


## Estado del arte sobre modelos de circulación global para resistir el problema del cambio climático



### State of the art on global circulation models to resist the problem of climate change

Gaitán Muñoz, Verónica Elizabeth

 Verónica Elizabeth Gaitán Muñoz  
vgaitan88@gmail.com  
Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Nicaragua

**Revista Torreón Universitario**  
Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua-Managua,  
Nicaragua  
ISSN: 2410-5708  
ISSN-e: 2313-7215  
Periodicidad: Cuatrimestral  
vol. 13, núm. 36, 2024  
[revis.torreon.faremc@unan.edu.ni](mailto:revis.torreon.faremc@unan.edu.ni)

Recepción: 26 Abril 2023  
Aprobación: 14 Diciembre 2023

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/387/3874817002/>

DOI: <https://doi.org/10.5377/rtu.v13i36.17630>

**Resumen:** Este artículo presenta un Estado del Arte sobre Modelos de Circulación Global para resistir el problema del Cambio Climático. La relevancia de este estudio consiste en la comprensión sobre el downscaling que es un proceso que implica la transformación de datos a una resolución espacial más fina. En este trabajo se verá la clasificación de los modelos climáticos en dos grandes tipos, modelos de circulación global (MCG, o GCM, por sus siglas en inglés) que cubren todo el Planeta y Modelos Climáticos Regionales (MCR, o RCM, por sus siglas en inglés) que abarcan una Región climática limitada. La información proporcionada por los GCM, suelen tener una resolución de entre 100 y 200 km de cuadrícula, la cual es adecuada para el soporte en la toma de decisiones a escala internacional. El estudio es de alcance exploratorio y emplea una metodología de estado del arte, la cual es de tipo documental y de carácter crítico interpretativo, se trabajó con ocho trabajos representativos. Los resultados del estudio apuntan a que en su mayoría, en que no se han estudiado a cabalidad, una técnica de reducción de escala de 2° a 0.5° (Statistical Downscaling Model, SDSM) para obtener información detallada de cambios en parámetros asociados a calidad en la construcción de proyecciones locales de temperatura y precipitación.

**Palabras clave:** Clima, Downscaling, Estadística, Global, Variabilidad climática, Crisis climática.

**Abstract:** This article presents a State of the Art on Global Circulation Models to resist the problem of Climate Change. The relevance of this study lies in the understanding of downscaling, which is a process that involves the transformation of data to a finer spatial resolution. This paper will look at the classification of climate models into two main types, Global Circulation Models (GCMs) that cover the entire Planet and Regional Climate Models (RCMs) that cover a limited climate region. The information provided by GCMs usually has a resolution of between 100 and 200 km of grid, which is suitable for supporting decision-making on an international scale. The study is exploratory in scope and uses a state-of-the-art methodology, which is documentary and interpretative critical in nature, working with eight representative works. The results of the study indicate that in most cases, in which a Statistical Downscaling Model (SDSM) technique has not been fully studied, to obtain detailed information on changes in parameters

associated with quality in the construction of local temperature and precipitation projections.

**Keywords:** Climate, Downscaling, Statistics, Global, Climate variability, Climate crisis.

## I. INTRODUCCIÓN

La importancia de la investigación matemática aplicada radica en el impacto de otras disciplinas sobre las necesidades del conocimiento humano, ya sea aplicando directamente resultados bien desarrollados (teoremas, algoritmos, etc.), o construyendo modelos matemáticos (al menos en parte) como respuesta a los problemas planteadas.

Para Herrera, (2022)

El saber sobre las ciencias exactas como lo son las Matemáticas al mismo tiempo de ser agradable es importante para interactuar con claridad, eficacia e inteligencia en un mundo lleno de números, fórmulas, ecuaciones, donde esta ciencia se relaciona con otras para dar respuesta a muchas situaciones del mundo real y la necesidad del conocimiento matemático crece cada vez más al igual que su aplicación. (p. 38)

La investigación es una actividad encaminada a adquirir nuevos conocimientos y aplicarlos a la solución de problemas sociales o científicos. Por eso es importante, en lo que a matemáticas se refiere, realizar un estado del arte sobre Modelos de Circulación Global para resistir el problema del Cambio Climático, tomando en consideración las características distintas de cada país y región, aunque para este tipo de modelos no existen desventajas de barreras ideológicas o culturales. El trabajo de los matemáticos en este campo se desarrolla tanto a nivel teórico como aplicado. La importancia de este tipo de trabajo está influenciada por las necesidades de conocimiento humano de otras disciplinas, así como por los problemas que surgen de su propio contexto.

En Nicaragua, también se hacen esfuerzos con el desarrollo de investigaciones matemáticas. Las universidades son pioneras en estos tipos de trabajos científicos. Existiendo pocas tesis sobre el comportamiento de un modelo heurístico de una técnica de reducción de escala de  $2^\circ$  a  $0.5^\circ$  (Statistical Downscaling Model, SDSM) para obtener información detallada de cambios en ciertos parámetros y se construyeron proyecciones locales de temperatura y precipitación, encontrando solo estudios extranjeros, y proyecciones realizadas por Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales (MARENA).

Por ello, en este artículo, se realiza un estado del arte, ya que como indica Molina Montoya, (2005):

El origen del estado del arte se remonta a la década de los ochenta, cuando se dirigieron fundamentalmente estudios en el área de las ciencias sociales en América Latina, los cuales procuraban la compilación de la información disponible sobre un tópico determinado, con el objetivo de fundamentar políticas y alternativas de acción para el desarrollo social; de aquí surgió el estado del arte asociado con la finalidad de hacer un reconocimiento de la investigación en la región latinoamericana. (p. 74)

Si, bien el origen del estado del arte está en las ciencias sociales, su utilidad ha sido tanta que es muy utilizada en estudios, de tipo científico, para conocer alcance del tema a abordar, modelos, metodologías, sistemas nuevos que se están aplicando a nivel mundial y que se pueden adaptar a la realidad que se quiere estudiar. Por ello, Urbina y Morel, (2017) toman la siguiente definición:

El Estado del Arte/Estado de la técnica, hace referencia al estado último del conocimiento sobre la investigación y el desarrollo (I+D), es decir que es el límite de conocimiento generado sobre un tema o problema de investigación científica y/ o tecnológica, estableciendo hasta donde ha avanzado el mismo, cual es la frontera en un tiempo y espacio determinado. (p.3)

También, es necesario conocer ¿Qué es un modelo matemático?, al respecto Herrera Castrillo (2023) plantea:

Un modelo matemático parte de una teoría en el sentido de que es un modelo de esa teoría. Esto significa que es un sistema que ignora los principios básicos de esta teoría (llamados axiomas). En otras palabras, un modelo matemático es un "objeto" que se usa como ejemplo para representarlo o, en algunos casos, una instancia especial separada de la encarnación (interpretación) de esta teoría. Usando este sentido típico, los diversos conjuntos numéricos (natural, racional, real...) son buenos ejemplos de estructuras abstractas sin contenido, que se construyen o no. (p. 37)

## 1.1 Reseña histórica de modelos climatológicos

Durante las últimas décadas, los modelos numéricos han sido el único método capaz de predecir el cambio climático. Esto se debe a la demora entre la causa del cambio y sus consecuencias (sean causas naturales o relacionadas con las actividades humanas, especialmente las emisiones de gases de efecto invernadero y el cambio de uso del suelo que incluye la explotación indiscriminada de los recursos naturales). Por ello, es importante describir el desarrollo de los modelos, las técnicas numéricas que utilizan, los principios físicos que les otorgan su poder predictivo, cómo se utilizan y cómo pueden contribuir a la definición de medidas políticas.

Los primeros modelos climáticos, en la década de 1960, eran modelos simples del balance de energía de la Tierra: 40 o 50 años después, se agregó una representación de la dinámica atmosférica (definida originalmente por aplicaciones meteorológicas), una representación de la dinámica oceánica y biogeoquímica, mar hielo, hidrología y cobertura vegetal en regiones continentales, química y calidad del aire, gran ciclo del agua, carbono.

Es importante considerar que para Slingo, (2017)

La ciencia del clima posee una historia larga y bien diferenciada. En 1686, Edmund Halley publicó su emblemática descripción de los vientos tropicales en la revista *Philosophical Transactions*, de la Royal Society: *An Historical Account of the Trade Winds, and Monsoons, Observable in the Seas between and near the Tropics, with an Attempt to Assign the Physical Cause of the Said Wind* [Explicación histórica de los vientos alisios y monzones observables en los mares entre los trópicos y sus proximidades, con un intento de determinar la causa física de dichos vientos]. Halley se preguntaba por qué los vientos soplaban invariablemente del este y sostenía que debían ser causados por el paso diario del Sol, debido al cual el Sol calienta la atmósfera, causando el ascenso del aire y, por tanto, atrayendo aire desde el este tras el paso solar.

Asimismo, Le Treut y Nuñez, (2017) indican:

La situación ha cambiado durante los últimos 10 o 20 años, porque los primeros síntomas del cambio climático se pueden medir de manera clara. Esta evolución hace que no se puede más hablar del cambio climático sin tomar en cuenta su vinculación con otras necesidades ambientales (preservación de la biodiversidad) y con temas socio-económicos. Esto determina una nueva evolución de los modelos en diversas direcciones. (p. 1)

## 1.2 Cambio de uso del suelo

El cambio de uso del suelo, que incluye la explotación indiscriminada de los recursos naturales, es una de las causas humanas que incide directamente en el calentamiento global.

La actividad humana ha llevado a la transformación de vastas áreas de bosques, humedales y otros ecosistemas naturales en tierras agrícolas, urbanas o industriales. Esta conversión de los ecosistemas naturales tiene múltiples impactos negativos en el clima global.

En primer lugar, la deforestación y la degradación de los bosques liberan grandes cantidades de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) almacenado en los árboles y el suelo. El CO<sub>2</sub> es uno de los principales gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global.

Además, la destrucción de los bosques y otros ecosistemas naturales reduce la capacidad de la vegetación para absorber el CO<sub>2</sub> de la atmósfera a través de la fotosíntesis. Esto lleva a un aumento en la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, intensificando el efecto invernadero y contribuyendo al calentamiento global.

Algunos estudios que se han realizado al respecto son:

Orellana Salas y Lalvay Portilla, (2018) realizó un estudio titulado “Uso e importancia de los recursos naturales y su incidencia en el desarrollo turístico. Caso Cantón Chilla, El Oro, Ecuador” El crecimiento turístico en un lugar está estrechamente ligado al uso de los recursos naturales por parte de los habitantes y a la importancia que estos recursos tienen para su calidad de vida y subsistencia. En este artículo, se analiza el uso e importancia de los recursos naturales y su impacto en el desarrollo turístico del cantón Chilla, en la provincia de El Oro, Ecuador. La metodología utilizada fue la observación directa y la aplicación de encuestas a la población económicamente activa. Los resultados revelaron los recursos naturales más utilizados e importantes para la comunidad. Se sugiere promover su conservación para mejorar la calidad de vida de los habitantes y lograr un turismo sustentable en la zona. Dado que el turismo local es una fuente de ingresos económicos para la población, es esencial llevarlo a cabo teniendo en cuenta la vulnerabilidad de los ecosistemas y respetando y cuidando el entorno natural. El cantón Chilla recibe una gran afluencia de turistas cada año, por lo que es necesario concienciar a la población sobre la importancia de cuidar y gestionar adecuadamente los recursos naturales que poseen.

## II. MATERIAL Y MÉTODO

### 2.1 Tipo y fuentes de investigación

El tipo de investigación es “documental de carácter crítico interpretativo” donde la recopilación de información bibliográfica es de suma importancia. Su alcance exploratorio, de énfasis cualitativo, pues lo que se pretende es conocer un fenómeno novedoso o poco estudiado (Hernández Sampieri, et al., 2014, p. 97). La fuente de donde se obtiene la información es, principalmente, la disponible en artículos relevantes que se refieren a Modelos de Circulación Global para resistir el problema del Cambio Climático.

El estado del arte es una modalidad de la investigación documental que permite el estudio del conocimiento acumulado (escrito en textos) dentro de un área específica. (Molina, 2005, p. 73)

Como investigación documental, el estado del arte es orientado por varios principios que dan rigor a su desarrollo, así: i) Finalidad. Representa el compromiso por establecer objetivos de investigación previos; ii) Coherencia. Es contar con unidad interna en materia de fases, actividades y datos; iii) Fidelidad. Alude a un respaldo en materia de recolección y transcripción; iv) Integración. Implica articulación y evaluación global del proceso y iv) Comprensión. Se traduce en el favorecimiento de la construcción teórica sobre el objeto de estudio, citado por Barbosa Chacón et al., 2013, p. 90).

El desarrollo de este estudio está basado en la investigación bibliográfica, proceso centrado en la búsqueda, recopilación, análisis, crítica e interpretación de datos, es decir, aquellos obtenidos y documentados por otros investigadores en fuentes bibliográficas: impresas, audiovisuales o electrónicas.

El enfoque histórico hermenéutico para el estado del arte es una manera de reconstruir con rigor los desarrollos de otros y con ello aportar diversas interpretaciones que transforman y contribuyen al fenómeno estudiado. Para Bolaños Mejía et al., (2021) este estudio se enmarca en el enfoque constructivista, porque “la revisión de la literatura es una actividad preliminar en busca de un marco de referencia flexible, que en la mayoría de los casos se convierte en una actividad continua durante el transcurso de la investigación” (p. 16)

Para la elaboración del estado del arte se utilizaron algunas de las etapas y lineamientos planteados por (Barbosa Chacón, et al., 2013), abordándolo en dos grandes momentos: Heurístico y Hermenéutico, respectivamente, según las necesidades de la investigación.

La fase heurística, de orden preparatorio, representa el procedimiento de búsqueda y recopilación de fuentes de información según su naturaleza y características; es la aproximación al objeto de estudio, a través de la delimitación y definición de estrategias particulares de búsqueda (Rojas Rojas, 2007; Hoyos, 2000;

Bucheli y Córdoba, s.f.; Lopera y Adarve, 2008; Castañeda, 2004, citado por Barbosa Chacón et al., 2013, pp. 90-91)

### Fase heurística

Es en esta fase cuando se leen las fuentes encontradas (bibliografías, se seleccionan los puntos fundamentales y se indican el o los instrumentos diseñados por el investigador para sistematizar la información. A través de la recopilación de la información es posible contextualizar las temáticas, clasificar los tipos de texto, los autores, las metodologías, los marcos de referencia, los conceptos y las conclusiones, ya que permiten elaborar y organizar el material consultado, además de establecer convergencias y divergencias.

### Fase Hermenéutica

Consiste en la lectura, análisis, interpretación, correlación y clasificación de la información, según el grado de interés y necesidad frente a la nueva investigación. Como en todo trabajo hermenéutico, es necesario realizar el ejercicio de pasar de la fragmentación realizada en las fichas, a la síntesis del texto y de la pluralidad del pensamiento a la reflexión crítica.

FIGURA 1  
Fase Heurística y Hermenéutica  
*Nota. Adaptado de (Bolaños Mejía et al, 2021, pp. 17-18)*

## 2.2 Pasos metodológicos

Para llevar a cabo el estudio, entonces, se han seguido los cinco pasos metodológicos, mostrados en la figura 2.

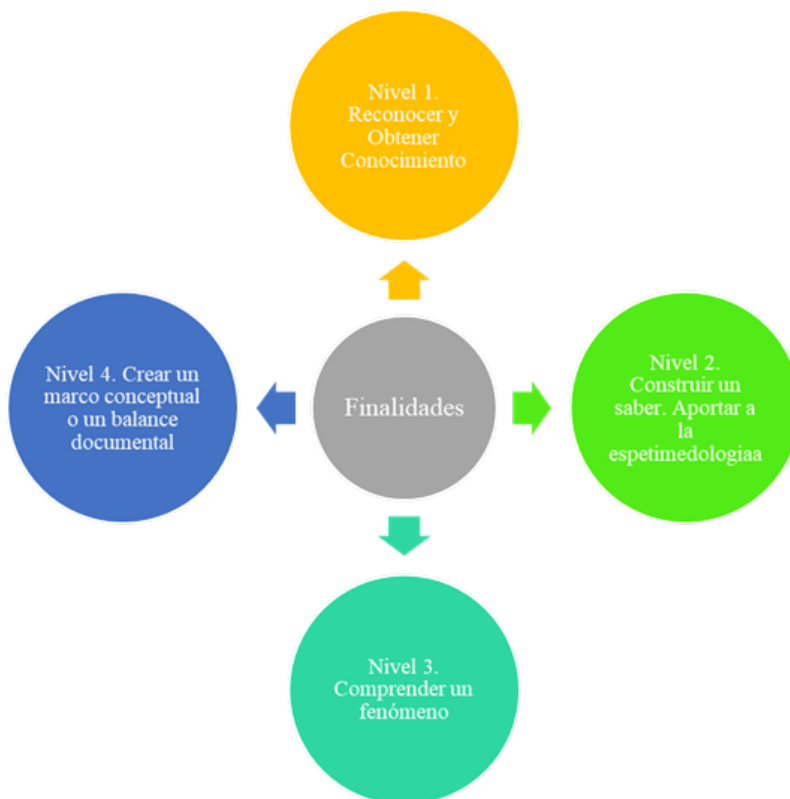


FIGURA 2  
Las finalidades del estado del arte  
*Nota. Extraído de (Gómez Vargas, et al., 2015, p. 433).*

Se describen de la siguiente manera:

1. Indagar, para hacer un rastreo general de algunos Modelos de Circulación Global para resistir el problema del Cambio Climático, en dependencia del vínculo histórico-cultural con modelos utilizados en Nicaragua, o bien, por el impacto regional o mundial que tengan.
2. Identificar y seleccionar los Modelos de Circulación Global más representativos por región
3. Clasificar y sistematizar la información documental oficial.
4. Analizar la información.
5. Aproximación al estado del arte.

### 2.3 Criterios para el análisis de resultados

Para el análisis de resultados, se identifica la existencia de Modelos de Circulación Global para resistir el problema del Cambio Climático, principalmente Statistical Downscaling Model, SDSM.

## III. RESULTADOS

En la búsqueda de investigaciones realizadas sobre el problema que se plantea en este estudio, se realizó un recorrido sobre la temática planteada “Comportamiento de un modelo heurístico de una técnica de reducción de escala de 2° a 0.5° (Statistical Downscaling Model, SDSM) para obtener información detallada de cambios en ciertos parámetros y se construyeron proyecciones locales de temperatura y precipitación.”

Para situar el área problemática se procedió a realizar revisión bibliográfica de la literatura correspondiente al tema de investigación, la cual consistió en textos digitales en el período comprendido del 2000 al 2023. En las fuentes consultadas se encuentran libros de texto, artículos de revista, congresos, tesis a nivel de maestría y doctoral. Se localizaron varios estudios que abordan algunos aspectos relacionados al tema objeto de investigación, realizados en diferentes países tales como Costa Rica, Ecuador, España, Panamá, Perú, entre otros.

Los trabajos de investigación realizados y que tienen relación con el objeto de estudio en el presente trabajo investigativo, se pueden citar los siguientes:

1. Amador y Alfaro, (2007), autores del trabajo: Métodos dinámicos y estadísticos de reducción de escala: Aplicaciones al clima, variabilidad climática y cambio climático, en la Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. El objetivo de este proyecto es desarrollar productos para el análisis y aplicaciones de datos de precipitación diarios, mensuales y estacionales mejorados en un sistema de mallas en apoyo al monitoreo del clima, predicción climática e investigación aplicada. En términos generales, se han usado dos aproximaciones para lidiar con esta deficiencia: los métodos de ajuste de escala dinámico y las de tipo estadístico. Ambas técnicas muestran niveles similares de habilidad bajo las mismas condiciones climáticas al estimar variables atmosféricas superficiales. En el presente trabajo, se discuten los elementos básicos del sistema climático y las posibles causas de los cambios observados en el sistema físico. Se presentan además en forma resumida, los principales conceptos asociados a los elementos que definen el sistema climático, la definición de clima de una región, algunos aspectos de la variabilidad climática asociada al estado medio de la atmósfera y las generalidades del problema del cambio climático global con énfasis en el aspecto regional del mismo. Se presentan además los esquemas metodológicos del proceso de reducción de escala, una discusión sobre sus ventajas y limitaciones, así como algunas aplicaciones al tiempo atmosférico y clima regional.

Las técnicas de ajuste de escala estadístico usan las salidas de los MACGA y permiten la construcción de escenarios climáticos para sitios individuales o regiones con una resolución a diferentes escalas temporales como la diaria, la mensual y la estacional, utilizando para ello información estadística o de relación derivada de series de tiempo históricas.

Dentro de los métodos estadísticos más usados están las técnicas del análisis multivariado, varias de las cuales han sido utilizadas por investigadores del Centro de Investigaciones Geofísicas de la Universidad de Costa Rica (CIGEFI-UCR) para el estudio de distintos campos superficiales sobre Centroamérica tales como la precipitación y temperatura superficial del aire y que se suponen están relacionadas con fenómenos de una escala mayor o global como el ENOS (El Niño-Oscilación del Sur).

2. Amador y Alfaro, (2009) desarrollaron el estudio: Métodos de reducción de escala: aplicaciones al tiempo, clima, variabilidad y cambio climáticos,

Los Modelos de Circulación General Atmosféricos-Oceánicos Acoplados muestran buena habilidad para simular la evolución de las circulaciones de escala global. Sin embargo, esta bondad no es muy útil para el estudio de impactos locales debido a que la resolución espacial de esos modelos está por encima de la escala de los impactos locales que se desean analizar. Es importante tomar esto en cuenta al estudiar impactos del clima en las actividades del hombre, en la biodiversidad, en ambientes marino-costeros y en arrecifes en las regiones tropicales, por ejemplo. Existen dos aproximaciones para lidiar con esta diferencia de escala e información: los métodos de reducción de escala dinámica y estadística. En este trabajo, se discuten los elementos básicos del sistema climático y las posibles causas de los cambios atmosféricos observados en este sistema.

La recopilación y organización de la mayoría de las bases de datos utilizadas en estudios y aplicaciones relacionadas con el cambio climático en la región recae en los Servicios Meteorológicos o Hidrológicos Nacionales, así como en otras instituciones nacionales o regionales responsables de proporcionar servicios públicos a diversos sectores de la sociedad. Además, algunos países desarrollados también han implementado bases de datos de carácter más regional a través de sus entidades o instituciones nacionales.

3. Ribalaygua, et al., (2010) realizaron un estudio titulado: Verificación y Validación de una Metodología de Downscaling Estadístico para Nicaragua. Tomando como motivación:

- Adaptar la metodología de regionalización de la Fundación para la Investigación del Clima (FIC) a la región de Nicaragua. Selección de predictores adecuados a la región de estudio.
- Verificación y validación de la metodología en Nicaragua.
- Primer estudio de este tipo en Nicaragua.

La metodología de regionalización desarrollada por la FIC es una técnica de regionalización basada en técnicas estadísticas que intenta establecer relaciones empíricas entre campos de variables de baja resolución procedentes del MCG (predictores) y las variables de alta resolución (predictores) en superficie (temperatura y precipitación). La metodología FIC consiste en un método de análogos en dos pasos.

El éxito de una metodología de regionalización no reside únicamente en lo buena que es dicha metodología simulando el clima local, sino que además una buena elección de los predictores supone un valor añadido a la misma. Por ese motivo se debe trabajar siempre con los predictores que mejor se adecuen a la región de estudio y a la variable a simular.

La adaptación de la metodología a cada zona de estudio y la selección de los predictores más adecuados son aspectos fundamentales para obtener los mejores resultados. Utilizar los campos de viento en lugar de los de geopotencial no solo permite capturar las situaciones sinópticas que afectan a Nicaragua, sino también los fenómenos que generan convección forzada. Los errores asociados al proceso de verificación no dependen de la distribución geográfica, ya sea para la

temperatura o para la precipitación. Se ha observado una posible relación entre el error y la altitud de las estaciones meteorológicas en el caso de la temperatura, pero debido al reducido número de observatorios disponibles para el estudio, no es posible establecer una conclusión definitiva.

4. García Herrera, et al., (2010) realizó un estudio bajo el tema: Escenarios a Futuro de Temperatura y Precipitación Pluvial Bajo el Efecto de un Cambio Climático en la Región Agrícola de los Llanos, Durango, México.

Este estudio está encaminado a generar una representación del clima a futuro, de la temperatura y precipitación pluvial, en sus condiciones medias; mediante la proyección al año 2020, 2050 y 2080, a fin de integrar dichas proyecciones en un índice de amenaza climática en la Región Agrícola de los Llanos, Durango. Región que comprende 5 municipios: Cuencamé, Guadalupe Victoria, Panuco de Coronado, Peñón Blanco y Santa Clara. Se seleccionaron estaciones climatológicas que tuvieran la mayor cantidad de información, con homogeneidad y consistencia en los datos. Se realizaron los escenarios utilizando el Modelo Estadístico de Reducción de Escala Espacial (SDSM, por sus siglas en inglés), siendo uno de los esquemas de reducción de escala espacial más útiles, en materia de generación de escenarios de cambio climático basado en procedimientos estadísticos de regresión. Se generaron archivos y escenarios para cada variable meteorológica de cada estación mediante una serie de procedimientos con el SDSM. Los resultados respecto a la temperatura máxima indicaron que los meses de Julio y Agosto son los que presentan el índice de aumento más considerable en los tres escenarios.

Para la temperatura mínima se presentó en los meses de Abril, Junio y Julio los aumentos más considerables, y en cuanto a la precipitación pluvial el mes de Junio es el que tiende a presentar un aumento considerable, seguido del mes de Septiembre. Siendo la variable precipitación la que presentó más heterogeneidad en las estaciones consideradas en este estudio. Este trabajo es la base para realizar estudios de evaluación de los impactos del cambio climático en el área de estudio. Palabras clave: Cambio climático, reducción de escala

5. Camargo-Bravo y García-Cueto, (2012) realizaron el artículo titulado: Evaluación de dos Modelos de Reducción de Escala en la Generación de Escenarios de Cambio Climático en el Valle de Mexicali en México. Se evaluaron dos modelos de reducción de escala en la generación de escenarios de cambio climático en el Valle de Mexicali en México. Las técnicas comparadas son un Generador Estocástico de Tiempo Meteorológico (LARS-WG) y un método dinámico-estadístico (SDSM). Cada técnica se evaluó por su habilidad para reproducir algunas características estadísticas del clima observado en el período 1961-1990.

Se elaboraron escenarios de cambio climático de temperatura y precipitación para los horizontes temporales 2020 y 2050. El LARS WG y el SDSM son técnicas sencillas que mostraron habilidades diferentes en la simulación de momentos estadísticos del clima observado, siendo ambos más eficientes para simular la temperatura que la precipitación. Para uno de los escenarios considerados se encontró diferencias de 0.1°C y 0.2°C para temperatura máxima y temperatura mínima y del 40.4% al 76.7% para precipitación.

6. Gualán, Sánchez, et al., (2014) realizaron un estudio bajo el título: Simplificación del proceso complejo de reducción de escala de los modelos climáticos globales por medio de la aplicación web SDW.

De las técnicas de reducción de escala dinámicas, basadas en la resolución de modelos regionales de clima, y las estadísticas, que buscan relaciones estadísticas entre variables sinópticas de clima y observaciones de superficie, las últimas han mostrado una mejor representación de las variables climáticas en zonas de montaña, como es el caso de los Andes. Sin embargo, para considerar las incertidumbres de escenarios de clima futuros entre modelos GCM, entre escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero, y entre técnicas de reducción de escala, surge la necesidad del



desarrollo de una herramienta versátil que sea parte fundamental de un sistema de soporte de decisiones.

Para el desarrollo de SDW se definieron las siguientes especificaciones como guías para construir una aplicación de calidad, útil y eficiente:

- Crear una interfaz gráfica sencilla y funcional;
- Proporcionar mecanismos para facilitar la integración de herramientas computacionales de inteligencia artificial; y
- Diseñar un flujo genérico para el manejo de las herramientas de reducción de escala estadística.

SDW agrupa su funcionalidad en dos módulos o subsistemas. El módulo de extracción carga y transformación, ECT, permite almacenar en un repositorio relacional, datos provenientes de archivos de reanálisis, GCMs y de observaciones. El módulo de generación de modelos y reducción de escala, GMD, permite ejecutar las diferentes etapas necesarias para la ejecución de técnicas de reducción de escala estadístico. Para el diseño se definió una arquitectura en capas, que de cara al usuario presenta un portal web. Como uno de los lineamientos para el desarrollo del sistema se definió la creación de un flujo de procesos genérico que permita utilizar los modelos de manera unificada. Esto permite y facilita la integración de nuevos modelos a futuro, característica que suma versatilidad y utilidad a esta herramienta, que formaría una parte fundamental dentro de un sistema de soporte de decisiones para la adaptación al cambio climático.

7. Duarte, et al., (2018) realizaron el estudio: Evaluación Hidrológica de la Técnica de Reducción de Escala CSD (Chaotic Statistical Downscaling) en la Cuenca del Rio Bogotá.

Se utilizó como modelo climático global el MPI-ESM-MR del instituto meteorológico Max Planck Institute bajo la primera realización histórica (1850-2005) y con el escenario RCP8.5 (2006-2100) en su primera realización a nivel diario para un total de 91676 datos, basado en el informe de Angarita, (2014), en el que se concluye que este modelo refleja adecuadamente la mayoría de los patrones de estado del tiempo local para la región de estudio, en total fueron utilizadas dos celdas del modelo con un valor promedio de 5.13 mm, una desviación estándar promedio de 6.12mm y un valor máximo promedio de 45.82mm. Para los datos locales fueron utilizadas 47 estaciones seleccionadas del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales).

El modelo hidrológico aplicado en la cuenca del rio Bogotá corresponde al desarrollado por Sugawara en 1967, también conocido como modelo de tanques. Para este modelo de 4 tanques, la precipitación es colocada en el tanque superior y la evaporación es sustraída individualmente de cada tanque a medida que se acaba el agua del tanque superior.

8. Ferrando, (2019) realizó un estudio titulado: Avances en las investigaciones en España sobre el uso de la modelización en la enseñanza y aprendizaje de las matemáticas. El objetivo de esta contribución es mostrar un panorama de la investigación centrada en el uso de la modelización.

La investigación relativa a la modelización es amplia y diversa, desde trabajos de perfil teórico hasta investigaciones centradas en el diseño y análisis de recursos basados en el uso de la modelización. En los avances realizados en España en los últimos años, las investigaciones desarrolladas abarcan desde la educación infantil hasta la formación de profesores, pasando por la educación obligatoria y la universitaria. Dada la heterogeneidad de las temáticas y de los enfoques, no es sencillo categorizar de forma unívoca los trabajos, ni tampoco unificar las perspectivas teóricas utilizadas. El objetivo de esta contribución es mostrar, de forma accesible, un panorama de los avances realizados y del impacto de estos en la investigación del campo de la modelización a nivel internacional.

## IV. CONCLUSIONES

Existen muy pocos trabajos referentes al tema a bordar a nivel global, en el caso de Nicaragua, será el primer trabajo referente a matemáticas aplicadas, ya que los existentes son trabajos ambientales, que toman la parte estadística de manera superficial, mientras que esta investigación profundiza en ello.

Para el diseño de los algoritmos heurísticos utilizados en el proceso de Downscaling, es fundamental contar con conocimientos en programación matemática, especialmente en el ámbito del software.

En este sentido, es necesario tener habilidades en programación para implementar los algoritmos de manera eficiente y efectiva. Esto implica comprender los conceptos matemáticos subyacentes, así como tener destreza en el uso de lenguajes de programación y herramientas específicas para el desarrollo de software.

Además, es importante tener en cuenta que el diseño de los algoritmos heurísticos para el Downscaling implica considerar aspectos como la optimización, la modelización matemática y la gestión de datos. Por lo tanto, es necesario contar con un sólido conocimiento de estas áreas, así como una comprensión profunda de los fundamentos de la programación y la programación matemática.

En resumen, el diseño de algoritmos heurísticos para el proceso de Downscaling requiere una combinación de habilidades en programación matemática y software, lo que permite desarrollar soluciones eficientes y precisas para el análisis y la proyección de datos climáticos a escalas más pequeñas.

Existen varios softwares que se pueden utilizar para el diseño de algoritmos heurísticos en el proceso de Downscaling y la programación matemática en general. Algunas opciones populares son:

1. MATLAB: MATLAB es un software ampliamente utilizado en el ámbito científico y de ingeniería. Ofrece una amplia gama de herramientas y funciones para el análisis numérico, la programación matemática y la implementación de algoritmos heurísticos.
2. R: R es un lenguaje de programación y entorno de software diseñado específicamente para el análisis estadístico y la manipulación de datos. Cuenta con numerosas bibliotecas y paquetes que permiten implementar algoritmos heurísticos y realizar análisis avanzados.
3. Python: Python es un lenguaje de programación de propósito general que se ha vuelto muy popular en el campo de la ciencia de datos. Dispone de bibliotecas como NumPy, SciPy y Pandas, que brindan amplias capacidades para el análisis numérico y la programación matemática.
4. GAMS: GAMS (General Algebraic Modeling System) es un lenguaje y entorno de modelado para la programación matemática y la optimización. Es especialmente adecuado para la resolución de problemas de optimización lineal, no lineal y mixta.
5. CPLEX: CPLEX es una biblioteca de optimización matemática desarrollada por IBM. Proporciona una amplia gama de algoritmos y técnicas para resolver problemas de programación matemática de manera eficiente.

## V. REFERENCIAS

- Amador, J. A., y Alfaro, E. J. (2009). Métodos de reducción de escala: aplicaciones al tiempo, clima, variabilidad climática y cambio climático. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, 39-52. Retrieved 16 de Marzo de 2023, from [https://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/76759/2009\\_2.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/76759/2009_2.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Amador, J., y Alfaro, E. (2007). *Métodos dinámicos y estadísticos de reducción de escala: Aplicaciones al clima, variabilidad climática y cambio climático*. Trabajo in extenso sometido al III Congreso Iberoamericano sobre Desarrollo y Ambiente, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. Retrieved 12 de Enero de 2023, from <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/427/AmadoryAlfaro2007.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Barbosa Chacón, J. W., Barbosa Herrera, J. C., y Rodríguez Villabona, M. (2013). Revisión y análisis documental para estado del arte: una propuesta metodológica desde el contexto de la sistematización de experiencias educativas. *Investigación Bibliotecológica*, 27(61), 83-105. Retrieved 5 de Noviembre de 2022, from <https://www.scielo.org.mx/pdf/ib/v27n61/v27n61a5.pdf>
- Bolaños Mejía, K. B., González Tórrer, O., y Rivera, M. C. (2021). *Estado del arte de los trabajos de grado realizados en la carrera de licenciatura en Ciencias de la Educación con mención en Ciencias Naturales*. Facultad Regional Multidisciplinaria, FAREM-Estelí, Ciencias de la Educación y Humanidades, Estelí. <https://repositorio.unan.edu.ni/18862/>
- Camargo-Bravo, A., y García-Cueto, R. (2012). Evaluación de dos Modelos de Reducción de Escala en la Generación de Escenarios de Cambio Climático en el Valle de Mexicali en México. *Información Tecnológica*, 11-20. Retrieved 03 de Marzo de 2023, from <https://www.scielo.cl/pdf/infotec/v23n3/art03.pdf>
- Duarte, F., Corzo, G., Santos, G., y Hernández, O. (2018). Evaluación Hidrológica de la Técnica de Reducción de Escala CSD (Chaotic Statistical Downscaling) en la Cuenca del Río Bogotá. *XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología*, 1-2. Retrieved 16 de Marzo de 2023, from [https://www.researchgate.net/profile/Santiago-Duarte-6/publication/346789117\\_EVALUACION\\_HIDROLOGICA\\_DE\\_LA\\_TECNICA\\_DE\\_REDUCION\\_DE\\_ESCALA\\_CSD\\_CHAOTIC\\_STATISTICAL\\_DOWNSCALING\\_EN\\_LA\\_CUENCA\\_DEL\\_RIO\\_BOGOTA/links/5fd0c98e299bf188d4048a82/EVALUACION-HIDROLOGICA-](https://www.researchgate.net/profile/Santiago-Duarte-6/publication/346789117_EVALUACION_HIDROLOGICA_DE_LA_TECNICA_DE_REDUCION_DE_ESCALA_CSD_CHAOTIC_STATISTICAL_DOWNSCALING_EN_LA_CUENCA_DEL_RIO_BOGOTA/links/5fd0c98e299bf188d4048a82/EVALUACION-HIDROLOGICA-)
- Ferrando, I. (2019). Avances en las investigaciones en España sobre el uso de la modelización en la enseñanza y aprendizaje de las matemáticas. *Investigación en Educación Matemática*, 43-64. Retrieved 16 de Marzo de 2023, from <http://funes.uniandes.edu.co/14462/1/Ferrando2019Avances.pdf>
- García Herrera, G., Esquivel Arriaga, G., Zárate Valdez, J. L., Trejo Calzada, R., Sánchez Cohen, I., y Esquivel Arriaga, O. (2010). Escenarios a Futuro de Temperatura y Precipitación Pluvial Bajo el Efecto de un Cambio Climático en la Región Agrícola de los Llanos, Durango, México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 107-120. Retrieved 16 de Marzo de 2023, from <https://www.redalyc.org/pdf/4555/455545063003.pdf>
- Gómez Vargas, M., Galeano Higueta, C., y Jaramillo Muñoz, D. A. (2015). EL ESTADO DEL ARTE: UNA METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN. *Revista Colombiana de Ciencias Sociales*, 423-442. <https://www.redalyc.org/pdf/4978/497856275012.pdf>
- Gualán, R., Sánchez, E., Campozano, L., Samaniego, E., y Vazquez, Á. (2014). Simplificación del proceso complejo de reducción de escala de los modelos climáticos globales por medio de la aplicación web SDW. *MASKANA*, 5(2), 97-105. Retrieved 15 de Marzo de 2023, from <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/maskana/article/download/441/380/1417>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., y Baptista Lucio, M. d. (2014). *Metodología de la investigación*. México.D.F: McGraw-Hill Interamericana.
- Herrera Castrillo, C. J. (2022). Metodologías para el aprendizaje por competencias de Ecuaciones Diferenciales aplicadas en Física al utilizar tecnología en la carrera Física Matemática. *Revista Torreón Universitario*, 11(32), 35-45. <https://doi.org/https://doi.org/10.5377/rtu.v11i32.15065>
- Herrera Castrillo, C. J. (2023). Interdisciplinarietà a través de la Investigación en Matemática y Física. *Revista Chilena de Educación Matemática*, 15(1), 31-45. <https://doi.org/https://doi.org/10.46219/rechiem.v15i1.126>
- Le Treut, H., y Nuñez, M. (2017). *MODELOS CLIMÁTICOS: PASADO, PRESENTE Y FUTURO*. Universidad de Buenos-Aires. Retrieved 02 de Marzo de 2023, from [http://www-atmo.at.fcen.uba.ar/programas/Curso\\_modelos\\_inv\\_2017.pdf](http://www-atmo.at.fcen.uba.ar/programas/Curso_modelos_inv_2017.pdf)
- Molina Montoya, N. P. (2005). Herramientas para Investigar ¿Qué es un Estado del Arte? *Revista Ciencia y Tecnología para la salud Visual y Ocular*(5), 73-75. Retrieved 16 de Octubre de 2022, from <file:///C:/Users/PC/Downloads/Dialnet-QueEsElEstadoDelArte-5599263.pdf>
- Orellana Salas, J. A., y Lalvay Portilla, T. D. (2018). Uso e importancia de los recursos naturales y su incidencia en el desarrollo turístico. Caso Cantón Chilla, El Oro, Ecuador. *Revista Interamericana de Ambiente y Turismo*, 14(1), 65-79. <https://www.scielo.cl/pdf/riat/v14n1/0718-235X-riat-14-01-00065.pdf>

- Ribalaygua, J., Torres, J., Pórtoles, L., y Gaitán, E. (2010). VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE DOWNSCALING ESTADÍSTICO PARA NICARAGUA. *Fundación para la Investigación del Clima*. Retrieved Diciembre de 2022, from [http://www.conama10.conama.org/conama10/download/files/CT%202010/Paneles/40886\\_panel.pdf](http://www.conama10.conama.org/conama10/download/files/CT%202010/Paneles/40886_panel.pdf)
- Slingo, J. (2017). *La evolución de la ciencia del clima La visión personal de Julia Slingo*. Organización Meteorológica Mundial : <https://public.wmo.int/es/resources/bulletin/la-evoluci%C3%B3n-de-la-ciencia-del-clima-la-visi%C3%B3n-personal-de-julia-slingo>
- Urbina, A., y Morel, M. (2017). El estado del arte / estado de la técnica y la Investigación Científica y Tecnológica. *Revista Portal de la Ciencia*, 1(13), 3-7. Retrieved 11 de Octubre de 2022, from <https://lamjol.info/index.php/PC/article/view/5916/5744#:~:text=El%20Estado%20del%20Arte%2FEstado%20de%20la%20t%C3%A9cnica%2C%20hace%20referencia,avanzado%20el%20mismo%2C%20cual%20es>

## GLOSARIO

Glosario de términos técnicos o especializados:

Siglas	Significado	Siglas	Significado
MCG, o GCM	Modelos de circulación global	MCR, o RCM	Modelos Climáticos Regionales
SDSM	Statistical Downscaling Model Modelo estadístico de reducción de escala	MARENA	Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales
MACGA	Los modelos MACG acoplados	km	Kilometro
LARS-WG	Generador Estocástico de Tiempo Meteorológico	MCG	Predictores
CIGEFI-UCR	Centro de Investigaciones Geofisicas de la Universidad de Costa Rica	ENOS	El Niño-Oscilación del Sur
FIC	Fundación para la Investigación del Clima	ECT	Módulo de extracción, carga y transformación,
MPI-ESM-MR	Serie climáticas obtenidas con un escenario RCP del Instituto meteorológico Max Planck Institute	CSD	Chaotic Statistical Downscaling
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales	RCP	Representative Concentration Pathway