

Propuesta técnico-metodológica para el monitoreo y seguimiento de la línea estratégica de seguridad hídrica de la Política Pública de Cambio Climático de Cundinamarca, Colombia

Technical-methodological proposal for monitoring and following up on the strategic line of water security of the Public Policy on Climate Change of Cundinamarca, Colombia

Nidia Clemencia Riaño Rincón

Master oficial Estrategias Territoriales y Ambientales en el Ámbito Local.

Maestría en Gestión Sostenible del Agua.

nidia.villa92@gmail.com | <https://orcid.org/0009-0002-5855-6290>

Citación: Riaño Rincón, N. C. (2025). Propuesta técnico-metodológica para el monitoreo y seguimiento de la línea estratégica de seguridad hídrica de la Política Pública de Cambio Climático de Cundinamarca, Colombia. *Mutis*, 15(1). 1- 19. <https://doi.org/10.21789/22561498.2156>

Recibido: 9 de diciembre de 2024

Aceptado: 9 de enero de 2025

Copyright: © 2025 por los autores. Licenciado para *Mutis*. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

RESUMEN

El presente artículo presenta los resultados originales de la tesis doctoral *Cambio Climático en Cundinamarca – Colombia: Estrategias de Seguridad Hídrica en el marco de la Política Pública de Gestión Integral de Cambio Climático*, la cual revisa cómo la propuesta técnico-metodológica basada en la teoría multicriterio (MCDM) y multiobjetivo (MODM) determina el comportamiento de la oferta del recurso hídrico en el Departamento. El principal aporte es la formulación del Macroíndice de Seguridad Hídrica para Cundinamarca (MISHC), el cual determinó que, de los 116 municipios que integran el territorio, 14 presentan riesgo alto, 96 riesgo medio y 6 riesgo bajo, en términos de seguridad hídrica.

Palabras clave: Teoría Multicriterio (MCDM); Teoría Multiobjetivo (MODM); seguridad hídrica; Política pública; Cundinamarca; ciencias naturales.

ABSTRACT

This article presents the original results of the doctoral thesis *Cambio Climático en Cundinamarca – Colombia: Estrategias de Seguridad Hídrica en el marco de la Política Pública de Gestión Integral de Cambio Climático*, which reviews how the technical-methodological proposal based on the multi-criteria theory (MCDM) and multi-objective theory (MODM) determines the behavior of the water resource supply in the Department. The main contribution is the formulation of the Macro Index of Water Security for Cundinamarca (MISHC), which determined that, of the 116 municipalities that make up the territory, 14 present high risk, 96 medium risk and 6 low risk, in terms of water security.

Keywords: Multi-Criteria Theory (MCDM); Multi-objective Theory (MODM); water security; Public Policy; Cundinamarca; Natural Sciences.

INTRODUCCIÓN

En la era de la información, el manejo y análisis de grandes volúmenes de datos se ha vuelto crucial para mejorar la precisión y calidad de las decisiones. En la gestión de recursos hídricos, la capacidad de recopilar, procesar y analizar esta información detallada es esencial, ya que permite integrar información cuantitativa y cualitativa, por lo que las metodologías multicriterio y multiobjetivo apoyadas por el manejo de datos son especialmente relevantes en este contexto complejo de análisis para el corto, mediano y largo plazo.

En ese sentido, partiendo del enfoque integral de la Política Pública de Gestión Integral de Cambio Climático de Cundinamarca y su gestión, y coincidente a la necesidad de revisar su seguimiento y monitoreo de forma general e integral, a continuación, se realiza una propuesta técnico-metodológica para el monitoreo y seguimiento de la línea estratégica de seguridad hídrica. Esta se basa en la implementación de la teoría multicriterio (MCDM) y multiobjetivo (MODM) enfocada a la gestión del recurso hídrico con énfasis en determinar el comportamiento de la oferta desde un marco integral de seguridad hídrica para el departamento.

Se parte del hecho de un análisis multinivel a través de la construcción de un macroíndice, el cual se construye con base en índices que a su vez contemplan indicadores con información oficial de las instituciones responsables de la gestión del recurso hídrico en el departamento. El modelo propuesto está diseñado bajo la teoría multicriterio (MCDM), facilitando la toma de decisiones complejas con base a los resultados obtenidos durante la implementación de este, a través de índices basados en múltiples criterios. Para esto, es necesario revisar los factores que tienen una correlación con la seguridad hídrica desde diferentes enfoques tales como el técnico, social ecosistémico y el financiero.

El diseño del modelo parte de la teoría multicriterio (MCDM) desarrollado por Thomas L. Saaty que, a través del método Delphi, logró generar un sistema de priorización y asignación de ponderadores con sustento en el criterio de expertos. Esta herramienta descompone problemas complejos en una jerarquía de objetivos, criterios y subcriterios (Zunzunegui, 2017), facilitando así la evaluación sistemática de cada componente y su contribución al objetivo global que es el aumento de la oferta hídrica en el departamento en escenarios de cambio y variabilidad climática, por lo que se deben seguir los siguientes pasos metodológicos:

- Identificación del problema central relacionado con la vulnerabilidad del territorio al acceso al agua.
- Construcción de la jerarquía.
- Comparación de pares.
- Cálculo de los pesos relativos y la consistencia.
- Síntesis de resultados seguida de un análisis de sensibilidad, descomponiendo provariables y subvariables.

Lo anterior permite realizar un análisis de sensibilidad el cual ayuda a evaluar la robustez de las decisiones bajo diferentes escenarios, mejorando así la calidad y fiabilidad de las decisiones en pro de consolidar las estrategias de seguridad hídrica en el departamento.

La gestión de recursos hídricos involucra una amplia gama de factores interrelacionados. La creciente demanda de agua potable, junto con la necesidad de conservar los ecosistemas y adaptarse al cambio climático, hace que la toma de decisiones en este ámbito sea particularmente desafiante. En este escenario, las herramientas de MCDM y MODM proporcionan un marco estructurado y robusto para evaluar y priorizar diversas alternativas y estrategias dependiendo de los factores que se presenten en la gestión del recurso hídrico (Luque, 2019).

La MCDM parte de una integración objetiva de metodologías y técnicas para evaluar, priorizar y seleccionar entre diferentes alternativas en función de múltiples criterios, permitiendo integrar criterios cualitativos y cuantitativos, que ofrecen un enfoque estructurado para tomar decisiones complejas¹ (Zunzunegui, 2017).

La teoría multiobjetivo, por su parte, está enfocada en problemas donde el eje central es optimizar simultáneamente varios objetivos conflictivos que permite encontrar un conjunto de soluciones óptimas, llamadas soluciones de Pareto, donde la mejora en un objetivo implica un detrimento en al menos otro objetivo (López, 2015).

Es por lo anterior que la gestión de recursos hídricos involucra una amplia gama de factores interrelacionados, escenario en el cual los modelos de MCDM y MODM proporcionan un marco de evaluación y priorización de estrategias para la gestión del agua, se identifican siete factores que son la base para la formulación del macroíndice de seguridad hídrica: crecimiento demográfico y demanda del agua, impacto del cambio climático, degradación de los ecosistemas acuáticos, conflictos por el agua, regulación y políticas públicas, innovación tecnológica y sostenibilidad, participación comunitaria y gobernanza.

Además, la gestión de recursos hídricos involucra una amplia gama de factores interrelacionados. La creciente demanda de agua potable, junto con la necesidad de conservar los ecosistemas y adaptarse al cambio climático, hace que la toma de decisiones en este ámbito sea particularmente desafiante. En este escenario, las herramientas de MCDM y MODM proporcionan un marco estructurado y robusto para evaluar y priorizar diversas alternativas y estrategias dependiendo de los factores que se presenten en la gestión del recurso hídrico (Luque, 2019):

- El primer factor es el crecimiento demográfico y demanda de agua, ya que esto ha acelerado significativamente la demanda de agua dulce para consumo humano, agricultura, industria y saneamiento, por la expansión de las ciudades y poblaciones rurales. Esto ha generado una insuficiencia

¹ El proceso que sustenta la teoría multicriterio se basa de tres niveles (Nantes, 2019):

- a. Estructurar los problemas en jerarquía de objetivos, criterios y subcriterios, utilizando comparaciones por pares con el fin de asignar pesos a criterios y ponderar las alternativas y, al tiempo, resulta un proceso simple que logra integrar visiones cualitativas.
- b. Ponderar y realizar la suma ponderada permitirá asignar pesos a los criterios seleccionados a través de su importancia relativa, y se calcula una puntuación global para las alternativas a través de la ponderación de estos criterios.
- c. Finalmente, el paso de entropía, el cual está basado en la teoría de la información y resulta útil cuando se tiene datos cuantitativos y se necesita minimizar la subjetividad en la asignación de pesos.

para satisfacer la demanda existente, causando escasez de agua y conflictos entre usuarios.

- Segundo: el impacto del cambio climático, el cual afecta los patrones de precipitación y la disponibilidad de agua en todo el mundo generado por eventos climáticos extremos, impactando tanto la cantidad como la calidad de agua disponible.
- Tercero: la degradación de los ecosistemas acuáticos, la cual es generada por la sobreexplotación de recursos hídricos y la contaminación, causando pérdida de biodiversidad y la degradación de los servicios ecosistémicos que afectan no solo al medio ambiente, sino también a las comunidades humanas que dependen de estos recursos para su sustento y bienestar.
- Cuarto: conflictos por el agua, ya que la competencia por los recursos hídricos está aumentando, tanto a nivel local como internacional, sumado a la escasez de agua, lleva a un conflicto entre usuarios, incluyendo agricultores, industrias, comunidades urbanas y rurales, y entre países que comparten cuencas hidrográficas.
- Quinto: regulación y políticas públicas, ya que la gestión del recurso hídrico está definida por un marco regulatorio y políticas públicas que logran equilibrar los objetivos incluyendo la sostenibilidad ambiental, la eficiencia económica y la equidad social, según el contexto diferencial de cada país.
- Sexto: innovación tecnológica y sostenibilidad, la cual juega un papel fundamental en la mejora de esta gestión a través de tecnologías avanzadas, sistemas de monitoreo, gestión de datos, entre otros.
- Séptimo: la participación comunitaria y gobernanza, ya que es fundamental para una gestión efectiva y equitativa del recurso hídrico, la cual sea inclusiva y que permita que las voces de todos los usuarios y sectores sean escuchadas y consideradas en el proceso de toma de decisiones.
- Octavo: evaluación integral y planificación a largo plazo, donde se adopta una visión integral y de largo plazo que considere las interrelaciones entre los diversos factores que afectan el agua, lo que incluye la planificación y evaluación de políticas, proyectos e inversiones.
-

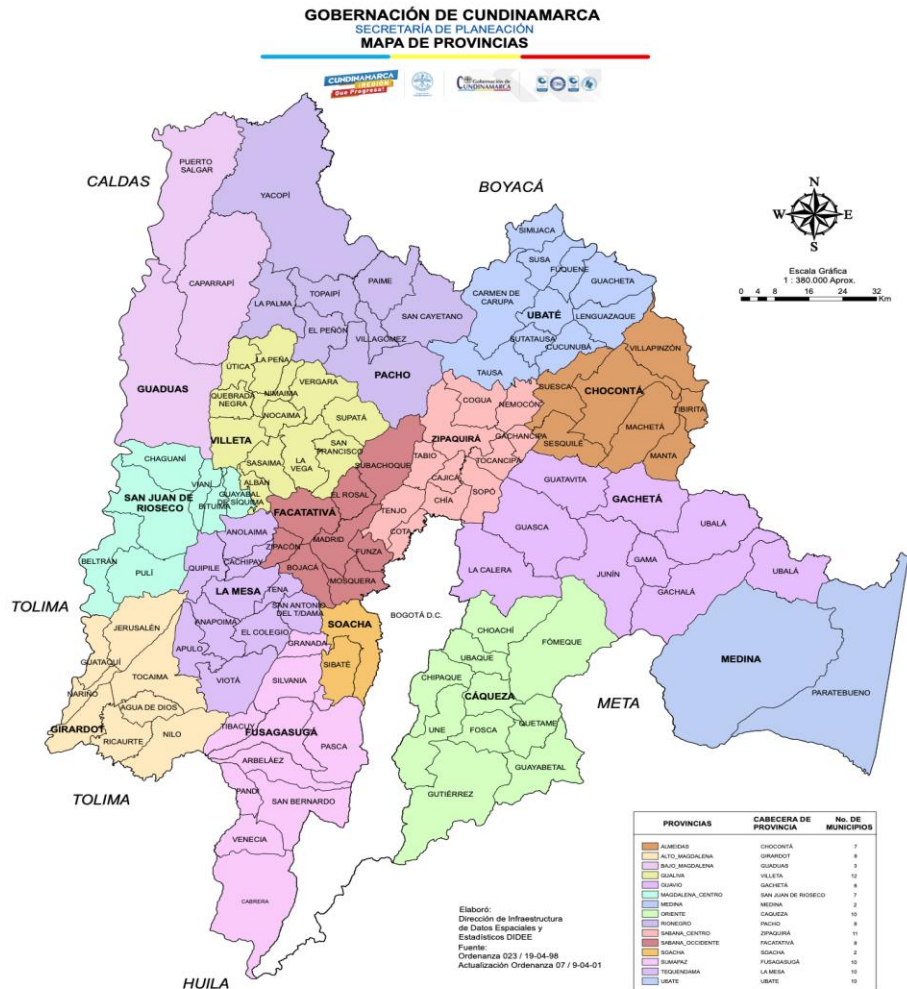
Estos factores resultan la base para la construcción del macroíndice de seguridad hídrica para el departamento de Cundinamarca con base en los lineamientos de la política de cambio climático del departamento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El análisis de la propuesta técnico-metodológica se realizó en los 116 municipios del departamento de Cundinamarca.

Figura 1. Mapa de provincias y municipios del departamento de Cundinamarca.



Fuente: Gobernación de Cundinamarca (2021).

MÉTODOS

Metodología para la aplicación de la teoría multicriterio (MCDM) en la gestión del recurso hídrico

La teoría multicriterio (MCDM) ayuda a los tomadores de decisiones a evaluar y priorizar las alternativas a considerar en situaciones que implican decisiones complejas, a través de su descomposición y organización de una jerarquía de subproblemas más simples. Facilita la evaluación sistemática de cada elemento combinando análisis cualitativo y cuantitativo con el fin de fomentar a la resolución del objetivo general (Vaidya & Kumar, 2006).

En el contexto de la gestión del recurso hídrico resulta fundamental la aplicación de la MCDM, teniendo en cuenta la necesidad de equilibrar múltiples

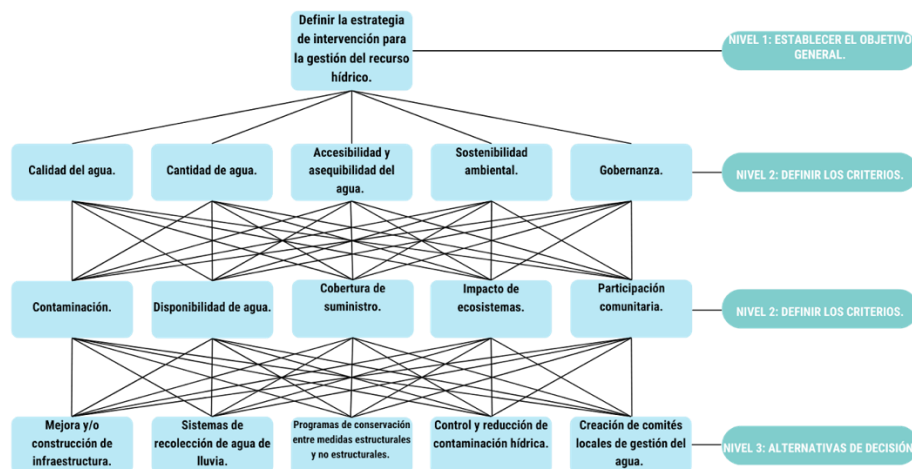
objetivos y criterios, pues desafíos como los que se presentan en el presente macroíndice requieren de herramientas robustas y flexibles que integren diversas perspectivas y datos, proporcionando una base racional y transparente para la toma de decisiones.

Para la aplicación de la MCDM en la gestión del recurso hídrico se debe tener en cuenta las variables presentadas anteriormente y aplicar la siguiente metodología:

- **Definición del problema y construcción de la jerarquía**

Con base en la línea estratégica de seguridad hídrica de la Política Pública de Gestión Integral del Cambio Climático de Cundinamarca y en el esfuerzo de aumentar la oferta como objetivo de la decisión, se realiza la jerarquía estructurada en criterios y subcriterios. Este proceso implica la identificación que se evidencia en la figura 2:

Figura 2. Estructura Jerárquica de la teoría Multicriterio (MCDM).



Fuente: elaboración propia (2024).

- **Comparación de pares**

Posterior a la definición del problema y la construcción de la jerarquía, la MCDM sugiere realizar las matrices de comparación por pares, paso esencial que permite a expertos calificados, comparar uno a uno los criterios y alternativas escogidas en el paso anterior. Esta metodología promueve la ponderación en temáticas que no tienen una escala de medida y, por tanto, se asigna un valor numérico con el fin de determinar las prioridades de los elementos evaluados (Nantes, 2019).

En este proceso se acudió a expertos referentes en gestión del recurso hídrico y cambio climático pertenecientes a entidades estatales, organizaciones internacionales y academia, quienes efectuaron el proceso jerárquico, el cual consta

de tres niveles: establecer el objetivo general, definir los criterios y generar las alternativas de decisión.

- **Cálculo de pesos relativos**

Para la construcción del modelo se partió de la definición de los índices e indicadores y, posteriormente, se generaron unos pesos relativos basados en valores numéricos que representan la importancia de cada criterio o alternativa en relación con otros en el contexto de la toma de decisiones. En la MCDM estos pesos se derivan de las comparaciones por pares y se utilizan para evaluar y priorizar las alternativas o criterios en función de su importancia relativa, originando valores reales (Nantes, 2019). Para su formulación se establecieron los siguientes pasos:

I. Construcción de la matriz de comparaciones por pares

Para la construcción de la matriz cuadrada $n \times n$, se partió del principio que n es el número de criterios o alternativas. Cada elemento de la matriz a_{ij} representa la comparación de la importancia del criterio i respecto al criterio j .

II. Realización de comparaciones

Utilizando una escala de 1 a 9, se asignan valores a cada celda de la matriz para reflejar la importancia relativa de cada par de criterios. Las comparaciones son recíprocas: si $a_{ij} = x$, entonces $a_{ji} = 1/x$.

III. Normalización de la matriz:

- Se suman los valores de cada columna de la matriz.
- Cada elemento de la matriz se divide por la suma de su respectiva columna, convirtiendo los valores en fracciones del total de cada columna.

IV. Cálculo del vector de prioridades:

Se promedia cada fila de la matriz normalizada para obtener el vector de prioridades, que representa los pesos relativos de los criterios.

Componentes y estandarización del Modelo Macro Índice de Seguridad Hídrica para Cundinamarca – MISHC

Para el análisis integral de la gestión e impacto de las acciones que genera la implementación efectiva de la Política Pública de Gestión Integral de Cambio Climático de Cundinamarca en especial del componente de Seguridad Hídrica, se ha diseñado una macroíndice que integra una evaluación multidinámica de aspectos correlacionados con la seguridad hídrica en el departamento de Cundinamarca, como soporte al proceso de seguimiento de la política de cambio climático estructurada.

Para la calificación numérica que se genera en la estandarización de los índices, se realizó un ejercicio de integración de metodologías partiendo del principio de normalización con el objetivo de vincular los resultados numéricos arrojados por la implementación del índice, para luego parametrizarlos en rangos definiendo la escala del índice de seguridad hídrica del departamento de Cundinamarca por municipio.

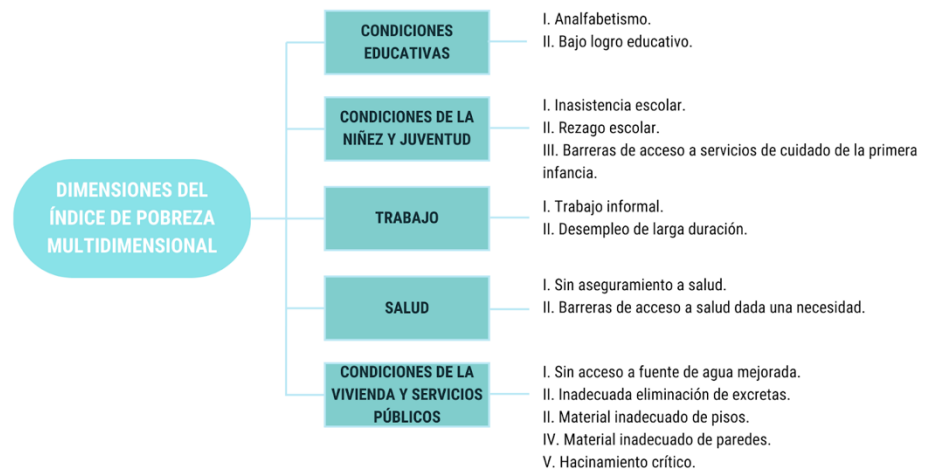
Aunado a lo anterior, se adoptó el principio de la metodología de valoración Likert, en donde a través de una escala de calificación se realiza una asignación numérica ordinal, la cual fue implementada en el proceso de consulta de expertos Delphi para finalmente incorporar el resultado en la interpretación del macroíndice.

Las variables seleccionadas para componer el modelo están integradas por los siguientes índices:

a. Índice de Pobreza Multidimensional (IPM)

Obtenido del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DNP) y construido con base en la Encuesta Nacional de Calidad de Vida (ECV) del 2022. Este índice cuenta con 5 dimensiones y 15 indicadores como se indica en la figura 3. Su cálculo es anual y su escala es municipal.

Figura 3. Dimensiones de la variable basada en el Índice de Pobreza Multidimensional (IPM).



Fuente: elaboración propia.

Con el fin de estandarizar este indicador, la medición se operacionalizó como se muestra en la tabla 1:

Tabla 1. Estandarización de la variable basada en el Índice de Pobreza Multidimensional (IPM) para el MISHC.

Medición del índice	Rango de clasificación en el modelo	Calificación numérica en el modelo
30 % – 2 %	Muy bajo	5
30,1 % – 40 %	Bajo	4
40,1 % – 50 %	Medio	3
50,1 % – 70 %	Alto	2
70,1 % – 99 %	Muy alto	1

Fuente: elaboración propia.

b. Índice de Riesgo de Cambio Climático (IRCC)

Obtenido de la Tercera Comunicación Nacional de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático elaborada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) del año 2017.

Este índice cuenta con cinco 5 y 6 dimensiones para la clasificación de cambio climático en Cundinamarca, como se muestra en la figura 4. Su escala es municipal:

Figura 4. Dimensiones de la variable basada en el Índice de Riesgo de Cambio Climático (IRCC).



Fuente: elaboración propia.

En la tabla 2 se evidencia la operacionalización que se realizó para la estandarización:

Tabla 2. Estandarización de la variable basada en el Índice de Riesgo Climático (IRC) para el MISHC.

Medición del índice	Rango de clasificación en el modelo	Calificación numérica en el modelo
1	Muy bajo	5
0,426845	Bajo	4
0,2064	Medio	3
0,180147	Alto	2
0,160494	Muy alto	1

Fuente: elaboración propia.

c. Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano en el Departamento (IRCA)

Obtenido del Boletín de Vigilancia de la Calidad del Agua para el Consumo Humano elaborado por el Instituto Nacional de Salud y el Ministerio de Salud y Protección Social del año 2022. Se construye a través de 18 parámetros de manera anual y en escala municipal, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Características físicas, químicas y microbiológicas de la variable basada en el Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano (IRCA).

Característica física, química y microbiológica del Índice de Riesgo de la Calidad del agua para el consumo humano en el Departamento		
Color aparente	Molibdeno	Cloruros
Turbiedad	Manganeso	Nitratos
pH	Molibdeno	Nitritos
Cloro Residual Libre	Magnesio	Aluminio (Al ³⁺)
Alcalinidad Total	Zinc	Fluoruros
Calcio	Dureza Total	COT
Fosfatos	Sulfatos	Coliformes Totales
Manganeso	Hierro Total	Escherichia Coli

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 4 se evidencia la operacionalización que se realizó para la estandarización:

Tabla 4. Estandarización de la variable basada en el Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano en el Departamento (IRCA) para el MISHC.

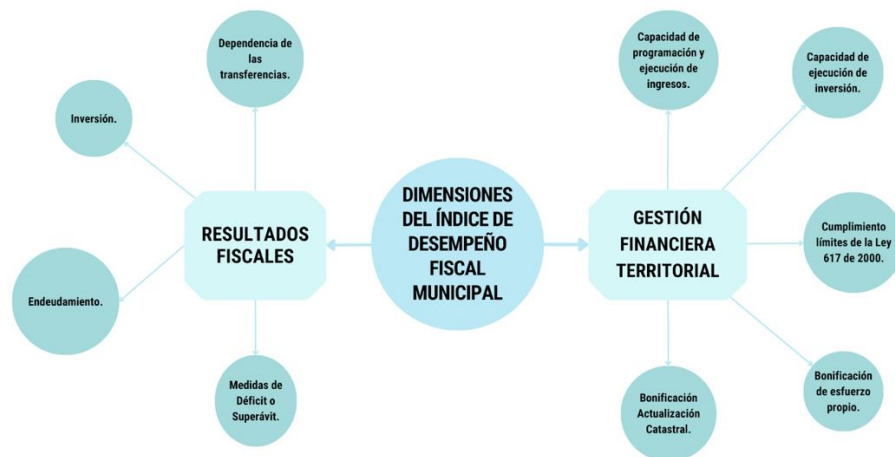
Medición del índice	Rango de clasificación en el modelo	Calificación numérica en el modelo
80.1 % – 100 %	Inviabile	5
35.1 % – 80 %	Alto	4
14,1 % – 35 %	Medio	3
5,1 % – 14 %	Bajo	2
0 % – 5 %	Sin riesgo	1

Fuente: elaboración propia.

d. Índice de Desempeño Fiscal Municipal - Inversión en Agua (IDFM)

Obtenido del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DNP) del año 2022. Este índice mide la sostenibilidad financiera de los municipios. Este índice cuenta con 2 dimensiones y 9 indicadores, como se muestra en la figura 3:

Figura 3. Dimensiones e indicadores de la variable basada en el Índice de Desempeño Fiscal Municipal – Inversión en Agua (IDFM).



Fuente: elaboración propia.

En la tabla 5 se evidencia la operacionalización que se realizó para la estandarización:

Tabla 5. Estandarización de la variable basada en el Índice de Desempeño Fiscal Municipal - Inversión en Agua (IDFM) para el MISHC.

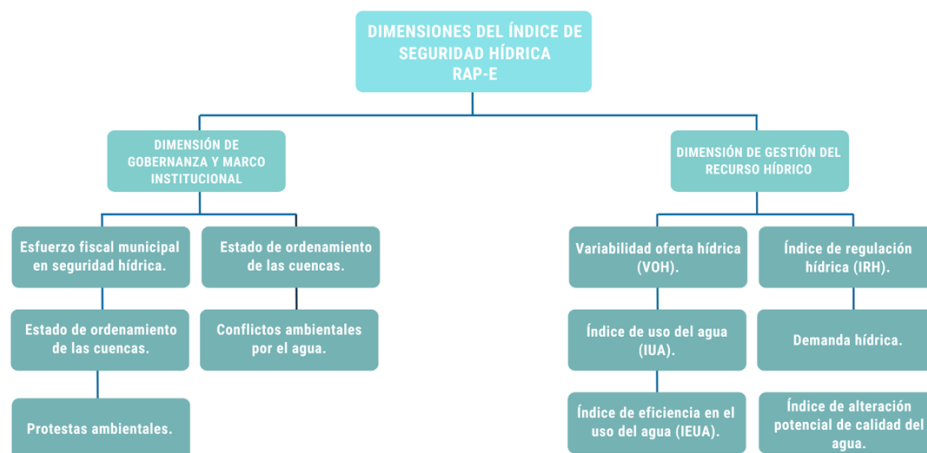
Medición del índice	Rango de clasificación en el modelo	Calificación numérica en el modelo
(≥ 80)	Solvente	1
(≥ 70 y <80)	Sostenible	2
(≤ 60 y <70)	Vulnerable	3
(≤ 40 y <60)	Deficiente	4
(≤ 40)	Deterioro	5

Fuente: elaboración propia.

e. Índice de Seguridad Hídrica de Cundinamarca (ISH)

Obtenido del Plan de Seguridad Hídrica - Región Central. Marco estratégico y programático, elaborado por la Región Administrativa y de Planeación Especial RAP-E y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) del año 2022. Este índice mide el estado de las cuencas que proveen agua para personas de Bogotá, Cundinamarca, Boyacá, Huila, Meta y Tolima. Cuenta con 2 dimensiones como se muestra en la figura 4:

Figura 4. Dimensiones de la variable basada en el Índice de Seguridad Hídrica (ISH).



Fuente: elaboración propia.

Con el fin de estandarizar este índice, se operacionalizó de la siguiente manera su medición como se muestra en la tabla 6:

Tabla 6. Estandarización de la variable basada en el Índice de Seguridad Hídrica de Cundinamarca (ISH), para el MISHC.

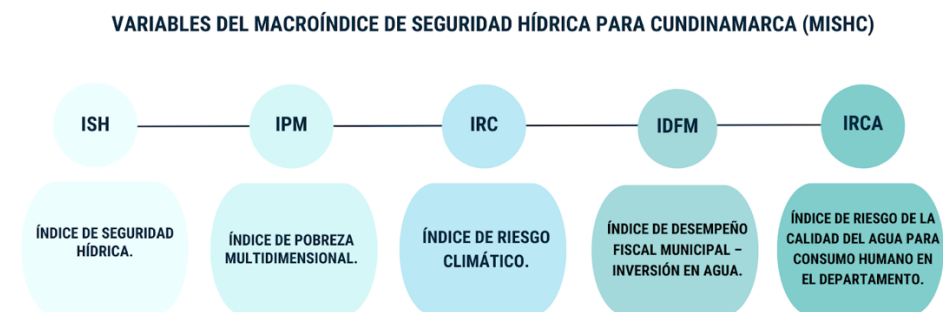
Medición del índice	Rango de clasificación en el modelo	Calificación numérica en el modelo
15.17 a -7.25	Muy bajo	5
-6.80 a -2.51	Bajo	4
-2.00 a 1.27	Medio	3
1.97 a 5.61	Alto	2
6.02 a 14.10	Muy alto	1

Fuente: elaboración propia.

f. Macroíndice de Seguridad Hídrica para Cundinamarca (MISHC)

Se constituye a partir de la estandarización de: I. Índice de Seguridad Hídrica (ISH); II. Índice de Pobreza Multidimensional (IPM); III. Índice de Riesgo Climático (IRC); IV. Índice de Desempeño Fiscal Municipal - Inversión en Agua (IDFM); V. Índice de Riesgo de la calidad del agua para consumo humano en el departamento (IRCA).

Figura 5. Variables del Macroíndice de Seguridad Hídrica para Cundinamarca (MISHC).



Fuente: elaboración propia.

Para realizar la estandarización del índice, se operacionalizó de la siguiente manera su medición como se muestra en la tabla 7:

Tabla 7. Estandarización del Modelo Macro Índice de Seguridad Hídrica para Cundinamarca (MISHC).

Medición del índice	Rango de clasificación en el modelo	Calificación numérica en el modelo
0 - 1	Muy bajo	5
1.1 - 2	Bajo	4
2.1 - 3	Medio	3
3.1 - 4	Alto	2
4.1 - 5	Muy alto	1

Fuente: elaboración propia.

Cálculo de la consistencia

Evaluar la consistencia de los juicios mediante el cálculo del índice de consistencia (CI) y la razón de consistencia (CR). Un CR inferior a 0.1 indica que los juicios son aceptablemente consistentes; de lo contrario, se deben revisar y ajustar las comparaciones.

Operacionalización del modelo

Para la operacionalización del modelo se realizó la agregación de los pesos relativos que se asignaron en el proceso de formulación de la jerarquía con el objetivo de obtener los puntajes globales de las alternativas con base en el análisis y criterios de expertos. Como se muestra a continuación, la operacionalización se realizó multiplicando los pesos de los criterios por las evaluaciones de las alternativas, sumando los resultados para determinar la mejor opción; es decir, los resultados se centraron en la paradoja de la tendencia media estadística, por lo cual se les dio un peso relacionado a la media para cada uno de los índices, la cual fue del 20 % de peso relativo para la construcción del marco índice de seguridad hídrica para el Departamento.

$$\text{Modelo: } \text{MISH} = \beta_0(\text{ISH}) + \beta_1(\text{IPM}) + \beta_2(\text{IRC}) + \beta_3(\text{IDF}) + \beta_4(\text{IRCA})$$

POBLACIÓN DE ESTUDIO

El presente estudio se llevó a cabo en el departamento de Cundinamarca, Colombia, con una población de estudio que abarcó la totalidad de sus 116 municipios. La selección de esta población se fundamentó en dos razones principales:

1. Cobertura de la Política Pública de Gestión Integral de Cambio Climático (PPGICC)

Cundinamarca es el área de implementación de la PPGICC, por lo que la inclusión de todos sus municipios permite un análisis exhaustivo y representativo de la efectividad y alcance de dicha política a nivel departamental.

2. Diversidad municipal:

La inclusión de todos los municipios de Cundinamarca garantiza una amplia diversidad en términos de tamaño, población, nivel de desarrollo económico y social, así como en la vulnerabilidad frente al cambio climático, particularmente en lo que respecta al impacto en el recurso hídrico.

La selección de la población fue de tipo intencional y no probabilística, dado que se buscó incluir la totalidad de los municipios de Cundinamarca con el fin de evaluar el impacto de la PPGICC en un contexto departamental específico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación de la teoría multicriterio (MCDM) en la gestión del recurso hídrico planteada para tomar decisiones informadas debe tener varias consideraciones que necesitan ser abordadas para asegurar su efectividad y precisión (Moral, 2016). A continuación, se detallan algunas de los principales desafíos y consideraciones en la aplicación de la teoría multicriterio en la construcción del Macroíndice de Seguridad Hídrica.

Primero: la información de los índices y subíndices es tomada de información oficial de entidades públicas relacionadas con el tema. Segundo: la periodicidad para el análisis será mínimo anual. Tercero: la línea base es tomada con relación al año 2021, que es la información más reciente de las instituciones a excepción del Índice de Riesgo por Cambio Climático en Cundinamarca (IRCCC), pues el último estudio publicado es la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático publicado en 2017.

Cuarto: se puede presentar una subvaloración con base en los métodos de obtención de la información por parte de las organizaciones públicas. Quinto: el macroíndice es una información que busca medir el impacto de la gestión en el aumento de la oferta hídrica en el departamento. Sexto: el macroíndice es una herramienta para la toma de decisiones de la política de cambio climático del departamento y deberá ser gestionado por la Secretaría de Ambiente del Departamento (Moral, 2016).

Esto también tiene una complejidad de la estructura jerárquica, ya que se presenta como desafío la definición de una jerarquía clara y comprensiva que refleje adecuadamente todos los factores relevantes en la gestión del recurso hídrico, debido a que la identificación de criterios y subcriterios apropiados requiere un entendimiento profundo del sistema hídrico y de las interacciones entre los distintos elementos.

Asimismo, se debe tener una subjetividad en las comparaciones realizadas por pares, ya que pueden introducir sesgos y afectar la objetividad del análisis, por lo que es necesario utilizar técnicas como la facilitación de grupos, consensos, análisis de sensibilidad para minimizar estos sesgos individuales y evaluar cómo las variaciones en las comparaciones afectan los resultados finales, aplicando la ISO 31010 con relación al método Delphi.

Se presenta también el desafío de la consistencia en las comparaciones, donde se puede presentar un nivel de complejidad cuando se manejan muchos criterios y subcriterios, lo que puede afectar la fiabilidad de los pesos relativos calculados. Es así como en algunos escenarios se ve necesario monitorear la razón de consistencia (CR), ajustar las comparaciones cuando CR sea mayor que 0.1, y capacitar a los tomadores de decisiones en la metodología de la teoría multicriterio (MCDM) para mejorar la precisión de las comparaciones.

Ahora, también se debe tener en cuenta que la disponibilidad y calidad de datos para la elaboración de la MCDM son limitadas, especialmente en áreas como recursos hídricos en donde no hay acceso a los documentos, por lo que se complementa esto con datos cuantitativos con evaluaciones cualitativas basadas en la experiencia y el conocimiento local. Este desafío se puede enfrentar a través del uso de fuentes de datos diversas y metodologías de validación cruzada para mejorar la robustez de la información utilizada.

Resulta claro que, a medida que aumenta el número de criterios, subcriterios y alternativas, la matriz de comparaciones por pares puede volverse muy grande y difícil de manejar, lo que incrementa la carga computacional y el tiempo requerido para el análisis. Por lo tanto, se intenta simplificar la jerarquía eliminando criterios redundantes o de menor relevancia y/o en algunos casos, el uso de softwares especializados para gestionar grandes matrices de comparación y facilitar los cálculos.

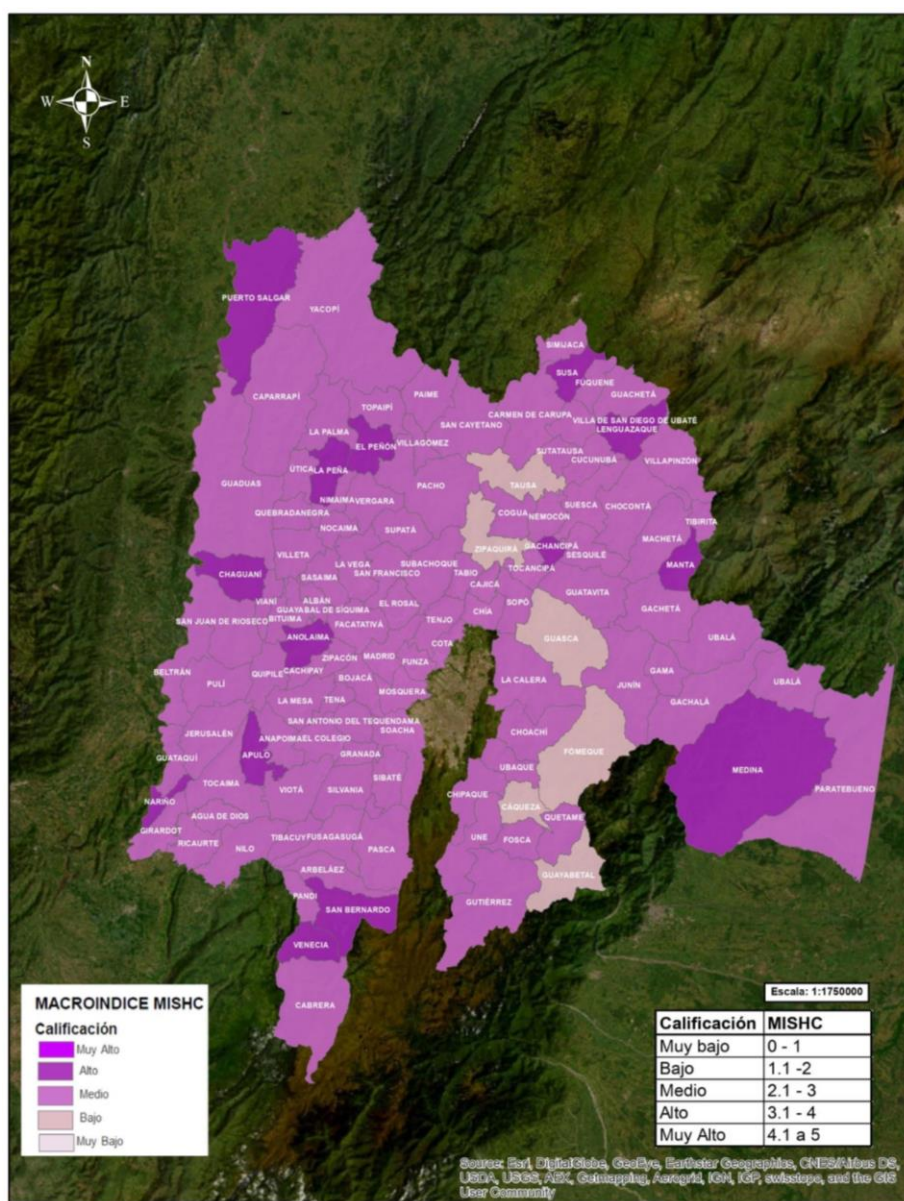
A pesar de un proceso metodológico exhaustivo, los resultados de la MCDM pueden ser complejos y difíciles de comunicar a todas las partes interesadas, especialmente a aquellas sin formación técnica, por lo que es necesario desarrollar visualizaciones claras y comprensibles de los resultados, como gráficos y tablas de resumen, asegurando que los resultados sean presentados de manera que todas las partes interesadas puedan entender las implicaciones y justificaciones de las decisiones tomadas.

Por último, es necesario tener en cuenta que, a pesar de que la teoría Multicriterio (MCDM) cuenta con un gran alcance, en ciertos contextos resulta necesario

la integración con otras metodologías de planificación y gestión para abordar completamente la complejidad de la gestión del recurso hídrico, tales como la Programación Lineal Multiobjetivo (MODM), Análisis de Costos-Beneficios (CBA) y Modelos Hidrológicos.

Ahora bien, teniendo en cuenta la discusión en torno a las consideraciones en torno a la aplicación de la MCDM en la formulación del Macroíndice de Seguridad Hídrica para Cundinamarca (MISHC), se identifica el aporte de la metodología utilizada, a través de la elaboración de la cartografía en la escala municipal del departamento de Cundinamarca, tal como se muestra en la figura 5:

Figura 5. Cartografía del Modelo Macroíndice de Seguridad Hídrica para Cundinamarca (MISHC).



Los resultados del presente MISHC promovieron la elaboración de la cartografía de los 116 municipios que conforman el departamento de Cundinamarca, evidenciándose el estado de riesgo de seguridad hídrica a nivel municipal en las categorías de alto, medio y bajo.

De acuerdo con lo anterior se identifica que 14 municipios están en categoría de riesgo alto de seguridad hídrica (Anolaima, Apulo, Chaguaní, El Peñón, Gachancipá, La Peña, Lenguaque, Manta, Medina, Nariño, Ospina Pérez -Venecia, Puerto Salgar, San Bernardo y Susa). Además, 96 municipios están en categoría de riesgo medio, representando el 82.16 % del total de municipios que conforman el departamento de Cundinamarca. Finalmente, 6 municipios están en categoría baja frente al riesgo de seguridad hídrica.

CONCLUSIONES

Los resultados sugieren que el Macroíndice de Seguridad Hídrica para Cundinamarca (MISHC) proporciona una evaluación multidinámica de variables correlacionadas con la seguridad hídrica, facilitando el proceso de la fase de seguimiento de la Política Pública de Gestión Integral de Cambio Climático de Cundinamarca, permitiendo focalizar las intervenciones y estrategias en los 14 municipios con riesgo alto, promover mejoras graduales en los 96 municipios de riesgo medio y resguardar los 6 municipios con riesgo bajo de seguridad hídrica.

Teniendo en cuenta el que MISHC tiene como base la metodología de la teoría Multicriterio (MCDM), este factor permite que tomadores de decisiones a nivel gubernamental tengan la capacidad de descomponer problemas complejos en elementos sencillos, con criterios que puedan evaluarse de forma sistémica, facilitando la toma de decisiones basada en la comparación y priorización de alternativas de solución, fomentando las estrategias más adecuadas en cuanto a la efectividad que puede generar en la solución del problema.

Este modelo facilita que se puedan integrar diferentes perspectivas de expertos en el problema a tratar, asegurando que, a partir de la comparación de pares, las decisiones se conviertan en inclusivas y objetivas a partir de la priorización de los criterios, subcriterios y alternativas de solución, generando legitimidad y un enfoque holístico y equilibrado.

RECOMENDACIONES

Con base a los resultados obtenidos, se brindan las siguientes recomendaciones, las cuales están orientadas a mejorar la toma de decisiones e implementación en la Política Pública de Gestión Integral de Cambio Climático en Cundinamarca.

En primer lugar, se sugiere llevar a cabo estudios más detallados en los municipios identificados con alto riesgo de seguridad hídrica. Estos estudios deberán profundizar en el análisis de las causas específicas de la vulnerabilidad, con el fin de diseñar e implementar estrategias focalizadas que respondan a las necesidades particulares de cada municipio. Es crucial que dichas investigaciones consideren factores como el estado de la infraestructura hídrica, la gobernanza del agua, el grado

de participación comunitaria en la gestión del recurso y las acciones existentes en materia de mitigación y adaptación al cambio climático.

En segundo lugar, se recomienda diseñar y desarrollar un sistema de alerta temprana, específicamente dirigido a la seguridad hídrica, en donde se puede integrar el MISHC junto a otras fuentes de información relevantes para el mismo. La integración de estos datos permitirá anticipar y gestionar los riesgos relacionados con la variabilidad y el cambio climático, tales como sequías, inundaciones, y desabastecimiento, facilitando la toma de decisiones oportunas y la implementación de medidas preventivas que minimicen los impactos en la población y los ecosistemas.

Por último, se recomienda promover la participación activa de las comunidades en la gestión del recurso hídrico y, por consiguiente, en la mitigación y adaptación del cambio climático en Cundinamarca a través del fortalecimiento de programas de educación ambiental que busque la comprensión de la problemática y el desarrollo de capacidades locales. Además, es fundamental impulsar la articulación intersectorial entre la academia, las comunidades, las organizaciones sociales y las autoridades locales, con el fin de facilitar la planificación e implementación de estrategias de adaptación conjuntas que respondan a las necesidades del territorio.

AGRADECIMIENTOS

El presente artículo evidencia los resultados originales de la tesis doctoral de la autora. En este proceso de investigación, agradezco por la guía y el apoyo en el desarrollo académico y profesional a los doctores Edgar Vargas y Juan Antonio Márquez.

REFERENCIAS

Gobernación de Cundinamarca. (2021). Mapa provincias 2020. Mapas y estadísticas de Cundinamarca. <https://mapas.cundinamarca.gov.co/documents/cundinamarca-map::mapa-provincias-2020/about>

López, J. (2015). *Optimización Multi-objetivo. Aplicaciones a problemas del mundo real*. [Tesis doctoral, Universidad de La Plata]. ResearchGate. <https://doi.org/10.35537/10915/45214>

Luque, H. S. (2019). *Revisión del análisis de decisión multicriterio para la gestión de los recursos hídricos* [Tesis de máster, Universidad de Alcalá de Henares].

Moral, M. de la P. (2016). Análisis multicriterio: una herramienta innovadora en la gestión sustentable de los recursos hídricos [Presentación en congreso]. XXXIX Congreso Argentino de Profesores Universitarios de Costos, Tucumán, Argentina.

Nantes, E.A. (2019). El método Analytic Hierarchy Process para la toma de decisiones. Repaso de la metodología y aplicaciones. *Revista De La Escuela De Perfeccionamiento En Investigación Operativa*, 27(46), pp. 54-73. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/epio/article/view/26474/28219>

Riaño Rincón, N. C. (2025). <https://doi.org/10.21789/22561498.2156>

Vaidya, O. & Kumar, S. (2006). Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of Operational Research*, 169 (1), pp. 1-29. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.028>

Zunzunegui Suárez, Á. (2017). *La teoría de decisión multicriterio* [Trabajo de grado]. Universidad de Cantabria. <http://hdl.handle.net/10902/13320>