cuanto al análisis de transiciones en los climas de la república mexicana entre los períodos 1980-1999 y 2000-2019 bajo el método de Köppen-Geiger, se concluye que sí existen cambios importantes en algunas categorías climáticas. Algunas zonas del país han expresado incremento de la temperatura, mientras que otras presentaron una disminución de esta. La misma situación se presentó con la precipitación, en algunas zonas aumentaron y

en otras hubo una disminución. Por lo tanto, los cambios no han sido uniformes sobre todo el territorio nacional. De hecho, los cambios de categoría climática representaron el 31.1% del territorio, en tanto que las persistencias de las categorías climáticas representaron el 68.9%.

Resultó complicado comparar o validar los resultados obtenidos del análisis de transiciones en esta investigación con los resultados de otras investigaciones, principalmente porque son pocos los trabajos que emplean la clasificación climática para evaluar cambios, y más bien se basan en el análisis de tendencias de series temporales. Bajo estas condiciones, los trabajos de otros autores detectan tendencias que bajo la perspectiva de esta investigación no implican cambios en la categorización climática.

En cuanto a las recomendaciones que se derivan tras el desarrollo de la investigación, se puede señalar que los modelos cartográficos implementados con éxito en esta investigación también podrían implementarse en otro SIG, tanto libre como comercial, con la finalidad de promover el tipo de análisis comparativo entre períodos como el que se desarrolló en este trabajo.

Cuando se analicen los resultados como los que genera el módulo de SIG aquí desarrollado, se debe tomar en consideración que la clasificación de los climas es una manera de agrupar áreas en diferentes latitudes que presentan condiciones térmicas y de humedad similares, pero no se debe perder de vista, que no hay dos lugares en la superficie terrestre que presenten climas iguales, es decir, condiciones iguales de temperatura, humedad y evapotranspiración.

Asimismo, sería conveniente utilizar los datos que uso Beck et al. (2018) para elaborar su mapa de clasificación climática, con su temporalidad y resolución, con la

finalidad de hacer comparables sus resultados con los que genera el módulo implementado en el SIG.

Tomando en consideración que la Organización Meteorológica Mundial (OMM) refiere que el clima se clasifica por períodos de 30 años, y dado que para la realización de este trabajo se usaron dos períodos de 20 años, debido a que no hubo disponibilidad de imágenes ráster anteriores de este lapso y que no era el propósito realizar un análisis a profundidad, sino mostrar la utilidad del módulo de SIG. Se recomienda que se profundice el análisis de las transiciones usando datos de elementos climáticos de al menos 30 años, con la finalidad de apegarse a las recomendaciones de la OMM.

Las transiciones de las categorías climáticas detectadas en este estudio son un área de oportunidad para llevar a cabo un análisis a detalle de las zonas donde se presentaron estos cambios. Y relacionado con la recomendación anterior, se considera que valdría la pena proponer investigaciones que tengan por propósito analizar a profundidad las transiciones climáticas.

Una de las aportaciones del módulo de clasificación climática, es que puede generar capas de al menos dos momentos distintos para analizar los cambios de categorías climáticas. Dichos cambios complementan el análisis de tendencias de variabilidad climática que tradicionalmente se han desarrollado. Por lo tanto, sería recomendable complementar los estudios de variabilidad y cambio climático con los resultados del módulo de clasificación climática, lo cual ayudaría a tener estudios más completos.

En cuanto al plan de estudios de la Maestría en Análisis espacial y Geoinformática (MAEG), y específicamente para proyectos que pretenden desarrollar software de análisis geoespacial, sería recomendable que se ofertaran más materias optativas de programación y

desarrollo de módulos de SIG en el plan de estudios, ya que son necesarias para trabajar en un ambiente de desarrollo y programación de SIG.

Finalmente, el módulo de clasificación climática es susceptible de mejorarse y ampliarse, por lo que se pueden implementar otros métodos de clasificación climática y dar la opción de generar capas de algunos cálculos importantes que se llevan a cabo, como el cálculo de la evapotranspiración, de esta manera se ofrecería una gama más amplia de productos para los usuarios, sobre todo cuando estén limitados de datos de entrada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arellano Monterrosas, J. L., & Ruíz Meza, L. E. (2019). Variabilidad climática y eventos extremos en la cuenca del río Zanatenco, Chiapas. *Tecnología y ciencias del agua*, 249-274. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-03-10>.
- Báez González, A. D., Torres Meza, M., Royo Márquez, M. H., & Kiniry, J. R. (2018). Climate variability and trends in climate extremes in the priority conservation area El Tokyo and adjacent areas in northeastern México. *Weather and Climate Extremes*, 36-47. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2018.10.001>.
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2014). *Diagnóstico integrado con identificación de áreas prioritarias*. Washington D.C. USA: Abt Associates Inc.
- Barón González, K. (Junio de 2020). Modelación en TerrSet de las transiciones en las categorías climáticas de Köppen-García entre 1956-1985 y 1986-2015 en la meseta Comiteca-Tojolobal, Chiapas. Toluca, México, México.
- Barredo, J. I., Achille, M., Giovanni, C., & Dosio, A. (2018). Assessing Shifts of Mediterranean and Arid Climates under RCP4.5 and RCP8.5 Climate Projections in Europe. *CrossMark*. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1853-6>.
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., Mc Vicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*. DOI: 10.1038/sdata.2018.214.
- Behzadi, F., Wasti, A., Rahat, S. H., Tracy, J. N., & Ray, P. A. (2020). Analysis of the climate change signal in Mexico City given disagreeing data sources and scattered projections. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100662>.
- Brugger, K., & Rubel, F. (2013). Characterizing the species composition of European Culicoides vectors by means of the Köppen-Geiger climate classification. *Parasites & Vectors*. <http://www.parasitesandvectors.com/content/6/1/333>.
- Buzai, G. D. (2015). Geografía y pensamiento geográfico. Articulación de enfoques para la investigación aplicada basada en Sistemas de Información Geográfica. *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/publication/303262970>.
- Buzai, G. D., & Santana Juárez, M. V. (2019). *Métodos cuantitativos en geografía humana*. Buenos Aires: Impresiones Buenos Aires.
- Buzai, G., Cacace, G., Humacata, L., & Lanzelotti, S. (2015). *Teoría y Métodos de la Geografía Cuantitativa*. Buenos Aires: MCA Libros.
- Carreto Bernal, F., & González Pérez, R. (2016). *Geografía Ambiente y Sociedad*. Toluca: Universidad Autónoma del estado de México.

- CENAPRED. (26 de Septiembre de 2019). Declaratorias de Emergencia y/o Desastre. CDMX, México.
- Chan, D., Wu, Q., Jiang, G., & Dia, X. (2016). Projected Shifts in Köppen Climate Zones over China and Their Temporal Evolution in CMIP5 Multi-Model Simulations. *Advances in Atmospheric Sciences*, 283-293. DOI: 10.1007/s00376-015-5077-8.
- CIGA UNAM. (25 de Septiembre de 2017). *Clic MD*. Obtenido de <https://www.ciga-unam.mx/index.php/desarrollo-tecnologico/software/item/34-clic-md>
- CONABIO. (11 de 05 de 2001). *Portal de Geoinformación 2021*. Recuperado el 24 de 06 de 2020, de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONABIO. (30 de 10 de 2008). *Portal de Geoinformación 2021*. Recuperado el 24 de 06 de 2020, de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Conrad, O. (2018). *SAGA-GIS Tool Library Documentation (v6.4.0)*. Obtenido de http://www.saga-gis.org/saga_tool_doc/6.4.0/climate_tools_19.html
- Cuadrat, J. M., & María, F. P. (s.f.). *Climatología*.
- Del Toro Guerrero, F. J., & Kretzschmar, T. (2017). Identificación de períodos de sequía histórica en una región de clima tipo semiárido mediterráneo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1311-1320. <http://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/2791>.
- Deliege, A., & Nicolay, S. (2016). Köppen-Geiger Climate Classification for Europe Recaptured via the Hölder Regularity of Air Temperature Data. *CrossMark*, 2885-2898. DOI 10.1007/s00024-016-1339-3.
- Diario Oficial de la Federación. (03 de 06 de 2013). Acuerdo por el que se expide la Estrategia Nacional de Cambio Climático. México, México, México.
- Edin Cuadra, D. (2014). Los enfoques de la Geografía en su evolución como ciencia. *Revista Geográfica Digital*, 1-22. <http://hum.unne.edu.ar/revistas/geoweb/default.htm>.
- Espinosa Rodríguez, L. M. (2001). Geomorfología del noreste del Nevado de Toluca, México. 14-26. CDMX, CDMX, México.
- Esquivel Arriaga, G., Cerano Paredes, J., Sánchez Cohen, I., Velásquez Valle, M. A., Flores, L. F., & Bueno Hurtado, P. (2019). Análisis de sequías (1922-2016) en la cuenca alta del río Nazas. *Tecnología y ciencias del agua*, 126-156. <https://doi.org/10.21138/bage.2937>.
- Farmer, T., & Cook, J. (2013). Climate Classifications. En T. G. Farmer, & J. Cook, *Climate Change Science: A Modern Synthesis* (págs. 339-355). Springer Netherlands.

- Fernández Eguiarte, A., Zavala Hidalgo, J., Romero Centeno, R., Conde Álvarez, A., & Trejo Vázquez, R. (2019). *Centro de Ciencias de la Atmosfera, UNAM*. Recuperado el 17 de 11 de 2019, de <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/ACDM/>
- Fuenzalida, M., Buzai, G. D., Moreno Jiménez, A., & García De León, A. (2015). *Geografía, Geotecnología y Análisis Espacial: Tendencias, Métodos y Aplicaciones*. Santiago de Chile: Triángulo.
- García, E. (2004). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. Ciudad de México: Instituto de Geografía. UNAM.
- Gobierno de la República. (2013). *Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018*. Ciudad de México.
- Gobierno del Estado de México. (2013). Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático del Estado de México 2013. *Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático del Estado de México 2013*. Toluca, México, México.
- Google Earth Engine. (06 de Mayo de 2020). *Climate Engine*. Obtenido de <http://climateengine.org/>
- INE. (09 de 06 de 2001). *Portal de Geoinformación 2021*. Recuperado el 24 de 06 de 2020, de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- INECC, I. (23 de Agosto de 2018). *¿Qué es el cambio climático?* Recuperado el 01 de Septiembre de 2019, de INECC: <http://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/que-es-el-cambio-climatico>
- INEGI. (2021). *Censo de Población y Vivienda 2020*. Recuperado el 24 de Junio de 2021, de <https://censo2020.mx/>
- INEGI. (2021). *Cuentame de México*. Recuperado el 24 de 06 de 2021, de <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/coordenadas.aspx?tema=T>
- IPCC, P. (2021). *AR6 Cambio climático 2021: impactos, adaptación y vulnerabilidad*. Faro, Portugal.
- IPCC, T. (2019). *The Intergovernmental Panel on Climate Change*. Recuperado el 17 de 11 de 2019, de <https://www.ipcc.ch/>
- Jylhä, K., Tuomenvirta, H., Ruosteenoja, K., Niemi-Hugaerts, H., Keisu, K., & Karhu, J. A. (2010). Observed and projected future shifts of climatic zones in Europe and their use to visualize climate change information. *weather, climate and society*, 148-166. DOI: 10.1175/2010WCAS1010.1
- Knapp, J., Zeratsky, J., & Kowitz, B. (2017). *La Metodología del Sprint en 5 Días*. Madison: Cometa.

- Köppen, W. (1936). *Das geographische System der klimate*. Berlín, Alemania: De Gebrüder Borntraeger.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). Worl Map of Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeistchrift*, 259-263. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130.
- Liévano Martínez, F., & Londoño, J. E. (2012). El pènsamiento sistèmico como herramienta metodològica para la resoluciòn de problemas. *Soluciones de Postgrado EIA*, 43-65.
- Madrid Soto, A., & Ortíz López, L. M. (2004). *Análisis y Síntesis en Cartografía: Algunos Procedimientos*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Maeda, P. (10 de 10 de 2014). *Portal de Geoinformación 2021*. Recuperado el 24 de 06 de 2020, de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Magaña Lona, D., Manzano Solís, L. R., Espinosa Rodríguez, L. M., Balderas Plata, M. Á., & Ordoñez, R. (2018). Tendencias de variabilidad climática en subcuencas del estado de México y sus implicaciones en el recurso forestal frente al cambio climático. *Revista latinoamericana el ambiente y las ciencias*, 637-654.
- Manzano Solís, L. R., Gómez Albores, M. A., Díaz Delgado, C., Mastachi Loza, C. A., Ordoñez Sierra, R., Ba, K. M., y otros. (2018). Identification of Variation in the Climatic Conditions of the Lerma-Chapala-Santiago Watershed by Comparative Analysis of Time Series. *Hindawi*. <https://doi.org/10.1155/2018/1098942>.
- Mendoza Uribe, I., & Vázquez Zavaleta, M. Á. (2017). Detección de extremos climáticos de precipitación y temperatura en el estado de Guerrero. *Ingeniería, Revista académica de la FIUADY*, 13-30. <http://hdl.handle.net/20.500.12013/1950>.
- Nojarov, P. (2017). Genetic climatic regionalization of the Balkan Peninsula using cluster analysis. *Journal of Geographical Sciences*, 43-61. <https://doi.org/10.1007/s11442-017-1363-y>.
- OMM, O. (2011). *Guía de prácticas climatológicas*. Ginebra, Suiza.
- OMM, O. (2019). *Informe Anual de 2018*. Génève, Suiza.
- Parker, L. (2015). Economía del Cambio Climático. *National Geographic*, 39-59.
- Pillet Capdepón, F. (2004). La geografía y las distintas acepciones del espacio geográfico. *Investigaciones geográficas*, 141-151. DOI: <https://doi.org/10.14198/INGEO2004.34.07>.
- PND. (05 de Mayo de 2003). Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018. *Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018*. CDMX, México.

- Red Mexicana de Modelación del Clima. (Enero de 2013). *ResearchGate*. Recuperado el Septiembre de 2019, de <https://www.researchgate.net/publication/321274898>
- Reyes, M., & Martínez Arce, J. (2003). *Tecnología de información, cartografía y geografía*. México.
- Rubel, F., & Kottek, M. (2010). Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. *Meteorologische Zeitschrift*, 135-141. DOI 10.1127/0941-2948/2010/0430.
- Rzedovsky, J. (2006). *Vegetación de México*. Ciudad de México: Limusa S.A.
- Sala Sanjaume, M., & Batalla Villanueva, R. J. (1999). Climatología. En M. Sala Sanjaume, & R. J. Batalla Villanueva, *Teoría y Métodos de Geografía Física* (págs. 41-65). Madrid: Síntesis S.A.
- Sánchez Santillán, N., & Garduño L., R. (2014). Algunas consideraciones acerca de los sistemas de clasificación climática. *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/publication/228349003>.
- SEGOB, S. d. (06 de Junio de 2012). Decreto por el que se expide la Ley General de Cambio Climático. Ciudad de México, Ciudad de México, México.
- SEMARNAT. (2019). *Informe de la situación del medio ambiente en México. Edición 2018*. Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente, CDMX.
- Toledo, V. (2009). *La diversidad biológica de México. Nuevos retos para la investigación de los noventa*. Ciudad de México: UNAM.
- Whittow, J., & Whittow, J. B. (2000). *The Penguin Dictionary of Physical Geography*. Middlesex: Penguin Books Ltd.
- Wu, S., Zheng, D., Yin, Y., Lin, E., & Xu, Y. (2010). Northward-shift of temperature zones in China's eco-geographical study under future climate scenario. *Springer-Verlag*, 643-651. <http://www.geogsci.com/EN/Y2010/V20/I5/643>
- Zeroual, A., Assani, A. A., Meddi, M., & Alkama, R. (2018). Assessment of climate change in Algeria from 1951 to 2098 using the Köppen-Geiger climate classification scheme. *Springer*. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4128-0>.