Análisis de Vulnerabilidad Del Abastecimiento Del Acueducto El Tabor Que Se Surte Del Glaciar Ritacuba Negro Del Parque Nacional Natural El Cocuy

Presentado por:

Adriana Carolina Velandia Reyes

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingenierías y Arquitectura

Programa de Ingeniería Ambiental

Pamplona – Norte de Santander

2024

Análisis de Vulnerabilidad Del Abastecimiento Del Acueducto El Tabor Que Se Surte Del Glaciar Ritacuba Negro Del Parque Nacional Natural El Cocuy.

Presentado por:

Adriana Carolina Velandia Reyes

Director

MSc. Javier Augusto Vera Solano

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingenierías y Arquitectura

Programa de Ingeniería Ambiental

Pamplona – Norte de Santander

2024

Nota de Aceptación

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Firma de director

_____

Firma de jurado

_____

Firma de jurado

Pamplona, Febrero 2024

Dedicatoria

Dedico este trabajo a las personas que han sido mi fuente constante de inspiración y apoyo a lo largo de este viaje académico.

A mis padres, Aired Reyes Leal y Luis Antonio Velandia Rodríguez, cuyos esfuerzos y amor incondicional han sido la claridad que ha iluminado mi camino. Agradezco su sacrificio y por ser mis guías durante mi educación.

A mis hermanas, Jenny Lizeth Téllez Reyes y mi sobrina María Celeste Reyes, quienes han compartido conmigo alegrías y desafíos, y cuyo aliento ha sido mi inspiración constante.

A mis amigos más cercanos, quienes han estado conmigo tanto en momentos felices como en momentos difíciles. Gracias por hacerme reír y celebrar todos mis logros.

A la memoria de Mario Reyes Leal, quien todavía me inspira, a pesar de que ya no esté presente físicamente. Este logro también es en su honor.

Esta investigación es una forma de mostrar mi gratitud a todos aquellos que de alguna forma han dado aportes a mi crecimiento y éxito. Mi perspectiva y mi éxito académico se han moldeado por sus influencias.

Agradecimientos

Quiero expresar mi gratitud a todos aquellos que han contribuido significativamente a la realización de esta tesis, especialmente a:

A mi madre y a mi padre Aired Reyes Leal y Luis Antonio Velandia Rodríguez, por todos sus esfuerzos para brindarme el apoyo a lo largo de estos años.

A mi abuela Rosa Estella Rodríguez, quien ha sido un ejemplo de dedicación y esfuerzo al luchar todos los días para ayudarme en todos los aspectos de mi vida.

A mi tío Mario Reyes Leal quien, aunque no estuvo presente en este proceso, su influencia positiva ha tenido un impacto duradero en mi vida académica y personal.

Quiero expresar mi gratitud a mis demás familiares por su respaldo incondicional durante este viaje académico. Su amor, paciencia y comprensión fueron esenciales para mantenerme motivada y concentrada.

A mi director de trabajo de grado Javier Augusto Vera Solano, por su excelente orientación a lo largo de la investigación. Sus conocimientos y dedicación han sido una fuente de inspiración constante.

A la Universidad de Pamplona por proporcionar el entorno adecuado para llevar a cabo esta etapa académica. .

Tabla De Contenido

Dedicatoria 4

Agradecimientos 5

Resumen 14

1 Planteamiento Del Problema Y Justificación 15

2 Justificación. 16

3 Objetivos 18

3.1 Objetivo General 18

3.2 Objetivos Específicos 18

4 Marco Conceptual 19

Cambio Climático: 19

Variabilidad Climática: 19

Vulnerabilidad ambiental: 20

Conservación de áreas: 20

5 Marco Contextual 21

5.1 Área de Estudio. 21

6 Marco Legal 23

7 Marco Teórico Y Estado Del Arte 25

7.1Marco Teórico 25

7.1.1 Generalidades. 25

7.1.2 Índice de vulnerabilidad hídrica. 27

7.1.3 Curva de duración de caudales. 29

7.1.4 Modelación basada en agentes 29

7.1.5 Entorno Net Logo. 29

7.2 Estado del Arte ..... **¡Error! Marcador no definido.**

8 Metodología. 36

8.1 Fase 1. Recopilación de información 38

8.1.1 Actividad 1. Indagación de estudios previos. 38

8.1.2 Actividad 2. Entrevista a la comunidad rural. 39

8.1.3 Actividad 3. Obtención de información mediante el uso de plataformas oficiales oficina de servicios públicos de Güicán-Boyacá y medición de caudales. 39

8.2 Fase 2. Determinación del índice de vulnerabilidad al desabastecimiento Hídrico. 41

8.2.1 Actividad 4. Procesamiento y presentación de datos. 41

8.3 Fase 3. Diseño del modelo mediante la metodología de la simulación basada en agentes. 43

8.3.1 Herramienta por implementar 43

8.3.2 Actividad 5. Determinar variables que se van a aplicar tales como oferta y demanda hídrica. 44

8.3.3 Actividad 6. Aplicación del protocolo ODD. 44

8.3.4 Actividad 7. Calibración del modelo. 47

8.4 Fase 4. Comparación de los resultados y posibilidades del modelo diseñado respecto a aquellos encontrados y considerados afines en la literatura con el fin de proponer lineamientos que favorezcan su aplicación. 47

8.4.1 Actividad 8. Revisión de la literatura. 48

8.4.2 Actividad 9. Análisis comparativo. 48

8.4.3 Actividad 10. Reconocimiento de ventajas y limitaciones. 48

8.4.4 Actividad 11. Recomendaciones. 48

9 Resultados y Análisis 48

9.1 Indagación de estudios previos 48

9.2 Entrevista a la comunidad rural. 51

9.2.1 Información General 52

9.2.2 Resultados Encuesta. 53

9.3 Obtención de información mediante el uso de plataformas oficiales oficina de servicios públicos de Güicán-Boyacá y medición de caudales. 61

9.4 Procesamiento y presentación de datos (Índice de Vulnerabilidad Hídrica) 66

9.4.1 Índice de Regulación Hídrica. 66

9.4.2 Índice del Uso del Agua 69

9.4.3 Índice de Vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico. 70

9.5 Determinar variables que se van a aplicar tales como oferta y demanda hídrica. 71

9.6Aplicación del protocolo ODD. 73

9.6.1 Propósito. 73

9.6.2 Entidades. 73

9.6.3 Conceptos de diseño. 82

9.6.4 Inicialización. 87

9.6.5 Datos de entrada. 89

9.6.6 Submodelos. 90

9.7 Calibración del modelo. 91

9.7.1 Escenario 1. Evento Base. 92

9.7.2 Escenario 2. Evento Favorable. 95

9.7.3 Escenario 3. Evento Catastrófico. 98

9.7.4 Análisis de resultados. 101

9.8 Revisión de la literatura. 103

9.9 Análisis comparativo. ..... **¡Error! Marcador no definido.**

9.9.1 Características. 105

9.9.2 Metodologías. 106

9.9.3 Resultados. 107

9.9.4 Capacidades. 108

9.9.5 Limitaciones. 109

9.10 Reconocimiento de ventajas y limitaciones 113

9.10.1Capacidades del modelo. 113

9.10.2Limitaciones 114

9.11 Recomendaciones. 114

10 Conclusiones. 115

11 Bibliografía. 117

12 Anexos. 128

Lista De Tablas

Tabla 1. *Normativa Relacionada con la Realización del Proyecto. 24*

Tabla 2. *Matriz de Asociación Índice de Vulnerabilidad Hídrica por desabastecimiento – IVH con sus diferentes categorías. 28*

Tabla 3. *Rangos y categorías del IRH. 41*

Tabla 4. *Rangos y categorías del IUA. 42*

Tabla 5. *Características de la estación Limnigráfica. 42*

Tabla 6. *Estudios, proyectos y publicaciones consultadas 49*

Tabla 7. *Actividades pecuarias a la que se dedica cierto porcentaje de usuarios encuestados. 54*

Tabla 8. *Actividades agrícolas a la que se dedica cierto porcentaje de usuarios encuestados. 55*

Tabla 9. *Prácticas de conservación que realiza cierto porcentaje de usuarios encuestado. 60*

Tabla 10. *Información dada por la Unidad de Servicios públicos de Güicán de la Sierra. 62*

Tabla 11. *Medición de Caudal en cada uno del os hogares de cada uno de los usuarios encuestados. 63*

Tabla 12. *Resultados del aforo al río El Mosco. 65*

Tabla 13. *Matriz de caudales. 66*

Tabla 14. *Cálculos de Vt y Vp.* 67

Tabla 15. *Caudal que se aproxima al promedio anual.* 68

Tabla 16. *Índice de Regulación Hídrica.* 68

Tabla 17. *Índice del Uso del Agua* 70

Tabla 18. *Índice de Vulnerabilidad al desabastecimiento Hidrico* 70

Tabla 19. *Estación de la cual se tomaron los datos de precipitación.* 71

Tabla 20. *Resultados de la demanda de agua en la zona* 72

Tabla 21. *Variables del modelo en la interfaz de Netlogo.* 74

Tabla 22. *Variables del modelo en la interfaz de Netlogo.* 88

Tabla 23. *Condiciones para el escenario 1.* 93

Lista De Figuras

Figura 1. *Pasos para la modelación basada en agentes.* 21

Figura 2. *Mapa de la cuenca del rio cardenillo indicando los puntos de la zona de estudio (vereda el Tabor y glaciar Ritacuba Negro).* 22

Figura 3. *Esquema Básico del Funcionamiento de Net logo.* 31

Figura 4. *Esquema General De Las Fases de desarrollo de la investigación.* 37

Figura 5. *Etapas del protocolo ODD.* 45

Figura 6. *Diligenciamiento de la encuesta.* 52

Figura 8. *Porcentaje de personas encuestadas que son pertenecientes al acueducto El Tabor.* 53

Figura 8. *Porcentaje de personas que tienen como fuente de abastecimiento únicamente el acueducto rural.* 56

Figura 9. *Porcentaje de personas que tienen Concesión del recurso hídrico.* 56

Figura 10. *Tipo de conducción de agua que tienen los usuarios encuestados* 57

Figura 11. *Porcentaje de usuarios con permanencia del recurso hídrico.* 57

Figura 12. *Porcentaje de usuarios con tanque de almacenamiento.* 58

Figura 13. *Porcentaje de personas que están satisfechas con la cantidad del recurso hídrico.* 58

Figura 14. *Porcentaje de personas que están satisfechas con la calidad del recurso hídrico.* 59

Figura 15. *Porcentaje de personas que están satisfechas con los niveles del recurso hídrico.* 59

Figura 16. *Consciencia sobre escasez de agua en un futuro.* 61

Figura 17. *Medición de caudal domestico con método volumétrico.* 64

Figura 18. *Medición de caudal agrícola con método volumétrico.* 64

Figura 19. *Medición de caudal con método flotador* 65

Figura 20. *Curva de Duración de Caudales.* 69

Figura 21. *Interfaz modelo de simulación en Netlogo.* 74

Figura 22. *Gráficas y monitores que indican los datos de salida del modelo.* 79

Figura 23. *Decisión de los agentes.* 80

Figura 24. *Resumen del proceso.* 82

Figura 25. *Suministro y Demanda de Agua del primer escenario.* 94

Figura 26. *Cantidad de usuarios y picos de agentes frustrados dentro de 50 años.* 94

Figura 27. *Interfase del Escenario* 95

Figura 28. *Suministro y Demanda de Agua del segundo escenario.* 97

Figura 29. *Cantidad de usuarios y picos de agentes frustrados dentro de 50 años.* 97

Figura 30. *Interfase del Escenario 3.* 98

Figura 31. *Estado inicial del glaciar y de Los Agentes.* 103

Lista de Anexos.

Anexo 1. *Encuesta aplicada a la comunidad de la vereda El Tabor 128*

Anexo 2. *Planilla para registro de consumo de agua de la comunidad de la vereda de El Tabor 130*

Resumen

El cambio climático es un fenómeno a escala global que modifica las dinámicas de los ecosistemas, como ocurre en los glaciares. Por ello, se planteó como objetivo analizar la vulnerabilidad del sistema de abastecimiento hídrico del acueducto El Tabor mediante la presentación de un modelo basado en agentes. Todo esto debido a que, el abastecimiento de dicho sistema depende del Glaciar Ritacuba Negro del Parque Nacional Natural El Cocuy, el cual se encuentra en una situación de fragilidad debido al cambio climático y a la reducción del volumen de hielo del glaciar. Para llevar a cabo este trabajo, se recopiló y organizó toda la información disponible utilizando fuentes de datos del Instituto de Hidrología y Estudios Ambientales (IDEAM), estudios previos referentes al tema, Unidad de Servicios Públicos del municipio de Güicán y datos obtenidos de medición de caudales con los cuales se realizarán cálculos para determinar la oferta y demanda del agua e inclusive hacer el procesamiento de datos del índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento siguiendo la metodología del IDEAM. Igualmente, se efectuaron encuestas o entrevistas a la población de la zona de estudio con el fin de tener conocimiento de la consciencia que pueden tener ante la escasez de agua y, por otro lado, deducir el uso, los horarios y cantidades del recurso hídrico que emplean en sus actividades.

Palabras clave:

Retroceso glaciar, Agente, Índice de uso del agua, Índice de regulación Hídrica, Variabilidad Climática, Net logo.

1 Planteamiento Del Problema.

Recientemente, el glaciar de la Sierra Nevada del Cocuy ha comenzado a retroceder. durante el siglo XX, se ha identificado un retroceso de su glaciar, el cual es de aproximadamente 1099,59 hectáreas de cobertura durante los últimos 34 años, según estudio de Molano et al. (2021), esto no solamente tiene implicaciones a nivel bilógico, si no un impacto social sobre las comunidades que se abastecen o hacen uso del agua proveniente de este glaciar.

Dentro de las problemáticas que tiene el parque Nacional Natural El Cocuy en cuanto al recurso hídrico es que éste abastece a varias poblaciones aledañas y los efectos del cambio climático pueden generar que el suministro de estas zonas se vulnere causando la escasez de agua y por ende la generación de un conflicto social. En este caso, el abastecimiento del acueducto El Tabor, que depende del Glaciar Ritacuba Negro del Parque Nacional Natural El Cocuy, se encuentra en una situación de vulnerabilidad debido al cambio climático y a la reducción del volumen del glaciar, ya que dicha masa de hielo es uno de los principales proveedores de agua para la región, y su disminución podría afectar gravemente el suministro de agua en el futuro.

Asimismo, la recolección de datos hecha por el IDEAM (2022) evidencia que la capa glaciar de dicho ecosistema ha ido disminuyendo considerablemente ya que en el año 1850 contaba con 148.7 km2 y desde la década de los 50 hasta la década de los 90, ha habido una disminución de 15.2 km2. Por otro lado, en los últimos 20 años su pérdida ha sido de 6.61km2 lo que se considera un factor de riesgo para las poblaciones que se benefician del recurso hídrico suministrado por este tipo de lugares.

2 Justificación.

El cambio climático tiene una incidencia considerable en el desarrollo socioeconómico de una región. En este caso, los ecosistemas de alta montaña son muy importantes en cuanto al suministro de agua y por ello es necesario evaluar en qué estado se encuentra la fuente hídrica presente desde su nacimiento, en condiciones naturales o si por el contrario esta es alterada por acciones antrópicas o por los efectos del calentamiento global (Price, 2002) .

En tal sentido, mediante esta investigación se pretende analizar cómo el deshielo de uno de los glaciares de Parque Nacional Natural El Cocuy denominado Ritacuba Negro, el cual, abastece de agua mediante el rio Cardenillo a la vereda El Tabor localizada en el municipio de Güicán-Boyacá, podría afectar la percepción de los usuarios del acueducto frente a los efectos del cambio climático como lo es la escasez de agua. Por ello, se generó un modelo que simule la reacción de los agentes involucrados como la población beneficiaria ante la falta del recurso hídrico comprendiendo su comportamiento en las decisiones que tomen frente a esta situación.

Para este caso, la elección de la modelación basada en agentes y el uso de Netlogo brindan la oportunidad de examinar el tema del comportamiento emergente, que estudia la relación entre las interacciones a nivel individual de los agentes y el comportamiento global que surge de estas interacciones (Quesada Chaverri, 2018), es decir, el comportamiento de los usuarios del acueducto en un entorno en el que puede haber un déficit de recurso hídrico.

Asimismo, se hace necesario tener conocimiento de la vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico de cuenca del rio Cardenillo con el objetico de realizar un diagnóstico de las condiciones actuales para conocer la situación real y estimar el potencial de esta lo que, permitirá a las entidades encargadas del suministro de agua identificar riesgos y tomar decisiones para mitigarlos involucrando la implementación de medidas de conservación, la búsqueda de fuentes alternativas de agua o la mejora de

la infraestructura existente. Finalmente, se espera que la difusión de esta información sea útil para que las entidades encargadas puedan hacer una mejor elaboración de políticas al tomar en cuenta a los actores locales.

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Analizar la vulnerabilidad del abastecimiento del acueducto el tabor dependiente del glaciar Ritacuba Negro Del Parque Nacional Natural El Cocuy mediante el método basado en agentes y el índice de vulnerabilidad hídrico por desabastecimiento.

3.2 Objetivos Específicos

Cuantificar la oferta y demanda hídrica de la comunidad de el Tabor en el periodo climático de lluvias.

Determinar la probabilidad de desabastecimiento hídrico para le vereda de El Tabor con la metodología dada por el Instituto De Hidrología Meteorología Y Estudios Ambientales.

Diseñar un modelo a partir de información secundaria que mediante la metodología de la simulación basada en agentes permita simular la reacción de los agentes involucrados como la población beneficiaria ante la falta del recurso hídrico en el periodo de 2023-2073.

4 Marco Conceptual

Para el desarrollo del siguiente proyecto se adoptan las siguientes definiciones:

Adaptación al cambio climático:

De acuerdo con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2018), se considera a la adaptación como un proceso de aprendizaje que requiere ser interdisciplinario, multidimensional y transversal, que toma en cuenta el conocimiento local, el papel de los individuos y las organizaciones de la sociedad civil. En este sentido, dos aspectos importantes por considerar son la incertidumbre que aún existe en torno a los impactos del cambio climático, es decir, su tipo, magnitud y naturaleza. En segundo lugar, el dinamismo de la vulnerabilidad a los impactos, que demanda la realización de evaluaciones periódicas para comprender mejor esos procesos.

Cambio Climático:

Es provocado por el calentamiento global que tiene su origen en el aumento de gases de invernadero en la atmósfera, afecta los patrones de temperatura y precipitación del planeta y afecta la frecuencia y severidad de eventos extremos como huracanes y sequías (Elizondo et al., 2003).

Variabilidad Climática:

Se refiere a las variaciones en el estado medio y otros datos estadísticos (como las desviaciones típicas, la ocurrencia de fenómenos extremos, etc.) del clima en todas las escalas temporales y espaciales, más allá de fenómenos meteorológicos determinados. Puede deberse a procesos internos naturales dentro del sistema climático (variabilidad interna), o a variaciones en los forzamientos externos antropogénicos (variabilidad externa) (IDEAM, 2014).

Vulnerabilidad ambiental:

Es un concepto que se relaciona con la susceptibilidad o predisposición intrínseca del medio y los recursos naturales a sufrir un daño o una pérdida por eventos naturales o de origen socioeconómico. El entendimiento de dicho termino en una determinada región implica comprender con precisión la susceptibilidad o resistencia de dicha área respecto a su problemática ambiental y como se manifiesta (Pérez Figueredo, 2012).

Conservación de áreas:

Se refiere a conservar una muestra de un ecosistema natural para que sea manejado bajo los principios de sustentabilidad en el uso de los recursos naturales y que por la voluntad de su propietario se destina para su uso sostenible, preservación o restauración con vocación de largo plazo (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2019).

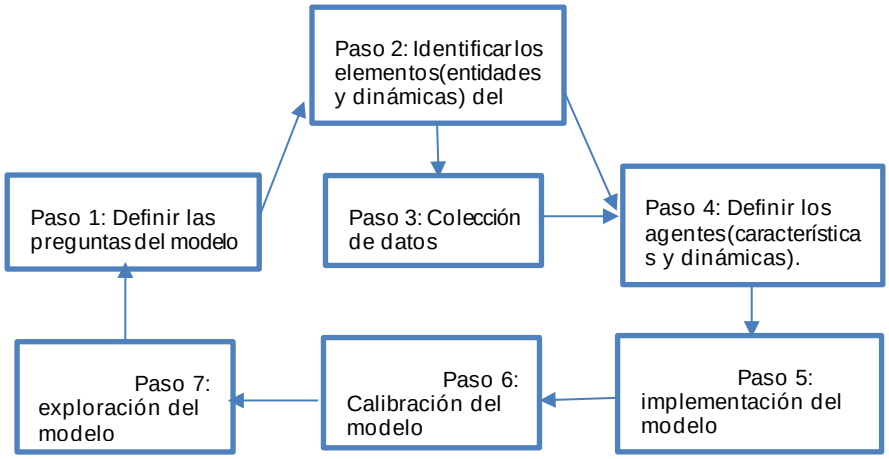
Simulación basada en Agentes:

La simulación basada en agentes es un método de investigación para las ciencias sociales que permite explicar de forma sencilla fenómenos sociales, políticos y económicos mediante mecanismos que hacen alusión a las acciones de los agentes, a la estructura de interacción entre ellos y al entorno que los rodea. Particularmente, puede explicar cómo emergen las estructuras sociales a partir de las acciones individuales y cómo dichas estructuras a su vez influyen en tales acciones, integrando de esta manera el nivel macro y micro de la realidad social, o puede evaluar políticas sociales a priori previendo sus consecuencias (a veces inesperadas) antes de ser implantadas. Dicho protocolo sigue los pasos de la figura 1 (García -Valdecañas, 2016).

Figura 1.

Pasos para la modelación basada en agentes.

.



Nota. El esquema representa los pasos para realizar el modelado basado en agentes. Tomado de *Construyendo Modelos Basados en Agentes* por Meléndez, A., (2007).

Agente:

Es una entidad con datos independientes, comportamientos y contextos de ejecución. Un agente en NetLogo (y especialmente un agente móvil o una tortuga) puede moverse y aparecer independientemente de otros elementos gráficos (Bennett, 2015).

5 Marco Contextual

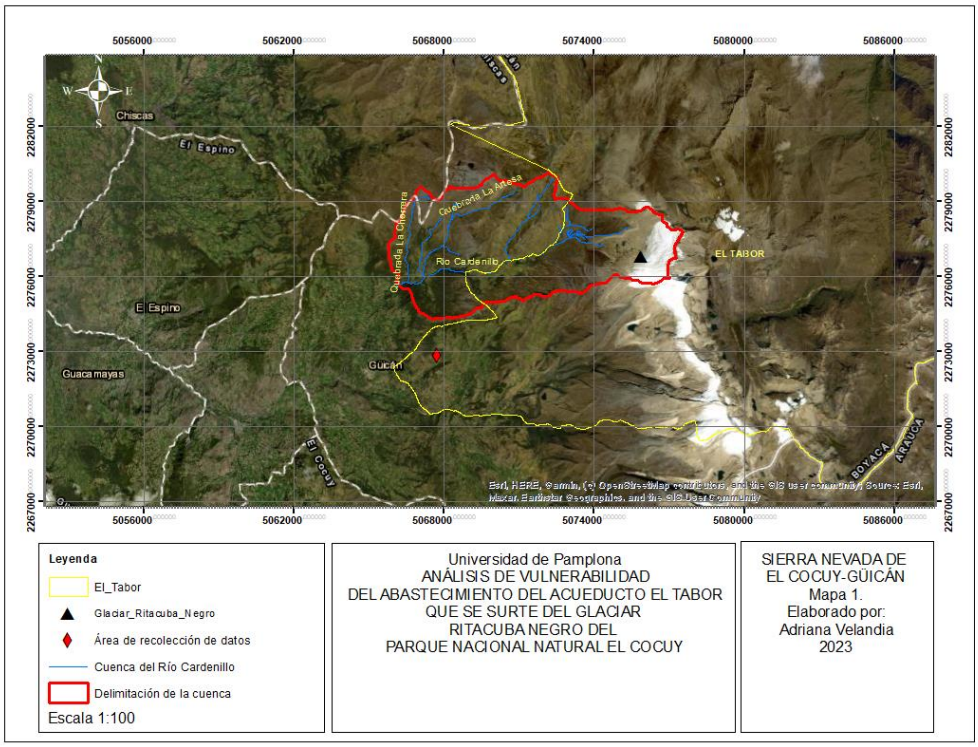
5.1 Área de Estudio.

En Boyacá, Colombia, al norte de la cordillera oriental, entre los municipios de El Cocuy y Güicán de la Sierra, se localiza el Parque Nacional Natural El Cocuy que es conocido por ser uno de los destinos turísticos de alta montaña más importantes en Colombia (Calderón Ramírez, 2014). El área de estudio (figura 2) cuenta con la microcuenca del Rio Cardenillo perteneciente a la cuenca del Rio Mosco

que posee una extensión de 52.73 km2 (Gutiérrez Rey et al., 2020) y que se localiza en la vereda El Tabor del municipio de Güicán, en la cordillera Oriental. Este rio recibe aporte por parte del Glaciar más específicamente del Ritacuba Negro con una altura máxima de 5.350 m.s.n.m. (Sánchez Suescún, 2015) y abastece mediante el acueducto “El Tabor ” a una parte de la vereda el Tabor (Hernández Díaz, 2014)

Figura 2.

Mapa de la cuenca del rio cardenillo indicando los puntos de la zona de estudio (vereda el Tabor y glaciar Ritacuba Negro).



Nota. Fuente: propia

6 Marco Legal

Para el cumplimiento de los objetivos se consideran una normatividad que regule dicha dinámica, como se puede apreciar en la tabla 1.

Tabla 1.

Normativa Relacionada con la Realización del Proyecto.

Norma	Descripción
Constitución Política de Colombia Gaceta Constitucional número 114	Artículo 79. Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarla. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de vital importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines
Ley 99 de 1993 El Congreso De Colombia	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental - SINA-y se dictan otras disposiciones Artículo 111. Adquisición de Áreas de Interés para Acueductos Municipales.
Decreto 2811 De 1974 Presidente De La República De Colombia	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente que tiene por objetivo regular la conducta humana, individual o colectiva y la actividad de la Administración Pública, respecto del ambiente y de los recursos naturales renovables y las relaciones que surgen del aprovechamiento y conservación de tales recursos y del ambiente. Artículo 81:De acuerdo con el artículo 677 del Código Civil, se entiende que un agua nace y muere en una heredad cuando brota naturalmente a su superficie y se evapora o desaparece bajo la superficie.
Ley 1523 de 2012 El Congreso De Colombia	Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres Artículo 30. Parágrafo 1°. Las áreas metropolitanas y las asociaciones de municipios deberán adoptar los procesos de la gestión del riesgo en el marco de su desempeño en la planificación del desarrollo, gestión ambiental y ordenamiento territorial, de conformidad con sus competencias.
Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos (PNGIBSE) Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.	Documento por el cual se planifican, ejecutan y monitorean las acciones para la conservación de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos, en un escenario social, territorial definido y en diferentes estados de conservación para maximizar el bienestar humano, a través del mantenimiento de la resiliencia de los sistemas socio-ecológicos a escalas nacional, regional, local y transfronteriza.
Decreto 622/77 Presidente De La República De Colombia	Este Decreto contiene los reglamentos generales aplicables al conjunto de las áreas con valores excepcionales para el patrimonio Nacional, que debido a sus características naturales y en beneficio de los habitantes de la Nación se reserva y declara dentro de alguno de los tipos de áreas definidas en el Artículo 329 del Decreto Ley 2811 de 1974. Artículo 3°. Apartado 5. Investigar los valores de los recursos naturales renovables del país, dentro de áreas reservadas para obtener su mejor conocimiento y promover el desarrollo de nuevas y mejores técnicas de conservación y manejo de tales recursos dentro y fuera de las áreas del Sistema.
Decreto 1076 de 2015 Presidente De La República De Colombia	Artículo 2.2.3.3.1.4 impone a la autoridad ambiental la obligación de realizar el Ordenamiento del Recurso Hídrico, entendido como el proceso de planificación de este, mediante el cual se establece la clasificación las aguas superficiales, su destinación y posibilidades de usos. Los objetivos de calidad a alcanzar en el corto, mediano y largo plazo, las normas de preservación de la calidad del recurso, las zonas en las que se prohibirá o condicionará la descarga de aguas residuales y el programa de seguimiento al recurso, con el fin de verificar la eficiencia y efectividad del ordenamiento
La Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH) Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial	Garantiza la sostenibilidad del recurso hídrico, mediante una gestión y un uso eficiente y eficaz, articulados al ordenamiento y uso del territorio y a la conservación de los ecosistemas que regulan la oferta hídrica, considerando el agua como factor de desarrollo económico y de bienestar social, e implementando procesos de participación equitativa e incluyente.

Nota. Fuente: Propia.

7 Marco Teórico Y Antecedentes.

7.1 Marco Teórico.

7.1.1 Generalidades.

El cambio climático es una problemática que ha sido estudiada desde diversos ámbitos, siendo una controversia a nivel mundial que genera preocupación a los diferentes países, debido a las transformaciones que puede llegar a ocasionar. De esta manera, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2001) lo define como: "Cualquier cambio en el clima a lo largo del tiempo, ya sea por su variabilidad natural o por la actividad humana".

Según Miller (2007), existen factores que generan una transformación de la temperatura media de la tierra y el cambio climático, los cuales se desenvuelven en el desnivel del mar, los efectos de las nubes, la emisión de aerosoles a la atmósfera, el aumento en las emisiones de dióxido de carbono, gas metano e hidratos de metano, aduciendo además índices en la contaminación del aire, en el hielo polar, el vapor del agua y la energía solar que alcanza la Tierra.

Por otro lado, se enuncia que una de las consecuencias del calentamiento global serán los cambios en el ciclo del agua, los cuales se han manifestado en las variaciones del contenido de vapor de agua de la atmósfera y en la distribución de la salinidad de los océanos. En consecuencia, se espera que haya cambios de frecuencia y/o intensidad de fenómenos meteorológicos extremos (Stocker et al., 2013), como la posible prolongación de los períodos de sequía y la alteración de los valores extremos de la precipitación, los cuales están asociados muchas veces a la ocurrencia de desastres (Garzón y Jiménez, 2017).

Por otra parte, Houghton et al. (2001) define un glaciar de montaña como "una masa de hielo terrestre que fluye pendiente abajo, encerrado por elementos topográficos que lo rodean, como las laderas de un valle o las cumbres adyacentes;

la topografía del lecho de roca es el factor que efectuá mayor influencia en la dinámica de un glaciar y en la pendiente de su superficie, y es un elemento que permanece gracias al depósito de nieve a gran altura, que se compensa con la fusión del hielo".

Actualmente, Colombia cuenta con seis glaciares activos, cuatro en la Cordillera Central, uno en el norte del país aledaño a la costa Caribe y uno en la Cordillera Oriental (Rekowsky et al., 2018). La sierra Nevada del Cocuy-Güicán, que se encuentra en esta última, posee diferentes ecosistemas de alta montaña (glaciar, superáramo, paramo, Subpáramo y bosque tropical) esenciales en la producción y conservación del recurso hídrico, el cual abastece a los departamentos de Boyacá, Arauca y Casanare. A lo largo del rio Cardenillo se encuentran cuatro sitios de captación, las cuales benefician a 150 usuarios, especialmente a los pobladores de la vereda el Tabor del municipio de Güicán, Boyacá (Sánchez Suescún, 2015).

Se conoce que ecosistemas de este tipo enfrentan diversos problemas frente a la gestión del recurso hídrico, pues la demanda de agua aumenta, mientras que el recurso se ve afectado por las acciones antrópicas como la explotación desmedida de las fuentes, la contaminación, el mal uso y el desperdicio entre otras; además, por fenómenos climáticos que afectan el ciclo natural del agua y principalmente su disponibilidad de agua (Arango Ruiz, 2013).

En este caso, la densidad de población, el fraccionamiento de la propiedad, la percepción de pureza y cantidad del agua del glaciar, son los principales estructurantes de esta relación directa entre comunidades y aguas superficiales de fusión glacial (IDEAM, 2022). De esta forma las comunidades de alta montaña de El Cocuy y Güicán perciben el glaciar como fundamental dentro del ciclo de las aguas, especialmente en términos de calidad y de cantidad del recurso. En general, las "aguas blancas" del glaciar son percibidas como más puras, ya que la comunidad de la vereda El Tabor afirma que no hay

factores que influyan en su calidad como lo son la dispersión de basuras (Ceballos Liévano et al., 2012).

7.1.2 Índice de vulnerabilidad hídrica.

El Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico (IVH) permite conocer el grado de fragilidad del sistema hídrico para conservar una oferta para el abastecimiento de agua ante amenazas como periodos largos de estiaje o eventos como el Fenómeno cálido del Pacífico (El Niño), lo que provoca riesgos de desabastecimiento (IDEAM, 2010).

Esta se determina para el ENA 2010, 2014, 2018 y 2022 a partir de la siguiente matriz de asociación de las categorías de interpretación del Índice de retención y ordenación hídrica (IRH) y del Índice de Uso de Agua (IUA) como se muestra en la Tabla 2:

Tabla 2.

Matriz de Asociación Índice de Vulnerabilidad Hídrica por desabastecimiento –IVH con sus diferentes categorías

Matriz de Asociación Índice de Vulnerabilidad Hídrica por desabastecimiento-IVH				
Índice de uso del Agua	Índice de retención y regulación Hídrica			
Categoría	**Alto**	**Moderado**	**Bajo**	**Muy Bajo**
Muy bajo	Muy Baja	Baja	Media	Media
Bajo	Baja	Baja	Media	Media
Medio	Media	Media	Alta	Alta
Alto	Media	Alta	Alta	Muy alta
Muy alto	Media	Alta	Alta	Muy alta
Critico	Muy alta	Muy alta	Muy alta	Muy alta

Nota. Fuente IDEAM (2010)

Especialmente, el IVH es visto como un instrumento de planeación que ayuda a proyectar acciones en casos de eventos extremos, con la identificación de las condiciones potenciales de una zona que pueden generar escasez de agua superficial. Del mismo modo, permite sugerir posibles condiciones de desabastecimiento para los municipios, cabeceras municipales y demás usos del agua, como también, proporcionar elementos para la gestión ambiental, la planificación y el ordenamiento del uso del agua (IDEAM, 2010).

Para la comprensión de los resultados se debe tener en cuenta que, si la regulación hídrica es alta y el uso del agua es muy bajo, la vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento es muy baja, mientras que con un uso del agua alto o muy alto y una regulación muy baja, la vulnerabilidad es muy alta. Entre más alto es el uso del agua y menor es la regulación, la vulnerabilidad por desabastecimiento aumenta; disminuye cuando: a) mejora la regulación de agua y b) se presenta un menor uso del agua (IDEAM, 2010).

En categoría media se pueden presentar dos situaciones, una cuando la regulación y el uso del agua son altos, o por el contrario cuando estos dos son bajos, de forma que con cambios en el uso o en la regulación del agua se puede pasar a una categoría alta o baja de vulnerabilidad, como es el caso de aquellas zonas en las que en año seco su vulnerabilidad aumenta comparada con la de un año normal (medio) (IDEAM, 2010).

7.1.3 Curva de duración de caudales.

Se obtienen los datos de caudal de una estación meteorológica y mediante herramientas como Excel se ubica la serie de datos, y se obtienen los promedios de cada mes para hacer la complementación de datos por promedio aritmético y el promedio multianual. Posterior a ello, se sitúan los percentiles en intervalos de 0.01. El caudal (m3/s) se halla con los percentiles de la matriz de caudales o serie de datos y el percentil correspondiente a la fila, tal y como lo muestra la ecuación 1 (Rincón Álvarez y Gutiérrez Prada, 2021).

$$=PERCENTIL\ (Matriz\ de\ caudales;\ \%)(1)$$

7.1.4 Modelación basada en agentes

La modelación basada en agentes es un método para modelar sistemas complejos que se componen de elementos individuales, es decir, agentes que pueden interactuar en el mismo entorno. Un conjunto de reglas que representan los comportamientos individuales de los agentes permite representar completamente la diversidad y heterogeneidad de los múltiples agentes involucrados en un sistema. Además, el comportamiento sistémico surge porque estos agentes heterogéneos pueden interactuar en el mismo entorno. En comparación con otras técnicas como la dinámica del sistema (DS) o la simulación de eventos discretos (SED), este tipo de modelación se distingue por estas dos características: el énfasis en la heterogeneidad de los agentes de modelado y los comportamientos emergentes .

Finalmente, el objetivo del MBA no es optimizar un sistema complejo, sino comprender los procesos que pueden surgir (Araya, 2020).

7.1.5 Entorno Net Logo.

De acuerdo con Huerta Barrientos (2023), Netlogo es un entorno de programación que permite la simulación de fenómenos naturales y sociales. Fue creado por Uri Wilensky en 1999 y está en continuo desarrollo en el Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling. Es particularmente útil para modelar sistemas complejos que evolucionan en el tiempo, ya que los implementadores de modelos pueden dar instrucciones a cientos o miles de agentes para que todos ellos operen de manera independiente, entre sí y con el entorno. Esto hace posible explorar la relación entre el comportamiento de bajo nivel de los individuos y los patrones macroscópicos que surgen a partir de la interacción de muchos individuos entre sí. Concretamente, en Netlogo existen 3 tipos de agentes:

Turtles(tortugas).

Patches(celdas).

Links(relaciones entre tortugas)

Las tortugas son agentes que se mueven por el mundo e interactúan con el medio ambiente. Además, el lugar donde habitan las tortugas se conoce como el "mundo". Cada patch es una porción cuadrada del mundo y está identificado por las coordenadas de su punto central.

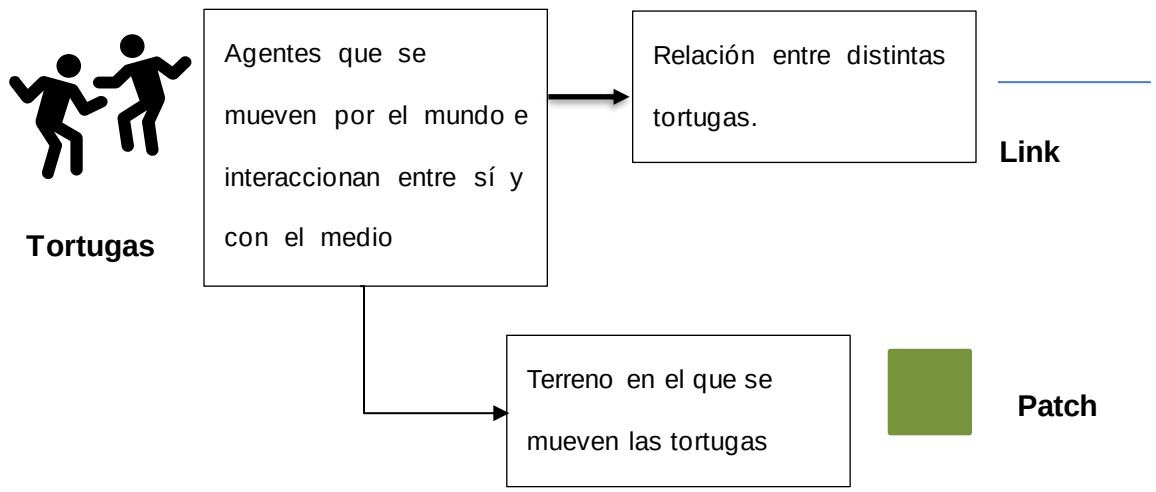
Las tortugas se mueven por el mundo (y, por tanto, por encima de los patches) e interaccionan entre sí según unas reglas de comportamiento y con el medio (es decir, con los patches).

Se pueden modelar las relaciones entre distintas tortugas mediante links, que es el tercer tipo de agente presente en Netlogo. Los links se designan mediante un par (tortuga1, tortuga2), que indica las dos tortugas relacionadas mediante dicho link.

Finalmente, en los modelos de Netlogo se presenta un observador que no está representado en el mundo, pero puede interactuar con él (crea y destruye agentes, asigna propiedades a los agentes, etc.). Todo lo anteriormente mencionado se resume en la figura 3.

Figura 3.

Esquema Básico del Funcionamiento de Net logo.



Fuente: propia

7.2 Antecedentes.

De acuerdo con Bórquez (2006), los glaciares y los casquetes polares son las principales reservas de agua dulce en el planeta, por lo cual, son el principal seguro que poseen los ecosistemas y las comunidades humanas para su subsistencia. Son reservas estratégicas ya que no sólo aportan agua a las cuencas hídricas en verano,

sino que también resultan ser la única fuente de recarga de ríos, lagos y napas subterráneas en las zonas áridas y en períodos de sequía.

En este sentido, el incremento de la temperatura de la Tierra tiene implicaciones en el acelerado proceso de deshielo de estos ecosistemas y en la alteración del ciclo del agua, además de su incidencia en fenómenos climáticos extremos y los conflictos por el uso del agua (Muñoz, 2016).

Las montañas de los Andes y del Himalaya poseen características bioculturales en común, debido a que son fuentes de agua en territorios biodiversos y albergan a miles de familias campesinas e indígenas. Sin embargo, ambas presentan una situación de eminente peligro por el extractivismo a gran escala. De ahí que las altas Cortes de Ecuador, Colombia y La India se vean obligadas a pronunciarse frente a la crisis ecológica y cultural a la que se enfrentan sus sistemas montañosos (Caguana y Naranjo, 2020).

Particularmente, en la zona Norte y Centro de Chile se han planteado desafíos en materia hídrica para el desarrollo de las actividades económicas y básicas para la subsistencia. Ante este escenario, los glaciares juegan un rol importante en el abastecimiento de las cuencas que dan vida a los valles de las zonas mencionadas, pero se ven amenazados por las externalidades de las actividades económicas extractivas, las cuales pueden generar o acrecentar la escasez de los territorios, afectando así a las comunidades aledañas que subsisten gracias a los glaciares (Valenzano Bustamante, 2021).

Asimismo, Barbaran Cruz y Bustinza Castillo (2021), demostraron que existe un impacto negativo en los glaciares del nevado Yuraccocha en Perú, por parte de los parámetros de temperatura y precipitación, el cual presentó una reducción de 4.6 % (0.12 km2) de la masa glaciar durante los últimos 10 años. Lo cual ha generado desequilibrios en la masa de hielo, siendo esto un punto relevante en el retroceso glaciar por su influencia inversa en la masa glaciar de los nevados.

A nivel nacional encontramos que Paniagua y Garcia (2013), hallaron que el retroceso de los glaciares es otra evidencia del cambio climático y que estudios previos que ellos analizaron han presentado una tasa de decrecimiento de aproximadamente de 20 m/año en los nevados de Puracé, Tolima, Huila, los del Parque Nacional Natural de los Nevados (Ruiz, Cisne, Santa Isabel), la Sierra Nevada del Cocuy y la Sierra Nevada de Santa Marta. Esta problemática pone en evidencia que a mediados del siglo XXI posiblemente todos los glaciares de montaña en Colombia habrán desaparecido, con todas las implicaciones en términos de alteraciones en el balance agua, pérdida de biodiversidad y abastecimiento de agua (Myers et al., 2000).

Por otra parte, un estudio realizado por Herrera y Ruiz (2009) argumenta que el retroceso glacial en la Sierra Nevada del Cocuy ha acelerado su rata anual más del doble y desaparecería si continua en la proporción mostrada durante los años 2004 al 2007. Además, estima que el glaciar es considerablemente más pequeño que lo previamente informado por varios estudios, por lo cual, sugiere que el glaciar desaparecería completamente para el 2075, bajo el supuesto que continúe la tendencia del periodo 1986-2007.

Existen otras estimaciones que señalan que la Sierra Nevada del El Cocuy, de acuerdo con registros morrénicos, entre 1955 y 2003 perdió un 39 %, así el porcentaje de área de pérdida total entre los años 1955 y 2014 ha sido de un 89 % de área glaciar aproximadamente (Peña Suarez, 2015).

Durante el año 2022 con la posible desaparición del glaciar Campanillas expertos confirman que la cobertura nevada del PNN Sierra Nevada El Cocuy le quedan máximo 40 años, ya que, la temperatura aumenta 0,33 grados centígrados al año. Mientras que el glaciar estadísticamente muestra una tendencia decreciente de 0,28 kilómetros cuadrados por año desde 1985 (Redacción Medioambiente Y Efe, 2022).

Teniendo en cuenta lo anterior, los intereses de investigación relacionados con el cambio climático tienden a tener un interés común en las poblaciones rurales, especialmente vulnerables a los efectos de ese fenomeno. Enfoques recientes y más completos se encuentran en Kniveton et al (2011), quien en su estudio de caso ha investigado el papel del entorno en la decisión de migrar utilizando escenarios de futuros cambios demográficos, económicos, sociales, políticos y climáticos en seco. En esta investigacion, halló que el cambio a un ambiente más seco produce el mayor número total y la migración internacional cuando se combina con cambios en gobernanza social y política inclusiva y conectada.

Por otro lado, en relación con el conflicto y el cambio climático, Piontek (2010) estudió el río Nilo, que sirve a 10 países de África, tratando de comprender, a través de Modelado computacional, cómo la interacción entre los seres humanos y el medio ambiente puede conducir al conflicto o a la cooperación. En este trabajo, el autor encontró que el cambio climático puede alterar condiciones para el conflicto y la cooperación, pero es muy poco probable que sea la causa inmediata de esas cuestiones.

A nivel nacional, Vargas Melo y Camargo Barrero (2015), mediante el uso de softwares como Netlogo observaron que la problemática de sequía de la cuenca del rio San Jorge que se ubica en la costa Caribe colombiana se hace presente en los meses en los que la precipitación es nula y la demanda de agua por parte de la población es constante, por lo tanto es mayor la demanda de agua respecto a la misma. Siendo una región cuya economía se basa en la agricultura y la pesca, anualmente se calculan perdidas, que afectan la calidad de vida de la población.

En el caso de la determinacion del indice de vulnerabilidad se encontraron estudios como el de Moreno et al. (2015), en el cual se establecio la vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico del Páramo Guerrero y se establecieron las posibles medidas de adaptación y mitigación. Los resultados evidenciaron que el IUA fue

Alto, por ende, las medidas recomendadas beneficiaran a la comunidad del área de influencia ymostróla fragilidad de mantener la oferta de agua para su abastecimiento.

Mecon Castillo (2016), determinó los indicadores hidroclimáticos que componen el índice de vulnerabilidad hídrica al desabastecimiento (IVH), en departamentos como Boyacá y Cundinamarca que presentaron un alto grado en la escala de vulnerabilidad, relacionando el índice de uso del agua (IUA) muy alto y una regulación muy baja (IRH). Teniendo en cuenta lo anterior, concluyo que no se puede responsabilizar a la variabilidad climática como el precursor de un desabastecimiento en acueductos, ya que los sistemas de aducción y conducción del preciado líquido tienen pérdidas superiores al 30% por falta de mantenimientos estructurales, inversión y conocimiento de la dinámica hídrica de la zona.

Del mismo modo, Hernandez Gamboa y Otalora Hernan (2018) quienes tuvieron como finalidad en su trabajo determinar los indicadores hídricos con especial interés en el índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico a través de la Metodología del IDEAM, en la subcuenca del Arroyo Grande Corozal, que pertenece a la cuenca del río Bajo San Jorge. Al analizar los resultados se encontro que la totalidad de la subcuenca posee un alto índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico, por lo cual las poblaciones asentadas en esta zona deben diseñar medidas de adaptación que les permitan generar mecanismos de desarrollo con menores impactos sobre los recursos hídricos, para de esta manera asegurar un desarrollo sostenible para las generaciones futuras.

Finalmente en Santa Marta, Arbelaez (2020) tuvo como propósito generar espacios de evaluación y validación de factibilidad técnica, en cuanto a la disminución del Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico en una parte del territorio de la cuenca baja del rio Manzanares, en Santa Marta (Colombia), entre los años 2018 y 2019. Al revisar los resultados se evidenció que la zona de estudio presentaba un índice de regulación muy alto y una categoría de vulnerabilidad muy alta, lo cual significa que

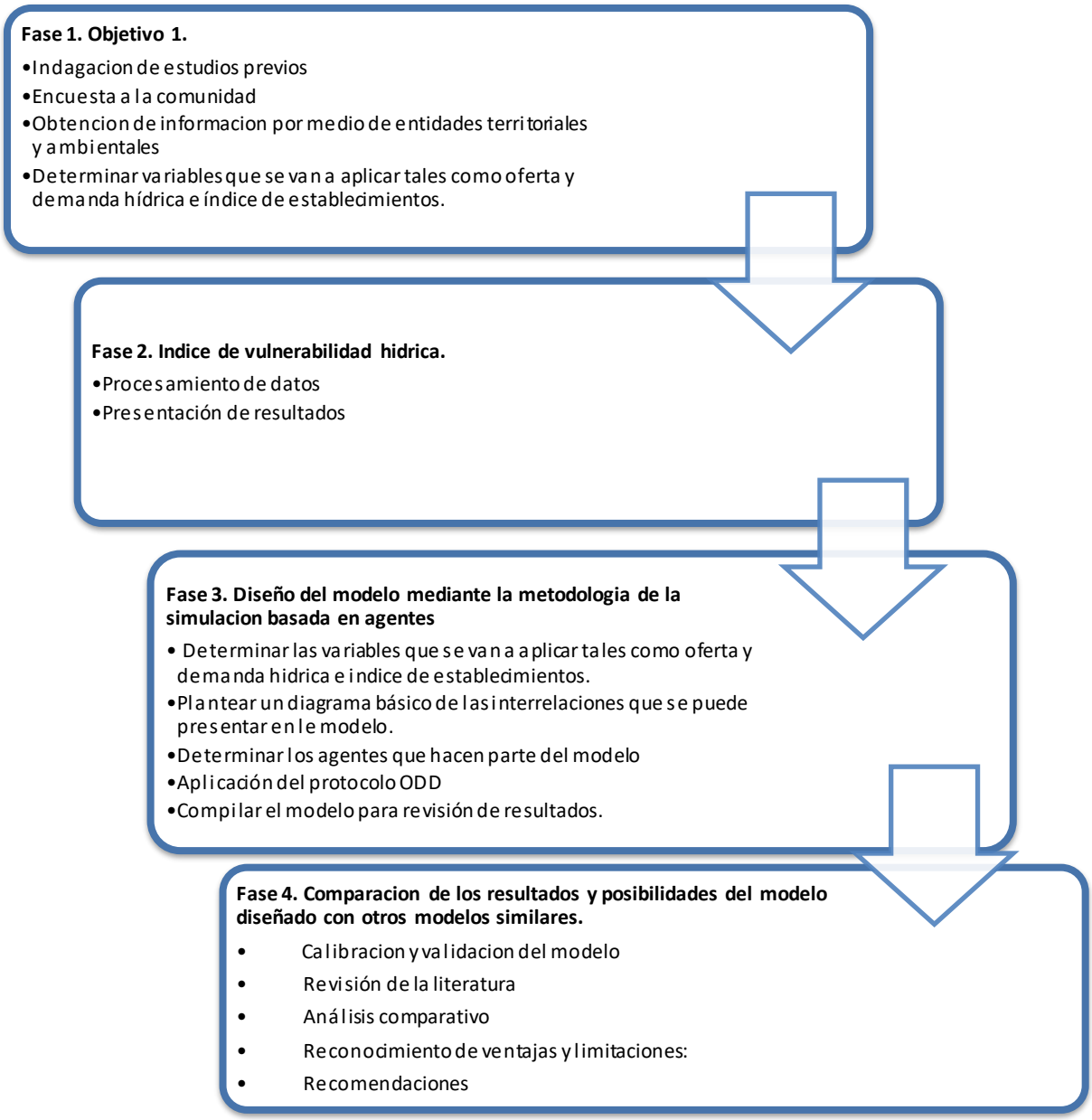
las condiciones de ensayo no tenían unidades hidráulicas de regulación durante la precipitación y de regulación.

8 Metodología.

El presente trabajo busca realizar un análisis de vulnerabilidad mediante la creación de un modelo en el que interactúa la reacción de la población que depende del acueducto El Tabor, que es abastecida por el glaciar Ritacuba Negro a través del método de modelación basado en agentes. La metodología para emplear en el desarrollo de este estudio se distribuye en cuatro fases, como se puede apreciar en la figura 4, en las cuales la primera se fundamenta en la recopilación de información, la segunda en la determinación del índice de vulnerabilidad al desabastecimiento, y la tercera como tal consiste en la programación del código por medio de herramientas como lo es Net logo que permite observar la reacción de la población ante el retroceso del glaciar estudiado en cuestión. Por otro lado, se empleará la metodología de la simulación basada en agentes como lo es el protocolo ODD para el desarrollo de dicha investigación. Por último, se implementará una comparación de los resultados y posibilidades del modelo diseñado respecto a aquellos encontrados y considerados afines en la literatura con el fin de validar el modelo y proponer lineamientos que favorezcan su aplicación.

Figura 4.

Esquema General De Las Fases de desarrollo de la investigación.



Fuente: Propia.

8.1 Variables.

Esta investigación es mixta, es decir, maneja tanto información cuantitativa como cualitativa. En el primer caso, es debido a que se realiza una recopilación de datos por medio de encuestas a usuarios de la vereda El Tabor, que es una herramienta cuantitativa que recauda datos utilizando un cuestionario para compilar actitudes, opiniones u otros datos sobre un estudio de interés, en este caso, actividades económicas (agropecuarias) y distintos aspectos relacionados con el manejo de los Recursos de Uso Común, tal como lo es el agua (Cárdenas et al., 2013). En tal sentido, mediante este método se pretende determinar la demanda y observar que impacto tiene sobre el suministro e inclusive observar que actividades se desarrollan dentro de la zona para tener un contexto de como se usa este recurso. Por otro lado, existen otros valores que no se recopilan en la encuesta y pueden incidir en el modelo como lo es el suministro de agua a la zona y datos que influyen como el índice de vulnerabilidad hídrica para conocer que probabilidad de desabastecimiento tiene en la actualidad el rio que la abastece.

En cuanto datos cualitativos se espera conocer si los usuarios son conscientes de que pueda existir escasez de agua en un futuro y que prácticas de conservación implementan para mantenerlo.

8.2 Fase 1. Recopilación de información.

8.2.1 Actividad 1. Indagación de estudios previos.

Se elaboró una indagación de estudios previos con respecto a investigaciones para la obtención de referentes sobre la situación de la zona de estudio. Así mismo, se consideraron la información existente y los productos previamente elaborados por el IDEAM en cuanto al componente de suministro de agua, por lo cual, se acudió al Estudio

Nacional del Agua del año 2022 y datos de estaciones limnigráficas del IDEAM.

8.2.2 Actividad 2. Encuesta a la comunidad rural.

Se realizó una recopilación de información in situ teniendo en cuenta el consentimiento informado y la ley de política y privacidad del dato (Ley Estatutaria 1581 De 2012), ya que el modelo requiere algunos datos sobre los agentes no disponibles en la bibliografía. Por lo cual, se organizaron encuestas individuales en las que se converse directamente con los residentes de la vereda El Tabor, por lo que, se elaboró previamente una lista de preguntas específicas relacionadas con los usos que se le dan al recurso hídrico, horarios de uso, cantidades.

8.2.3 Actividad 3. Obtención de información mediante el uso de plataformas oficiales oficina de servicios públicos de Güicán-Boyacá y medición de caudales.

Se recolectó información de la cantidad de usuarios que se benefician del acueducto El Tabor mediante la adquisición de informes dados por la oficina de servicios públicos de Güicán-Boyacá. Por otra parte, para el suministro dado por la microcuenca del rio Cardenillo, se buscó información mediante estaciones limnigráficas del IDEAM y la oficina de PNN El Cocuy.

<u>Medición de caudales por método del flotador.</u>

Cuando no hay equipos de medición, se utiliza el método del flotador y se necesita conocer el área de la sección y la velocidad del agua. Para su realización, se debe elegir un tramo del canal uniforme, y tomar los datos de la longitud, el ancho (en ambos extremos) y la profundidad (tres veces en cada extremo y en diferentes lugares) para calcular el volumen de agua. Deja caer un flotador en la parte superior. En la mayoría de los casos, se utilizaría una botella de medio litro llena de agua hasta la mitad. Esta operación debe repetirse 3 veces y calcularse el promedio del tiempo para tener mayor precisión (Barreto Sáenz, 2009).

Para el cálculo de caudal, primero se debe hallar el volumen de la zona delimitada tal como se muestra en la ecuación 2:

$$V = L \, x \, H \, x \, A \; (2)$$

Sin embargo, para llegar a el anterior cálculo se debe determinar el ancho que consiste en el promedio de los medidos en la zona. Dicho proceso se resume en la ecuación 3:

$$A = (A1 + A2)/2 \; (3)$$

Igualmente sucede con las profundidades y el tiempo, que se hallan con el promedio para poder hallar el volumen y a su vez el caudal, tal como se muestra en la ecuación 4, 5 y 6 respectivamente:

$$H = (H1 + H2 + H3 + H4 + H5 + H6)/6 \; (4)$$

$$(L1 + L2)/2 \; (5)$$

$$T = (t1 + t2 + t3)/3 \; (6)$$

Con los anteriores datos para la determinación del volumen y el tiempo, el cálculo de caudal consiste en la ecuación 7:

$$Q = V/T \; (7)$$

Donde, L es el largo del tramo, H es la profundidad promedio de la sección, A es el promedio de anchos, V es el volumen final, t es el tiempo en segundos del recorrido por el flotador, T es el tiempo promedio del recorrido por el flotador a lo largo del tramo seleccionado y Q es el caudal hallado.

8.2.3.1 Medición de caudal por método volumétrico.

Por lo general, se usa para cantidades muy pequeñas y requiere un recipiente para recolectar el agua. El caudal se calcula dividiendo el volumen de agua que se recolecta en el recipiente entre el tiempo que lleva recolectar ese volumen.

Para obtener una mayor precisión, se deberá repetir la operación cinco veces y tomar el promedio del tiempo (Barreto Sáenz, 2009).

8.3 Fase 2. Determinación del índice de vulnerabilidad al desabastecimiento Hídrico.

8.3.1 Actividad 4. Procesamiento y presentación de datos.

Se siguió la metodología planteada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) en el estudio nacional del agua (ENA) 2022, donde se estimó el índice de retención y regulación hídrica. En la ecuación 8 se muestra el cálculo para este parámetro.

$$IRH = Vp/Vt \ (8)$$

Donde: IRH: índice de Retención y Regulación Hídrica, Vp: volumen representado por el área que se encuentra por debajo de la línea de caudal medio y Vt: volumen total representado por el área bajo la curva de duración de caudales diarios. En la tabla 4 se muestran los rangos y categorías del IRH de la siguiente manera en la tabla 3:

Tabla 3.

Rangos y categorías del IRH.

Rango del indicador	Clasificación
Muy baja	<0.5
Baja	0.5-0.65
Moderada	0.65-0.75
Alta	0.75-0.85
Muy baja	>0.85

Nota. Fuente: IDEAM (2010).

El Índice de Uso de Agua (IUA) corresponde a la cantidad de agua utilizada por los diferentes sectores de usuarios en un periodo de tiempo ya sea anual o mensual, en una unidad espacial de referencia (área, zona, subzona) en relación

con la oferta hídrica superficial disponible para las mismas unidades de tiempo y espacio (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2010). La estimación de este índice se puede efectuar mediante la expresión 9.

$$IUA\ (jt) = (Dh\ (jt)\ /\ Oh\ (jt)\ )^{*}\ 100\ (9)$$

Donde, Dh (jt): Demanda hídrica sectorial en la unidad espacial de referencia j, en el periodo de tiempo t. Oh (jt): Oferta hídrica superficial disponible en la unidad espacial de referencia j, en el periodo de tiempo t.

En la Tabla 4, se muestra los rangos y categorías identificados para el Índice del Uso del Agua (IUA):

Tabla 4.

Rangos y categorías del IUA.

Rango del indicador	Clasificación
Muy baja	>50
Baja	20.1-50
Moderada	10.1-20
Alta	1-10
Muy baja	>=1

Nota. Fuente: IDEAM (2010).

Así mismo, para la implementación de la ecuación 6 se hizo la elaboración de curvas de duración de caudal y con empleo de herramientas de procesamiento de información como lo es Excel. Por otro lado, para la toma de datos se considerarán los caudales obtenidos de estaciones limnigráficas del IDEAM. En este caso, los valores serán tomados de la estación descrita en la tabla 5.

Tabla 5.

Características de la estación Limnigráfica.

Código	Estación Limnigráfica	m.s.n.m	Latitud	Longitud
24037001	LA PLAYA, CARDENILLO	3742	6.49955556	-72.3761389

Nota. Esta tabla muestra características como el código, nombre, altitud, latitud y longitud de la estación que se va a emplear. *Fuente: propia.*

8.4 Fase 3. Diseño del modelo mediante la metodología de la simulación basada en agentes.

8.4.1 Herramienta por implementar.

NetLogo es un entorno de modelo programable que simula fenómenos sociales y naturales. Uri Wilensky lo diseñó en 1999, pero desde entonces ha estado en constante desarrollo en el Centro de Aprendizaje Conectado y Modelado Basado en Computadora. Por otra parte, es ideal para modelar sistemas evolutivos. Los modeladores pueden operar independientemente con cientos o miles de "agentes" y darles instrucciones, lo cual, permite investigar cómo los patrones de nivel macro que surgen (emergen) de la interacción entre las personas y su comportamiento a nivel micro están conectados entre sí. Además, es un entorno de autoría que permite a los estudiantes, docentes y desarrolladores de planes de estudio crear sus propios modelos. NetLogo es simple para estudiantes y profesores, pero lo suficientemente avanzado como para ser una herramienta útil para investigadores en varios campos (Wilensky, 2023).

8.4.2 Actividad 5. Determinar variables que se van a aplicar tales como oferta y demanda hídrica.

Se conoce que el país no cuenta con un sistema de información continua y sectorial del uso del agua, ni ha hecho contabilizaciones históricas del agua usada de fuentes superficiales y subterráneas. El volumen de agua usada para el desarrollo de actividades socioeconómicas debe ser el resultado de las mediciones ejecutadas por los usuarios y reportadas a las instituciones relacionadas y autoridades ambientales regionales (Vargas Melo y Camargo Barrero, 2015). Teniendo en cuenta lo anterior, el cálculo del suministro de agua para la cuenca se hizo mediante la ecuación 10.

$$Saguai = Srioi + Sglaciar + Slluvia \ (10)$$

Donde, Saguai es el suministro total de agua (en m3/s), Sríoi es el suministro del flujo del rio, Sglaciar es el suministro a través del glaciar (en m3/s) y Slluviai es el suministro a través de precipitaciones (en m3/s).

Por otro lado, para determinar la demanda se emplea la ecuación 11.

$$DT = Dd + Da \ (11)$$

Donde, DT es la demanda total, Dd es la demanda por uso doméstico y Da es la demanda por uso agropecuario (Vargas Melo y Camargo Barrero, 2015). Todo en (m3/s).

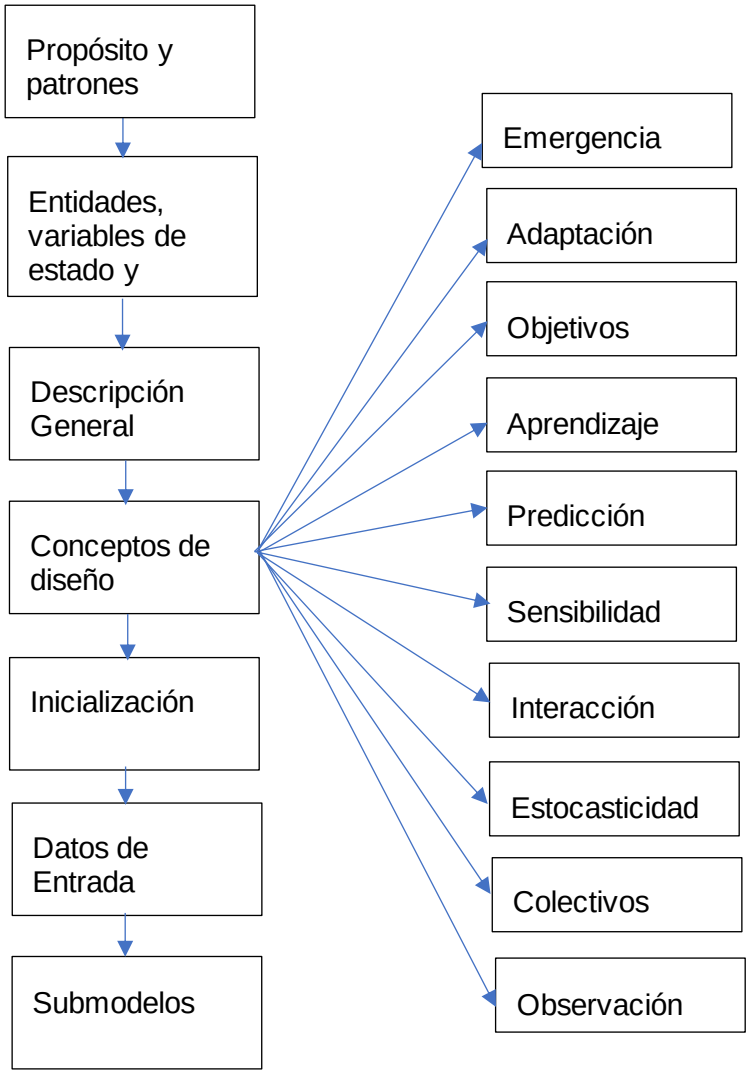
8.4.3 Actividad 6. Aplicación del protocolo ODD.

Grimm, Railsback junto con investigadores más optaron por un protocolo estándar que describe modelos basados en agentes y realimentar las ideas y conceptos, dando como resultado el trabajo publicado en la revista Ecological Modelling, titulado "A standard protocol for describing individual-based and agent-based models" (Grimm et al., 2006). En esta investigación se propone un protocolo estándar al que denominan ODD (Overview, Design concepts, and Details) (Descripción general, los conceptos de diseño y los

detalles), que consta de tres bloques principales que se subdividen en siete elementos: propósito, variables de estado y escalas, descripción y planificación de procesos, conceptos de diseño, inicialización, entradas del modelo y submodelos (Ontiveros y Calvo, 2017). Dicho protocolo se resume en la figura 5.

Figura *5*.

Etapas del protocolo ODD.



Fuente: propia

8.4.3.1 Propósito.

Todas las propuestas y modelos deben comenzar con una pregunta, propuesta o hipótesis. Como resultado, ODD comienza con un resumen del objetivo general del modelo. Aunque se menciona el objetivo de desarrollar el modelo, no se explica su funcionamiento (Ontiveros y Calvo, 2017).

8.4.3.2 Descripción general.

¿Qué entidad lo lleva a cabo y en qué orden? ¿Cuándo se activan las variables de estado? ¿Cómo se presenta el tiempo modelado como un continuo en el que pueden ocurrir tantos eventos discretos como procesos continuos, así como pasos discretos? A excepción de programas muy simples, se debe utilizar pseudocódigo para describir el programa en todos los detalles para que el modelo se pueda volver a aplicar desde ese código.

8.4.3.3 Conceptos de diseño.

No es necesario replicar el modelo porque el elemento "conceptos de diseño" del protocolo ODD no lo describe. Sin embargo, estos conceptos de diseño suelen ser distintivos de los modelos basados en agentes, pero sin duda no exclusivamente. Además, pueden ser esenciales para la interpretación de los resultados de un modelo porque las técnicas convencionales como las ecuaciones y los diagramas de flujo no pueden describirlos adecuadamente (Ontiveros y Calvo, 2017).

8.4.3.4 Inicialización.

Es necesario explicar cómo establecemos las condiciones iniciales del modelo al principio de la simulación, ya que los resultados del modelo frecuentemente dependen de dichas condiciones iniciales. El número de agentes creados y los valores asignados a sus variables de estado (localización, tamaño, color, etc.) son ejemplos de condiciones iniciales (Ontiveros y Calvo, 2017).

8.4.3.5 Datos de entrada.

En el modelo de sistemas reales, las dinámicas suelen ser impulsadas en parte por una serie temporal de variables ambientales, también conocidas como forzamientos externos. Por ejemplo, la precipitación anual en sabanas semiáridas puede afectar la variable de humedad del suelo, una variable de estado de celdas de cuadrícula y, por lo tanto, afecta a la dispersión y crecimiento de los árboles (Ontiveros y Calvo, 2017).

8.4.3.6 Submodelos.

Los submodelos muestran los procesos que realiza el modelo de manera detallada. La explicación precisa de los submodelos, es decir, las ecuaciones y los algoritmos, debe ser la primera y debe estar separada de la información adicional (Ontiveros y Calvo, 2017).

8.4.4 Actividad 7. Calibración del modelo.

Se proponen 3 escenarios tomando como referentes las condiciones de tasa de deshielo, cantidad de lluvias y tasa de crecimiento poblacional de diferentes años para obtener conocimiento del comportamiento de estas variables dentro de la zona de estudio y a la vez tomarlas como si fuesen condiciones actuales. Por otra parte, los escenarios consideran situaciones que sirvan para un evento base, favorable y catastrófico, para hacer diferentes predicciones.

8.5 Fase 4. Comparación de los resultados y posibilidades del modelo diseñado respecto a aquellos encontrados y considerados afines en la literatura con el fin de proponer lineamientos que favorezcan su aplicación.

8.5.1 Actividad 8. Revisión de la literatura.

Analizar la literatura existente para encontrar modelos y métodos similares que han sido propuestos y estudiados por otros investigadores. Analizar los hallazgos, las metodologías empleadas y las limitaciones reportadas en dichos estudios.

8.5.2 Actividad 9. Análisis comparativo.

Evaluar los resultados del modelo en comparación con los de la literatura, analizando si logra resultados similares. Además, se consideraron las características y capacidades particulares del modelo en comparación con otros modelos examinados en la literatura.

8.5.3 Actividad 10. Reconocimiento de ventajas y limitaciones.

Identifica las ventajas y limitaciones del modelo en comparación con otros modelos de la literatura. Determine las limitaciones o áreas de mejora en su modelo.

8.5.4 Actividad 11. Recomendaciones.

Hacer recomendaciones sobre sobre cómo usar y adaptar el modelo en diferentes contextos, cómo superar sus limitaciones o cómo aprovechar sus fortalezas para aplicaciones particulares, teniendo en cuenta los posibles escenarios de uso y las consideraciones éticas o legales pertinentes.

9 Resultados y Análisis

9.1 Indagación de estudios previos

La tabla 6 muestra los estudios, proyectos y publicaciones consultados con respecto a investigaciones para la obtención de referentes sobre la situación de un futuro escenario de escasez de agua.

Tabla *6.*

Estudios, proyectos y publicaciones consultadas

N°	Título	Tipo de Documento	Autores	Año	Zona de Estudio
1	Páramo Del Cocuy: Un Problema Ecológico Y Medioambiental En El Departamento De Boyacá	Informe	Yineth Juliana León Mondragón Alexa Gisela Martínez Ramírez Laura Natalia Valderrama Vargas	2018	PNN El Cocuy
2	Diagnóstico De Los Impactos Ambientales Causados Por Diferentes Actores Sociales Sobre Los Páramos Del Parque Nacional Natural El Cocuy, Colombia	Artículo de Revista	María Paula Ordóñez-Pachón	2016	PNN El Cocuy
3	Zisuma : Parque Nacional Natural El Cocuy, Cuenca Alta del Río Nevado.	Libro	Edisson Ramiro Cepeda Arias, Adriana Janneth Espinosa Ramírez, Franz Gutiérrez Rey, Mayer Isnardo Lagos López, Juan Alonso Neira Simijaca	2020	Microcuencas de los Ríos Cardenillo, Cóncavo, San Pablín, Corralitos y Lagunillas pertenecientes a la cuenca Alta del Río Nevado
4	Implementación de bimodales estimativos de la calidad ecosistémica en el nevado del cocuy al año 2030 producto del retroceso glaciar	Trabajo de Grado	Nicolás Herrera Vargas	2021	PNN El Cocuy

5	Identificación de riesgos y factores de contaminación del Río Cardenillo a su paso por la Sierra Nevada del Cocuy Güicán	Trabajo de Grado	Angélica Sánchez Suescún	2015	Río Cardenillo
6	Estudio Nacional del Agua	Estudio	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible e IDEAM	2022	Colombia
7	Evaluación del retroceso glaciar de la Sierra Nevada del Cocuy, Colombia a partir de la clasificación de imágenes multisensorial	Artículo de Revista	Sergio Mauricio Molano, Diana Paola Cárdenas, Howard Snaider Gómez; Dayana Mairely Alvarado, Andrés Fernando Galindo, Jeisson Fabian Sanabria, Juan Sebastián Gómez Neita	2022	Sierra Nevada del Cocuy
8	Análisis De Situación De Salud Con El Modelo De Los Determinantes Sociales De Salud, Municipio De Güicán De La Sierra Boyacá 2018	Informe	Neyla Lizneyld Riscanevo Puentes	2018	Güicán De La Sierra
9	Unidades Geomorfológicas Del Territorio Colombiano	Estudio	Instituto De Hidrología, Meteorología Y Estudios Ambientales, IDEAM	2000	Zona litoral y fluvial del Caribe Central colombiano

10	Análisis Multitemporal Del Retroceso Glaciar De La Sierra Nevada Del Cocuy Ubicada En Los departamentos De Boyacá y Arauca entre Los Años 1992,2003 Y 2014	Artículo, Trabajo de Grado Especialización	Jeimy Carolina Peña Suárez	2015	Sierra Nevada del Cocuy
11	Revisión de planes de saneamiento y manejo de vertimientos de 11 municipios del departamento de Boyacá	Lizeth Dayanna Rodríguez Sandoval	Trabajo de grado en la modalidad práctica con proyección empresarial o social para optar al título de Ingeniero Ambiental	2023	Belén, Güicán, Paz de río, Sora, Susacón, Tipacoque, San Eduardo, Chita, Rondón, Briceño y Pauna
12	Análisis Situacional De Salud Modelo Determinantes Sociales Güicán de la Sierra, Boyacá 2017	Secretaria de Salud	Informe	2017	Güicán de la Sierra, Boyacá

Fuente: Propia

9.2 Encuesta a la comunidad rural.

Dentro de las actividades programadas para el desarrollo de este trabajo, se creó y entregó una encuesta a algunos usuarios del acueducto "El Tabor", como se muestra en el anexo N°1 y la figura 6, en este caso a personas ubicadas en los sectores Tabor Chiquito y La Candelaria. Después de tabular, graficar y analizar cada pregunta, los resultados de esta encuesta se presentan a continuación. Por otra parte, dentro de las encuestas hechas se hizo un registro de consumo mediante la realización de mediciones de caudal por método volumétrico, para conocer la demanda de cada hogar. Dichos datos

fueron registrados en la planilla mostrada en el anexo 2 y los resultados son mostrados en la tabla 11.

Figura *6.*

Diligenciamiento de la encuesta.



Fuente: propia.

9.2.1 Información General

- **Municipio:** Güicán de la Sierra Acueducto “El Tabor”
- **Universo:** 150 suscriptores (Hernández Diaz, 2014)
- **Tamaño de la muestra:** 21: 14%
- **Método:** Encuesta personal domiciliaria.
- **Tipo de servicio:** Consumo humano.

9.2.2 Resultados Encuesta.

Los resultados que hacen referencia a las preguntas de la encuesta (anexo 1) se muestran en gráficas (figura 8 a 16) y tablas (tabla 7 a 9), junto con una explicación de los valores.

Figura *7.*

Porcentaje de personas encuestadas que son pertenecientes al acueducto El Tabor.



Nota. Todas las personas encuestadas son pertenecientes al acueducto El Tabor. *Fuente: propia.*

Tabla 7.

Actividades pecuarias a la que se dedica cierto porcentaje de usuarios encuestados.

Actividad Pecuaria	%Usuarios
Bovino	33.33%
Bovino y Ovino	9.52%
Ovino	14.28%
Avícola	14.28%
Ninguna	28.57%
Total	99.98%

Nota. Gran parte de los encuestados realizan actividades como la de bovinos. *Fuente: propia.*

Tabla *8*.

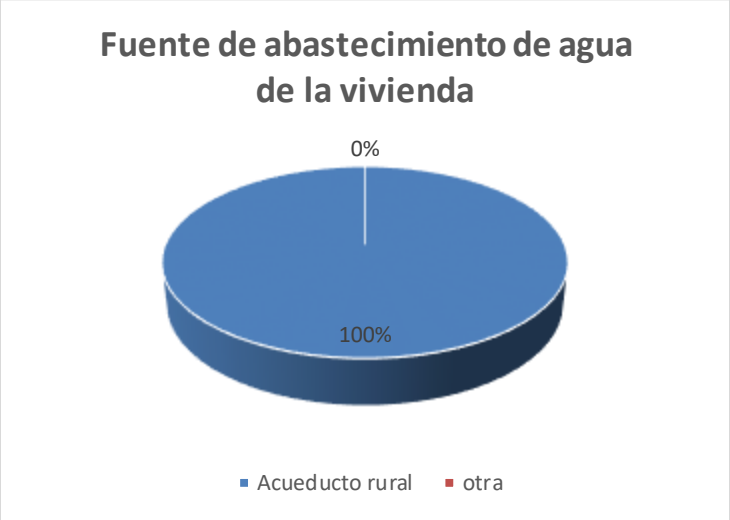
Actividades agrícolas a la que se dedica cierto porcentaje de usuarios encuestados.

Actividad Agrícola	%Usuarios
Arveja	14.28%
Arveja, trigo, maíz	4.76%
Cebolla	4.76%
Maíz	14.28%
Ninguno	33.33%
Papa	4.76%
Papa y pastos	4.76%
Pastos	4.76%
Trigo	4.76%
Trigo y Maíz	4.76%
Zanahoria	4.76%
Total	99.98%

Nota. En este caso, la mayoría que cuenta con un 33.33% de usuarios no realiza alguna actividad agrícola. *Fuente: propia.*

Figura *8.*

Porcentaje de personas que tienen como fuente de abastecimiento únicamente el acueducto rural.



Nota. En este caso todas las personas tienen como fuente de abastecimiento el sistema de acueducto. *Fuente: propia.*

Figura *9.*

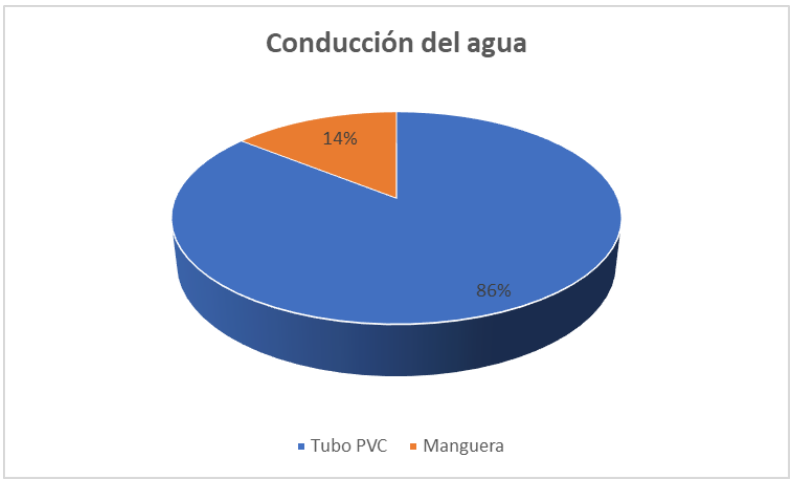
Porcentaje de personas que tienen Concesión del recurso hídrico.



Nota. Todos los encuestados tienen concesión del agua. *Fuente: propia.*

Figura *10.*

Tipo de conducción de agua que tienen los usuarios encuestados.



Nota. El 86% de los usuarios cuenta con Tubo PVC para la conducción del agua. *Fuente: propia.*

Figura *11.*

Porcentaje de usuarios con permanencia del recurso hídrico.



Nota. El 95% de los usuarios encuestado tienen acceso al recurso hídrico de manera permanente. *Fuente: propia.*

Figura *12.*

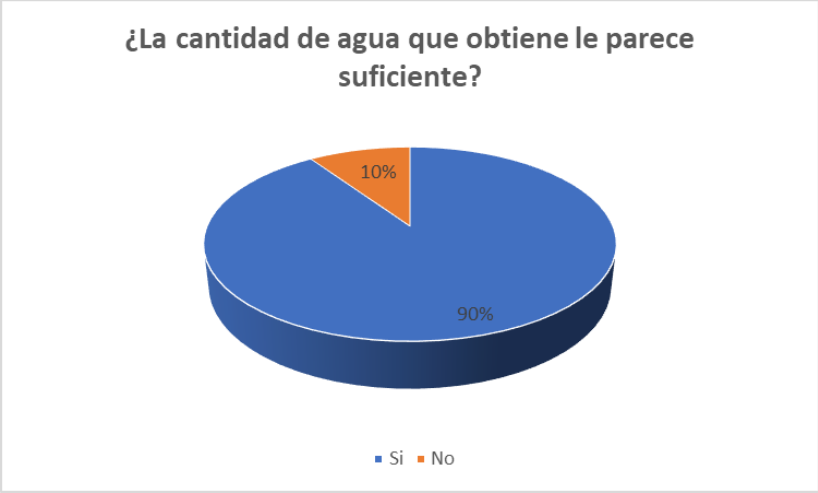
Porcentaje de usuarios con tanque de almacenamiento.



El 86% de los usuarios encuestados cuenta con tanque de almacenamiento, el 14% no cuenta con tanque de almacenamiento. *Fuente: propia.*

Figura *13.*

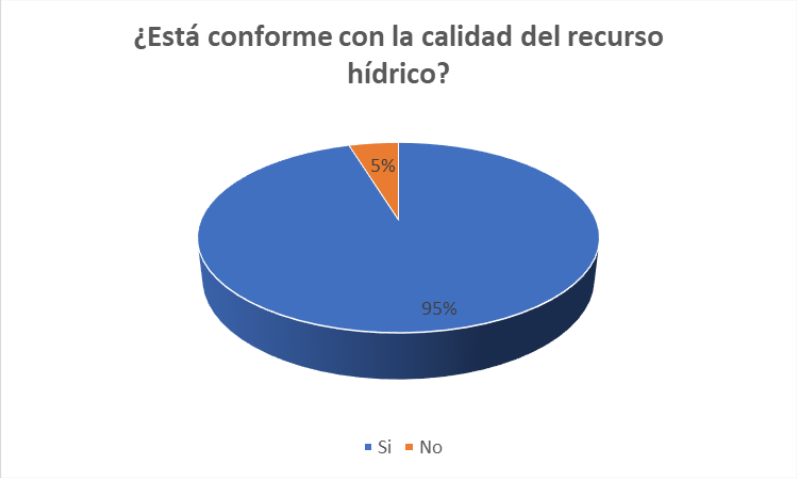
Porcentaje de personas que están satisfechas con la cantidad del recurso hídrico.



Nota. El 90% de los usuarios están satisfechos con la cantidad de agua que se presenta en sus viviendas. Fuente: propia.

Figura *14.*

Porcentaje de personas que están satisfechas con la calidad del recurso hídrico.



Nota. El 95% de los usuarios están satisfechos con la calidad del agua que se presenta en la zona. Gran parte de ellas respondieron que el agua al ser de glaciar es un agua completamente limpia y adecuada para el consumo. *Fuente: propia.*

Figura *15.*

Porcentaje de personas que están satisfechas con los niveles del recurso hídrico.



Nota: El 86% de los usuarios consideran que los niveles de agua que se presenta en la zona son aceptables, mientras que, el 9% los perciben altos y el 5% bajos. *Fuente: propia.*

Tabla *9*.

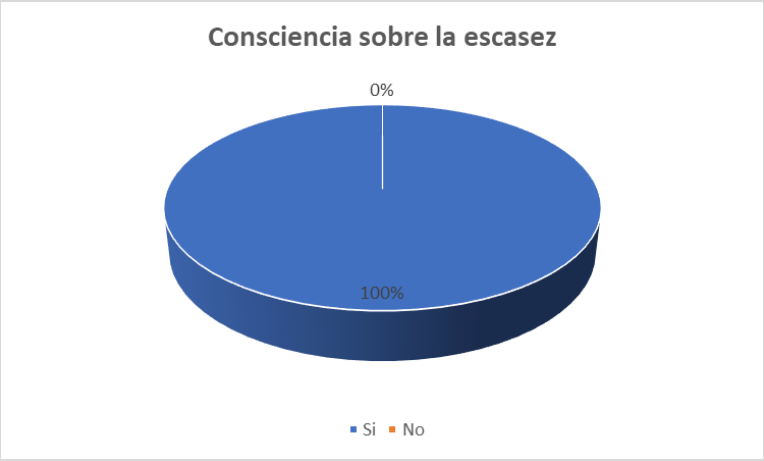
Prácticas de conservación que realiza cierto porcentaje de usuarios encuestado.

Práctica de conservación	% de usuarios
Ahorro de agua, cerrar las llaves después de usarlas	80.95%
Proyectos ambientales con los niños sobre el cuidado del agua	4.76%
Reservorios de Agua lluvia	4.76%
Reutilizar agua para otras actividades	4.76%
Reutilizar agua para otras actividades y cerrar las llaves después de cada uso	4.76%
Total	99.99%

Nota. Gran parte de los usuarios encuestados tiene como practica de conservación el ahorro de agua y cerrar las llaves después de usarlas. *Fuente: propia.*

Figura *16.*

Consciencia sobre escasez de agua en un futuro.



Nota. El 100% de los usuarios encuestados son conscientes de la posible escasez de agua que puede haber en un futuro*. Fuente: propia.*

9.3 Obtención de información mediante el uso de plataformas oficiales, oficina de servicios públicos de Güicán-Boyacá y medición de caudales.

En este caso, se solicitó información a la oficina de servicios públicos, obteniendo como resultado un informe acerca del acueducto "El Tabor". Así mismo, mediante la oficina de PNN El Cocuy en Güicán se obtuvo una base de datos con el registro de los aforos realizados en los últimos 3 años. La información de dichos documentos se encuentra en la tabla 10.

Tabla *10*.

Información dada por la Unidad de Servicios públicos de Güicán de la Sierra.

N°	Título	Tipo de Documento	Autores	Año	Zona de Estudio
1	Diagnostico para el programa de uso eficiente y ahorro del agua acueducto "El Tabor"	Informe	Diego Iván Hernández Díaz Unidad De Servicios Públicos Domiciliarios USPD	2014	Vereda El Tabor
2	Consolidato Recurso Hídrico	Base de datos	Oficina de PNN El Cocuy (Güicán)	2018-2022	Río Cardenillo

Fuente: propia.

Por otra parte, como se mencionó anteriormente se registró en una planilla la demanda doméstica y agrícola de los usuarios, tal como lo representa la tabla 11.

Tabla *11*.

Medición de Caudal en cada uno del os hogares de cada uno de los usuarios encuestados.

Tipo de Caudal																	
Ducha			Lavamanos			Inodoro			Cocina			Lavado de ropas			Agrícola		
# de usos (días por semana)	Tiempo de uso (min)	Caudal (L/min)	# de usos (por día)	Tiempo de uso (min)	Caudal (L/min)	# de usos (por día)	Tiempo de uso (min)	Caudal (L/min)	# de usos (por día)	Tiempo de uso (min)	Caudal (L/min)	# de usos (días por semana)	Tiempo de uso (min)	Caudal (L/min)	# de usos (días por semana)	Tiempo de uso (min)	Caudal (L/min)
3	5	2.8	3	1	2	2	1	6	5	5	5	7	20	3.1			
1	5	1.5	2	1	2	3	1	6	3	20	3.8	3	60	2.8	7	1440	54
7	7	1.8	2	3	0.9	3	1	6	10	7	4.2	3	10	1.5	7	1440	54
3	5	2.9	2	1	2	2	1	6	4	5	1.4	2	60	4	7	1440	54
7	5	3	3	2	1.5	3	1	6	10	5	1.9	1	40	3.1	1	480	54
7	7	2.2	4	2	0.62	3	1	4.8	4	10	1	7	15	1.2	7	1440	4.8
3	10	2	3	2	1.6	2	1	6	3	15	1.6	1	10	1.4			
3	6	1.05	4	1	1.6	3	1	6	6	10	2.1	1	60	2.4	7	1440	15
7	20	6.8	4	1	1	4	1	6	6	10	1.1	1	180	0.8	4	480	54
7	7	1.8	3	2	1.6	2	1	6	3	5	1.5	3	60	1.6	7	1440	54
			3	2	0.9	2	1	6	2	360	1.3				1	1440	4.8
3	3	1.5	3	1	0.7	4	1	6	6	10	1.4	1	60	1.8	7	480	54
7	20	6.8	4	1	1	4	1	6	6	10	1.1	1	180	0.8	4	480	54
7	10	1.3	5	1	1.3	3	1	6	5	2	1.2	2	30	0.8	4	120	1
2	5	2.1	3	2	1.6	2	1	6	2	2	1.2	1	60	3			
3	10	1.3	5	1	1.3	2	1	6	5	2	1.2	1	30	0.8	7	60	15
7	10	2.9	2	3	0.25	1	1	6	5	2	1.4	1	15	7			
						2	1	6	6	3	1.7				2	20	1.7
5	7	2.9	4	5	1.1	3	1	4.8	4	10	1.4	1	15	7	1	30	7
7	10	1	2	5	1.1	3	1	4.8	6	2	0.8	2	30	8.9	7	20	8.9
7	6	2.2	3	3	0.62	5	1	4.8	4	10	1	1	60	7.2	7	1440	4.8

Fuente: propia

Figura *17.*

Medición de caudal domestico con método volumétrico.



Fuente: propia.

Figura *18.*

Medición de caudal agrícola con método volumétrico.



Fuente: propia.

Así mismo, se hizo el aforo a uno de los ríos relacionados con la microcuenca del río Cardenillo, denominado El Mosco. La ubicación de la sección para dicha actividad se realizó cerca del Puente El Calvario (Lat. 6.49036111 y Long. -72.407). Para la medición de caudal se empleó el método flotador y se obtuvieron los resultados de la tabla 12.

Tabla *12*.

Resultados del aforo al río El Mosco.

Q Río Mosco		
(A1+A2)/2	4.49	m
(H1+Hn)/n	0.29	m
(L1+L2)/2	7.90	m
T	16	s
Q	0.64	m3/s

Fuente: propia.

En este caso, L es largo promedio, A es ancho promedio, H es altura promedio, T es el tiempo promedio, n el número de alturas tomadas en la medición Q el caudal tomado.

Figura *19.*

Medición de caudal con método flotador



Fuente: propia.

9.4 Procesamiento y presentación de datos (Índice de Vulnerabilidad Hídrica)

9.4.1 Índice de Regulación Hídrica.

Para el procesamiento de datos, se ubicaron los valores en una matriz y se obtuvieron los promedios mensuales para complementar la información mediante el promedio aritmético y el promedio multianual, como se muestra en la tabla 13. En este análisis se consideraron los años 2014-2022 debido a que es el único periodo con datos disponibles de la estación La Playa, Cardenillo.

Tabla *13*.

Matriz de caudales.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
2015	2.036	1.923	1.825	1.755	1.683	1.617	1.564	1.511	1.468	1.411	1.375	1.343	1.626
2016	1.308	1.281	1.256	1.222	1.193	1.166	1.148	1.121	1.093	1.071	1.054	1.043	1.163
2017	1.026	1.015	1.013	1.012	1.004	0.993	0.984	0.962	0.950	0.950	0.936	0.925	0.981
2018	0.914	0.903	0.892	0.885	0.878	0.872	0.868	0.859	0.847	0.833	0.826	0.819	0.866
2019	0.806	0.793	0.783	0.776	0.770	0.759	0.748	0.736	0.727	0.716	0.704	0.691	0.751
2020	0.681	0.671	0.657	0.646	0.637	0.632	0.619	0.608	0.596	0.584	0.571	0.558	0.622
2021	0.551	0.543	0.532	0.523	0.517	0.515	0.507	0.493	0.481	0.470	0.452	0.440	0.502
2022	0.428	0.414	0.403	0.384	0.366	0.335	0.309	0.257	0.880	0.862	0.846	0.831	0.526
Promedio	0.969	0.943	0.920	0.900	0.881	0.861	0.843	0.819	0.880	0.862	0.846	0.831	0.880

Fuente: propia.

La Tabla 13 muestra que los percentiles se ubicaron en intervalos de 0.01 debido a la metodología de procesamiento de datos utilizada. El caudal (m3/s) se representa con los percentiles de la matriz de caudales y el percentil correspondiente a la fila. El tiempo total se calcula convirtiendo el número de años de la serie (8 años) en segundos. Para el delta del tiempo, el tiempo total se multiplica por el intervalo de percentiles, que es 0.01. Para encontrar Vt, el caudal se multiplica por el delta del tiempo. En la Tabla 14, el percentil 85, que corresponde al caudal ambiental según la metodología ENA (2022), es la fila verde.

Tabla *14*.

Cálculos de Vt y Vp.

%	Percentil	Caudal	Tiempo total	Delta tiempo	Vt	Vp	Qamb
0	1	0.257	252288000	2522880	649373.035	649373.035	0.516
0.01	0.99	0.307	252288000	2522880	773477.572	773477.572	0.516
0.02	0.98	0.332	252288000	2522880	838293.68	838293.680	0.516
0.03	0.97	0.361	252288000	2522880	910905.135	910905.135	0.516
0.04	0.96	0.380	252288000	2522880	959401.584	959401.584	0.516
0.05	0.95	0.398	252288000	2522880	1004265.43	1004265.430	0.516
0.06	0.94	0.410	252288000	2522880	1035450.76	1035450.761	0.516
0.07	0.93	0.423	252288000	2522880	1067355.67	1067355.671	0.516
0.08	0.92	0.435	252288000	2522880	1098630.23	1098630.231	0.516
0.09	0.91	0.447	252288000	2522880	1127710.19	1127710.190	0.516
0.1	0.9	0.461	252288000	2522880	1163226.81	1163226.812	0.516
0.11	0.89	0.475	252288000	2522880	1197656.63	1197656.634	0.516
0.12	0.88	0.486	252288000	2522880	1225527.04	1225527.045	0.516
0.13	0.87	0.498	252288000	2522880	1256209.74	1256209.739	0.516
0.14	0.86	0.509	252288000	2522880	1284860.66	1284860.655	0.516
0.15	0.85	0.516	252288000	2522880	1301009.27	1301009.268	0.516
0.16	0.84	0.518	252288000	2522880	1307495.15	1307495.153	0.516
0.17	0.83	0.525	252288000	2522880	1323546.24	1323546.241	0.516
0.18	0.82	0.533	252288000	2522880	1345289.21	1345289.214	0.516
0.19	0.81	0.543	252288000	2522880	1370227.43	1370227.432	0.516
0.2	0.8	0.551	252288000	2522880	1389633.36	1389633.365	0.516

Fuente: propia.

El valor de Vp es igual a Vt hasta que el caudal se aproxime al promedio multianual mencionado. En este cálculo, el promedio es 0.880, lo que se acerca al caudal del percentil de 0.58 (0.881). Vt es igual a Vp en ese valor, y Vp repite el valor anterior. La Tabla 15 muestra este procedimiento.

Tabla *15*.

Caudal que se aproxima al promedio anual.

%	Percentil	Caudal	Tiempo total	Delta tiempo	Vt	Vp	Qamb
0.55	0.45	0.869	252288000	2522880	2191974.97	2191974.975	0.516
0.56	0.44	0.873	252288000	2522880	2202927.88	2191974.975	0.516
0.57	0.43	0.878	252288000	2522880	2215475.9	2191974.975	0.516
0.58	0.42	0.881	252288000	2522880	2222130.93	2191974.975	0.516
0.59	0.41	0.885	252288000	2522880	2233356.07	2191974.975	0.516

Fuente: propia.

Después de procesar esta información se emplea la ecuación 8, los resultados se muestran en la tabla 16.

Tabla *16*.

Índice de Regulación Hídrica.

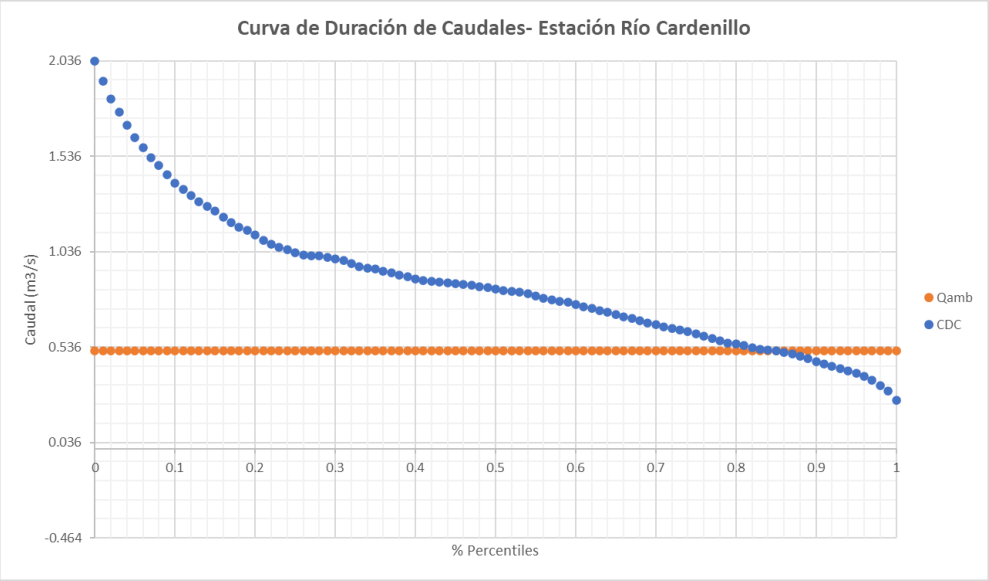
Vp	186714160.592
Vt	224111999.9
IRH=Vp/Vt	**0.83**
IRH	Alto

Fuente: propia.

Finalmente, se representa la curva de duración del flujo (figura 20), donde el eje X es la columna de percentiles y el eje Y, el flujo total.

Figura *20.*

Curva de Duración de Caudales.



Fuente: propia.

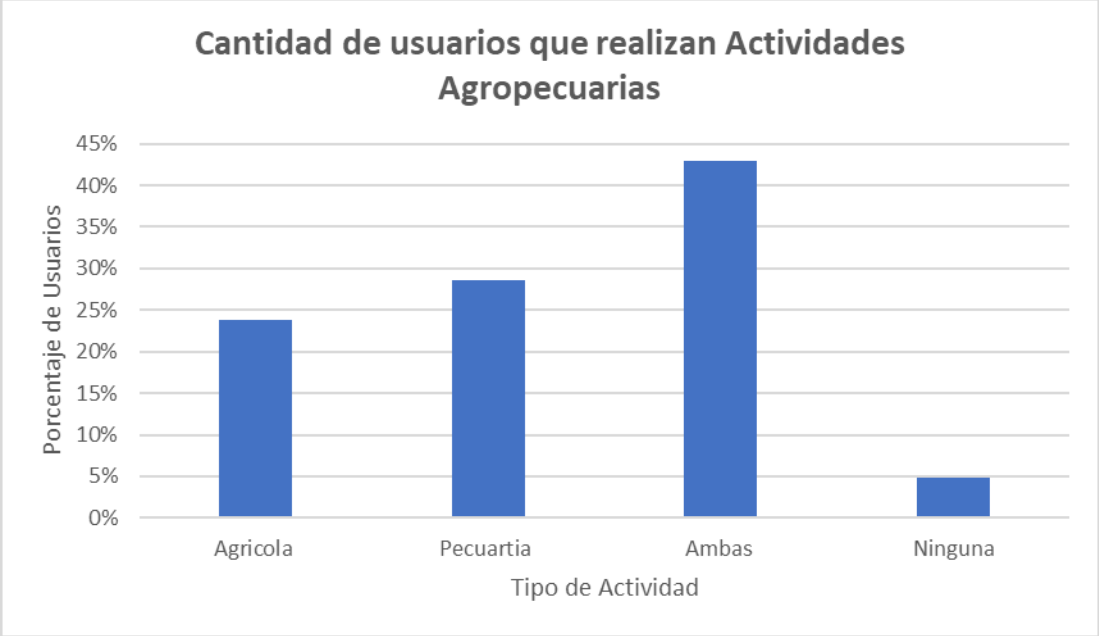
9.4.2 Índice del Uso del Agua

Para este índice se tuvieron en cuenta los datos de la tabla 11 que muestra la demanda agrícola y doméstica que hay en la zona. Del mismo modo, se consideraron los datos de caudal dados por la oficina del Parque Nacional Natural El Cocuy, los valores del aforo del río Mosco y la cantidad de lluvia que se presenta en la zona (valores dados por la estación de SIERRA NEVAD COCUY), dichos datos se usaron en m3/año en la aplicación de la fórmula 9. Debido a la poca información para encontrar la oferta hídrica subterránea, se toma en cuenta solo la oferta hídrica superficial (IDEAM, 2015). Los resultados se muestran en la tabla 17.

Por otra parte, en cuanto a la empleabilidad del recurso hídrico la comunidad encuestada presenta las tendencias mostradas en la figura 21 referentes a actividades agropecuarias.

Figura *21.*

Usuarios que realizan Actividades Agropecuarias.



Fuente: propia.

Tabla *17*.

Índice del Uso del Agua

Río	m3/año Domestico	m3/año Agrícola	TOTAL	OHTS (m3/año)	OHTD	IUA	Categoría IUA
Cardenillo	3829.4184	239614.224	243443.6424	86047536.2	86047535.68	0.282917623	Muy Bajo

Nota. En este caso, OHTD se obtiene de la diferencia del OHTS y el caudal ambiental que se presenta en la tabla 14. Fuente: propia.

9.4.3 Índice de Vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico.

Con los anteriores resultados y teniendo en cuenta la interpretación de éstos por parte del IDEAM, dicha microcuenca presenta un índice muy bajo. Todo esto se presenta en la tabla 18.

Tabla *18*.

Índice de Vulnerabilidad al desabastecimiento Hídrico

Categoría IUA	Categoría IRH	Categoría IVH
Muy Bajo	Alto	Muy Bajo

Fuente: propia.

9.5 Determinar variables que se van a aplicar tales como oferta y demanda hídrica.

Para determinar el suministro de agua en la zona se recurrió a los aforos hechos por parte de la Oficina de Parques Nacional Natural El Cocuy en Güicán, datos de precipitación mensuales por la estación mostrada en la tabla 19, el aforo hecho en el rio mosco, la determinación de agua proporcionada por el glaciar y el uso de la ecuación 10.

Tabla *19*.

Estación de la cual se tomaron los datos de precipitación.

Código	Estación Climática	m.s.n.m	Latitud	Longitud
24035240	SIERRA NEVAD COCUY	3716	6.410083333	-72.37519444

Fuente: propia

Por otra parte, en la determinación de demanda se consideraron los resultados de la tabla 11, de los cuales se obtuvo un patrón mensual de consumo y a la vez anual para la aplicación de la ecuación 11 dando como resultado los valores de la tabla 20.

Tabla *20*.

Resultados de la demanda de agua en la zona

Cantidad de personas por establecimiento/vivienda	Caudal Doméstico (L/mes)	Caudal Agrícola (L/mes)	Caudal Total (L/mes)	Caudal Total (L/año)
6	37908	0	37908	454896
2	18972	2332800	2351772	28221264
3	31860	2332800	2364660	28375920
7	23898	2332800	2356698	28280376
3	13818	2332800	2346618	28159416
3	7268.4	207360	214628.4	2575540.8
4	12416	0	12416	148992
3	15490.8	648000	663490.8	7961889.6
3	22428	2332800	2355228	28262736
4	11412	2332800	2344212	28130544
5	30690	207360	238050	2856600
4	16560	2332800	2349360	28192320
	22428	2332800	2355228	28262736
2	3354	1920	5274	63288
1	1596	0	1596	19152
2	3354	27000	30354	364248
1	1761	0	1761	21132
1	1278	272	1550	18600
1	3598	840	4438	53256
5	15702	5340	21042	252504
3	23326	207360	230686	2768232
63	319118.2	19967852	20286970.2	243443642.4

Fuente: propia.

La demanda total proporcionó como resultado 243443642.4 L/s, los cuales se pasaron a unidades de m3/s obteniendo un valor de 0.00772 m3/s.

9.6 Aplicación del protocolo ODD.

9.6.1 Propósito.

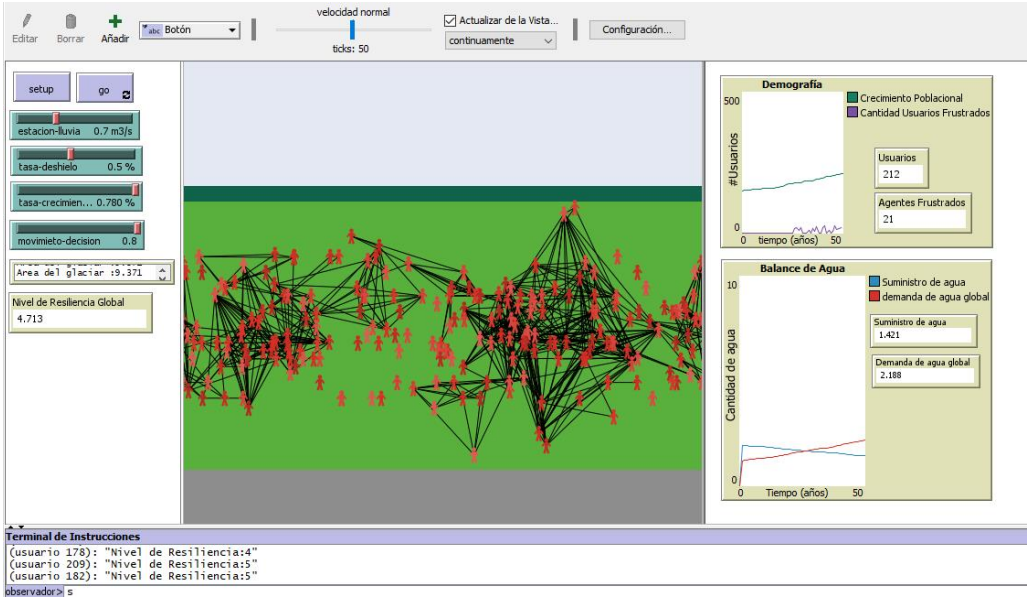
Se sigue el protocolo ODD en el presente trabajo con el fin de diseñar un modelo de simulación del comportamiento humano en situaciones de emergencia, en este caso, un posible escenario de escasez de agua.

9.6.2 Entidades.

Para determinar el funcionamiento del modelo, se crea un escenario básico, favorable y catastrófico. La figura 22 muestra la interfaz de simulación basada en agentes implementada en Netlogo, así como un escenario de escasez de agua en el cual hay personas que se abastecen de un glaciar, tal como lo son los usuarios del Acueducto El Tabor del municipio de Güicán-Boyacá.

Figura *22.*

Interfaz modelo de simulación en Netlogo.



Fuente: propia.

Las variables que interactúan con el modelo que se desea implementar se muestran en la tabla 21:

Tabla *21*.

Variables del modelo en la interfaz de Netlogo.

Variables	Descripción	Tipo	Referencia
estacion-lluvia	Suministra la cantidad de lluvia que se puede presentar en la zona .	Deslizador	Estación SIERRA NEVAD COCUY (IDEAM)
tasa-deshielo	Es una variable que permite determinar la cantidad de agua que proporciona el glaciar en la zona teniendo en cuenta la tendencia de retroceso que se presenta desde 1987 a 2021.	Deslizador	(Molano et al., 2022)
tasa-crecimiento	Determina el crecimiento de población en la zona considerando una tendencia del año 2016.	Deslizador	(Riscanevo Puentes, 2018)
movimiento-decision	Umbral que limita el desplazamiento en búsqueda de agua	Deslizador	(Magallanes Reyes, 2015)
patches-own [areaglaciar]	Representa el área del glaciar que interviene en el modelo	Interna	(Hernández Diaz, 2014)
turtles-own [	Probabilidad de migración para cada agente. Variable aleatoria	Interna	Autor

migracion-probabilidad]	considerando movimiento-decision.		
suministro-agua-global	Es la sumatoria del agua de los ríos, de la lluvia y del agua que proviene del glaciar	Global	.(Magallanes, 2015)
suministro-rios	Sumatoria del agua de los ríos que abastecen a la zona	Global	Trabajo de Campo Consolidato del recurso Hídrico (2022)
vereda	Patches que representan el área de la vereda	Parcela	(Hernández Diaz, 2014)
demanda-agua	Cantidad de agua que se consume en la zona actualmente	Global	Trabajo de Campo. Autor.
demanda-agua-global	Actualización de demanda en relación con el Crecimiento poblacional en la zona	Global	Depende de demanda-agua y tasa-crecimiento. *Fuente: propia*
pueblo	Patches que representan el área de la zona urbana	Parcela	(Gobernación de Boyacá, 2017)
tiempo	Periodo en el cual se realiza la simulación. En este caso, consta de 50 años.	Global	Autor

velocidad-retroceso	Velocidad en la cual el glaciar se derrite	Global	(Medioambiente,2016)
paramo	Patches que se encuentran entre la vereda y la zona urbana	Parcela	Autor
nivel-resiliencia	Nivel de resiliencia actual. Se mide en una cantidad de tiempo.	Global	Autor
nuevo-nivel-resiliencia	Actualización del nivel-resiliencia. Se mide en un periodo de 4 a 6 años	Global	(Magallanes Reyes, 2015)
factor-disminución	Reduce el nuevo-nivel-resiliencia cuando la demanda de agua es mayor al suministro	Global	Autor
agentes-conflicto	se emplea para almacenar una lista de usuarios que cumplen con ciertos criterios (escasez de suministro de agua y baja resiliencia) y que se creen posibles fuentes de conflicto.	Agente	Autor
usuarios-frustrados	Se identifican como aquellos agentes en conflicto que crean redes con otros usuarios que comparten los mismos rasgos	Agente	Autor

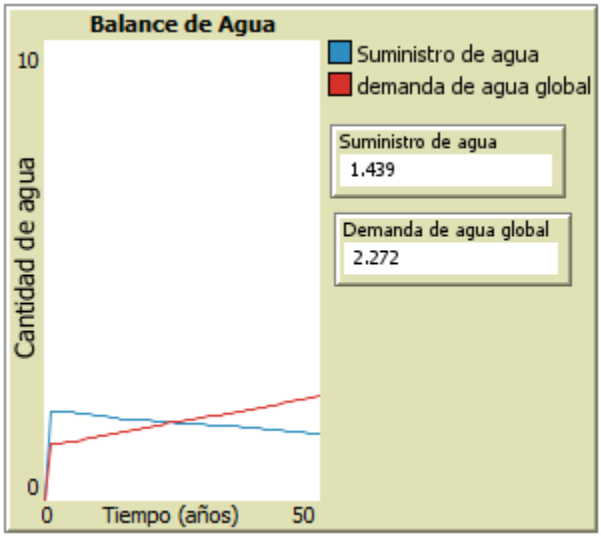
prior-probabilidad	Simboliza la probabilidad previa a la actualización bayesiana de un evento, particularmente la probabilidad de migración para los usuarios en conflicto.	Agente	Autor
posterior-probabilidad	Se emplea en el código para la toma de decisiones sobre la migración de agentes en función de la probabilidad actualizada.	Agente	Autor

Fuente: propia.

Los datos de entrada del modelo se pueden cambiar con los deslizadores y los datos de salida se pueden presentar después de la corrida o simulación del modelo. Para el modelo, tanto los datos de entrada como los de salida están conectados a los factores y agentes que participan. Los datos de salida o los resultados se pueden ver en el modelo de tres maneras: a través de gráficas, monitores y ventanas de salida; un ejemplo de ello se presenta en la figura 23.

Figura *23.*

Gráficas y monitores que indican los datos de salida del modelo.

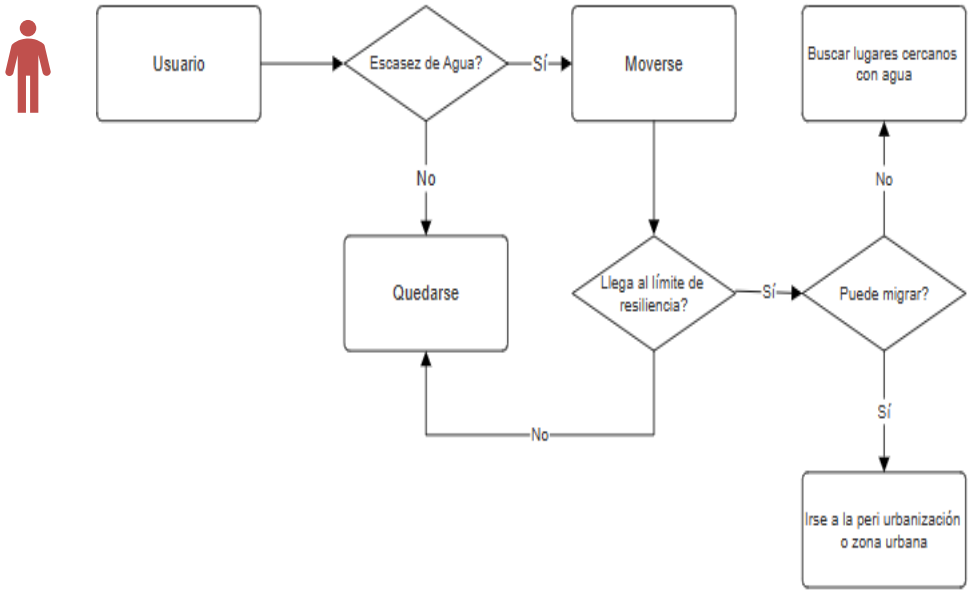


Fuente: propia.

Los agentes del modelo tienen características que los distinguen de los demás tales como su nivel de resiliencia y probabilidades para migrar. El código define estos rasgos como variables locales, que son inherentes a cada agente. La figura 24 muestra cuando el usuario detecta escasez y finaliza en el que este alcanza un límite de resiliencia. Si el individuo encuentra condiciones para migrar, lo hará hacia la zona urbana y en caso contrario buscará un lugar cercano con agua.

Figura *24.*

Decisión de los agentes.



Fuente: propia

El modelo es una representación de los próximos cincuenta años de la zona de estudio. Cada vez que se ejecuta un ciclo completo de simulación, la historia de la vereda cambia. El Tabor avanza un año que se representa por un tick. Este modelo solo durará 50 ticks. Para llevar a cabo esta simulación, se establecen las condiciones iniciales del entorno, tales como la distribución del espacio entre la vereda, el páramo, la ciudad y el glaciar. Se crea un grupo inicial de usuarios con atributos aleatorios, como su ubicación en el espacio, su nivel de resiliencia y su probabilidad de migración. Posteriormente, la región recibe una gran cantidad de lluvias y el deshielo del glaciar se regula mediante deslizadores, lo que tiene un impacto en la cantidad de agua disponible.

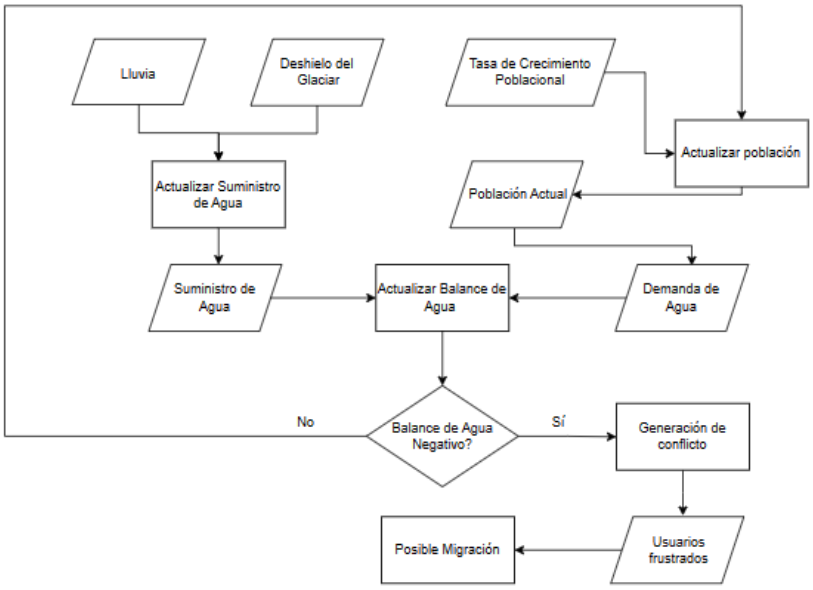
Con lo anterior, se restablece el suministro global de agua, teniendo en cuenta también el abastecimiento de los ríos y restando una demanda de agua aleatoria. Se simula el incremento de la población a través de la creación de nuevas

tortugas ubicadas aleatoriamente y la demanda de agua global aumenta en función de la tasa de crecimiento estipulada. El siguiente paso consiste en evaluar la resiliencia de cada usuario considerando la escasez de agua y otros factores para así ajustar el nivel de resiliencia de acuerdo con los impactos del agua.

Se identifican los usuarios en la vecindad que están en conflicto debido a la insolvencia del recurso hídrico con resiliencia insuficiente y se crean enlaces entre estos agentes para formar redes de frustración. Finalmente, con el método de Bayes se actualiza la probabilidad de migración de los usuarios en conflicto y se toma la decisión de migrar o permanecer en función de la probabilidad calculada. El flujo del código durante cada ciclo o temporada se muestra en la figura 25.

Figura *25.*

Resumen del proceso.



Nota. Adaptado de *Climate Change And The Potential For Conflict And Extreme Migration In The Andes: A Computational Approach For Interdisciplinary Modeling And Anticipatory Policy-Making* (p. 87), por J.M. Magallanes Reyes

La migración y los conflictos resultarán del equilibrio hídrico, que es el resultado de la interacción de dos sistemas (natural y social) (Magallanes, 2015). Mientras que el sistema natural se define como el suministro de recursos hídricos a través de la microcuenca del río Cardenillo, la lluvia local y el agua del glaciar, el sistema social se define como la necesidad de los usuarios de consumir agua.

9.6.3 Conceptos de diseño.

9.6.3.1 Emergencia.

En este caso, el modelo no especifica cuántas personas deberían migrar ni adónde deberían ir. Estos resultados implicarían la toma de

decisiones de cada usuario junto con información limitada del entorno del agente. De esta manera, se espera que las consecuencias añadidas aporten ideas interesantes porque la producción surgirá de la dinámica de la simulación.

9.6.3.2 Adaptación.

Cada agente, cuando sienta escasez de agua en el sitio en el que se encuentra, buscará algún lugar con disponibilidad del recurso hídrico, ya sea en su vecindario, paramo, peri-urbanización y zona urbana. Dicha situación se presenta cuando el usuario tiene un nivel de resiliencia bajo y la demanda es mayor para el suministro de agua.

9.6.3.3 Objetivos.

El objetivo de los agentes es permanecer en El Tabor el mayor tiempo posible y hacer todo lo posible para buscar un lugar adecuado donde haya agua disponible. Por otro lado, éstos pueden abandonar el sistema (migrar) o quedarse frustrados si no pueden vivir sin agua.

9.6.3.4 Aprendizaje

Las experiencias de una persona pueden influir en su respuesta a un evento de emergencia porque estos conocimientos condicionan su respuesta (Candamil Pineda y Grajales, 1998). En tal sentido, los agentes pueden tomar diferentes reacciones, como abandonar la zona afectada, buscar alternativas para el suministro de agua o, en su defecto, migrar a un lugar que pueda satisfacer esta necesidad, como la zona urbana o el páramo.

9.6.3.5 Predicción.

La modelación no puede determinar cómo las personas de la región predicen un posible escenario de escasez, por lo que se optó por un mecanismo bayesiano que se deriva del uso de la regla de Bayes para llegar a una evaluación subjetiva sobre la probabilidad de que algún evento ocurra en el futuro al combinar conocimiento a priori con información empírica (Rendón Macías et al., 2018). En esta situación,

cada tortuga maneja este tipo de modelo estadístico para calcular la probabilidad de migración. La información actual sobre la probabilidad de migración y la dirección preferida (calculada mediante el método bayesiano) es suficiente para la toma de decisiones sobre migración en el paso del tiempo.

9.6.3.6 Sensibilidad.

Las variables internas y ambientales afectan la toma de decisiones de los usuarios (agentes) simbolizados por las tortugas. Algunas de estas variables se describen a continuación:

- El nivel de resiliencia de cada agente es una variable interna afectada por la escasez de agua y puede afectar la decisión de migrar.
- probabilidad-migracion es como su nombre lo indica como probabilidad de migración, al crear a cada agente esta se establece aleatoriamente.
- suministro-agua-global es la oferta de agua en el mundo de la simulación y su disponibilidad determina las decisiones de las personas.
- demanda-agua-global es la demanda de agua en todos los agentes en la simulación, y con esta se puede decidir si la cantidad de agua disponible es suficiente para satisfacer la demanda.
- usuarios-frustrados son los agentes que sienten frustración por la falta de agua.
- Los links se utilizan para representar la red de frustración que existe entre las tortugas.
- posterior-probabilidad es la posibilidad posterior de migración de un agente, calculada utilizando el teorema de Bayes.

Las decisiones que toman las tortugas en la simulación están influenciadas por estas variables. En función de la disponibilidad de agua y

la frustración en la vecindad, estas pueden cambiar su probabilidad de migración, su nivel de resiliencia y su comportamiento.

9.6.3.7 Interacción.

La gestión del recurso de agua y la resiliencia de las personas son los temas principales de las interacciones. A continuación se enumeran los tipos de interrelaciones entre agentes:

- La falta de agua disminuye el nivel de resiliencia de los agentes afectados.
- Los agentes identifican a otros agentes en su vecindad que tienen bajos niveles de resiliencia y se sienten frustrados por la escasez de agua. Para visualizar la red de frustración, se establecen enlaces entre los agentes frustrados de la vecindad.
- Para establecer la posibilidad de que los agentes afectados migren por la escasez de agua, se emplea un método bayesiano y, en función del suministro y la demanda de agua, esta interacción implica evaluar la probabilidad de migrar o no.

9.6.3.8 Aleatoriedad.

Varios procesos se modelan utilizando la aleatoriedad o la aleatoriedad parcial. Estos son los procedimientos que utilizan elementos aleatorios.

- La creación de agentes ocurre al principio de la simulación, cuando se ubican agentes en posiciones aleatorias en el mundo simulado. La ubicación inicial de cada agente dentro de ciertos rangos se elige al azar.
- Cuando se crea cada agente, la probabilidad de su migración se establece de forma aleatoria, generando un impacto en la decisión de un agente de migrar en función de la probabilidad posterior calculada a partir del método de Bayes.

- Cada paso de la simulación genera una cantidad aleatoria de lluvia.
- El espesor del glaciar se reduce aleatoriamente según la tasa de deshielo.

9.6.3.9 Colectivos.

Los usuarios-frustrados al ser identificados y conectados mediante enlaces, forman un colectivo. La formación de estas conexiones es el resultado de una comunidad de personas que comparten experiencias de frustración similares. En tal sentido, la función identificar-usuarios-frustrados crea redes entre usuarios frustrados en una vecindad cercana. Esta red de frustración puede evolucionar con el tiempo y reflejar la dinámica del colectivo.

9.6.3.10 Observación.

Los datos que se recolectaron durante el estudio presentan cómo cambian las variables y cómo interactúan los agentes del modelo. En tal sentido, se muestran algunas salidas y datos relevantes para observar y analizar en el contexto de este modelo.

- La evolución de los niveles de resiliencia de las personas con el tiempo Se puede ver cómo la escasez de agua afecta a la resiliencia individual y cómo estos cambios afectan a la población en general
- Las redes establecidas entre estos agentes ayudan a visualizar los enlaces entre usuarios frustrados, lo cual permite ver cómo las comunidades se conectan y forman en respuesta a la escasez de agua.
- A la hora de realizar la simulación se imprime el "Área del glaciar" en la consola, lo que permite ver cómo se reduce el área del glaciar debido al deshielo.
- A medida que avanza la simulación, también se pueden observar visualmente otros resultados, tales como la formación de patrones de migración y los cambios en la dinámica poblacional.

9.6.4 Inicialización.

Al inicio de la simulación, los valores iniciales de las variables se instauran en el procedimiento de ”setup”. Los valores iniciales de las variables se muestran a continuación en la tabla 22:

Tabla *22*.

Variables del modelo en la interfaz de Netlogo.

Variable	Valor Inicial	Nota
Usuarios	150	Cantidad de usuarios en la actualidad
suministro-agua-global	-	Calculado como suministro-rios + estacion-lluvia + agua-deshielo
suministro-rios	1.188	m3/s. Datos reescalados a la población en simulaciones.
vereda	7.59	Km2
areaglaciar	12.04	Km2
demanda-agua	0.00772	m3/s. Datos reescalados a la población en simulaciones.
pueblo	3.4	Km2
tiempo	0	Años
velocidad-retroceso	7.93 * 10 ^ -7	m/s. Datos reescalados a la población en simulaciones.
paramo	2	Km2
nuevo-nivel-resiliencia	4	años

agentes-conflicto	0	Posibles agentes que no tienen suficiente agua
usuarios-frustrados	0	Cantidad de usuarios que se sienten frustrados por la escasez de agua
prior-probabilidad	0	Para actualización Bayesiana
posterior-probabilidad	0	Para actualización Bayesiana
estacion-lluvia	0 a 1.8	m3/s . Intervalo. Datos reescalados a la población en simulaciones.
tasa-deshielo	0 a 1.1	Porcentaje. Intervalo.
tasa-crecimiento-poblacional	0 a 0.78	Porcentaje. intervalo
movimieto-decision	0.5 a 0.8	Probabilidad. intervalo

Fuente: propia.

9.6.5 Datos de entrada.

No se ve el uso de recursos externos, como archivos de datos o la integración con otros modelos, para representar procesos que cambian a lo largo del tiempo en el código proporcionado. En el modelo actúan los siguientes datos de entrada:

- Usuarios (Personas que actualmente se abastecen del acueducto).
- Demanda de agua.
- Suministro de agua.
- Usuarios frustrados.
- Área actual del glaciar.

9.6.6 Submodelos.

9.6.6.1 Simulación de Lluvias (simulate-lluvia):

En cada paso de la simulación, este submodelo genera de forma aleatoria una cantidad de lluvia. La cantidad total de lluvia se suma a la variable estacion-lluvia.

9.6.6.2 Deshielo del Glaciar (deshielo-de-glaciar):

En función de la tasa de deshielo, este submodelo reduce el espesor del glaciar. La variable areaglaciar se actualiza para reflejar la pérdida de área causada por el deshielo. La ecuación 12 indica que esta acción se lleva a cabo.

$$areaglaciar - (areaglaciar * tasa - deshielo\ [\%]) (12)$$

9.6.6.3 Actualización del Suministro de Agua (actualizar-suministro-de-agua):

Este submodelo adiciona la cantidad de lluvia y deshielo al suministro global de agua (suministro-agua-global).

9.6.6.4 Balance de Agua (balance-agua):

Simula el balance de agua substrayendo la demanda global de agua (demanda-agua-global) del suministro global de agua (suministro-agua-global).

9.6.6.5 Crecimiento Poblacional (crecimiento-poblacional):

Representa el crecimiento poblacional, y la tasa de crecimiento poblacional se emplea para deducir la cantidad de nuevos agentes creados en cada paso de la simulación. Se rige por la ecuación 13:

$$(tasa - crecimiento - poblacional\ [\%]) *\ count\ usuarios\ (13)$$

9.6.6.6 Actualización de la Demanda (actualizar-demanda):

Adapta la demanda de agua global al crecimiento de la población.

9.6.6.7 Evaluación de Resiliencia (evaluar-resiliencia):

Evalúa la resiliencia de cada agente que se ve afectado por la escasez de agua y se actualiza en función de factores aleatorios como un factor de disminución en caso de que la demanda de agua sea mayor al suministro. Por otra parte, ésta es definida por un intervalo de 4 a 6 años que es un periodo en el cual los agentes podrían soportar dicha situación.

9.6.6.8 Generación de Conflicto (Generacion-conflicto):

Halla posibles adversarios (personas en la zona con escasez de agua y baja resiliencia) e instaura la variable agentes-conflicto.

9.6.6.9 Identificación de Usuarios Frustrados (identificar-usuarios-frustrados):

Encuentra a los usuarios frustrados considerando la variable agentes-conflicto y crea enlaces entre ellos.

9.6.6.10 Actualización Bayesiana (actualizacion-bayesiana):

Implementa una actualización bayesiana de la probabilidad de migración de los agentes teniendo en cuenta la probabilidad previa y la verosimilitud. Se rige por la ecuación 14 que calcula la probabilidad posterior utilizando el teorema de Bayes.

$$posterior - probabilidad = \frac{prior - probabilidad * verosimilitud}{movimieto - decision} \quad (14)$$

9.7 Calibración del modelo.

Para la calibración de este modelo se emplearon diversos parámetros e indicadores que permiten mejorar su calidad a la hora de realizar las simulaciones. En este caso, el periodo propuesto es de 50 años, el año de inicio es de 2023 y cada ciclo equivale a 1 año de avance.

Para el análisis de los cambios en las condiciones tanto ambientales como sociales del modelo computacional, se utilizan como criterio datos

como la tasa de deshielo, la cantidad de lluvias, la tasa de crecimiento poblacional y la probabilidad de migración por parte de los agentes.

Los valores para la creación de los escenarios fueron tomados de estudios similares y referentes a la zona e inclusive se obtuvieron de la estación meteorológica ubicada en la sierra nevada, para que dicho sistema se sintiese más realista a la hora de realizar las simulaciones. Cabe destacar que estos datos van a ser tomados como si esas condiciones ocurrieran en el año de inicio y para observar ese comportamiento en el tiempo planteado.

9.7.1 Escenario 1. Evento Base.

Para la calibración de este modelo se emplearon diversos parámetros e indicadores que permiten mejorar su calidad a la hora de realizar las simulaciones. En este caso, el periodo propuesto es de 50 años, el año de inicio es de 2023 y cada ciclo equivale a 1 año de avance.

Para el análisis de los cambios en las condiciones tanto ambientales como sociales del modelo computacional, se utilizan como criterio datos como la tasa de deshielo, la cantidad de lluvias, la tasa de crecimiento poblacional y la probabilidad de migración por parte de los agentes.

Los valores para la creación de los escenarios fueron tomados de estudios similares y referentes a la zona e inclusive se obtuvieron de la estación meteorológica ubicada en la sierra nevada, para que dicho sistema se sintiese más realista a la hora de realizar las simulaciones. Cabe destacar que estos datos van a ser tomados como si esas condiciones ocurrieran en el año de inicio y para observar ese comportamiento en el tiempo planteado.

Tabla *23*.

Condiciones para el escenario 1.

Deslizador	Valor	Referencia
estación-lluvia	1,27 m3/s	Estación SIERRA NEVAD COCUY
tasa-deshielo	0,884 %	(Herrera Vargas, 2017)
tasa-crecimiento-poblacional	0,78%	(Riscanevo Puentes, 2018)
movimiento-decision	0,6	(Magallanes Reyes, 2015)

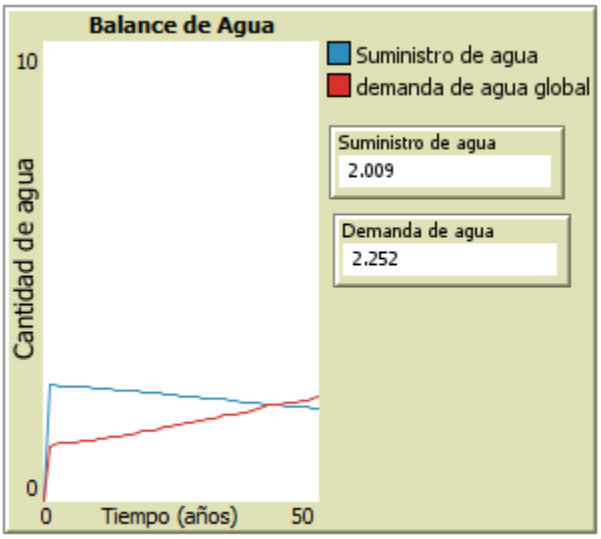
Fuente: propia.

9.7.1.1 Resultados del Escenario 1.

Para este escenario, el modelo evidencia que para el año 2066 empezarían a existir eventos de escasez de agua debido a que, el suministro del recurso hídrico disminuiría con respecto a la demanda, dicho suceso se muestra en la figura 26. Por otra parte, habrá mayor cantidad de usuarios frustrados en los años 2064, 2065, 2070 y 2071, tal como se muestra en las figuras 26.

Figura *26.*

Suministro y Demanda de Agua del primer escenario.

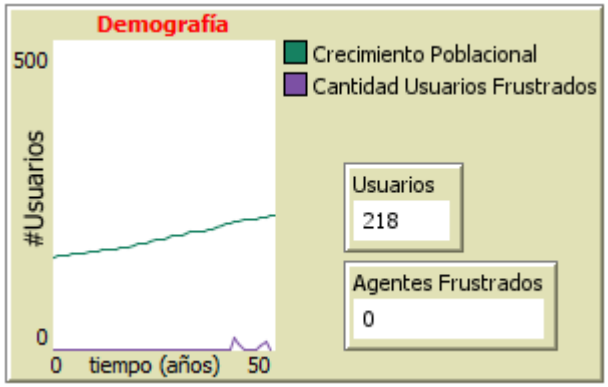


Fuente: propia.

Los valores mostrados en los monitores son los valores finales del modelo. Para el año 2066 el suministro de agua tendrá un valor de 2,0817 m3/s y una demanda de 2,1102 m3/s.

Figura *27.*

Cantidad de usuarios y picos de agentes frustrados dentro de 50 años.

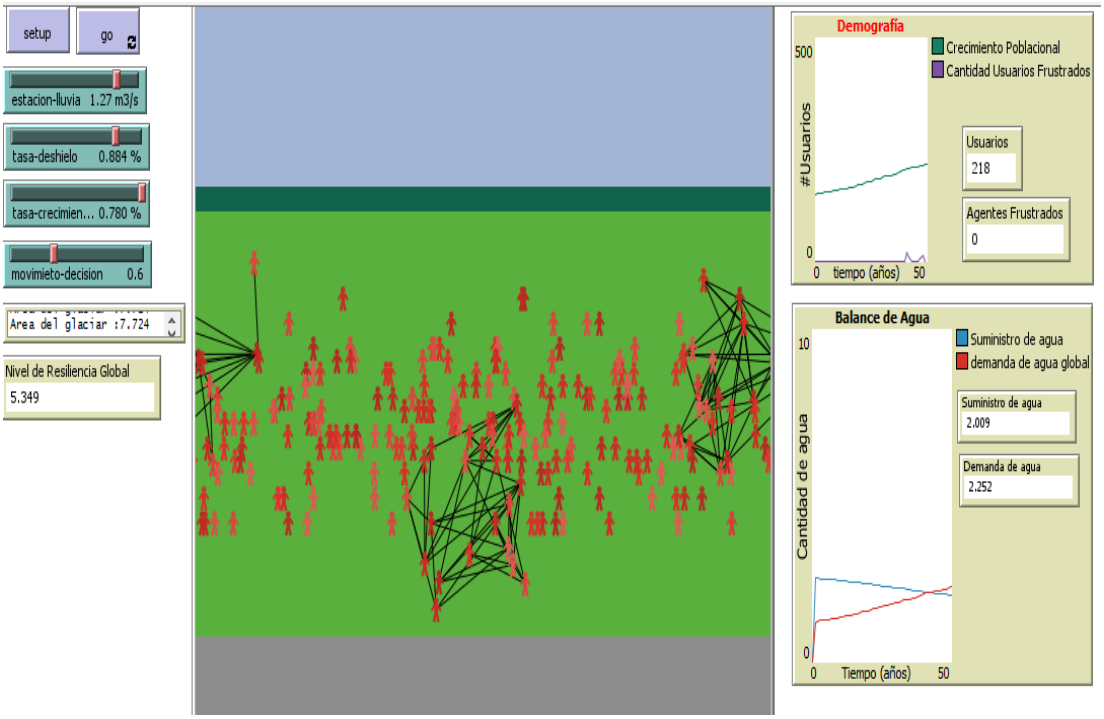


Fuente: propia.

La interfase (figura 28) muestra las demás variables tales como el nivel de resiliencia final la cual está en un valor alto de 5,349 años a nivel global, el área final del glaciar que presenta un valor de 7,724 Km2 (pérdida del 35,84%), los enlaces de frustración de los usuarios frustrados y la localización final de los agentes.

Figura *28.*

Interfase del Escenario



Fuente: propia.

9.7.2 Escenario 2. Evento Favorable.

Al ajustar las condiciones ambientales para optimizar la resiliencia de los usuarios y disminuir los conflictos, es parte de establecer un escenario favorable para la simulación. En este caso, se consideraron datos del año 2005 para proponer

dicha situación y hacer una predicción al respecto. Los valores son proporcionados por la tabla 24.

Tabla *24*.

Condiciones para el escenario 2.

Deslizador	Valor	Referencia
estación-lluvia	0,93 m3/s	Estación SIERRA NEVAD COCUY
tasa-deshielo	1,01 %	(Gutiérrez Rey et al., 2020)
tasa-crecimiento-poblacional	0,25%	(Riscanevo Puentes, 2018)
movimiento-decision	0,5	(Magallanes Reyes, 2015)

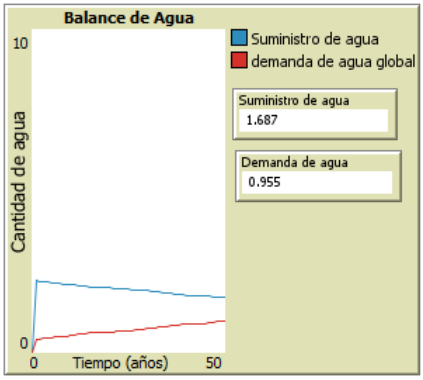
Fuente: propia.

9.7.2.1 Resultados del Escenario 2.

En este escenario, el modelo evidencia que no existen eventos de escasez de agua debido a que la tasa de crecimiento es baja, y por ende, la demanda también, lo cual genera que el suministro sea suficiente para los próximos 50 años. Teniendo en cuenta lo anterior, al no haber déficit del recurso hídrico no hay presencia de usuarios frustrados. Dicha situación se muestra en las figuras 29 y 30.

Figura *29.*

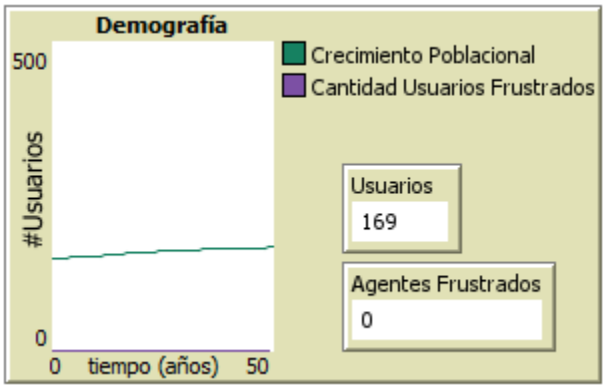
Suministro y Demanda de Agua del segundo escenario.



Fuente: propia.

Figura *30.*

Cantidad de usuarios y picos de agentes frustrados dentro de 50 años.

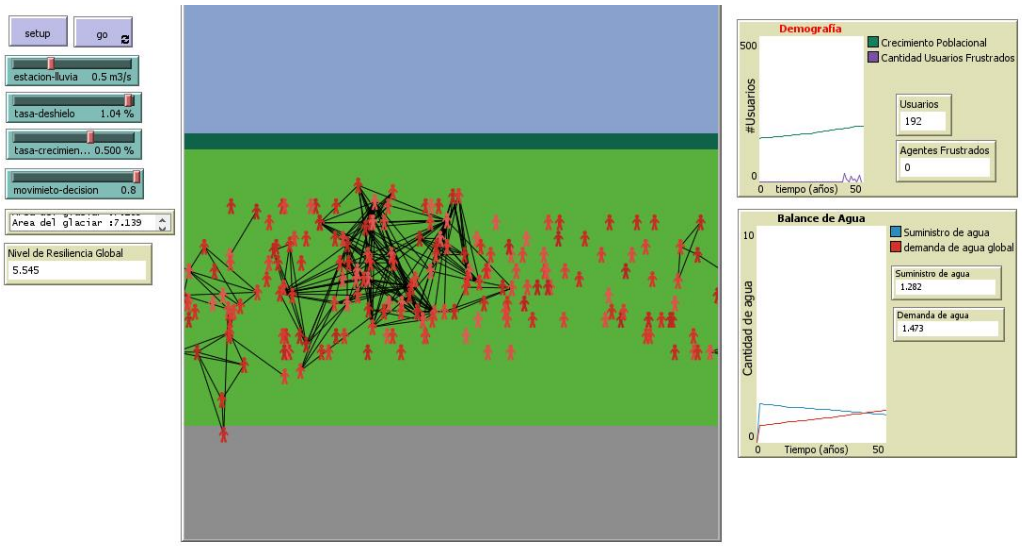


Fuente: propia.

La interfase (figura 31) presenta las demás variables tales como el nivel de resiliencia final la cual está en un valor alto de 5,042 años a nivel global, el área final del glaciar que presenta un valor de 7,248 Km2 (perdida del 39,8%) y una cantidad final de usuarios de 169.

Figura *31.*

Interfase del Escenario 3.



Fuente: propia.

9.7.3 Escenario 3. Evento Catastrófico.

Generar un escenario catastrófico para el modelo implica adaptar las condiciones ambientales de tal forma que empeore el nivel de resiliencia de los usuarios e incrementen los conflictos causados por la escasez de agua. La tabla 25 suministra los datos que se van a implementar tales como la tasa de deshielo, la cantidad de lluvias y la tasa de crecimiento poblacional que son referenciadas por tendencias del año 2013.

Tabla *25*.

Condiciones para el escenario 3.

Deslizador	Valor	Referencia
estación-lluvia	0,5 m3/s	Estación SIERRA NEVAD COCUY
tasa-deshielo	1,04 %	(Cepeda Arias, 2018)
tasa-crecimiento-poblacional	0,5%	(Riscanevo Puentes, 2018)
movimiento-decision	0,8	(Magallanes Reyes, 2015)

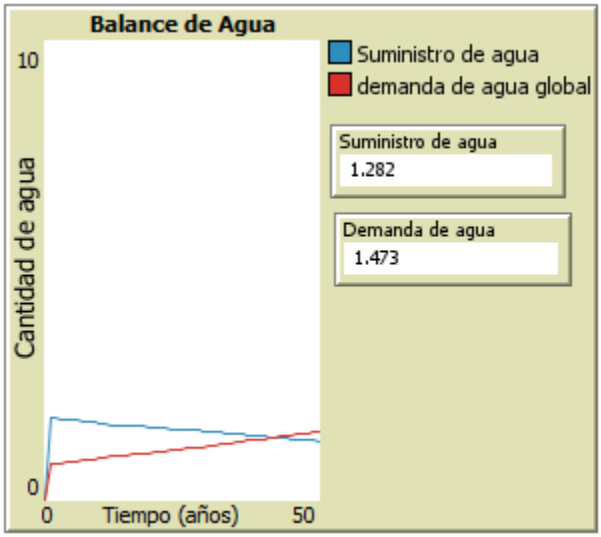
Fuente: propia.

9.7.3.1 Resultados del Escenario 3.

Para este escenario, el modelo evidencia que para el año 2065 años empezaría a existir eventos de escasez de agua debido a que, el suministro del recurso hídrico disminuirá con respecto a la demanda, dicho suceso se muestra en la figura 32. Por otra parte, habrá mayor cantidad de usuarios frustrados entre los años 2064 y 2072 tal como se representa en las figuras 33.

Figura *32.*

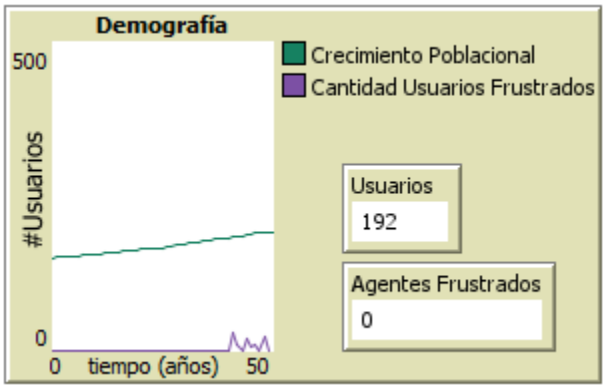
Suministro y Demanda de Agua del Tercer Escenario



Fuente: propia.

Figura *33.*

Cantidad de usuarios y picos de agentes frustrados dentro de 50 años.



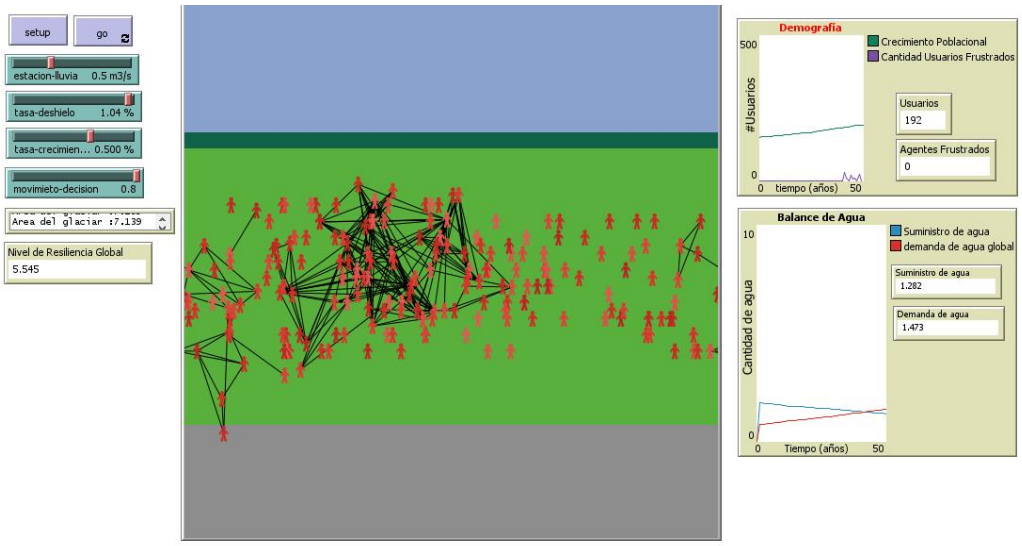
Fuente: propia.

La interfase (figura 34) presenta las demás variables tales como el nivel de resiliencia final la cual está en un valor alto de 5,545 años a nivel

global, el área final del glaciar que presenta un valor de 7,139 Km2 (pérdida del 40,7%) y los enlaces de frustración de los usuarios frustrados y la localización final de los agentes.

Figura *34.*

*Interfase del Escenario 3**.***



Fuente: propia.

9.7.4 Análisis de resultados.

Se conoce que las aguas de deshielo aumentan los caudales de los ríos, principalmente en las épocas de mayores temperaturas, cuando las precipitaciones se reducen (Plasencia Sánchez, 2011). Es por ello, que el tercer escenario al tener tendencias de deshielo significativas y baja cantidad de lluvias no proporciona agua suficiente para finales del periodo propuesto en el modelo.

Por otra parte, en el segundo escenario que resulta ser favorable al tener una tasa de deshielo y una cantidad de lluvias significativas similar al primer escenario, lo que más impacta es su tasa de crecimiento poblacional ya que esta es baja y la demanda va en función de esta, lo cual permite proporcionar agua suficiente para el periodo propuesto. Un aspecto que se destaca en el primer evento (base) es que hay mayor

cantidad de lluvias que en los otros dos y aun así no cumple con el suministro en todo el periodo y esto es debido también a que, en tiempos húmedos, los glaciares se cubren de nieve y su derretimiento es menor, aportando menos agua a los caudales (Milana, 1998).

En cuanto al nivel de resiliencia, este se centra en la capacidad colectiva de los agentes para responder a cambios en el ambiente (Sánchez-Zamora et al., 2016). En este caso, los modelos básico y catastrófico obtuvieron mayores niveles de resiliencia que el escenario favorable ya que, a pesar de que estos no proporcionan suficiente agua para los usuarios en sus hogares en el tiempo previsto, las personas vecinas al sentir frustración antes de que la demanda fuese mayor que el suministro, pudieron haber diversificado sus fuentes, como aguas superficiales y pluviales, lo cual les dio más opciones disponibles y aumentaron su resiliencia.

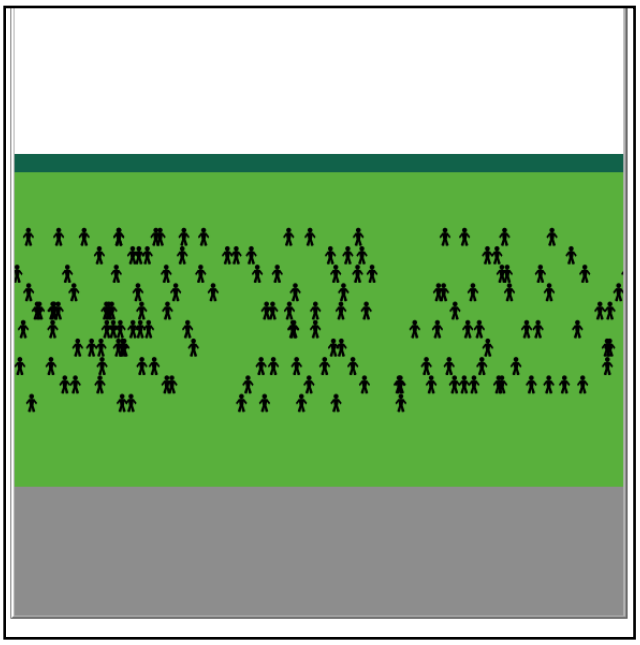
En estos escenarios anteriormente mencionados también se presentan redes de frustración cuando la demanda es mayor que el suministro, sin embargo, en el escenario base estas líneas no se muestran en gran cantidad ya que hay mayor captación de lluvias que permite a los usuarios buscar otros lugares con disponibilidad de agua. Por otra parte, en el escenario favorable al no haber frustración y agua disponible para todo el periodo, esto se liga a garantizar el suministro de agua protegiendo los sistemas hídricos vulnerables, reduciendo el impacto de desastres como las inundaciones y las sequías, avalando el acceso al agua y sus servicios, y administrando de forma adaptada y equitativa los recursos hídricos (Mendoza et al., 2020).

Finalmente, es importante aclarar que al iniciar cada simulación el área del glaciar posee un color blanco que simula la nieve (figura 35). En cada paso, dicha área va obteniendo una tonalidad azul debido al deshielo que se presenta en la zona. En los tres escenarios se muestra el mismo matiz ya que la diferencia en la pérdida de glaciares es baja debido a las tasas que se manejan en cada uno de ellos. Lo anterior, hace pensar en la siguiente conclusión que relaciona la característica visual y paisajística de la

montaña, que es portadora de glaciares milenarios que tienden a perder su cubierta ya que es otro elemento para destacar en la dimensión cultural afectada por el retroceso glaciar (Mendizabal, 2008).

Figura *35.*

*Estado inicial del glaciar y de Los Agentes***.**



Fuente: propia.

9.8 Revisión de la literatura.

Para comparar el modelo con otros similares y establecer su validación, se indago en literatura referente a la temática de abastecimiento de agua en zonas rurales mediante cuencas que se surten de glaciares. En la tabla 27 se muestran los estudios consultados.

Tabla *26*.

Estudios consultados para la validación del modelo.

N°	Titulo	Tipo de Documento	Autor	Año	Zona de Estudio
1	Understanding human adaptation to drought: agent-based agricultural water demand modeling in the Bow River Basin, Canada	Artículo	Mohammad Ghoreishi, Saman Razavia, Amin Elshorbagy	2021	Rio Bow, Canada
2	Agent-based modelling of water balance in a social-ecological system: A multidisciplinary approach for mountain catchments	Artículo	Lisa Huber, Johannes Rüdisser, Claude Meisch, Rike Stotten, Georg Leitinger, Ulrike Tappeiner	2021	Valle de Mazia/Matsch», en la provincia de Bolzano/Bozen, Tirol del Sur, Italia

3	Climate change and the potential for conflict and extreme migration in the Andes: a computational approach for interdisciplinary modeling and anticipatory policy-making	Tesis de Doctorado	Jose Manuel Magallanes Reyes	2015	Zonas urbanas y rurales de Huancayo

Fuente: propia.

9.9 Identificación de Similitudes y Diferencias de los Modelos.

9.9.1 Características.

Los estudios consultados poseen aspectos similares al realizado en este documento como el surtimiento de cuencas a través de glaciares para abastecer a poblaciones rurales. Sin embargo, los analizados tienen un enfoque más amplio en cuanto al regadío de cultivos; en este caso, el estudio elaborado por Ghoreishi et al. (2021), considera aspectos como los procesos de toma de decisiones de agricultores individuales en respuesta a diversos factores, como los precios de las siembras y los costos de producción. Este modelo incluye ecuaciones para las decisiones de los agricultores sobre la adopción de sistemas de aspersión, el cambio de patrones de cultivos y la determinación del área a regar, lo cual está influenciado por interacciones con otros agentes.

Por otro lado, la investigación hecha por Huber et al. (2021) analizó la dinámica del agua subdiaria a escala de cuenca, con un enfoque especial en las cuencas de alta montaña, que se caracterizan por una variabilidad estacional

significativa en el suministro de agua, incluso el derretimiento de la nieve y el hielo de los glaciares, para involucrar sistemáticamente el conocimiento local, profundizar y validar las historias creadas y traducirlas en datos cuantificables.

Magallanes Reyes (2015) realizó un modelo estilizado basado en agentes diseñado para explorar los efectos de combinar las tendencias actuales en el equilibrio hídrico con las tendencias actuales en el crecimiento de la población y el cambio en el uso de la tierra. A medida que estas tendencias continuaban, se implementaban mecanismos de toma de decisiones a nivel individual para representar la reacción probable que tuvo la población local al enfrentar los desafíos que ambos sistemas presentan simultáneamente.

Para el caso del modelo en cuestión, se tomó en cuenta la capacidad que los agentes tienen para migrar a otros lugares para satisfacer su necesidad de agua disponible, empleando ecuaciones sencillas para estimar la cantidad de lluvias, el deshielo del glaciar, el crecimiento poblacional y el método bayesiano para la toma de decisiones ante cualquier escenario que se presente. Los agentes interactúan especialmente con sus vecinos más aledaños que son afectados por la escasez de agua y resiliencia creando redes de frustración.

9.9.2 Metodologías.

En cuanto a metodología, todos emplearon el programa de Netlogo y la modelación basada en agentes, debido a que es una manera de modelar sistemas complejos y adaptativos que permite a los agentes adaptarse a nuevas situaciones, lo que resulta ser de gran utilidad a la hora de crear situaciones dinámicas y realistas. Sin embargo, a diferencia del modelo realizado en este documento, las investigaciones realizadas por los otros autores utilizaron otros programas para un mejor análisis de datos en cuanto a distribución o variación del agua dentro de un periodo determinado. Así mismo, tanto Magallanes Reyes (2015) como Huber et al. (2021) y el estudio en cuestión consideraron la participación de las personas involucradas a través de entrevistas y talleres para la obtención

de datos y para conocer la reacción de ellas ante un posible evento de escasez de agua en la zona.

9.9.3 Resultados.

Los resultados que se obtuvieron dependen del enfoque de cada investigación, en tal sentido, Ghoreishi et al. (2021) en su indagación evidencia que, lo que más se destaca es la necesidad de comprender y gestionar la incertidumbre en la interacción social, así como la sensibilidad del modelo a la variabilidad en el rendimiento de los cultivos, para una gestión efectiva de la demanda de agua en la agricultura. Por otro lado, Huber et al. (2021) en sus seis escenarios propuestos para las simulaciones la relación demanda/oferta (D:S) de agua aumenta continuamente para el periodo establecido (2015-2050), por ende, la respuesta de la simulación refuerza la importancia de analizar los balances hídricos de alta resolución temporal y puede apoyar los procesos de gestión y las conversaciones entre los involucrados para una gestión sostenible de las cuencas.

En el proyecto de Magallanes Reyes (2015), se evidenció que el retroceso del Glaciar Huaytapallana no tuvo un impacto significativo en la migración y los conflictos. Se reveló que la asignación de destinos basada en destrezas influyó en los patrones de migración empleando la modelación basada en agentes. Las personas que estaban dispuestas a migrar pero no lo hicieron se sintieron frustradas y el potencial de conflictos empeoró por la privación relativa en áreas rurales y la interacción con áreas urbanas ricas. Se determinó que el ahorro de al menos el 13 % durante la temporada de lluvias era esencial para prevenir problemas importantes. Estos hallazgos resaltan la complejidad de los elementos que afectan la migración y los conflictos en situaciones de escasez.

En el modelo propuesto en esta investigación, en los tres escenarios planteados se mostraron hallazgos como que en el evento base a pesar de que hay más lluvias, no cumple con el suministro debido a que los glaciares se cubren de nieve

en tiempos húmedos, lo que reduce su derretimiento y aporta a los caudales. Así mismo, con tendencias significativas de deshielo y baja lluvia, el tercer escenario no proporciona suficiente agua para el período propuesto en el modelo. Todo esto se resume en que los resultados recalcan la complejidad de varios elementos interdependientes, como el deshielo, el crecimiento poblacional, la resiliencia, la demanda y los factores culturales, que tienen un impacto en la disponibilidad de agua y en la región estudiada.

Dando una comparación de todos estos hallazgos, se comprende que la gestión del agua es un reto que debe tener una comprensión profunda de eventos definidos y la contemplación de una diversidad de aspectos que se relacionan entre sí. Por ello, las soluciones deben tener en cuenta los factores sociales y ambientales, y la importancia de considerar la incertidumbre y la variabilidad de los modelos y escenarios propuestos para una gestión sostenible del agua.

9.9.4 Capacidades.

En cuanto a las capacidades de cada estudio, todos los modelos emplean la modelación basada en agentes que resulta ser de gran utilidad para la simulación de la toma de decisiones de los individuos en una zona que es afectada por distintos factores. Por otro lado, el modelo de Ghoreishi et al. (2021) tiene la capacidad de comprender cómo los comportamientos humanos se desarrollan en conjunto con los sistemas hidrológicos y da relevancia a la interacción social, los objetivos de conservación y la expansión del riego para variar la demanda de agua, mientras que, Huber et al. (2021) facilita el desarrollo de escenarios participativos que involucran a las partes interesadas locales, mejorando la comprensión del complejo sistema humano-agua.

Magallanes Reyes (2015) y el modelo en cuestión emplean datos cuantitativos para representar el glaciar, el río y la demografía del sistema, así como datos cualitativos obtenidos para representar cómo reaccionarán las personas a

medida que continúen las tendencias. De igual manera, ambos utilizan un enfoque bayesiano para ilustrar cómo los individuos toman decisiones ante un posible evento de escasez de agua a nivel local.

Esta comparación resalta los diferentes enfoques y capacidades en la modelación de sistemas que se relacionan con el recurso hídrico y los patrones ambientales. Por ende, se recalca la importancia de tomar en cuenta tanto factores sociales como ambientales, así como la necesidad de abordar la variabilidad y la incertidumbre en la toma de decisiones para una gestión efectiva y sostenible del agua en contextos específicos.

9.9.5 Limitaciones.

En las limitaciones se presentaron casos como falta de información para la determinación de valores o características que se pudieran emplear en los diferentes modelos. Tal es el caso de Ghoreishi et al. (2021), quienes disminuyeron el número de parámetros en el modelo para evitar problemas de sobreajuste en el estudio debido a la limitación de la disponibilidad de datos como lo fue la falta de información con respecto a formas alternativas de producción. Por otra parte, a diferencia de los otros estudios, la simulación tiene una temporalidad baja ya que se efectuó entre los años 1999 al 2015 lo que puede no permitir en estudios futuros observar el comportamiento de diferentes variables que se involucran en la modelación.

En cuanto a Huber et al. (2021), tuvo complicaciones con respecto a la falta de datos, por lo que tomaron la decisión de reducir temporalmente los valores anuales de rendimiento de agua de Invest y esto se hizo utilizando las variaciones interanuales promedio a largo plazo medidas en el medidor de escorrentía. No consideró la representación de actores sociales a gran escala, como estructuras institucionales o de gobernanza, dentro de la estructura del modelo, aunque estos efectos se tomaron en cuenta a lo largo de la historia socioeconómica.

En el estudio de Magallanes Reyes (2015), hubo problemas con datos tales como el tiempo de respuesta y que la PRAA financió la recopilación de datos, pero solo cuando ésta estuvo activa (entre 2009 y 2012). De igual manera, los datos que obtuvo del censo ofrecieron mucha información significativa sobre la demografía de la región bajo estudio, no obstante, la división política del censo no brindó información para el área periurbana y los asentamientos rurales particulares a lo largo del río Shullcas.

En el estudio presente, los datos para la determinación de demanda mediante la aplicación de encuestas fueron en baja cantidad y esto es debido a que actualmente dentro de la zona de estudio se presenta una alta migración debido a la falta de oportunidad que genera que cada vez sea más insostenible la vida en el pueblo produciendo altos grados de desempleo (Lizarazo, 2023). De igual forma, no se encontraron datos tales como la tasa de migración y se tomó la probabilidad del estudio de Magallanes Reyes (2015) para la aplicación del método bayesiano. Además de ello, no se incluyeron factores socioeconómicos individuales que posiblemente afectarían las decisiones y la resiliencia de los agentes tales como la educación y la economía.

9.10 Análisis Comparativo.

Los modelos comparados consideran la comprensión de la adaptación ante una posible sequía e inclusive la influencia de diferentes factores sociales sobre la demanda. En el caso del estudio en cuestión, se encuentra la variable de tasa de crecimiento poblacional, mientras que en los demás se identifican parámetros como factor de aversión al riesgo, conservación de la fuente hídrica, protección al ambiente y los cambios en el uso del suelo para la realización de prácticas agrícolas. A pesar de que las variables en el contexto social sean diferentes en todos los modelos, con esto se establece la estrecha relación que existe entre las actividades humanas y los comportamientos sociales con el agua.

La tasa de crecimiento poblacional de la zona de estudio ha tenido un incremento natural positivo; en otras palabras, es más la población la que nace que la que fallece. Desde el año 2014 al 2016 ha habido un aumento lineal que va desde el 0,58% al 0,78% (Riscanevo Puentes, 2018). Sin embargo, este aspecto ha sido afectado por los procesos de migración debido al bajo desarrollo de su economía (Lizarazo, 2023), lo que podría prolongar la cantidad de agua suficiente para la población en el tiempo estipulado en el modelo.

Asimismo, tanto este estudio como el realizado por Magallanes Reyes (2015) y Ghoreishi et al. (2021), consideran la creación de redes entre vecinos, las cuales determinan su actuar y la frustración que sienten al percibir escasez, ya que se cree que el comportamiento de los vecinos influye en las decisiones y en el ajuste de características individuales para realizar acciones que se implementen en los diferentes modelos.

En cuanto a condiciones ambientales, la ubicación de los sitios de cada estudio las determina, lo cual, puede generar diferentes resultados a la hora de ejecutar los modelos ya que los lugares que están fuera de la cordillera de los Andes presentan mayor posibilidad de tener eventos de sequía en el futuro, como es el caso de Ghoreishi et al. (2021), que elaboro su análisis en el rio Alberta en Canadá, zona que ha pasado por diferentes periodos de sequía debido a las bajas precipitaciones que se presentan en la zona y el caso de Huber et al. 2021 de, en el valle Matsch en los Alpes, que resulta ser uno de los lugares más secos en esa zona y que se muestra precipitaciones convectivas en verano (mayo a septiembre) y escazas lluvias en tiempo de invierno lo que genera una mayor probabilidad de desabastecimiento.

Por otro lado, Magallanes Reyes (2015) en su sitio de estudio (Huancayo) presenta estaciones húmedas de octubre a abril y de mayo a septiembre sin algún episodio de escasez. Finalmente, en comparación con las anteriores documentaciones, El Tabor en el municipio de Güicán evidencia comportamiento bimodal de lluvias también sin presentar hasta el momento eventos de déficit, además de que posee como

despensa acuíferos que no han sido intervenidos lo cual generará una riqueza a futuro para suplir las consecuencias de las sequias (Hernández Diaz, 2014).

Los resultados de Ghoreishi et al. (2021), en su primera simulación, muestran que el factor de interacción social y el factor de conservación son los parámetros más sensibles y controlan la demanda, influyendo más el primer factor. Al realizar un reajuste en la siguiente ejecución del modelo, los hallazgos mostraron que la expansión del riesgo afecta en gran medida la dinámica de la demanda del agua. Lo anterior concluye que la interacción social juega un papel importante en el crecimiento de sistemas de riesgo y el cambio de cultivos.

Por otro lado, según Huber et al. (2021) la demanda aumentó para el año 2050 en comparación al 2015, ya que desde un principio en los escenarios tanto negativos como a los que se les incluyó cambio climático indicaron una intermitente escasez de agua, ya que los agricultores empezaron a percibir escasez y por ende, el gestor de agua aumentó dicha demanda. En Magallanes Reyes (2015), en la ejecución de su modelo hubo momentos específicos de escasez, sin embargo, solo en su último escenario el potencial de conflicto y migración ya era un hecho.

Relacionando estos resultados con los hallazgos hechos en el estudio y teniendo en cuenta las condiciones ambientales de cada lugar en cuanto a cantidad de lluvias, deshielo glaciar y comportamientos estacionales. Los factores sociales influyen bastante en el comportamiento de la demanda ya que en el caso en cuestión, al existir una alta tasa de crecimiento en el escenario base y catastrófico, la demanda afectó el suministro que no permitió que hubiese agua suficiente en el tiempo propuesto, caso similar en Magallanes Reyes (2015) en el tercer escenario. Este mismo aspecto se evidenció en cuanto a hábitos de consumo y aumento en la implementación de algunas prácticas agrícolas en los lugares del río Alberta y el Valle de Matsch.

En cuanto a las redes, en el primer caso de Ghoreishi et al. (2021) no hubo mayor heterogeneidad en la toma de decisiones ya que los agentes se basaban en las acciones de sus vecinos, mientras que, en el estudio en cuestión y Magallanes Reyes (2015), estas conexiones aumentaban conforme el problema de déficit de agua empeoraba ya que si un agente se sentía frustrado su vecino también empezaba a experimentar esta reacción.

Todo esto indica que la relación entre los factores ambientales, el comportamiento humano y las opciones de gestión demuestra la complejidad de este problema y la necesidad de alternativas para garantizar la sostenibilidad del suministro de agua.

9.11 Reconocimiento de ventajas y limitaciones

9.11.1 Capacidades del modelo.

El modelo en las simulaciones considera la autonomía de los usuarios, lo que permite representar decisiones de cada uno de ellos.

La simulación de las precipitaciones y el retroceso del glaciar permiten crear las dinámicas de la disponibilidad de agua y el cambio climático.

Es un modelo que permite ajustar valores y condiciones iniciales para examinar diversos escenarios y entender cómo diferentes aspectos ambientales afectan al sistema.

Para facilitar la comprensión y el análisis, proporciona una representación visual del entorno y del estado de los usuarios.

El uso del método de Bayes para la toma de decisiones añade un elemento de adaptación a las decisiones tomadas por los agentes.

En algunos casos, es difícil interpretar y analizar modelos complejos, por lo cual, al ser simple este modelo facilita la comprensión de los resultados, lo que es importante para su uso y aplicación.

9.11.2 Limitaciones

Al ser un modelo simple que relaciona la capacidad de adaptación de los agentes con la disponibilidad de agua, este no incluye datos socioeconómicos que puedan afectar de alguna manera las decisiones y la resiliencia de los usuarios.

De igual forma, teniendo en cuenta esta característica, puede poseer una representación no muy precisa de la realidad ya que se simplifican algunas variables que no fueron obtenidas debido al problema de la información limitada.

La representación del agua está fundada en variables simples y no se consideran variabilidades estacionales.

9.12 Recomendaciones.

Realizar su calibración con datos reales de cualquier zona que experimente una situación similar a la que plantea este estudio y examinar su capacidad de predicción comparando los hallazgos obtenidos con las observaciones reales.

Para mejores resultados, hacer un análisis de sensibilidad para entender cómo los hallazgos se ven influenciados por cambios en los parámetros. Esto permitirá establecer la firmeza del modelo y las variaciones necesarias.

Según los objetivos de la aplicación, ajustar el modelo para adecuarse a diversos niveles temporales y geográficos, lo cual puede incluir cambios en la resolución espacial o el tiempo de la simulación…

Extender el modelo para incluir eventos extremos tales como sequías o inundaciones, ya que esto permitirá explorar la respuesta del sistema a contextos poco comunes.

Adecuar el modelo para añadir detalles concretos de la zona o población de interés que pueden ser los rasgos geográficos, elementos socioeconómicos y datos meteorológicos.

A medida que se adquieren más datos, se ejecutan validaciones experimentales y se crean nuevas metodologías, se debe organizar una técnica de monitoreo y realizar reajustes del modelo.

10 Conclusiones.

El modelo es útil porque proporciona una representación básica e inicial de las dinámicas de una comunidad rural afectada por el cambio climático y el déficit de recursos hídricos. No obstante, para que se utilice correctamente, es necesario realizar esfuerzos constantes para optimizar la contemplación de diversos contextos que imitan la realidad y superar los desafíos con que se encuentran. Su capacidad para adaptarse a los contextos específicos y proporcionar información notable y precisa a las comunidades y los agentes determinará su beneficio.

El enfoque basado en agentes otorga la oportunidad de modelar la autonomía de los usuarios a la hora de tomar decisiones, lo cual es crucial para entender cómo las interacciones individuales ayudan a los patrones emergentes en el sistema. La creación de redes de frustración, la identificación de usuarios frustrados y el uso de la toma de decisiones basada en Bayes, que agrega un componente cognitivo a la migración de usuarios, brinda una ventaja al modelo y representa la capacidad de adaptación de los agentes, son ejemplos de ello.

Aunque hay un índice de vulnerabilidad muy bajo, la sostenibilidad a largo plazo y la capacidad de adaptarse a cambios en la demanda o en las condiciones ambientales dependen de esfuerzos continuos de conservación y monitoreo.

La falta de datos para la determinación del IVH hace que sea complicado predecir y gestionar eventos relacionados con el agua como la

sequía, los cambios en los patrones de precipitación y la demanda, lo cual, enfatiza la necesidad de implementar enfoques adaptables en la planificación y gestión del agua tales como efectuar prácticas eficaces de conservación del agua que pueden coexistir con sistemas de distribución y almacenamiento para trabajar junto con estrategias de conservación del agua eficientes.

El modelo debe ser un instrumento que pueda evolucionar y mejorar con los aportes de los usuarios y los estudios actuales. Es por ello por lo que se consideran métodos participativos para simular fenómenos que tienen un impacto en las poblaciones humanas, tal como lo fueron las encuestas individuales para conocer patrones de consumo y si existe consciencia sobre un futuro con escasez de agua, mientras que, los estudios permitieron obtener datos para la realización de escenarios posibles que son basados en condiciones y tendencias ambientales reales.

Finalmente, frente a la crisis climática que se presenta en la actualidad en el país causada por el fenómeno del Niño, la probabilidad de conflictos entre los usuarios del agua, como las comunidades rurales, puede aumentar. Este estudio, muestra cómo la escasez de agua puede afectar la resiliencia de los usuarios, lo que puede provocar frustración y conflicto e inclusive como estos aspectos pueden provocar un aumento en la migración de las áreas rurales a las zonas urbanas, lo que puede generar un impacto significativo en la sociedad y la economía de los lugares afectados.

11 Bibliografía.

Arango Ruiz, Á. (2013). Crisis mundial del agua. Producción+ Limpia, 8(2), 7-8.

Araya, F. (2020). Modelación basada en agentes:¿Una herramienta para la ingeniería y gestión de la construcción? *Rev. Ing. Constr.*, *35*(2). https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732020000200111

Arbelaez, O., David, J. (2020). *Evaluación de factibilidad para la instalación de unidades hidráulicas como reguladoras del flujo hídrico en los últimos siete kilómetros de cauce exorreico en la cuenca baja del Río Manzanares en Santa Marta, Colombia, durante el periodo 2018 - 2019.* Universidad Santo Tomás. https://repository.usta.edu.co/handle/11634/22190

Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2019). *Las Áreas Protegidas*. Metropol.gov.co. https://www.metropol.gov.co/planeacion/areas-protegidas/Paginas/contexto/las-areas-protegidas.aspx

Barbaran Cruz, R. A., y Bustinza Castillo, A. J. (2020). *Retroceso glaciar en el nevado Yuraccocha y las variables meteorológicas de temperatura y precipitación, entre los años 2010 – 2020, provincia de Huaylas – Ancash* [Trabajo de Grado, Universidad César Vallejo]. Repositorio de la Universidad César Vallejo.

Barreto Sáenz, P. (2009). *Instructivo de medición de caudal*. Universidad nacional "*Santiago Antunez De Mayolo*," 1.

Bennett, N. (2015). *Serie Tutorial de NetLogo: Introducción y Conceptos Básicos*. https://www.nickbenn.com/sites/default/files/projects/documents/Core%20Concepts%20%28Spanish%29.pdf

Bórquez, R. (2006). *Glaciares chilenos: reservas estratégicas de agua dulce para la sociedad, los ecosistemas y la economía*. LOM ediciones.

Caguana, A. R., y Naranjo, V. M. (2020). Los derechos de la naturaleza en diálogo intercultural: una mirada a la jurisprudencia sobre los páramos andinos y los glaciares indios. *Deusto Journal of Human Rights*, (6), 99-123.

Calderón Ramírez, D. R. (2014). La participación como base del turismo comunitario y el manejo de los recursos de uso común. Sendero de Ritakuwas, Sierra Nevada de El Cocuy, Güicán y / o Chita. Boyacá, Colombia. *Turismo Y Sociedad*, *15*, 17. https://doi.org/10.18601/01207555.n15.02

Candamil Pineda, E. M., y Grajales, G. M. (1998). Curso Comportamiento humano. *Universidad Del Valle Vicerrectoría De Extensión*. https://studylib.es/doc/4511621/comportamiento-humano---universidad-del-valle

Cárdenas, J. C., Castañeda, J. L., Castillo Brieva, D., Laverde, C., Pereira, M. F., y Rodríguez, L. Á. (2013). *Métodos complementarios para la valoración de la biodiversidad: una aproximación interdisciplinar* (1st ed.). Universidad de los Andes.

Ceballos Liévano, J. L., Rodríguez Murcia, C. E., y Real Núñez, E. L. (2012). *Glaciares de Colombia: más que montañas con hielo*. IDEAM.

Constitución Política de Colombia [Const]. Art. 79. 7 de julio de 1991 (Colombia).

Decreto 1076 de 2015 [Presidente de La República de Colombia]. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. D.O: N. 49523.

Decreto 2811 de 1974 [Presidente de La República de Colombia]. Por medio del cual se expide el Código de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. 27 de enero de 1974. D.O. No. 34243.

Decreto 622 de 1977 [Presidente de La República de Colombia]. Por el cual se reglamentan parcialmente el Capítulo V, Título II, Parte Xlll, Libro II del Decreto – Ley número 2811 de 1974 sobre "Sistema de Parques Nacionales"; la Ley 23 de 1973 y la Ley 2 de 1959. D.O. 34759.

Elizondo, M. G., Ybarra, E. J., Elizondo, S. G., Calderón, Ó. a. A., Pérez, J. J., y De Jesús Návar Cháidez, J. (2003). Cambio climático mundial : origen y consecuencias. *CIENCIA UANL*, *3*. http://eprints.uanl.mx/1287/

García-Valdecasas, J. I. (2011). La simulación basada en agentes: una nueva forma de explorar los fenómenos sociales. *Revista Espanola De Investigaciones Sociologicas*, *136*. https://doi.org/10.5477/cis/reis.136.91

Garzón, L. J. R., y Jiménez, V. L. L. (2017). Vulnerabilidad Hídrica De La Cuenca Del Río Blanco, En El Municipio de La Calera, considerando los escenarios de cambio climático propuestos por la corporación autónoma regional de Cundinamarca-Car. Publicaciones e Investigación, 11(1), 77-88.

Ghoreishi, M., Razavi, S., y Elshorbagy, A. (2021). Understanding human adaptation to drought: agent-based agricultural water demand modeling in the Bow River Basin, Canada. *Hydrological Sciences Journal*, *66*(3), 389–407. https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1873344

Greenpeace. (2017). Cambio climático | *Causas, consecuencias y soluciones. Greenpeace España.* https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/cambio-climatico/

Grimm, V., Railsback, S. F., Vincenot, C. E., Berger, U., Gallagher, C., Jiang, J., Edmonds, B., Ge, J., Giske, J., Groeneveld, J., Johnston, A. S., Milles, A., Nabe-Nielsen, J., Polhill, G., Radchuk, V., Rohwäder, M., Stillman, R. A., Thiele, J. C., y Ayllón, D. (n.d.). The ODD Protocol for Describing Agent-Based and Other Simulation Models: A Second Update to Improve Clarity, Replication, and Structural Realism. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *23*(2). https://doi.org/10.18564/jasss.4259

Gobernación de Boyacá. (2017). Análisis Situacional De Salud Modelo Determinantes Sociales Güicán De La Sierra Boyacá 2017. In *boyaca.gov*.

Gutiérrez Rey, F., Lagos-López, M. I., Cepeda Arias, E. R., Espinosa Ramírez, A. J., y Neira Simijaca, J. A. (2020). *Zisuma : Parque Nacional Natural El Cocuy, Cuenca Alta del Río Nevado.* (1st ed., Vol. 1). Editorial UPTC. https://librosaccesoabierto.uptc.edu.co/index.php/editorial-uptc/catalog/view/141/172/3237

Hernández Diaz, D. I. (2014). *Diagnostico Para El Programa De Uso Eficiente Y Ahorro De Agua Acueducto "El Tabor" Municipio De Güicán De La Sierra*. Unidad De Servicios Públicos Domiciliarios Güicán De La Sierra (USPD).

Hernández Gamboa, j. S., y Otalora Hernán, M. C. (2017). *Estimación De Los Índice Hídricos (IUA, IRH, IVH) Y Formulación De Medidas Parala Mitigación Del Desabastecimiento En La Subcuenca Arroyo Grande Corozal (2502- 01-07) De La Cuenca Río Bajo San Jorge* [Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia]. Universidad Católica de Colombia.

Herrera, G. y Ruiz, J. (2009). Retroceso glaciar en la Sierra Nevada del Retroceso glaciar en la Sierra Nevada del Cocuy, Boyacá - Colombia, acá - Colombia,

acá - Colombia, 1986-2007 1986-2007. *Perspectiva Geográfica*, 13, ISSN 0123-3769. https://revistas.uptc.edu.co/index.php/perspectiva/article/view/1710

Herrera Vargas, N. (2016). *Implementación De Biomodelos Estimativos De La Calidad Ecosistémica En El Nevado Del Cocuy Al Año 2030 Producto Del Retroceso Glaciar* [Tesis de Especialización, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Houghton, J., Ding, Y. H., Griggs, D. J., y Johnson, C. A. (2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/216811760_Climate_Change_2001_The_Scientific_Basistps://ufpso.edu.co/

Huber, L., Rüdisser, J., Meisch, C., Stotten, R., Leitinger, G., y Tappeiner, U. (2021). Agent-based modelling of water balance in a social-ecological system: A multidisciplinary approach for mountain catchments. *Science of the Total Environment*, *755*, 142962. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142962

Huerta Barrientos, A. (2023). *Manual de Netlogo en español*. aidahuertabarrientos.files.wordpress.com%2F2021%2F05%2Fmanual-de-netlogo-en-espanol-1.pdf

IDEAM. (2022). *Sierra Nevada De El Cocuy O Güicán.* http://glaciares.ideam.gov.co/web/ecosistemas/sierra-nevada-cocuy-guican

IDEAM. (2010). *Índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento* (IVH). IDEAM.

IDEAM. (2014). *Conceptos Básicos De Cambio Climático - IDEAM*. Cambioclimatico.gov.co. http://www.cambioclimatico.gov.co/otras-iniciativas

Ideam (2023). *Estudio Nacional del Agua 2022*. Ideam. 464 pp

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2018). *Adaptación al cambio climático*. Gobierno De Mexico. Retrieved June 15, 2023, from https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/adaptacion-al-cambio- climatico-78748

IPCC. (2001). *Cambio climático 2001: La base científica*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2020/02/wg1sum_sp.pdf

Ley 1523 de 2012. Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. 24 de abril de 2012. D.O. No. 48411

Kniveton, D., Smith, C. D., y Wood, S. (2011). Agent-based model simulations of future changes in migration flows for Burkina Faso. *Global Environmental Change*, *21*, S34–S40. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.09.006

Ley 1581 de 2012. Por la cual se dictan disposiciones generales para la protección de datos personales. Octubre 17 de 2012. D.O. No. 48587

Ley 9 de 1979. Por la cual se dictan Medidas Sanitarias. 24 de enero de 1979

Ley 99 de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. 22 de diciembre de 1993. D.O. No. 41146

Lizarazo, D. A. (2023). *Rodeados de tradición - Mercado, Terminal y Cinemateca (Equipamiento para el Municipio Güicán Boyacá)* [Trabajo de Grado, Universidad El Bosque]. Universidad El Bosque.

Magallanes Reyes, J. M. (2015). *Climate Change And The Potential For Conflict And Extreme Migration In The Andes: A Computational Approach*

For Interdisciplinary Modeling And Anticipatory Policy-Making [Trabajo de Doctorado, Universidad George Mason]. Universidad George Mason.

Mecon Castillo, M. T. (2016). *Análisis De La Vulnerabilidad En Fuentes Hídricas Superficiales Abastecedoras De Acueductos Frente Al Cambio Climático En La Cuenca Del Río Subia En Los Municipios De Fusagasuga, Granada Y Silvania* [Trabajo De Grado, Universidad Militar Nueva Granada]. Universidad Militar Nueva Granada.

Meléndez, A. (2007) *Construyendo Modelos Basados en Agentes | Modelación basada en Agentes*. https://bookdown.org/jamelende/LibroMobaBookDown/construyendo-modelos-basados-en-agentes.html

Mendizabal, M. (2008). *El retroceso de los glaciares: Termómetro del Cambio Climático. Vol. 2 (3).*

Mendoza, G., Jeuken, A., Matthews, J. H., Stakhiv, E., Kucharski, J., y Gilroy, K. (2020). *Análisis de decisiones basadas en el riesgo climático (CRIDA), Planificación colaborativa de los recursos hídricos para un futuro incierto* [UNESCO]. UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375241

Milana, J. P. (1998). . Predicción de caudales de ríos alimentados por deshielo mediante balance de energía: aplicación en los Andes centrales. Argentina. *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología*, 5 (0328–1159), 53–69. https://www.scielo.org.ar/pdf/raas/v5n2/v5n2a01.pdf

Miller, G., 2007, *Ciencia ambiental: Desarrollo sostenible, un enfoque integral*, 8va edición, Editores Internacional Thomson, México.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). *Política Nacional para la Gestión integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos*. https://www.minambiente.gov.co/direccion-de-bosques-biodiversidad-y-servicios-

ecosistemicos/politica-nacional-para-la-gestion-integral-de-la-biodiversidad-y-sus-servicios-ecosistemicos/

Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*.124 p.

Molano, S. M., Cardenas, D. P., Gómez, H. S., Alvarado, D. M., Galindo, A. F., Sanabria, J. F., y Neita, J. S. G. (2022). Evaluación del retroceso glaciar de la Sierra Nevada del Cocuy, Colombia a partir de la clasificación de imágenes multisensor. *Boletín De Geología*, 44(1). https://doi.org/10.18273/revbol.v44n1-2022002

Moreno, l. V. G., Pinzón, a. M. A., y García, r. M. (2015).*Determinar la vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico del páramo Guerrero y establecer las posibles medidas de adaptación y mitigación*.[Trabajo de Grado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio institucional Universidad Católica de Colombia. https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/6c4410f0-0864-4641-985f-67aab02446f2

Muñoz, C. L. (2016). El riesgo hídrico de los sectores minero y energético en un contexto de cambio climático. *Vox Juris*, 30(2), 255-261.

Myers, N., Mittermeier, R.A., Mittermeier, C.G., Da Fonseca, G.A., y Kent, J. (2000). *Biodiversity hotspots for conservation priorities*. Nature, 403, 853–858

Ontiveros, A. A., y Calvo, M. P. (2017*). Introducción al modelado basado en agentes: Una aproximación desde Netlogo*. El Colegio de San Luis.

Paniagua, E. C. P., y García, D. H. (2013). La perspectiva del cambio climático en el departamento de Antioquia. *Trilogía Ciencia Tecnología Sociedad*, 5(9), 115-130.

Peña Suárez, J. C. (2015). *Análisis Multitemporal Del Retroceso Glaciar De La Sierra Nevada Del Cocuy Ubicada En Los Departamentos De Boyacá Y Arauca Entre Los Años 1992, 2003 Y 2014.* [Trabajo de Grado, Universidad Militar Nueva Granada]. Universidad Militar Nueva Granada.

Pérez Figueredo, A. (2012). *La Vulnerabilidad Ambiental En Los Territorios*. Eumed.net. https://www.eumed.net/rev/delos/13/apf.html

Piontek, F. (2010). *The impact of climate change on conflict and cooperation in the Nile basin*. [Tesis de Maestría, Universidad de Hamburgo] Universidad de Hamburgo. https://www.clisec.uni-hamburg.de/pdf/thesis-piontek-2010.pdf

Plasencia Sánchez, E. (2011). Glaciares, cambio climático y actividades productivas: el caso de Perú. *Keneamazon*, 46. https://keneamazon.net/Documents/Publications/Virtual-Library/Ecosistemas-Zonas-Aridas/12.pdf

Price, M. F. (2002). *Las montañas: ecosistemas de importancia mundial*. Fao.org. https://www.fao.org/3/w9300s/w9300s03.htm#:~:text=Las%20monta%C3%B1as%20desempe%C3%B1an%20un%20papel%20esencial%20en%20el,a%20menudo%20durante%20el%20periodo%20de%20menor%20pluviosidad.

Quesada Chaverri, F. (2018). *Introducción Al Lenguaje Netlogo Y La Programación Basada En Agentes*. https://franciscoquesada.com/wp-content/uploads/2020/11/netlogo13.pdf

Redacción Medioambiente Y Efe. (2022, 27 septiembre). *El triste adiós de un glaciar de El Cocuy que «morirá» en dos años*. El Tiempo. https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/adios-a-un-glaciar-del-parque-el-cocuy-que-morira-en-dos-anos-705392

Rekowsky, I.; Bremer, U.; Veettil, B. (2018). Variações de área das geleiras da Colômbia e da Venezuela entre 1985 e 2015 com dados de

sensoriamento remoto. *Geociências*, 37(3), 569-581. https://doi.org/10.5016/geociencias.v37i3.11946

Rendón Macías, M. E. R., Riojas-Garza, A., Contreras-Estrada, D., y Martínez‐Ezquerro, J. D. (2018). Análisis bayesiano. Conceptos básicos y prácticos para su interpretación y uso. Revista Alergia México, 65(3), 285‐298. https://doi.org/10.29262/ram.v65i3.512

Rincon Alvarez, A. C., y Gutiérrez Prada, K. V. (2021). *Cálculo Del Índice De Vulnerabilidad Hídrica En La Cuenca Del Río Chicamocha En Los Departamentos Boyacá-Santander En Escenarios De Cambio Climático* [Trabajo de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Riscanevo Puentes, N. L. (2018). Análisis De Situación De Salud Con El Modelo De Los Determinantes Sociales De Salud, Municipio De Güicán De La Sierra Boyacá 2018. E.S.E Hospital Andrés Girardot.

Sánchez Suescún, A. (2015). *Identificación de riesgos y factores de contaminación del Río Cardenillo a su paso por la Sierra Nevada del Cocuy Güicán Cardenillo a su paso por la Sierra Nevada del Cocuy Güican*. [Trabajo de Grado, Universidad de la Salle] Ciencia UniSalle. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/283/

Sánchez-Zamora, P., Gallardo-Cobos, R. y Ceña Delgado, F. (2016) La noción de resiliencia en el análisis de las dinámicas territoriales rurales: Una aproximación al concepto mediante un enfoqueterritorial. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 13 (77), 93-116. http://dx.doi.org/10.11144/Javeriana.cdr13-77.nrad

Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., ... y Midgley, P. M. (2013). Cambio climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo i al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de

Expertos sobre el Cambio Climático. *Cambio Climático 2013: Bases Físicas*. C, 27.

Sullivan, C. (2008). The Climate Vulnerability Index: relevance to the Tourism Sector. *Capacity Building Seminar Balliol College*

Valenzano Bustamante, J. P. (2021). *Propuesta de protección de glaciares, según los casos de estudio en la zona norte y centro del país*. [Trabajo de Grado, Universidad de Chile]. Repositorio Académico Universidad de Chile. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/188393

Vargas Melo, J. A. y Camargo Barrero D.M. (2015).*Modelo de Autómatas Celulares para el Análisis de la ParteBaja de la Subcuenca Hidrográfica del rio San Jorge*. . [Trabajo de Grado, Universidad Católica]. Repositorio Institucional Universidad Católica de Colombia. https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/2468

Wilensky, U. (2023). *NetLogo 6.4.0 User Manual*. Netlogo. https://ccl.northwestern.edu/netlogo/docs/

12 Anexos.

Anexo 1.

Encuesta aplicada a la comunidad de la vereda El Tabor

ENCUESTA

PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

OBJETIVO: Analizar la vulnerabilidad del abastecimiento del acueducto el tabor dependiente del glaciar Ritacuba Negro Del Parque Nacional Natural El Cocuy mediante el método basado en agentes y el índice de vulnerabilidad hídrico por desabastecimiento.

COORDENADAS GEOGRÁFICAS:		
DEPARTAMENTO:	**FECHA**	
MUNICIPIO:	**VEREDA**	
NOMBRE DE LA PROPIEDAD:	**N° de personas**	
NOMBRE DEL PROPIETARIO:	**Sexo: Femenino ( ) Masculino ( )**	

1) **¿Es perteneciente al distrito del acueducto de El Tabor?**

Si ( )

No ( )

2) **¿Qué actividad pecuaria se dedica?**

Bovinos ( )

Ovinos ( )

Otros _____

3) **¿Qué actividad agrícola se dedica?**

Papa ( )

Pastos ( )

Otros _____

4) **¿Cuál es la fuente de abastecimiento de agua de la vivienda donde habita?**

Acueducto rural ( ) Quebrada ( )

Pozo ( ) Naciente ( )

Otros _____

5) ¿**Concesión del recurso hídrico?** Si( ) No) Caudal captado _____	**6)** **¿Cómo se conduce el agua a la vivienda?** Manguera ( ) Tubo PVC ( ) Motobomba ( ) Acequia ( ) Otro _____-
7) ¿Cuántas horas al día o a la semana tienen acceso a agua potable? _____	**8)** ¿El punto de concesión llega a ,tanque o punto directo? _____
9) **¿Cantidad** de caudal con que se beneficia? _____**[L/s]**	**10)** **¿La cantidad de agua que obtiene le parece suficiente?** Si ( ) No ( )
11) **¿Está conforme con la calidad del recurso hídrico?** Si ( ) No ( ) ¿Por qué ? _____	**12)** **¿Considera usted que la cantidad de agua que existen en la zona son?** Altos ( ) Aceptables ( ) Bajos ( )
13) ¿Qué prácticas de conservación del agua se siguen en su hogar o comunidad? _____ _____ _____ _____ _____	**14)** **¿Son conscientes los habitantes del casco rural de que podría haber problemas de agua en el futuro?** _____ _____ _____
Firma del encuestado: _____	
Observaciones: la información recolectada en esta encuesta será de uso exclusivo para el investigador en curso. Regulado por la Ley 1581 de 2012	

Anexo 2.

Planilla para registro de consumo de agua de la comunidad de la vereda de El Tabor

Tipo de caudal																				
Usuario	Ducha			Lavamanos			Inodoro			Cocina			Lavado de ropas			Agrícola			Comercial		
	# de usos	Tiempo de uso	Caudal (L/min)	# de usos	Tiempo de uso	Caudal (L/min)	# de usos	Tiempo de uso	Caudal (L/min)	# de usos	Tiempo de uso	Caudal (L/min)	# de usos	Tiempo de uso	Caudal (L/min)	# de usos	Tiempo de uso	Caudal (L/min)	# de usos	Tiempo de uso	Caudal (L/min)