



**Aproximación bayesiana para predecir los riesgos del cambio climático en el  
municipio de Pasto**

Luis Carlos Ortega Chamorro

Tesis doctoral presentada para optar al título de Doctor en Ingeniería Ambiental

Asesor

Julio Eduardo Cañón Barriga, Doctor (PhD) en Hidrología

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería  
Doctorado en Ingeniería Ambiental  
Medellín, Antioquia, Colombia  
2022

<b>Cita</b>	(Ortega Chamorro, 2022)
<b>Referencia</b>	Ortega Chamorro, L. C. (2022). <i>Aproximación bayesiana para predecir los riesgos del cambio climático en el municipio de Pasto</i> [Tesis doctoral]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	



Doctorado en Ingeniería Ambiental, Cohorte Seleccione cohorte posgrado.  
 Grupo de Investigación Gestión y Modelación Ambiental (GAIA).  
 Centro de Investigación Ambientales y de Ingeniería (CIA).



Centro de Documentación de Ingeniería (CENDOI)



**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes.

**Decano/Director:** Jesús Francisco Vargas Bonilla.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación fue posible gracias a:

Lida Carmenza mi bella esposa, por su apoyo incondicional; a David mi hijo, por llenar mis días de felicidad y por ser mi inspiración y mi fuente diaria de motivación; a Maryori y Alejandro por estar juntos en los buenos y malos momentos; a mis padres Carlos y Elsy, por sus bendiciones y oraciones permanentes; y a Dios por escucharlas siempre.

Al profesor Julio Eduardo Cañón mi director de tesis, por su paciencia, sus consejos y por ser mi guía durante todos estos años.

Al profesor Jordi Morató, Coordinador de la Cátedra UNESCO de Sostenibilidad de la Universidad Politécnica de Cataluña (Cataluña, España), y al profesor Marek J. Druzdzel creador del Laboratorio de Sistemas de Decisión, de la Universidad de Pittsburgh (Pittsburgh, EEUU), por darme la oportunidad de realizar mi pasantía investigativa, y por compartir sus conocimientos y experiencias.

A la Universidad de Nariño, por su acompañamiento de principio a fin en mi proceso de formación doctoral

¡MIL Y MIL GRACIAS!

## TABLA DE CONTENIDO

<b>Resumen .....</b>	<b>8</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>9</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>10</b>
<b>Planteamiento del problema .....</b>	<b>13</b>
<b>Objetivos .....</b>	<b>14</b>
<b>Publicaciones .....</b>	<b>15</b>
<b>1. CAPÍTULO I. UNA APROXIMACIÓN SISTÉMICA A LA INFLUENCIA DEL CLIMA EN LA DINÁMICA DEL MUNICIPIO DE PASTO (COLOMBIA).....</b>	<b>16</b>
<b>1.1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>17</b>
<b>1.2 MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>20</b>
1.2.1 Selección del enfoque sistémico.....	20
1.2.2 Identificación de elementos urbanos .....	21
1.2.3 Relaciones sistémicas con el método Micmac.....	25
1.2.4 Construcción del diagrama causal .....	25
<b>1.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>26</b>
1.3.1 Elementos urbanos que conforman el municipio de Pasto .....	26
1.3.2 Relaciones entre elementos .....	26
1.3.2.1 Elementos explicativos o de poder del sistema urbano.....	28
1.3.2.1.1 Clima.....	28
1.3.2.1.2 Energía .....	29
1.3.2.1.3 Cultura.....	30
1.3.2.2 Elementos de enlace del sistema urbano .....	31
1.3.2.2.1 Gobernabilidad.....	31
1.3.2.2.2 Educación.....	32
1.3.2.2.3 Demografía .....	33
1.3.2.2.4 Ambiente.....	34
1.3.2.2.5 Economía .....	35
1.3.2.3 Elementos dependientes o de resultados del sistema urbano .....	37
1.3.2.3.1 Riesgos de desastres.....	37
1.3.2.3.2 Funcionalidad.....	38
1.3.2.3.3 Salud pública.....	39
1.3.2.4 Elementos autónomos del sistema urbano .....	40
1.3.3 Modelo conceptual del sistema urbano .....	41
<b>1.4 CONCLUSIONES .....</b>	<b>45</b>
<b>2. CAPÍTULO II. IMPACTOS DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LOS ELEMENTOS URBANOS DEL MUNICIPIO DE PASTO (2004-2019) .....</b>	<b>47</b>
<b>2.1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>48</b>
<b>2.2 MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>50</b>
2.2.1 Identificación de variables.....	50
2.2.2 Periodo de evaluación.....	51

2.2.3	Cálculo de variables.....	52
<b>2.3</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>53</b>
2.3.1	Impactos del cambio climático .....	53
2.3.2	Identificación de posibles efectos locales del cambio climático .....	54
2.3.3	Clima local.....	56
2.3.4	Impactos de la variabilidad climática en las variables urbanas .....	58
2.3.4.1	Influencia del clima en la disponibilidad de agua superficial .....	58
2.3.4.2	Influencia del clima en el rendimiento de los cultivos .....	60
2.3.4.3	Influencia del clima en la producción pecuaria.....	63
2.3.4.4	Influencia del clima en la seguridad alimentaria.....	65
2.3.4.5	Influencia del clima en los riesgos de desastres .....	67
2.3.4.5.1	Efecto del clima en las inundaciones .....	68
2.3.4.5.2	Efecto del clima en los deslizamientos de tierra .....	69
2.3.4.5.3	Efecto del clima en los incendios forestales.....	71
2.3.4.6	Influencia del clima en la salud humana .....	72
<b>2.4</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>76</b>
<b>3.</b>	<b>CAPÍTULO III. APROXIMACIÓN BAYESIANA PARA PREDECIR LOS RIESGOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL MUNICIPIO DE PASTO .....</b>	<b>78</b>
<b>3.1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>79</b>
<b>3.2</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>81</b>
3.2.1	Caso de estudio.....	81
3.2.2	Selección del tipo de modelación .....	82
3.2.3	Componentes de la red bayesiana.....	83
3.2.3.1	Componente cualitativa de la red bayesiana urbana .....	84
3.2.3.2	Componente cuantitativa de la red bayesiana .....	86
3.2.4	Definición del riesgo .....	89
3.2.5	Escala temporal del modelo.....	90
3.2.6	Construcción de la red bayesiana .....	91
3.2.7	Configuración de la red híbrida bayesiana .....	91
<b>3.3</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>92</b>
3.3.1	Evolución del clima según los escenarios RCP .....	92
3.3.2	Estimación de riesgos urbanos.....	93
3.3.2.1	Riesgos en la disponibilidad de agua .....	93
3.3.2.2	Riesgos del sector agrícola.....	95
3.3.2.3	Riesgos del sector pecuario.....	97
3.3.2.4	Riesgos para la seguridad alimentaria.....	99
3.3.2.5	Riesgos de desastres.....	101
3.3.2.6	Riesgos para la salud pública .....	103
3.3.3	Validez de los riesgos previstos e implicaciones para la gestión de la ciudad .....	106
<b>3.4</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>107</b>
<b>4.</b>	<b>CONCLUSIONES GENERALES .....</b>	<b>109</b>
<b>5.</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>112</b>
<b>6.</b>	<b>APÉNDICE.....</b>	<b>139</b>
<b>6.1</b>	<b>Apéndice A.....</b>	<b>139</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Elementos de las metodologías de planificación territorial para describir el territorio .....	23
Tabla 1.2 Descripción de los elementos urbanos seleccionados para describir el territorio .....	26
Tabla 1.3. Matriz de relaciones directas.....	27
Tabla 1.4. Bucles del sistema urbano.....	42
Tabla 2.1. Estadísticas climáticas de los periodos climáticos de referencia y evidencias.....	58
Tabla 2.2. Validación estadística de las correlaciones entre rendimiento de los cultivos y las variables climáticas .....	63
Tabla 3.1. Ajuste de series de temperatura y precipitación con distribuciones paramétricas.....	87
Tabla 3.2. Ajuste de series de población con distribuciones paramétricas .....	87
Tabla 3.3. Parámetros de la red bayesiana (base numérica).....	88
Tabla 3.4. Variables auxiliares del modelo .....	88
Tabla 3.5. Temperatura y precipitación media de los escenarios RCP para el periodo 3 .....	92
Tabla 3.6. Riesgos en la disponibilidad de agua .....	94
Tabla 3.7. Rango y dominio del rendimiento de los cultivos.....	95
Tabla 3.8. Riesgos en la producción agrícola.....	97
Tabla 3.9. Riesgos en la producción ganadera .....	98
Tabla 3.10. Riesgos en la producción ganadera .....	100
Tabla 3.11. Rango y dominio de los riesgos de desastres .....	101
Tabla 3.12. Riesgos de desastres.....	103
Tabla 3.13 Rango y dominio del riesgo de incidencia de las EDA y las IRA.....	104
Tabla 3.14 Riesgos en salud pública .....	106

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.2 Mapa de influencias y dependencias indirectas.....	28
Figura 1.3 Diagrama de influencias del sistema urbano con diferentes densidades. ....	41
Figura 1.4 Diagrama causal de dinámica de sistemas del municipio de Pasto. ....	42
Figura 2.1 Red global de impactos del cambio climático en América Latina y el Caribe. ....	54
Figura 2.2 Red local de impactos del cambio climático. ....	56
Figura 2.3 Distribución de la temperatura y la precipitación en el municipio de Pasto.....	57
Figura 2.4 Oferta hídrica del municipio de Pasto, obtenida en la parte alta y media de la cuenca del río Pasto (Udenar) y en la parte alta de la cuenca del río Guamuez (La Cocha). ....	59
Figura 2.5 Coeficiente de escorrentía (Cs) en el municipio de Pasto. ....	60
Figura 2.6 Curva de correlaciones entre P/T y el rendimiento de cultivos. Si P/T disminuye el clima es cálido y seco, pero si aumenta, el clima es frío y húmedo.....	61
Figura 2.7 Correlaciones entre el rendimiento de cultivos y las variables climáticas. ....	62
Figura 2.8 Principales características de la producción local de ganado bovino. ....	65
Figura 2.9 Energética alimentaria local deriva de la producción agrícola y ganadera.....	66
Figura 2.10 Características de los eventos de inundaciones. ....	69
Figura 2.11 Características de los eventos de deslizamientos de tierra. ....	70
Figura 2.12 Características de los eventos de incendios forestales.....	71
Figura 2.13 Incidencia del clima en la morbilidad por IRA y EDA.. ....	74
Figura 2.14 Incidencia de mortalidad infantil por IRA, EDA y DNT. ....	75
Figura 3.1. Mapas de inundaciones y deslizamientos de tierra del municipio de Pasto.. ....	82
Figura 3.2 Estructura de la red bayesiana para predecir los riesgos urbanos.....	85
Figura 3.3 Simulación de la disponibilidad de agua superficial en la cuenca del río Pasto.....	94
Figura 3.4 Simulación del rendimiento de los cultivos bajo el cambio climático. ....	96
Figura 3.5 Simulación de la producción ganadera bajo el cambio climático.....	98
Figura 3.6 Simulación de la producción calórico de los alimentos bajo el cambio climático. ....	100
Figura 3.7 Simulación de personas y bienes afectados por desastres bajo el cambio climático. .	102
Figura 3.8 simulación de la dinámica de la salud pública bajo el cambio climático. ....	105

## RESUMEN

El clima es un elemento que influye en la estructura social de las comunidades agrupadas en pueblos y ciudades. Sin embargo, a nivel global experimenta cambios significativos asociados al incremento de los gases de efecto invernadero, que impactan a nivel local, generando nuevas dinámicas territoriales, que agudizan las ya existentes (economía, medios de producción, salud, recursos naturales, entre otros). Si bien estos fenómenos son estudiados ampliamente en grandes ciudades, a nivel de ciudades o comunidades intermedias y pequeñas, su estudio aún no es relevante. Por lo tanto, en esta investigación, pretendemos describir los impactos y los riesgos del cambio climático mediante un estudio de caso de la región Andina aplicado en el municipio de Pasto (Colombia), con una ciudad intermedia que alberga a más del 80% de su población, ubicada en el nodo de los Pastos de la Cordillera de las Andes, con una morfología de montaña y altas pendientes, que lo hace susceptible frente al cambio climático.

La metodología propuesta consistió en utilizar el método de análisis estructural para reconocer y establecer las relaciones causales de los elementos que describen sistémicamente el desarrollo del municipio. Posteriormente, con la prueba de estabilidad, identificamos que las series de tiempo de temperatura y precipitación del periodo 2006-2019, cambiaron significativamente respecto al periodo 1976-2005, lo que permite inferir que se está gestando un cambio en el clima local. De ahí que, con la información disponible, las relaciones causales identificadas, y el método correlacional, definimos matemáticamente las relaciones entre las variables climáticas y las urbanas en el periodo 2004-2019, con el fin reconocer las trayectorias que siguen las variables urbanas impactadas por la variabilidad del clima. Las trayectorias identificadas siguen modelos cuadráticos, es decir, que pequeños cambios en las variables de temperatura y precipitación producen alteraciones significativas en las variables urbanas (el impacto crece exponencialmente).

Finalmente, con base en los modelos correlaciones, y los escenarios de cambio climático, diseñamos un modelo estocástico con redes bayesianas que nos permitió predecir los riesgos de las variables urbanas a corto (2011-2040), mediano (2041-2070) y largo plazo (2071-2100), donde los elementos más comprometidos son los relacionados con disponibilidad de agua, producción agrícola, seguridad alimentaria, desastres (inundaciones, deslizamientos de tierra e incendios forestales) y salud pública.

## ABSTRACT

Climate is an element that influences the social structure of communities grouped in towns and cities. However, at the global level, it is undergoing significant changes associated with the increase in greenhouse gases, which have an impact at the local level, generating new territorial dynamics that exacerbate existing ones (economy, means of production, health, natural resources, among others). Although these phenomena are widely studied in large cities, at the level of intermediate and small cities or communities, their study is not yet relevant. Therefore, in this research, we intend to describe the impacts and risks of climate change through a case study of the Andean region applied to the municipality of Pasto (Colombia), with an intermediate city that houses more than 80% of its population, located in the Pastos node of the Andes Mountains, with a mountain morphology and high slopes, which makes it susceptible to climate change. The trajectories identified follow quadratic models, i.e., small changes in the temperature and precipitation variables produce significant changes in the urban variables (the impact grows exponentially).

The proposed methodology consisted of using the structural analysis method to recognize and establish the causal relationships of the elements that systemically describe the development of the municipality. Subsequently, with the stability test, we identified that the time series of temperature and precipitation for the period 2006-2019, changed significantly with respect to the period 1976-2005, which allows us to infer that a change in the local climate is taking place. Hence, with the available information, the causal relationships identified, and the correlational method, we mathematically defined the relationships between climate and urban variables in the period 2004-2019, in order to recognize the trajectories followed by urban variables impacted by climate variability.

Finally, based on the correlation models and the climate change scenarios, we designed a stochastic model with Bayesian networks that allowed us to predict the risks of urban variables in the short (2011-2040), medium (2041-2070) and long term (2071-2100), where the most compromised elements are those related to water availability, agricultural production, food security, disasters (floods, landslides and forest fires) and public health.

## INTRODUCCIÓN

De acuerdo con las Naciones Unidas (UN, 2019) las ciudades son las responsables y a la vez las más afectadas por el cambio climático, debido a que albergan a más de la mitad de la población mundial, consumen la mayor parte del suministro energético disponible y, por lo tanto, liberan el 70% de los gases de efecto invernadero (GEI) del planeta.

Las mediciones recientes muestran que en el último decenio (2011-2020) el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) alcanzó una concentración de 410 ppm (sin precedentes en millones de años), produciendo un aumento de la temperatura global de 1.09 °C, respecto al periodo pre industrial (1850-1900), generado en las ciudades eventos extremos (olas de calor, precipitaciones y escorrentías) más frecuentes e intensos (Panel Intergubernamental de Cambio Climático [IPCC], 2021). Además, en los mares y en los océanos el nivel de acidez, la temperatura, la salinidad, el nivel del mar, entre otros, cambiando rápidamente y afectan la infraestructura, la economía y la salud humana de las comunidades costeras (IPCC, 2019a). Pese a lo anterior, a nivel urbano existen muchos vacíos en cuanto a la adaptación al clima, principalmente relacionados con la gestión de datos, la evaluación interdisciplinaria de los impactos, la inadecuada articulación entre las políticas y el mercado (Edward y Chao, 2018), así como desafíos en la modelización de alta resolución y la articulación del cambio climático con la adaptabilidad de los elementos urbanos (calidad del aire, salud, energía, planificación urbana, gobierno, agua, agricultura, procesos humanos y gestión de bases de datos) (González et al., 2021).

Sin embargo, las consecuencias mundiales del cambio climático no se distribuyen proporcionalmente según las emisiones de GEI. Por ejemplo, la región de América Latina y el Caribe emiten menos del 10% de ellos, empero se ha convertido en una de las regiones más vulnerables del planeta (Bárcena et al., 2018), ya que más del 50% de su población se concentra en ciudades intermedias donde experimenta precipitaciones extremas, deslizamientos de tierra, inundaciones, sequías, escasez de alimentos y riesgos para la salud humana (Novillo, 2018).

En este contexto, el municipio de Pasto ubicado en el Departamento de Nariño, al sureste de Colombia, no es ajeno a los efectos del cambio climático, especialmente por la ubicación geográfica en el Nudo de los Pastos de la Cordillera de los Andes (Región Andina) que se caracteriza por un morfología montañosa con altas pendientes (Alcaldía de Pasto, 2014a), y por

una población creciente de 460,454 habitantes, de los cuales el 86% se concentra en la ciudad de San Juan de Pasto (ciudad intermedia y zona urbana del municipio) (Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas [DANE], 2019). Estas condiciones generan presiones significativas en el desarrollo local y en la disponibilidad de los recursos naturales que, sumado a la crisis del cambio climático a corto, mediano y largo plazo, se convertirán en las importantes amenazas, no solo para el municipio, sino también para la región, ya que San Juan de Pasto es la principal ciudad de suroccidente Colombiano que mantiene vínculos comerciales y sociales con el departamento del Putumayo al occidente y con la república del Ecuador al sur, siendo esta frontera la puerta de entrada del América del Sur.

En cuanto a sus características geográficas, Pasto se ubica en el nudo de los Pastos de la Cordillera de los Andes, a más de 2500 m.s.n.m., con una morfología montañosa y de altas pendientes, que lo hacen vulnerable a eventos de inundaciones, deslizamientos de tierras y en menor medida a incendio forestales (Alcaldía de Pasto, 2014a), los cuales se presentan durante todo el año, pero se agudizan con los eventos climáticos extremos de la Niña y el Niño (Dirección para la Gestión del Riesgos de Desastres [DGRD], 2020). Estas condiciones son comunes en muchos municipios y ciudades intermedias ubicadas en la región andina de Colombia, las cuales según Maturana *et al.* (2017), son ciudades económicamente activas que concentran el 45% del Producto Interno Bruto (PIB) de la nación.

Por otra parte, los impactos del cambio climático en Pasto aún no se han identificado, sin embargo, los registros históricos del clima reportados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), muestran alteraciones importantes en las series de tiempo de temperatura y precipitación, que coincide con el sexto informe del IPCC (2021), el cual afirma que todas las regiones habitables del planeta ya padecen las consecuencias del cambio climático.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, en esta investigación pretendemos identificar los impactos actuales, y los riesgos del cambio climático a los que estará expuesto el municipio de Pasto a corto (2011-2040), mediano (2041-2070) y largo (2071-2100) plazo, como preámbulo a los procesos de mitigación y adaptación que deberá asumir administración municipal.

Para lograr este propósito combinamos las herramientas de análisis estructural, el método Delphi, el modelo causal de dinámica de sistemas, el método correlación y el método de redes bayesianas (modelo estocástico), que nos permitieron identificar impactos y simular los riesgos urbanos, con base en las proyecciones propuestas por el IPCC (2013) que se basan en escenarios

de forzamiento radiativo planetario (2.6, 4.5, 6.0 y 8.5  $w/m^2$ ), a los que denominamos escenarios de trayectorias de concentración representativas (RCP, sigla en inglés) o escenarios RCP.

Con base en lo anterior, encontramos que los principales riesgos del cambio climático a corto, mediano y largo plazo del municipio de Pasto están asociados con la disponibilidad de agua, el rendimiento de los cultivos, la seguridad alimentaria, los desastres territoriales (inundaciones, deslizamientos de tierra e incendios forestales), e incidencia en la salud pública. Siendo el escenario RCP8.5 el más probable y el que mayores riesgos genera al territorio, dado que las proyecciones de temperatura y precipitación son las más altas de todos los escenarios. Por otra parte, logramos identificar las relaciones del clima con los elementos urbanos, su impacto en la trayectoria de las variables urbanas impactada y a partir de ello, predecir su evolución y los riesgos.

La novedad de esta investigación radica en el diseño metodológico planteado que, partiendo de una escasa información disponible, permitió reconocer con cierta validez estadísticas los impactos actuales del cambio climático que aún son incipientes y de cierta forma pasan inadvertidos tanto por las comunicadas como por las administraciones o gobiernos locales. Además, el modelo estocástico de redes bayesianas permitió realizar simulaciones de los diferentes escenarios RCP con una visión holística del territorio.

En cuanto a la aplicabilidad del modelo estocástico, consideramos que puede ser replicable en municipios o comunidades clasificadas como ciudades intermedias y económicamente activas ubicadas en la región andina, muchas de las cuales comparten características similares a las del municipio de Pasto, tales como: clima muy frío húmedo y semihúmedo, montañoso, ciudades intermedias y con una dinámica poblacional concentrada en la zona urbana.

Esta tesis doctoral se estructura en tres capítulos, en el primer capítulo se identifican la manera en que se establecen las relaciones entre el clima y los elementos urbanos del municipio. En el segundo capítulo, se definen los modelos correlaciones que marcan las trayectorias de las variables urbanas dada la influencia de las variables climáticas. En el tercer capítulo, construimos un modelo estocástico basado en redes bayesianas donde simulamos los riesgos del cambio climático para los diferentes escenarios RCP a corto, mediano y largo plazo. Los tres capítulos coinciden con los objetivos específicos formulados. La estructura de los capítulos I al III corresponde con el método IMRyC (Introducción, Método, Resultados y Conclusiones), y en la parte final se presenta la sección de conclusiones generales.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Mediante el estudio de caso aplicado al municipio de Pasto, esperamos reconocer los impactos actuales del cambio climático de un municipio con características orográficas de alta montaña (región andina), con una ciudad intermedias económicamente activas y una dinámica poblacional concentra en la zona urbana. A partir de ello, buscamos predecir la evolución del territorio a corto, mediano y largo plazo, según los diferentes escenarios RCP propuestos por el IPCC (2013) y ajustados por el IDEMA a escala local. En este sentido, la pregunta de investigación formulada es la siguiente:

¿Qué riesgos significativos existen para el municipio de Pasto y su ciudad intermedia de la región Andina de Colombia, en el marco de los escenarios de cambio climático?

Las hipótesis nula y alternativa que esperamos demostrar respecto a la pregunta de investigación son las siguientes:

- Hipótesis nula (h0): No existen riesgos para el municipio de Pasto y su ciudad intermedia de la región Andina de Colombia, en el marco de los escenarios de cambio climático proyectados
- Hipótesis alternativa (h1): Los riesgos significativos para el municipio de Pasto y su ciudad intermedia de la región Andina de Colombia, en el marco de los escenarios de cambio climático, se relacionan con disponibilidad de agua, producción agrícola, seguridad alimentaria, desastres territoriales y salud pública

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Identificar los impactos actuales del cambio climático y la magnitud de los riesgos urbanos asociados a las proyecciones de los escenarios RCP en el municipio de Pasto

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Reconocer mediante una aproximación sistémica, la influencia del clima en la dinámica socioeconómica y ambiental del municipio de Pasto.
- Identificar las trayectorias de las variables urbanas asociadas al impacto de la variabilidad del clima en el periodo 2004-2019.
- Predecir con redes bayesianas los riesgos del cambio climático en el municipio de Pasto a corto (2011-2040), mediano (2041-2070) y largo plazo (2071-2100).

## PUBLICACIONES

Esta investigación esta publicada en las siguientes revistas científicas:

Ortega Chamorro, L. C., & Cañón Barriga, J. E. (2023). Urban risks due to climate change in the Andean municipality of Pasto, Colombia: A Bayesian network approach. *Risk Analysis*, 1–16. <https://doi.org/10.1111/risa.14086>

Ortega-Chamorro, L.; Cañón-Barriga, J. (2022). Correlative analysis of climate impacts in an Andean municipality of Pasto, Colombia. *Revista de Ciencias Agrícolas*. 39(2): 143-159. doi: <https://doi.org/10.22267/rcia.223902.188>

El manuscrito titulado “Systemic approach to the influence of climate on the dynamics of the municipality of Pasto, Colombia” se encuentra en proceso de evaluación en el Revista de Ingenierías de la Universidad de Medellín.

# CAPÍTULO I

## UNA APROXIMACIÓN SISTÉMICA A LA INFLUENCIA DEL CLIMA EN LA DINÁMICA DEL MUNICIPIO DE PASTO (COLOMBIA)

### **Resumen**

El clima es un elemento urbano que influye significativamente en la estructura social de las comunidades agrupadas en pueblos y ciudades, pero la alteración de la variabilidad climática por efectos del cambio climático está produciendo nuevas vulnerabilidades asociadas a la economía, los medios de producción, la salud, los recursos naturales, entre otros. Sin embargo, este fenómeno es ampliamente estudiada en las grandes ciudades y en menor medida en las pequeñas e intermedias. Por lo tanto, en esta investigación se describió los impactos y riesgos del clima en el municipio de Pasto (Colombia), que comparte condiciones similares con las ciudades intermedias de la región Andina de la cordillera de los Andes. La metodología propuesta consistió en reconocer los elementos urbanos del municipio, a través de la revisión de las principales metodologías internacionales de planificación territorial. Luego, con el método de análisis estructural de enfoque multidisciplinario, y el método Delphi, se obtuvo el mapa de influencias y dependencias, así como y el diagrama de influencias. A partir de este último, se construyó un modelo conceptual de dinámica de sistemas, que permitió identificar las posibles relaciones de los elementos urbanos y el clima. Entre estas influencias se destacan las que limitan el abastecimiento de agua y la producción de alimentos, además del incremento de los efectos negativos en la salud pública, los riesgos de desastres y la economía.

**Palabras claves:** sistema urbano, enfoque sistémico, análisis estructural, modelo conceptual, clima.

### **Abstract:**

Climate is an urban element that significantly influences the social structure of communities grouped in towns and cities, but the alteration of climate variability due to climate change is producing new vulnerabilities associated with the economy, means of production, health, natural resources, among others. However, this phenomenon is widely studied in large cities and to a lesser extent in small and intermediate cities. Therefore, this research describes the impacts and risks of climate in the municipality of Pasto (Colombia), which shares similar conditions with

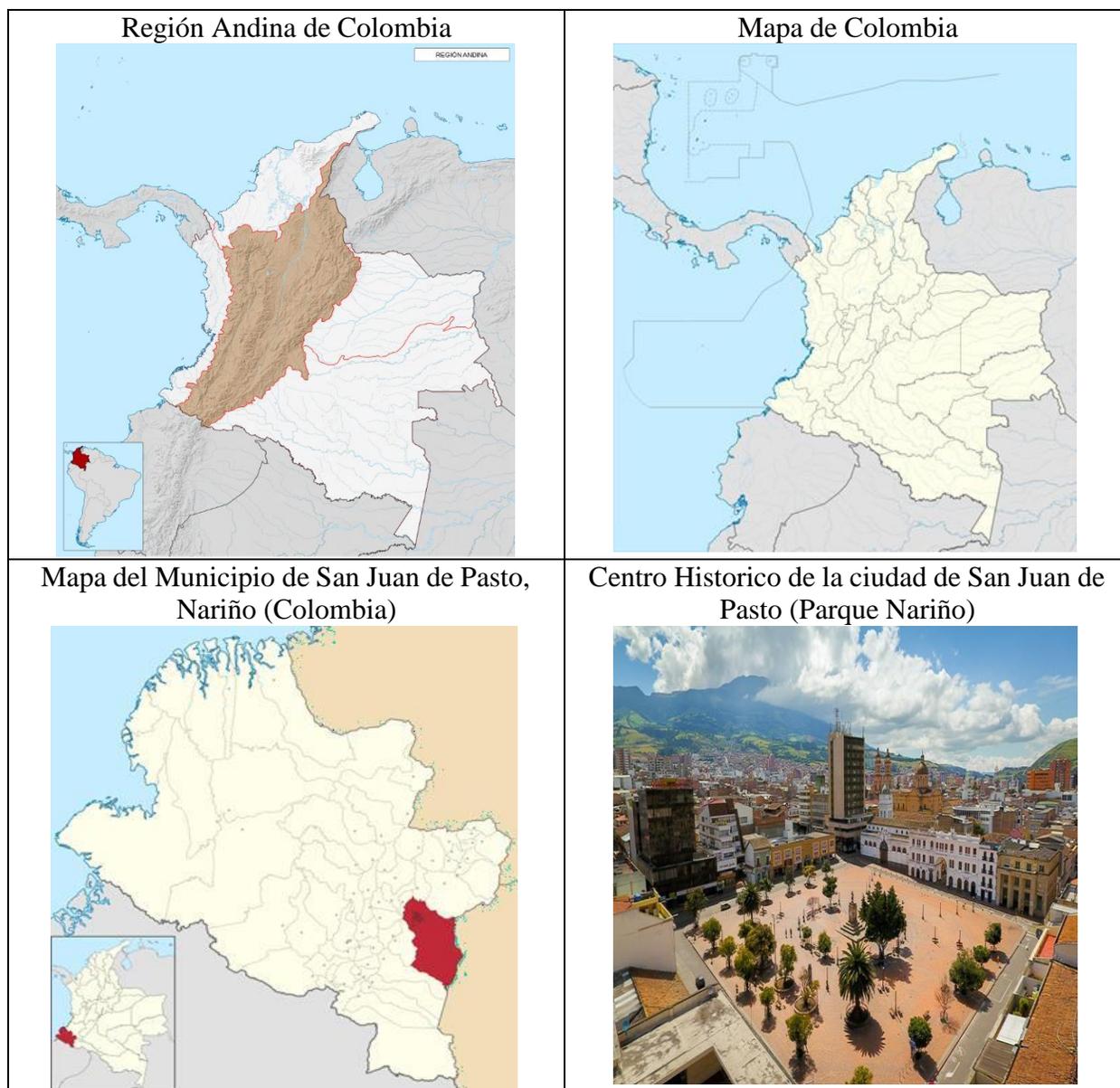
intermediate cities in the Andean region of the Andes Mountain range. The methodology consisted of recognizing the urban elements of the municipality of Pasto, through the review of the main international methodologies of territorial planning. Then, using the multidisciplinary approach structural analysis method and the Delphi method, we obtained the map of influences and dependencies, as well as the influence diagram. Based on the latter, we constructed a conceptual model of the system dynamics, which allowed us to identify the possible relationships between urban elements and climate. Among these influences are those that limit water supply and food production, in addition to increasing negative effects on public health, disaster risks and the economy.

**Keywords:** urban system, systemic approach, structural analysis, conceptual model, climate.

## 1.1 INTRODUCCIÓN

Las ciudades son las principales concentraciones humanas que mayor influencia tienen en el cambio climático y también son las primeras en sufrir sus consecuencias (UN, 2019). En las ciudades se concentran personas, ambientes construidos y dinámicas económicas que hacen necesario concentrar esfuerzos para adaptarse al cambio climático (Novillo, 2018). Si bien el municipio de Pasto no contribuye significativamente al cambio climático, las proyecciones locales de temperatura y precipitación construidas por el IDEAM, nos permiten prevenir alteraciones del clima con efectos sistémicos en todo el municipio de Pasto. Por lo tanto, esta investigación busca reconocer las relaciones sistémicas entre el clima y los elementos urbanos del municipio de Pasto, de acuerdo con su ubicación geográfica y la dinámica de su población.

Respecto a la ubicación, Pasto se localiza al sur oriente de Colombia en el departamento de Nariño, entre las coordenadas  $1^{\circ}12'0''\text{N}$  y  $77^{\circ}16'0''\text{W}$ , con una extensión de 109,555 hectáreas (ha), de las cuales 2,367 ha corresponde a la ciudad de San Juan de Pasto (zona urbana), capital municipal y departamental. De acuerdo con el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) 2015-2027, Pasto se planifica por ejes estructuradores y unidades territoriales urbanas; zonas territoriales y centralidades subregionales, municipales y locales, como base del modelo de ciudad compacta, que busca proteger los recursos naturales de la zona rural y mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub> (Alcaldía de Pasto, 2015) (Figura 1.1). En términos poblacionales, Pasto es una ciudad intermedia con 460,454 habitantes, donde el 86% vive en la zona urbana y el 14% en la zona rural (DANE, 2019).



**Figura 1.1** Ubicación del municipio de Pasto y su contexto. “Región Andina de Colombia” de [Milenioscuro](#) con licencia [CC BY-SA 4.0](#). “Mapa de Colombia” de [Milenioscuro](#) con licencia [CC BY-SA 3.0](#). “Mapa del Municipio de San Juan de Pasto, Nariño (Colombia)” de [Milenioscuro](#) con licencia [CC BY-SA 3.0](#). Centro Historico de la ciudad de San Juan de Pasto (Parque Nariño) tomada de CIDEU <https://www.cideu.org/miembro/san-juan-de-pasto/>

Adicionalmente, las condiciones de crecimiento económico y de prestación de servicios, consolidan a la zona urbana como una ciudad atractiva, principalmente para los habitantes de los diferentes municipios del departamento de Nariño y del Putumayo, que buscan en Pasto oportunidades de empleo, vivienda digna, salud, educación, entre otros servicios que no cuentan en sus territorios (FINDETER, 2015). Además, la influencia fronteriza con el Ecuador dinamiza

la economía local y regional. En este sentido, San Juan de Pasto, al igual que otras ciudades intermedias de Colombia, son consideradas ciudades receptoras de población migrante, debido a múltiples razones, entre ellas, la concentración del 45% del PIB, la menor desigualdad social y espacial, el menor costo de la vivienda, bajos tiempos de desplazamiento, bajos niveles de congestión vehicular y de contaminación, a diferencia de las grandes ciudades (Maturana *et al.*, 2017).

En algunas ciudades, el cambio climático genera pérdidas económicas, altera el tejido social, agudiza la pobreza, y promueve la migración de las poblaciones más vulnerables (United Nations Human Settlements Programme [UNHABITAT], 2011), en especial quienes habitan a nivel del mar y en fuertes pendientes (UN-HABITAT, 2016). Mientras que en las ciudades receptoras y en el marco del cambio climático, presenta dificultades de bienes y servicios ecosistémicos (agua, energía, otros) (UNHABITAT, 2011).

Pasto por su ubicación, tiene una gran biodiversidad asociada a los ecosistemas de la provincia Amazónica (régimen de lluvia monomodal) y a la provincia Norandina (régimen de lluvia bimodal), que dan forma a un patrimonio natural constituido por: paisajes naturales y construidos, ecosistemas frágiles, cuencas hidrográficas, humedales, áreas protegidas, entre otros (Alcaldía de Pasto, 2014a). Sin embargo, su topografía montañosa, dominada por el complejo volcánico Galeras, genera riesgos que se materializan en sismos, inundaciones y deslizamientos (Alcaldía de Pasto, 2014b), donde los dos últimos se agudizan con los episodios climáticos extremos producidos por la fase fría de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) ocurrida entre 2010 y 2011, y por la fase cálida ocurrida entre 2015 y 2016.

De acuerdo con los datos reportados por la Dirección para la Gestión del Riesgo de Desastres (DGRD) de Pasto, los episodios de clima extremo son los que han producido los mayores desastres de los que se tiene registro. Aunque, según Rubio (2016), este incremento también se produce por el asentamiento de viviendas en áreas con riesgos de inundaciones y deslizamientos.

Para identificar las relaciones de elementos urbanos con el clima en el municipio de Pasto, se recurrió al método descriptivo, que se desarrolló de acuerdo con la siguiente metodología: revisión documental, consulta a expertos (método Delphi), aplicación de análisis estructural y construcción de un diagrama causal de dinámica de sistemas. De acuerdo con Cárdenas *et al.* (2020), este diseño metodológico, permite reconocer al territorio como un sistema e inferir su comportamiento. Por otra parte, esta metodología se puede adaptar a otras ciudades de América

Latina que comparten características comunes como clima frío (IDEAM, s.f.), montañosas, poblacional concentrada en zona urbana, ciudades fronterizas y economías emergentes.

Este artículo se divide en tres secciones. En la primera sección se definen los principales elementos que conforman los elementos del sistema urbano. En la segunda se identifican las relaciones entre los elementos urbanos, utilizando el método Delphi y el método de Micmac, y en la tercera sección se construye un modelo conceptual (diagrama causal de dinámica de sistemas), en el cual se identifican los roles de los elementos y sus interacciones, así como los principales bucles de retroalimentación positivos y negativos que se pueden formar en el sistema urbano.

## 1.2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 1.2.1 Selección del enfoque sistémico

El enfoque sistémico desarrollado a nivel local se basó en el método de análisis estructural, conocido o método Micmac (Godet, 2002). Este método permite definir las variables de un sistema, revisar sus relaciones y reconocer las variables claves (Paulus y Fauzi, 2017). Por lo tanto, la implementación del método Micmac para identificar la influencia del clima a nivel local se desarrolló a través de las siguientes fases: i) identificar los elementos que conforman la estructura del territorio; ii) establecer las relaciones entre los elementos; y iii) construir de un diagrama causal para representar la dinámica del municipio de Pasto.

Esta metodología permite identificar las relaciones entre los elementos y las variables esenciales del sistema a partir de una matriz cuadrada que conecta todos los elementos, los cuales son previamente definidos e interrelacionados por expertos, y posteriormente valorados y clasificados según su nivel de influencia y dependencia que tienen dentro del sistema (Barati, *et al.*, 2019). Adicionalmente con el software *Micmac* (versión libre) se identifica el nivel de influencia y de dependencias de los elementos.

De acuerdo con Somoza-Cabrera (2019), el método Micmac clasifica los elementos en cuatro grupos: i) Explicativos o de poder (alto nivel de influencia y bajo nivel dependencia); ii) Enlace (alto nivel de influencia y dependencia); iii) Dependientes o de resultados (baja influencia y alta dependencia); y iv) Autónomos (baja influencia y dependencia). Esta clasificación se presenta en el Mapa de influencias y dependencias indirectas, mientras que las relaciones causales se muestran en el diagrama de influencia. Este último, es la base de un modelo conceptual de

dinámica de sistemas (Quintero y López, 2010), el cual contiene bucles que ofrecen una visión global del sistema (Cárdenas, 2015), así como de la jerarquía, las funciones y la transdisciplinariedad (Varisco, 2016), además de sus límites (Posada, Paredes y Ortiz, 2016).

Por otra parte, el método Micmac es ampliamente utilizado como herramienta de planificación en diferentes sectores. Recientemente se ha incorporado en los procesos de planificación territorial, especialmente en ciudades de América Latina, como en la planificación urbana del municipio de Nuevitas (Cuba), que permitió identificar a los factores turísticos, agropecuarios, portuarios y constructivos, como elementos claves de la economía (Pineda, 2017). En la provincia de Cienfuegos (Cuba), el método contribuyó a identificar los elementos claves de los sectores económicos, políticos, sociales y medioambientales (Riquelme y Azorín, 2019). También se utilizó en la planificación y gestión de la infraestructura de transporte urbano en la ciudad de México (México) (Chatziioannou y Alvarez-Icaza, 2017).

El método Micmac se puede combinar con otras herramientas, por ejemplo, Madanian y Costa (2017), combinaron con sistemas de información geográfica (SIG) para planificar y construir un cinturón verde en la ciudad de Qazvin (Irán). Mientras que en la ciudad de Niš (Serbia) se identificó las principales causas del estancamiento demográfico, espacial y funcional de la ciudad (Ljubenočić y Mitković, 2018). A nivel nacional, el municipio de Jamundí lo utilizó para identificar las variables claves que movilizan el sistema urbano (Cabo, 2020), entre otras.

### **1.2.2 Identificación de elementos urbanos**

Para analizar el territorio bajo la influencia del clima se utilizan diferentes variables. Por ejemplo, Apreda *et al.*, (2019) incluyen las variables del clima, la tecnología, la construcción, los espacios abiertos, las características socioeconómicas, así como la exposición y vulnerabilidad poblacional al cambio climático. Por su parte, Chapman *et al.* (2016) consideran como variables claves del sistema urbano a la salud y el bienestar, mientras que Webb *et al.* (2018) incorporan las variables de crecimiento poblacional, infraestructura, expansión urbana, transporte público, vivienda, comunidades desfavorecidas y la vulnerabilidad al cambio climático.

Por otra parte, Da Silva, *et al.* (2012) proponen representar las ciudades o regiones mediante un mapeo de las redes de infraestructura, conocimiento e instituciones, en interacción de los componentes de bienestar social, los ecosistemas remotos o locales, los límites, las tensiones del cambio climático y la resiliencia urbana. Por su parte, Pelorosso *et al.* (2017), sugieren analizar

los flujos de materia y energía, la oferta y demanda de servicios ecosistémicos, los espacios no utilizados e infrautilizados, la infraestructura verde, las herramientas de planificación y de gobernabilidad, y los indicadores de entropía. Para McPhearson *et al.* (2016), las ciudades como sistemas complejos y dinámicos deben vincular la infraestructura social, ecológica y técnica, a través de los espacios verdes, la memoria social-ecológica (evitar la pérdida de biodiversidad y el cambio de uso de suelo), los servicios ecosistémicos (rasgos funcionales) y el uso del suelo urbano.

De acuerdo con la anterior, se puede afirmar que existen diferentes maneras de comprender el territorio. Sin embargo, para lograr una visión holística de los principales elementos que definen el sistema urbano, adoptamos los elementos que tienen en común las principales metodologías reconocidas internacionalmente en la planificación territorial, entre ellas la Norma ISO 37120:2018, El Índice de Resiliencia de la Ciudad, el Programa de Ciudades Emergentes y Sostenibles (ICES) y la Campaña Mundial de Ciudades Resilientes.

En este sentido, la norma ISO 37120:2018 pretende rastrear y monitorea el desempeño de la ciudad, para lograr un desarrollo sostenible (articulado con los Objetivos de Desarrollo Sostenibles), mediante una serie de indicadores que incluye temas de economía, educación, energía, medio ambiente y cambio climático, finanzas, gobernabilidad, salud, vivienda, población, recreación, seguridad, residuos sólidos, telecomunicaciones, deporte y cultura, transporte, agricultura urbana, urbanismo, aguas residuales, agua (ISO, 2018), además, esta norma es certificable por el World Council on City Data (WCCD, 2019).

De igual manera, el programa “Iniciativa de Ciudades Emergentes y Sostenibles” (ICES) del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), permite identificar, organizar y priorizar proyectos de infraestructura relacionados con el ambiente, el cambio climático, el urbanismo, y los aspectos fiscales y de gobernabilidad (BID, 2016). Esta metodología utiliza 130 indicadores para medir los retos de la sostenibilidad, la calidad de vida, la generación de empleo productivo, el bienestar social y la desigualdad urbana en las ciudades latinoamericanas (BID, 2016). Esta iniciativa se desarrolló en el municipio de Pasto con el nombre de “Plan de Acción 2038 Pasto Recorrer el Buen Camino” y sus estrategias entre ellas la densificación urbana, la gran manzana, y las centralidades se incorporaron en el Plan de Ordenamiento territorial (POT) 2015-2027 (Alcaldía de Pasto, 2015).

Por su parte el Índice de Resiliencia de la Ciudad, creado por ARUP, tiene una visión más específica que se desarrolla con 12 objetivos y 52 indicadores (ARUP, 2018), que abordan las dimensiones relacionadas con las personas, los lugares, las organizaciones y el conocimiento

(Aurrekoetxea, 2018), con el fin de garantizar que los habitantes y las empresas sobrevivan a las tensiones recurrentes, así como a los desastres repentinos producidos por el cambio climático, la escasez del agua y de alimentos, la falta de seguridad y de energía, epidemias, y eventos económicos adversos (Miceli, 2014).

Mientras que la metodología “Cómo Desarrollar Ciudades más Resilientes”, fue elaborada por la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR, siglas en inglés) con el objetivo de apoyar a los gobiernos locales y nacionales a insertar en sus instrumentos de planificación los factores de gestión del riesgo y de adaptación al cambio climático, mediante cuatro prioridades (comprensión del riesgo, fortalecimiento de la gobernanza, inversión para reducir el riesgo y la preparación para atender desastre) (UNDRR, 2017).

La aplicación de estas metodologías en el territorio requiere una gran cantidad de información que el municipio de Pasto por una parte no registra y por otra se pierde en el paso de una administración municipal a otra, además de los débiles sistemas de información con los que se cuenta. De ahí que, para obtener la información requerida para estas metodologías es necesario contratar nuevos estudios, como ocurrió con la formulación del Plan de Acción 2038 Pasto Recorrer el Buen Camino, que se hizo con la metodología ICES.

A partir de una comparación entre las metodologías descritas anteriormente, se identificaron los principales elementos y variables que permitieron describir el territorio de forma holística. Los principales elementos y variables seleccionados se presentan en la Tabla 1.1.

**Tabla 1.1.** Elementos de las metodologías de planificación territorial para describir el territorio

<b>ISO 37120:2018 (WCCD)</b>	<b>Índice de resiliencia de la ciudad (ARUP)</b>	<b>Ciudades emergentes ICES (BID)</b>	<b>Campaña Mundial de Ciudades Resilientes</b>
<b>Elemento 1: Ambiente</b>			
Ambiente		Calidad del aire Ruido	Protección del ambiente y de los ecosistemas
<b>Elemento 2: Cultura</b>			
	Identidad colectiva, apoyo comunitario		Recuperación de comunidades
<b>Elemento 3: Salud</b>			
Salud	Salvaguarda de salud y de vidas humanas	Salud	Protección instalaciones de salud
<b>Elemento 4: Educación</b>			
Educación		Educación	Instalaciones, Capacitación, educación y concientización pública

<b>ISO 37120:2018 (WCCD)</b>	<b>Índice de resiliencia de la ciudad (ARUP)</b>	<b>Ciudades emergentes ICES (BID)</b>	<b>Campaña Mundial de Ciudades Resilientes</b>
<b>Elemento 5: Demografía</b>			
Población	Población	Población	Población
<b>Elemento 6: Funcionalidad</b>			
Planificación urbana			
Agua y sanidad	Prestación de servicios esenciales	Agua	
Aguas residuales		Saneamiento y drenaje	
Residuos sólidos		Residuos sólidos	
Abrigo		Desigualdad urbana	
Recreación		Uso del Suelo	
Telecomunicaciones e innovación	Movilidad fiable y comunicaciones	Conectividad	
Transporte		Movilidad y Transporte	
<b>Elemento 7: Riesgos</b>			
Incendios y emergencias	Vulnerabilidad humana		Evaluación de riesgos multi amenazas
	Exposición reducida y fragilidad		Alerta temprana y respuestas eficaces
			Protección y resiliencia de la infraestructura
<b>Elemento 8: Clima</b>			
		Mitigación del cambio climático	
		Vulnerabilidad de cambio climático	
<b>Elemento 9: Económico</b>			
Economía	Medios, subsistencia y empleo	Competitividad de la economía	Financiamiento y recursos
Finanzas	Economía sostenible	Empleo	
<b>Elemento 10: Gobernabilidad</b>			
Gobernabilidad	Planificación integrada	Gestión pública participativa	Marco institucional y administrativo
	Seguridad integral y estado de derecho	Impuestos y autonomía financiera	Reglamentación de la construcción y ordenamiento territorial
	Liderazgo y gestión eficaces	Transparencia	
	Partes interesadas potenciadas	Gestión del gasto	
		Deuda	
<b>Elemento 11: Energía</b>			
Energía		Energía	
<b>Elemento 12: Seguridad</b>			
Seguridad		Seguridad	

Nota: En su orden las fuentes de la tabla son las siguientes: ISO (2015), ARUP (2018), (BID, 2016), UNDRR (2017)

### 1.2.3 *Relaciones sistémicas con el método Micmac*

Una vez identificados los elementos urbanos, se definió el nivel de influencia y de dependencia, mediante consulta a seis profesionales locales con experiencia en diversos temas (economía, emprendimiento, salud, política, ambiente y organización social), a quienes se les pidió diligenciar la Matriz de Impactos Directos, para recoger su percepción acerca de la manera en que estos elementos se relacionan. Este instrumento se aplicó siguiendo el método Delphi con el fin de mantener el anonimato de los participantes, y evitar influencias entre ellos (López-Gómez, 2018), para ello Arango y Cuevas (2014) recomiendan que los grupos no superen 12 participantes (los instrumentos utilizados en esta sección se encuentran en el Apéndice A). El llenado de la Matriz de Impactos Directos se realizó de acuerdo con la valoración propuesta por Godet y Durance (2011), así:

- 0 = No existe influencia de una variable sobre la otra.
- 1 = La influencia es débil.
- 2 = La influencia es media
- 3 = La influencia es fuerte
- 4 = La influencia es potencial (ahora la variable no influye sobre otra, pero sí en el futuro).

Las respuestas de los expertos se sistematizaron en el software *Micmac* mediante la matriz de influencia directa. Como resultados el software clasifico los elementos urbanos en explicativos, enlace, dependientes y autónomos.

### 1.2.4 *Construcción del diagrama causal*

A partir del diagrama de influencias y del mapa de influencias, se construye el diagrama causal de dinámica de sistemas para el municipio de Pasto. De acuerdo con Meléndez (1998, como se citó en Novelo, 2017), este tipo de sistemas sociales tienen procesos complejos de autoorganización, autorregulación, autoreparación, autoobservación e inteligencia, a los que Cócola (2017) los denomina procesos de retroalimentación positivos y negativos. Sin embargo, para reducir la complejidad, Van Meeteren (2019) sugiere representar las relaciones con diagramas, mientras que Cócola (2017) sugiere adicionar modelos lineales y circulares. Estas dos maneras de representar los sistemas se juntan en los modelos de dinámica de sistemas, que además permiten anticipar los cambios del sistema (Chapman, Howden-Chapman y Capon, 2016).

## 1.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 1.3.1 *Elementos urbanos que conforman el municipio de Pasto*

Con base en los elementos urbanos de las metodologías de planificación consultadas en la Tabla 1.1, se definen 12 elementos principales para el municipio de Pasto, los cuales se muestran en la Tabla 1.2.

**Tabla 1.2** Descripción de los elementos urbanos seleccionados para describir el territorio

<b>Elementos</b>	<b>Descripción</b>
Ambiente	Calidad ambiental de los recursos naturales
Cultura	Manifestaciones culturales, costumbres, etnias y tradiciones
Salud	Incidencia en la salud a nivel físico, mental y social de la población
Educación	Nivel, cobertura y la calidad de la educación formal ofrecida
Demografía	Número de habitantes, distribución y procesos migratorios
Funcionalidad	Intervenciones urbanísticas, cobertura y calidad de servicios públicos
Riesgos	Exposición de la población a factores de riesgos de desastres
Clima	Condiciones de precipitación, temperatura y cambio climático
Economía	Procesos de competitividad y productividad de los sectores económicos
Gobernabilidad	Capacidad de liderazgo de las instituciones públicas
Energía	Tipo y fuente de energía disponible
Seguridad	Situaciones de violencia e inseguridad

### 1.3.2 *Relaciones entre elementos*

A partir del contenido y alcance de los elementos urbanos definidos anteriormente, se consultó la percepción de seis expertos locales acerca de la manera en que dichos elementos se relacionan. La percepción de los expertos se obtuvo con la Matriz de Impactos Directos, cuyos resultados se consolidaron en la matriz de relaciones directas (Tabla 1.3).

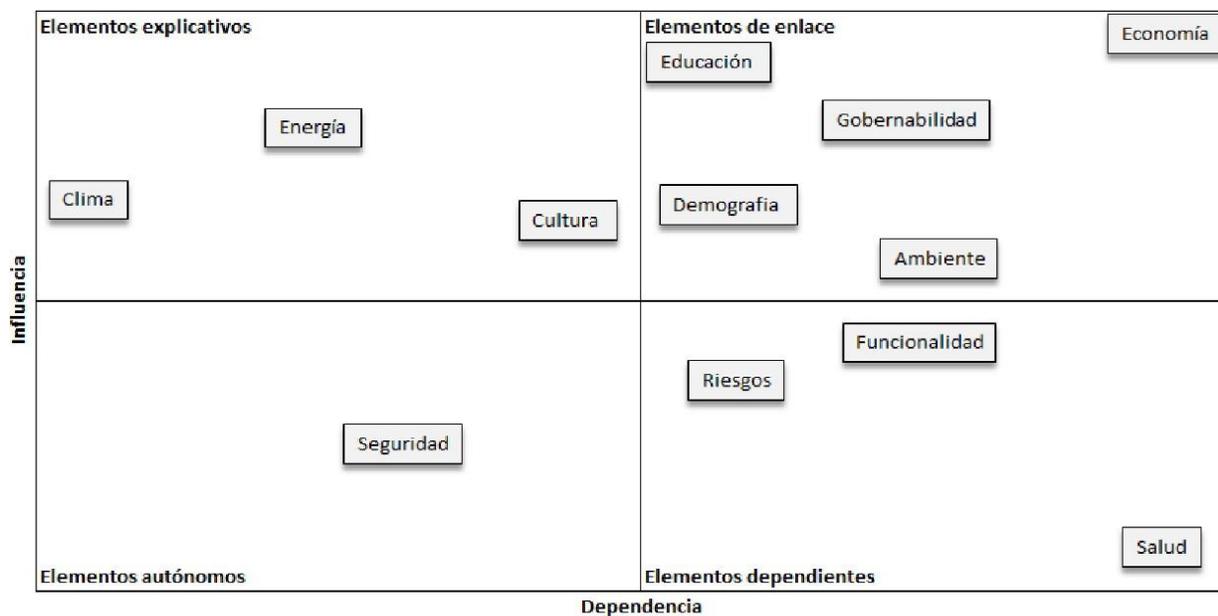
**Tabla 1.3.** Matriz de relaciones directas

	Ambiente	Cultura	Salud	Education	Demografía	Funcionalidad	Riesgos	Clima	Economía	Gobernabilidad	Energía	Seguridad	Influenciadas	
Ambiente		2	3	1	2	3	2	2	3	2	2	1		
Cultura	3		1	2	3	2	3	2	2	2	2	2		
Salud	0	1		2	2	1	1	0	2	2	0	1		
Educación	3	3	2		3	3	2	2	3	3	3	3		
Demografía	3	2	3	2		2	3	2	2	2	2	2		
Funcionalidad	2	1	3	2	2		2	1	3	2	2	1		
Riesgos	2	2	3	2	2	1		1	3	2	1	1		
Clima	3	2	3	2	2	3	3		3	2	2	0		
Economía	3	3	3	3	3	3	3	2		3	3	3		
Gobernabilidad	3	2	3	3	2	3	2	2	3		2	2		
Energía	3	2	2	2	1	3	2	2	3	3		2		
Seguridad	1	2	2	2	1	1	1	0	3	2	1			
Influenciadas														

Nota: Esta matriz muestra el consolidado de la percepción de los expertos acerca de las relaciones que de influencia y dependencia entre los elementos.

A partir del consolidado de la matriz de relaciones directas que se ingresó al software *Micmac*, se obtiene el mapa de influencias y dependencias indirectas (Figura 1.2). Este mapa, según Somoza-Cabrera (2019), es un plano cartesiano con cuatro cuadrantes en el que las variables o elementos se ubican por su nivel de influencia (motricidad) y dependencia. Según la valoración realizada por los expertos los elementos se clasifican en:

- Explicativos: se ubican en el cuadrante superior izquierdo, son altamente independientes de los elementos del sistema, pero influyen significativamente sobre ellos.
- Enlace: se ubican en el cuadrante superior derecho, son altamente influyentes y dependientes, por lo que son gestionados por procesos de retroalimentación para cancelar o potencializar cualquier acción que intente modificar el sistema
- Dependientes: se ubican en el cuadrante inferior derecho, son poco influyentes y altamente dependientes de los demás elementos del sistema.
- Autónomos: se ubican en el cuadrante inferior izquierdo, son muy poco influyentes y dependientes por lo que suelen descartarse en el análisis del sistema.



**Figura 1.2** Mapa de influencias y dependencias indirectas.

A continuación, se describe la dinámica local de cada uno de estos elementos de acuerdo con su clasificación.

### 1.3.2.1 Elementos explicativos o de poder del sistema urbano

Los elementos que resultaron clasificados como elementos explicativos o de poder son el clima, la energía y la cultura, es decir que estos elementos no pueden ser modificados significativamente por el sistema.

#### 1.3.2.1.1 *Clima*

El clima se puede considerar como un elemento de poder debido a que su alteración se produce por la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) que, resultan del consumo de combustibles fósiles (elemento externo del sistema). En este sentido, los mayores emisores de GEI, son China, Estados Unidos, India, Rusia y Japón, que en conjunto emiten el 59.3% de los GEI, mientras que, Colombia emite el 0.291% (Global Carbon Project, 2019), de las cuales Pasto aporta el 0.000715% de las emisiones de GEI, que de acuerdo con (FINDETER, 2015) corresponde a 643475 tn de CO<sub>2</sub>, de las cuales el 58% son emitidas por el transporte público y privado, 18% por el sector de Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU, siglas en inglés), 13% por la gestión de residuos sólidos y el resto por los demás sectores. Sin embargo, los efectos del cambio

climático no son proporcionales a las emisiones, siendo América Latina y el Caribe unas de las regiones más afectadas del planeta, pese a que sus emisiones de GEI no superan el 10% de las emisiones totales (Bárcena *et al.*, 2018).

Las ciudades de América Latina y del Caribe son vulnerables por la ubicación geográfica, el clima, las condiciones socioeconómicas, demográficas y la sensibilidad de los activos naturales (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2015), que se manifiestan mediante el incremento de inundaciones, deslizamientos de tierra, sequías, escasez de alimentos y riesgos para la salud (Novillo, 2018). Particularmente en Pasto, los efectos del cambio climático que se esperan por su morfología montañosa, el clima y su ubicación en la cordillera de los Andes, están relacionados con afectaciones en la producción agrícola y pecuaria, la salud humana, el incremento de inundaciones, deslizamientos, sequías e incendios forestales, que de cierta manera inciden en el desarrollo económico local.

#### **1.3.2.1.2 Energía**

La clasificación de la energía como elemento explicativo, se justifica debido a que la demanda de energía que requiere el sistema urbano proviene en su mayoría de otras ciudades de Colombia (elemento externo del sistema), por lo que el sistema local no puede ejercer mayor influencia en la cadena productiva, excepto en la comercialización para garantizar el abastecimiento energético del municipio. Sin embargo, las fuentes energéticas dinamizan y estimulan todos los sectores económicos y sociales del municipio, con una demanda de 1,004,743 de Barriles Equivalentes de Petróleo (BEP), donde el 85% son energías no limpias derivadas del petróleo, como gasolina, diésel y gas licuado de petróleo (GLP), cuyo mayor consumidor principal es el sector transporte (Gómez y Morán, 2015). Parte de este consumo se atribuye al incremento del 247% del parque automotor entre 2010-2015 (Diario del Sur, 2016).

Por otra parte, el aporte del sistema local a la matriz energética solo permite cubrir entre el 15% y 20% de la demanda eléctrica mediante dos pequeñas hidroeléctricas (Julio Bravo y Rio Bobo) y el resto tiene que ser adquirido en la Bolsa de Energía de Colombia, de las grandes centrales hidroeléctricas y termoeléctricas del país (lo anterior de acuerdo con los datos suministrados por Centrales Eléctricas de Nariño - CEDENAR).

Sin embargo, el potencial de energía eléctrica del municipio es de 243.6 GWh/año (casi 100% de la demanda) que se puede generar a partir de diferentes fuentes renovables, tales como:

i) hidroelectricidad proveniente del aprovechamiento de las centrales Julio Bravo y Rio Bobo, que actualmente son aprovechadas en un 30%; ii) energía solar fotovoltaica en techos residenciales, comerciales e institucionales; y iii) Captación del biogás producido en el relleno sanitario Antanas (Alcaldía de Pasto *et al.*, 2019). A nivel departamental, el potencial para generar energía renovable está en la radiación solar, dada la ubicación geográfica cercana a la línea ecuatorial, y por la energía eólica de los altiplanos del departamento, con velocidades de viento entre 3 m/s y 4.6 m/s, y en la costa Pacífica con velocidades del viento entre 4.11 m/s y 6.12 m/s (Orbes y Vallejo, 2013; Universidad de Nariño [UDENAR] y Corporación Autónoma Regional de Nariño [CORPONARIÑO], 2007). También se cuenta con biomasa forestal para cubrir las zonas no interconectadas de la costa pacífica Nariñense (Guerrero, *et al.*, 2016).

#### **1.3.2.1.3 Cultura**

La cultura como elemento explicativo se justifica por ser un constructo de los sucesos históricos que se incrustan en la memoria colectiva y que se transmiten de generación en generación (Giraldo, 2018), formando la identidad cultural (Rius, Sánchez, 2015). En este sentido, gran parte de la identidad cultural actual de los habitantes de Pasto fue influenciada por el proceso independentista de la Nueva Granada (Álvarez y Marín, 2018) que se dio entre 1808 a 1819 (Vázquez, 2020), y cuyas diferencias entre patriotas y realistas apartaron a los Pastusos del resto de Colombia (Cardona, 2018). Estas diferencias aún se mantienen, por lo que el BID (2015) ratifica la expresión “dos Colombias, una del sur oriente para arriba y otra del sur oriente para abajo”.

Este aislamiento, definió a la zona urbana en el sistema de ciudades Colombianas como una ciudad autónoma, es decir, desconectada del país en cuanto a relaciones comerciales, laborales y culturales ((Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2014). Pese a lo anterior, Pasto aporta significativamente al valor agregado del país y del departamento, en parte gracias a los vínculos históricos con el Ecuador, siendo este el primer proveedor con el 50% de las importaciones departamentales, y el segundo destino de las exportaciones cercanas al 22%, además de los estímulos del turismo ecuatoriano a los servicios de alojamiento, comida, entre otros (Cámara de Comercio de Pasto, 2016).

Por otra parte, la cultura en Pasto se caracteriza por conservar sus tradiciones, que contribuyen al desarrollo social y económico. Entre ellas, el carnaval de negros y blancos, reconocido en 2009 por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y

la Cultura (UNESCO) como patrimonio cultural e inmaterial de la humanidad (Villota, 2017), del que se desprenden otras tradiciones como el trabajo artesanal, desfiles, colectivos coreográficos, la música y el juego (Timarán 2017). Por lo que recientemente la UNESCO, declaró a Pasto como Ciudad Creativa en Artesanía y Arte Popular 2021 por UNESCO (Cámara de Comercio de Pasto, 2021).

En las artesanías sobresale el Barniz de Pasto que es el arte de recubrir las figuras de madera con la resina del arbusto mopa-mopa (Forero, 2019), que en 2020 fue reconocido por la UNESCO como patrimonio inmaterial de la humanidad en calidad de salvaguardia para evitar su desaparición (Cultura, 2020). En gastronomía se destaca el consumo del cuy como plato típico de la región (Duran y Monroy, 2015), mientras que en la arquitectura sobresale el estilo románico de los siglos XI y XII en la mayoría de los templos (Camacho, 2012), que contribuyen e incentivan el turismo religioso y, por lo tanto, la economía y el patrimonio cultural (Pulistar y Morales, 2017).

Sin embargo, algunos aspectos culturales afectan el desarrollo del municipio, como la quema de residuos de cosechas, la disposición de residuos sólidos en la calle, el incremento de vehículos particulares, la quema de pólvora en navidad y fin de año, la tala de árboles, el uso de la palma de cera, entre otros, los cuales incrementan los riesgos de incendios forestales, inundaciones, contaminación atmosférica, pérdida de recursos naturales, que finalmente inciden en la salud humana y la conservación de los ecosistemas.

### **1.3.2.2 Elementos de enlace del sistema urbano**

Los elementos de enlace identificados en el sistema urbano son gobernabilidad, educación, demografía, ambiente y economía. Según Dodman et al. (2016), estos elementos tienen el potencial de generar mayores retornos sociales, económicos y ambientales cuando se gestionan integradamente.

#### ***1.3.2.2.1 Gobernabilidad***

La gobernabilidad es uno de los elementos esenciales en el desarrollo del territorio porque de ella depende el estado y las políticas públicas (Bayón, 2018), así como las relaciones entre el gobierno y los ciudadanos (Capano, Howlett, y Ramesh, 2015). La gobernabilidad se estableció para atender los problemas de salud, infraestructura, educación, agua, legislación y autoridad (Faguet, 2016), y así configurar el estado, el orden y la inclusión social (D'Eramo, 2017). En este

sentido, la gobernabilidad en el municipio de Pasto se puede considera estable, y con un avance significativo en 1995 cuando se implementaron los procesos de participación comunitaria para concertar, priorizar e invertir los recursos públicos (Rodrigues de Caires, 2018), lo que contribuyó al crecimiento económico y a la gestión institucional y administrativa (DNP, 2014). Sin embargo, la corrupción, la desigualdad social, el narcotráfico, la presencia de grupos armados, entre otros factores, generan entropía y amenazan la estabilidad del sistema.

Si bien la gobernabilidad surge a partir de los procesos de elección popular, es la administración municipal la responsable de decidir o reorientar su rumbo. Sin embargo, estas decisiones generalmente se toman de forma parcializada, sin analizar los efectos sobre todo el sistema. Por ejemplo, se adoptó la estrategia de compactación urbana para combatir el cambio climático, a pesar de que Pasto tiene uno de los índices de densificación más altos de América Latina (185-165 hab/ha), con zonas verdes de apenas 1 m<sup>2</sup>/hab (Terraiza *et al.*, 2016), valor muy inferior a los 9 m<sup>2</sup>/hab recomendados por la Organización Mundial de la Salud (UNHABITAT, 2015). Adicionalmente, los edificios de gran altura en el centro y en las zonas periféricas agudizan la congestión vehicular y ocultan el paisaje de la cordillera de los Andes (Paradiso y Gómez, 2017), además de los altos riesgos sísmicos por la presencia del volcán Galeras.

#### **1.3.2.2 Educación**

La educación es el medio a través del cual se crea y se transmite el conocimiento hacia todos los elementos del sistema, por lo tanto, la inversión en cobertura, calidad y nivel educativo promueve el desarrollo local y el bienestar de las personas, como ocurre en muchos países desarrollados. Por ejemplo, en los países de la Asociación del Sur de Asia para la Cooperación Regional (SAARC, siglas en inglés), la inversión en educación generó nuevas oportunidades de trabajo y procesos de innovación que revolucionaron la salud, la educación, las comunicaciones, la sostenibilidad ambiental, el PIB y el desarrollo humano (Hanif y Arshed, 2016).

A nivel local, el municipio de Pasto se ubica en los primeros lugares del Índice Sintético de Calidad Educativa del Ministerio de Educación Nacional (Redacción Educación, 2018; UDENAR, 2019), debido a las tasas altas en alfabetización y de la cobertura educativa en primaria y secundaria, excepto por la cobertura en estudios de posgrado que apenas es del 3.4%, (FINDETER, 2015), lo que dificulta los procesos de desarrollo e innovación, que son los motores del mercado laboral, la productividad, los salarios y la promoción laboral (Hanif y Arshed, 2016).

Por otra parte, Pavón (2015) afirma que la inversión en educación genera sinergias positivas en el desarrollo local. Un ejemplo, es la integración entre educación, negocios, comunidad, tecnología y transporte que hizo China para contener al Covid-19 (Liu, W., y Tchounwou, 2020).

Por lo tanto, la educación a nivel local en el contexto del cambio climático se puede convertir en un motor para desarrollar el turismo y nuevos mercados energéticos y agrícolas, que se adapten a las condiciones climáticas futuras, como ocurre en Noruega, Canadá y Suecia, donde el aumento de la temperatura genera riqueza (Diffenbaugh y Burke, 2019). Sin embargo, es claro que en Pasto la educación no es un elemento clave para lograr las transformaciones que hoy se requieren, por lo que está desarticulado del sistema urbano, afectado con ello la investigación, el desarrollo y la innovación de los diferentes sectores productivos del municipio, que se evidencia por la baja oferta de estudios de maestrías y doctorados en la región.

#### **1.3.2.2.3 Demografía**

El crecimiento poblacional depende de la relación de varios elementos, entre estos la cultura, la educación, la salud y la economía, que pueden ser gestionados por el propio sistema. Por ejemplo, la cultura define el número de hijos que conforman una familia, la salud promueve estrategias de planificación familiar para controlar la población, mientras que la economía estimula los procesos migratorios. De manera que el inadecuado control demográfico, puede producir entropías en el sistema urbano, como mayores presiones a la población en edad de trabajar, a los sistemas de protección social y al desempeño económico y fiscal, lo que puede promover nuevos procesos migratorios (United Nations Department of Economic and Social Affairs [UNDESA], 2019). En este sentido, Vilches *et al.* (2014) sugieren que para garantizar la sostenibilidad es necesario mantener la población con igual número de personas en los distintos grupos de edad.

Actualmente, San Juan de Pasto tiene una población de 460,454 habitantes (DANE, 2019), por lo que en el sistema de ciudades de Colombia se clasifica como una ciudad intermedia (población entre 100 mil y 1 millón de habitantes) (DNP, 2014), que crece a un ritmo cada vez más lento, es decir, la tasa de crecimiento entre 1993-2005 fue de 2.55%, mientras que el periodo 2005-2018 fue de 1.53%, lo que redujo el Índice Friz de 221.98% en 1985 a 88.98% en 2018. Esto significó que a finales del siglo pasado la estructura poblacional pasó de joven a madura. Entre las causas que generaron este cambio se encuentran los programas de planificación familiar, la disminución de los índices de fecundidad y mortalidad, y al aumento de la esperanza de vida

(Ministerio de Salud y Protección Social, 2015), gracias a los avances de la medicina, las vacunas y los antibióticos, que permitió pasar de grandes descendencias de corta vida a descendencias reducidas, pero de mayor duración (tres veces mayor), lo que explica el envejecimiento demográfico y el progreso, entendido éste como el desarrollo de la creatividad, la innovación, la económica, la salud, el conocimiento, la riqueza, el bienestar social y la solidaridad intergeneracional, que ha generado riqueza en los países desarrollados (Pérez, 2016). Por lo que se puede afirmar que una población estable y madura puede contribuir a la reducir la pobreza, la contaminación ambiental y la demanda de recursos naturales, entre otros.

#### **1.3.2.2.4 Ambiente**

El ambiente está conformado por componentes bioclimáticos, geomorfológicos, hidrogeológicos y ecosistémicos que interactúan de forma compleja a través de procesos de retroalimentación entre los elementos físicos, bióticos, sociales, culturales y los artefactos construidos (Folch y Bru, 2017), que favorecen la oferta de bienes y servicios ambientales (agua, oxígeno, alimento, materia prima, entre otros), mejoran la calidad de vida y la salud de las personas e inciden en el desarrollo económico local. Por esta razón, en muchos países estos servicios son valorados como materias primas (Aguilar *et al*, 2018), aunque en muchas situaciones los costos ambientales de la explotación de los ecosistemas se externalizan para obtener mayores beneficios económicos (Folch y Bru, 2017).

En Pasto, el agua como uno de los bienes y servicios ambientales transversales del sistema urbano, dependen de las provincias Amazónica y Norandina, donde nacen los ríos Putumayo (tributario de la cuenca Amazónica), y los ríos Pasto y Bobo (tributarios de la cuenca Pacífica), que de acuerdo con Corponariño (2009) producen  $538.7 \text{ mm}^3/\text{año}$  de agua, y dan forma a planicies, montañas, humedales lacustres, zonas de recarga hídrica y zonas de vida entre 1,600 y 4,200 m s.n.m., (Alcaldía de Pasto, 2014a). Entre estas zonas se encuentran los páramos El Fraile, La Piscicultura, Bordoncillo, Morasurco, Galeras, Azonales de la Cocha, Alcalde, Patascoy y El Tábano que cubren una extensión de 17,218 ha compartidas con otros municipios.

En cuanto a lagunas, el municipio tiene 10 de 36 que existen en el departamento, de las cuales, la Cocha fue declarado en 2001 como humedal Ramsar debido a su gran diversidad de especies de flora, además del Santuario de Flora Corota que cuenta con más de 500 especies identificadas y, el Santuario de Flora y Fauna Galeras que es considerado como un lugar de

conservación de germoplasma *in situ* (Delgado *et al.*, 2008). Sin embargo, el cambio climático y el nitrógeno atmosférico pueden alterar la estructura y funcionalidad de los ecosistemas y limitar los servicios ambientales a la población (Schlutow & Schröder, 2021).

Por lo tanto, el ambiente como elemento de enlace articula varios elementos urbanos, por lo que debe ser protegido y conservado a través del liderazgo que ejerza el sistema interno para generar sinergias positivas con los demás elementos (economía, cultural, educación, entre otros) y asegurar los servicios ecosistémicos, mediante el incremento de las áreas protegidas, el fortalecimiento de los procesos de educación ambiental y el uso sostenible de los recursos naturales. Estas prácticas, de acuerdo con Tapia *et al.* (2017), inciden en el fortalecimiento de la económica local, el desarrollo multidimensional y el bienestar social. No obstante, el sistema local está expuesto a entropías como la deforestación (industria minera, construcción, industria artesanal, fabricación de muebles, expansión de la frontera agrícola y el urbanismo), además de la contaminación producida por la industria láctea, de alimentos, el comercio, el transporte, la agricultura intensiva, entre otros.

#### **1.3.2.2.5 Economía**

La principal actividad económica local es el comercio, asociada a un incipiente desarrollo industrial (Alcaldía de Pasto *et al.*, 2019). Pese a ello, el PIB de Pasto entre 2005 y 2010 fue de 6%, superando la media nacional (4.28%) y departamental (3.8%), además, contribuyó con el 53% del PIB departamental (Ortiz, 2015). Las actividades que mayor aporte hicieron al PIB son las Actividades del sector terciario, entre ellas la prestación de servicios personales, domésticos y de reparación de automotores (19.5%), seguidas de la administración pública (16.2%) y los servicios inmobiliarios (12.1%). En el sector secundario sobresale la industria manufacturera (11.3%), mientras que en el sector primario están las actividades agropecuarias con 3.6% (Centro de Estudios de Desarrollo Regional y Empresarial [CEDRE], 2011), aunque estas cifras siempre experimentan altibajos (Viloria de la hoz, 2007).

En el Índice de Competitividad del Consejo Privado de Competitividad y de la Universidad del Rosario (2020), Pasto ocupa el puesto 13 de 32 ciudades colombianas con 5.25 puntos sobre 10, donde sobresale en los pilares de institucionalidad, infraestructura y equipamiento, salud, educación básica y media, que coincide con los avances que han tenido estos sectores. Mientras que desciende ligeramente en los pilares de adopción de Tecnologías de la Información y las

Comunicaciones (TIC), educación superior y formación para el trabajo, sistema financiero, innovación y dinámica empresarial, sofisticación y diversificación, finalmente, los pilares con baja puntuación están relacionados con sostenibilidad ambiental, entorno para negocios, mercado laboral y tamaño del mercado.

Según Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento (BIRF) y Banco Mundial (BM) (2017), la baja calificación en temas de negocios se debe en parte a la dificultad para abrir un negocio y de la falta de un enfoque espacial, este último según Galvis-Aponte y Hahn-De-Castro (2016), favorece la convergencia económica regional y la distribución equitativa de la riqueza. Sin embargo, este enfoque no está consolidado, debido en parte al aislamiento de Pasto del contexto nacional. A pesar de ello, el BID (2015) reconoce el potencial local para generar economías de urbanización y aglomeración, que según el DNP (2014) se pueden consolidar mediante el ordenamiento supramunicipal de esquemas asociativos y de sistemas urbanos subregionales.

Sistémicamente, la economía está ligada a muchos elementos, entre ellos la gobernabilidad que define los objetivos de desarrollo, además de formular y hacer cumplir las normas, por su parte la educación es un elemento articulador de los procesos de innovación, mientras que la cultura no solo permite conservar las tradiciones, sino también se convierte en un mecanismo de integración entre Colombia y Suramérica. Por su parte, el ambiental soporta la oferta de bienes y servicios ambientales, así como, el desarrollo de las actividades agrícolas y ganaderas, que, si bien no son las principales actividades económicas locales, si contribuyen con la seguridad y la soberanía alimentaria. Lastimosamente, estas actividades se han visto amenazadas por la importación de alimentos y por el cambio climático.

Por otra parte, la pandemia (Covid-19) dejó en evidencia la dependencia de la economía con la salud, al punto que se paralizó la economía de Colombia, generando pérdidas estimadas entre \$4,6 y \$59 billones de pesos al mes (0,5% y 6,1% del PIB nacional) y de 895 mil millones de pesos para el departamento de Nariño, con pérdidas mensuales para la agricultura y los servicios de 154 y 658 miles de millones de pesos respectivamente (Bonet-Morón *et al.*, 2020), lo que incrementó la tasa de desempleo al 21% en el segundo semestre de 2020.

### **1.3.2.3 Elementos dependientes o de resultados del sistema urbano**

Los elementos que resultaron clasificados como dependientes son los riesgos de desastres, funcionalidad y salud pública, es decir que la evolución de estos elementos depende de las decisiones que tome la autoridad central del municipio.

#### **1.3.2.3.1 Riesgos de desastres**

Entre los riesgos de desastres asociados al clima se encuentran las inundaciones, los deslizamientos de tierra y los incendios de la cobertura vegetal (Alcaldía de Pasto, 2014b). Las inundaciones se presentan por varias razones, entre ellas las condiciones climáticas, la geografía, la impermeabilización del suelo, la pérdida de la cobertura vegetal, la ocupación de los cauces naturales y por la acumulación de basuras en el sistema de alcantarillado y en las fuentes hídricas. Los reportes de la DGRD entre 2004-2019 permitieron estimar una media de afectación por inundaciones de 627 y 393 personas y bienes respectivamente. Sin embargo, en 2011 con presencia del fenómeno de la Niña (el más intenso registrado) el índice se incrementó a 2,479 personas y 2,823 bienes afectados. No obstante, en los últimos años estos eventos están disminuyendo debido a la adecuación de la infraestructura pública.

Los deslizamientos de tierra también se incrementan con la presencia de lluvias que afectan principalmente a la zona urbana por sus pendientes mayores a 45° (Alcaldía de Pasto, 2014b), por lo que los datos suministrados por la DGRD entre 2004-2019, tiene una media de afectación de 50 personas y 14 bienes. Sin embargo, durante el episodio de La Niña de 2011, esta media ascendió a 109 personas y 32 bienes (sin reporte de personas heridas o fallecidas). Si bien en los últimos años la afectación se ha reducido, los datos históricos muestran que la tendencia es creciente, y está asociada con el crecimiento poblacional y las bajas condiciones económicas que, obligan a una parte de la población, a ubicarse en zonas de peligro y en viviendas frágiles, donde el riesgo evoluciona por el constante cambio del uso de suelo (Atienza *et al.*, 2019).

En cuanto a incendios forestales, en 2015 la DGRD Pasto reportó afectaciones de 36 personas y 326 bienes, el cual tuvo una duración de más de 8 días (Radio Nacional de Colombia, 2015). Este evento ocurrió en presencia de uno de los años Niño más fuertes de los que se tiene registro en Pasto. Sin embargo, de acuerdo con los registros de Alcaldía de Pasto (2014b) el 99% de estos incendios son producidos por la actividad humana, asociada a la quema de residuos de cosechas como prácticas culturales de los agricultores nariñenses. Si bien el fenómeno del Niño

no es responsable directo de los incendios forestales, si crea las condiciones climáticas de bajas precipitación, vientos fuertes y altas temperaturas, que propician el fuego y su expansión.

En este sentido, la reducción de estos riesgos depende en gran medida de la gestión y articulación de los diferentes elementos (gobierno, economía, funcionalidad, cultura, salud y ambiente) para delimitar las zonas de riesgos, establecer medidas restrictivas para la ocupación del territorio y la reubicar a las comunidades asentadas en zonas de riesgo. Indirectamente, estas acciones permiten reducir la pobreza, controlar la entropía del sistema e incrementar la resiliencia urbana, especialmente ante los eventos climáticos extremos que, de acuerdo con el IPCC (2021), se están incrementando en frecuencia e intensidad a nivel global por el cambio climático.

#### **1.3.2.3.2 Funcionalidad**

Los aportes de GEI de Pasto como ciudad residencial se asocian con la alta densificación urbana y el déficit de áreas verdes cualificadas, que equivale a 1 m<sup>2</sup>/habitante (Terraza *et al.*, 2016). Este tipo de desarrollo urbanismo, según el IPCC (2021), puede intensificar e incrementa los eventos extremos de olas de calor, las precipitaciones y la escorrentía. Bajo estas condiciones, Pasto adaptó el modelo de ciudad compacta, articulado con el modelo de la gran manzana y el sistema de centralidades con el fin de reducir la expansión urbana y conservar la tierra para uso agrícola y otros servicios (Alcaldía de Pasto, 2014c). De acuerdo con Orum y Jenks (2020), este modelo promueve la mezcla de uso de suelo, estimula otros medios de transporte (caminar, uso de bicicletas y servicio público), reduce las emisiones de GEI e incrementa la economía, estableciendo vínculos sociales y culturales en la ciudad.

Sin embargo, la implementación de este modelo avanza lentamente, por lo que Pasto aún continúa siendo una ciudad monocéntrica, pero con gran dinámica en la construcción de edificios de gran altura que ha contribuido a mantener el déficit de vivienda estable, así lo muestran las cifras del DANE (2021), donde el déficit de vivienda en 2005 fue de 22.92% y en 2018 de 22.42%, pese al incremento poblacional y al déficit de suelo urbanizable. Sin embargo, este tipo de urbanismo parece no estar evolucionando de forma adecuada, ya que estas edificaciones se construyen a lo largo y ancho de la ciudad, incluso en las faldas del volcán Galeras, lo que incrementa los riesgos de desastres, además de los riesgos a la salud humana por la pérdida de zonas verdes. En cuanto a servicios públicos, la zona urbana tiene una cobertura de 99.7% de

energía eléctrica, 98.4% de acueducto, 89.8% de alcantarillado y 90.1% de recolección de residuos (DANE, 2020).

Por otra parte, el urbanismo como parte de la funcionalidad en las ciudades, juega un papel importante en la mitigación del cambio climático, debido a que el cambio de uso del suelo incide en la emisión de GEI y, por lo tanto, en la formación de islas de calor (Zambrano *et al*, 2019), que son parcialmente responsables del incremento de las epidemias estacionales (Abrutzky *et al.*, 2017), y de la producción y distribución agrícola (Viguera *et al.*, 2017). Afortunadamente, en Pasto no se reportan efectos en la salud humana asociadas a isla de calor (producidas por el desarrollo urbanístico) ni olas de calor debido a su clima frío durante la mayor parte del año, además, la temperatura máxima mensual proyectada hasta 2100 es de 15.49°C (IDEAM, 2016), por lo que es posible inferir que este tipo de evento climático extremo no serán muy comunes en el territorio.

#### **1.3.2.3.3 Salud pública**

A nivel global, World Health Organization (WHO, 2018a) identificó que el cambio climático, así como los eventos climáticos extremos, están incrementando la incidencia de enfermedades cardiovasculares, respiratorias, mentales, infecciosas, alergias, desnutrición y estrés térmico. Al comparar estas enfermedades con la prevalencia de enfermedades reportadas en los Eventos de Notificación Obligatoria en Salud del municipio de Pasto (Instituto Departamental de Salud de Nariño [IDSN], 2020), es posible inferir que el cambio climático esté afectando o pueda afectar la incidencia de las enfermedades respiratorias agudas (IRA), enfermedades diarreicas agudas (EDA) y desnutrición infantil (DNT) especialmente en menores de 5 años. Las enfermedades cardiovasculares, mentales y de estrés térmico, se descartan por las condiciones climáticas y de altura, donde no existen registros de olas de calor que hayan afectado la salud de las personas.

La gestión del sistema de salud en Pasto se califica como intermedia debido a sus avances en la reducción de la mortalidad, disminución de la tasa de embarazos en adolescentes, y el aumento de la esperanza de vida (73 años) (FINDETER, 2015). Por otra parte, la cobertura de agua segura y alcantarillado en la zona urbana es cercanos al 100%, mientras que, en el sector rural, la cobertura de agua potable es de 31%, y alcantarillado de 53% (IDSN, 2019), lo cual incrementa el riesgo potencial para la salud de las personas. En este sentido, la WHO (2018b) recomienda proteger los recursos naturales y adecuar los sistemas de saneamiento para garantizar el suministro

de agua potable y alcantarillado para mejorar la higiene y combatir las enfermedades. Por otra parte, zonas verdes, vías peatonales, ciclo-rutas y el transporte masivo, permiten crear hábitos de vida saludables que previenen enfermedades como la diabetes, el cáncer y las cardiopatías, además, de combatir al cambio climático (WHO, 2018c).

Teniendo en cuenta que el método Micmac se aplicó meses antes del inicio de la pandemia Covid-19, en la percepción de los expertos no se identificó la magnitud de la relación entre salud y economía, especialmente en sus primeros meses. Sin embargo, a medida que la pandemia avanzaba, la economía también empezó a reactivarse, gracias a la articulación de otros elementos, como el trabajo virtual, las normas de bioseguridad, los emprendimientos virtuales, las vacunas, entre otros, aunque con dificultades culturales con el uso de tapabocas y aglomeraciones en las fiestas de navidad, año nuevo, carnavales y demás fechas especiales, que generaron episodios de alerta.

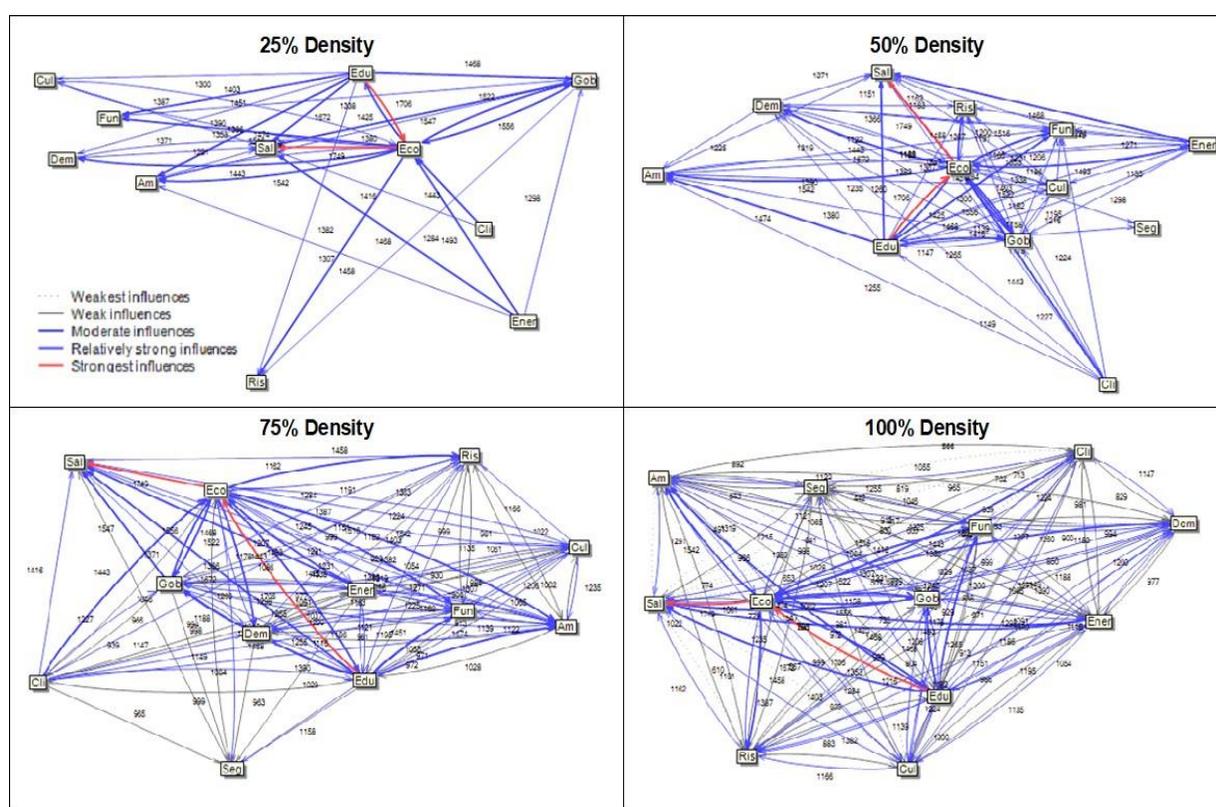
Aunque la pandemia dejó en evidencia que América Latina y el Caribe es la región más desigual del mundo por su pobreza, la deficiente urbanización y el débil sistema de protección social y de salud, que incidieron en el incremento de los contagios (CEPAL, 2020), a diferencia de países como Australia y Nueva Zelanda, donde los casos de Covid-29 se están controlando adecuadamente (El Tiempo, 2021). Lo anterior es una muestra de la dependencia de la Salud a los determinantes sociales, económicos, ambientales, culturales, biológicos y demográficos (Rodríguez-Páez *et al*, 2012).

#### **1.3.2.4 Elementos autónomos del sistema urbano**

A nivel local el único elemento que fue clasificado como autónomos fue la seguridad, es decir que tiene poca importancia en el sistema y puede ser descartado en el análisis. Sin embargo, la pandemia del Covid-19 resaltó la relación entre seguridad y economía, que en Colombia se evidencio con una pérdida de empleo estimada en 23.4% (Serna-Gómez *et al*, 2020), que en corto plazo se tradujo en el incremento de actos violentos como homicidios, lesiones personales y hurtos que, si bien disminuyeron por el aislamiento, a mediano y largo plazo se espera que empeora, debido al empobrecimiento en el que se encuentran las comunidades (Rettberg, 2020; International Organization for Standardization [OIT], 2020).

### 1.3.3 Modelo conceptual del sistema urbano

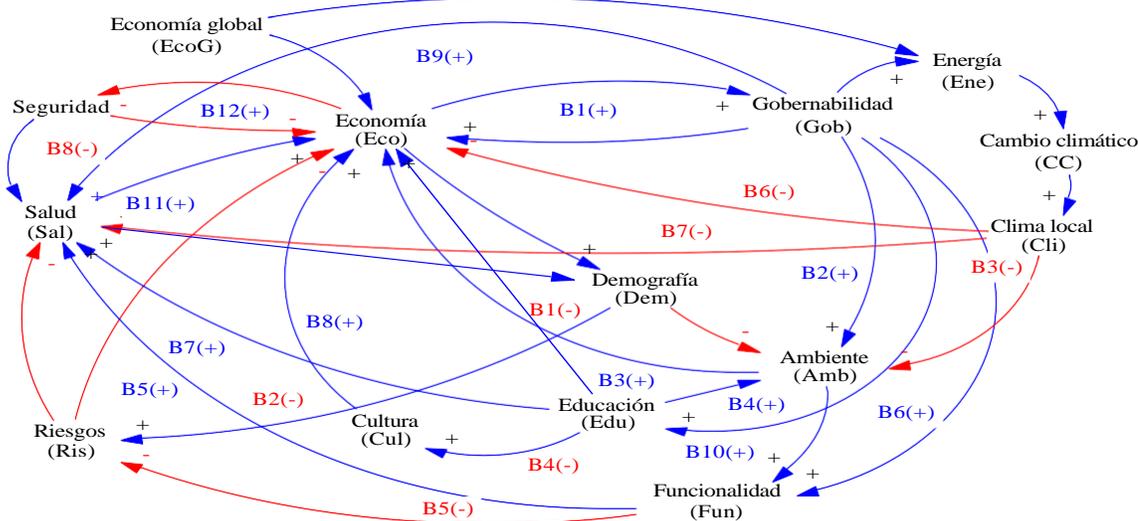
A partir del mapa de influencias-dependencias indirectas y con el software *Micmac* se obtuvo el diagrama de influencias que se ejecutó con diferentes densidades (15% al 75%), con el fin de visualizar los niveles de influencia (fuertes a débiles) y reconocer las relaciones de mayor a menor influencia según la siguiente clasificación: muy fuerte, relativamente fuerte, moderado, débil y más débil (Figura 1.3). Las relaciones más fuertes se presentaron entre economía, salud y educación, seguidas de las relaciones entre los elementos de gobernabilidad, clima, ambiente, funcionalidad, demografía y energía, y en menor entre seguridad y economía



**Figura 1.3** Diagrama de influencias del sistema urbano con diferentes densidades.

Sin embargo, este diagrama no identifica el sentido de las relaciones, es decir, la manera en que el elemento impactado (punta de la flecha) evoluciona en virtud de la influencia ejercida por el elemento impactante (cola de la flecha). En este sentido, García (2020) define este tipo de relaciones como positivas si la alteración del elemento impactante altera al elemento impactado en el mismo sentido y negativas si el elemento impactado reacciona en sentido contrario.

Teniendo en cuenta lo anterior se construyó el diagrama causal de dinámica de sistemas que representa de forma simple la complejidad del sistema urbano (Figura 1.4). A partir de estas relaciones se construyeron los bucles y se clasificaron como positivos cuando el número de relaciones negativas es par, y negativos cuando el número de relaciones negativas es impar.



**Figura 1.4** Diagrama causal de dinámica de sistemas del municipio de Pasto.

El diagrama causal del sistema urbano cuenta con doce bucles positivos y ocho negativos, como se muestra en la Tabla 1.4, siendo los bucles positivos responsables del crecimiento, decrecimiento y colapso del sistema (inestabilidad), mientras que los bucles negativos lo estabilizan y orientan (García, 2020). Estos bucles se integran mediante arquetipos que definen el comportamiento del modelo, de acuerdo con el nivel y la magnitud de la perturbación que sufra el sistema (Valença y De Carvalho, 2013). Estas interacciones fueron denominadas por Keivani (2010), como círculos virtuosos que, en el contexto de una política adecuada, son la base para construir un crecimiento más equitativos, comunidades empoderadas y espacios más habitables y menos contaminados.

**Tabla 1.4.** Bucles del sistema urbano

Bucles	Positivos	Negativos
B1	Eco - Gob - Eco	Eco - Dem - Amb - Eco
B2	Gob - Amb - Eco - Gob	Dem - Ris - Eco - Dem
B3	Gob - Edu - Eco	Cli - Amb - Eco - Gob - Ene - CC - Cli
B4	Gob - Edu - Amb - Eco - Gob	Cli - Amb - Fun - Sal - Eco - Gob - Ene - CC - Cli
B5	Gob - Fun - Ris - Eco - Gob	Cli - Amb - Fun - Ris - Sal - Eco - Gob - Ene - CC - Cli

<b>Bucles</b>	<b>Positivos</b>	<b>Negativos</b>
B6	Gob - Fun - Sal - Eco – Gob	Cli - Eco - Gob - Ene - CC – Cli
B7	Dem - Ris - Sal – Dem	Cli - Sal - Eco - Gob - Ene - CC – Cli
B8	Gob - Edu - Cul - Eco – Gob	Eco - Seg - Sal – Eco
B9	Gob - Sal - Eco – Gob	
B10	Gob -Amb - Fun - Sal - Eco – Gob	
B11	Gob - Edu - Sal - Eco – Gob	
B12	Eco - Seg – Eco	

La relación entre salud y economía es por lo general positiva, ya que, si las condiciones de salud pública mejoran, la economía también lo hace, y viceversa (como se comprobó con la pandemia de Covid-19). Por otra parte, si el desempeño de la gobernabilidad mejora (menores niveles de corrupción, violencia y burocracia), se favorece el crecimiento económico y se generan sinergias positivas en todo el sistema. En contraste, una relación negativa se puede inferir entre el clima y la salud, dado que el incremento o disminución de la temperatura y la precipitación alteran las condiciones de salud y bienestar de las personas, produciendo efectos adversos, ya que las condiciones de normalidad del clima se ven afectadas tanto por exceso como por defecto, es decir, que según evolucione el clima, este elemento puede convertir al bucle y al sistema en positivo, siempre y cuando la economía global siga dependiendo de los combustibles fósiles como instrumentos de desarrollo. Aunque el cambio de esta tendencia en la ciudad no se espera que ocurra a corto plazo.

En cuanto a los bucles positivos, el B1 define el crecimiento político y económico local; el B2 la incidencia del ambiente en el crecimiento económico; el B3 y B4 la sinergia potencial del sistema con la gestión del sector educativo y ambiental; el B5 y B6 reflejan los efectos de los riesgos de desastres sobre la funcionalidad, la economía, la salud y la gobernabilidad, donde la falta de gestión gubernamental ante los riesgos de desastres puede provocar el colapso del sistema; el B7 muestra la vulnerabilidad de la salud de las personas por exposición a los riesgos de desastres, en un contexto del crecimiento poblacional; el B8 incorpora la cultura en la relación de gobernabilidad y educación, como elemento de transformación social; del B9 al B11 resaltan la influencia de la gobernabilidad en los elementos del sistema y su capacidad para articular políticas y estrategias sistémicas orientadas al crecimiento sostenible y resiliente del municipio; y por último, el B12 indica el impacto de la seguridad ciudadana frente a una eventual crisis económica.

Por su parte, los bucles negativos buscan estabilizar el sistema. En este sentido, B1 muestra al ambiente como regulador del desarrollo económico, en especial de las actividades

agropecuarias, la producción de alimentos y las actividades comerciales relacionadas con la artesanía, carpintería, entre otras que dependen de su explotación; el B2 resalta la importancia del crecimiento económico que incide en la gestión de riesgos de desastres (a mejores ingresos, mejores sitios de vivienda); del B3 al B5 muestran la incidencia de las condiciones climáticas en el ambiente, y por lo tanto, en la prestación de servicios públicos (suministro de agua), en la presencia de riesgos de desastres (áreas de inundación, deslizamiento y de recarga de acuíferos) y en la generación de energía hidráulica (por las represas de Julio Bravo y río Bobo que cubren una pequeña parte de la demanda energética), incidiendo en las condiciones de salud, el desarrollo económico y la gobernabilidad; B6 representa la relación de dependencia energética y su impacto sobre la economía y el clima, pese al potencial local y regional de generar diferentes tipos de energía renovable; el B7 muestra los efectos en la salud y la economía; y finalmente, el B8 incluye el efecto de la seguridad en la salud de las personas (violencia) y por lo tanto en la economía.

De acuerdo con García (2020), el diagrama causal también permite definir los siguientes elementos: i) Elemento clave del sistema (del que se desprende el mayor número de relaciones de influencia); ii) Elemento limitante (el que recibe el mayor número de relaciones de influencia); iii) Elemento inactivo (que no cumple tareas especiales). En este sentido, el diagrama causal muestra que la gobernabilidad es posiblemente el elemento clave, debido a que es responsable de ejercer la autoridad y administrar los recursos para alcanzar los objetivos establecidos por el sistema. El elemento limitante actual es el económico, porque depende de la evolución de los demás elementos y es capaz de erosionar los objetivos del sistema, dada la volatilidad de los mercados, la inestabilidad política, la corrupción, el cambio climático, nuevas pandemias, entre otros. No obstante, una adecuada gestión financiera permitiría construir una ciudad resiliente y sostenible. Finalmente, la seguridad como elemento inactivo indica baja influencia en el sistema, sin embargo, bajo las condiciones de crisis económica y social, se puede convertir en un elemento sensible para el desarrollo local.

Por último, el diagrama causal representa la dependencia que tiene el sistema local de los sistemas externos para el suministro de combustibles fósiles, siendo estos los responsables del cambio climático (IPCC, 2018; IPCC, 2021). Sin embargo, como se mencionó anteriormente, a nivel local y regional existe el potencial para cubrir gran parte de la energía eléctrica requerida a partir de fuentes renovables de energía como eólica, hidroeléctrica, fotovoltaica y biomasa, que

además de estimular nuevas economías, pueden contribuir a reducir el desempleo, proteger el ambiente, mejorar la calidad de vida y, especialmente, a disminuir la dependencia del sistema.

#### 1.4 CONCLUSIONES

El análisis estructural permitió identificar que varios de los elementos urbanos analizados tienen gran potencialidad y que el modelo de desarrollo municipal no logra articularlos sistémicamente para generar sinergias positivas y alcanzar los objetivos propuestos, reduciendo el tiempo y maximizando los recursos disponibles.

El cambio climático como elemento externo al sistema urbano y sobre el cual el sistema local no tiene la capacidad para gestionar su evolución, debe ser considerado como una seria amenaza, capaz de generar alteraciones significativas en el desarrollo del municipio. Entre ellas, el impacto en el rendimiento de los cultivos, la pérdida de la seguridad y soberanía alimentaria, la disponibilidad de agua, el incremento de la incidencia en las enfermedades relacionadas con EDA e IRA, así como el incremento en los eventos extremos climáticos responsables de las inundaciones, deslizamientos e incendios forestales. Aunque es posible que el aumento de temperatura incida favorablemente en otras actividades económicas como el turismo, la generación de energía renovable, la siembra y comercialización de nuevos cultivos, entre otros.

El Covid-19 ha demostrado importantes vulnerabilidades en los sistemas locales en términos de servicios médicos, civismo, sistema educativo y en la incapacidad de la infraestructura urbana para brindar servicios básicos de agua y alcantarillado, especialmente al sector rural y a las comunidades más pobres. No obstante, la evolución del cambio climático puede empeorar estas condiciones y aumentar los riesgos para el ambiente, la economía y la salud de las personas.

Entre las potencialidades de Pasto está la posibilidad de generar economías de aglomeración a nivel regional, nacional e internacional, además de producir energía a partir de fuentes renovables, con lo que se pueden disminuir las emisiones de GEI, la contaminación ambiental y la incidencia de algunas enfermedades, además de generar riqueza y bienestar en la población.

En el sistema urbano existen varios factores generadores de entropías que amenazan la estabilidad del sistema, entre ellos la inestabilidad política, la deforestación, la contaminación

ambiental, inundaciones, deslizamientos de tierra, incendios forestales y el incremento de las enfermedades, los cuales se pueden incrementar en el marco del cambio climático.

La desaceleración del crecimiento poblacional generó una transición de una sociedad joven y endémica a una población adulta y más abierta, cuyo crecimiento contribuyó significativamente al desarrollo económico local, aunque también aumentó las presiones ambientales debido a la expansión de las zonas urbanas, el transporte y la demanda de bienes y servicios ambientales, teniendo como limitantes el acceso al agua y el escaso territorio que pueden contrarrestar el crecimiento.

El sistema urbano está formado por bucles positivos y negativos que definen la evolución de la ciudad y también su regulación frente a las repercusiones programadas o no programadas del sistema. Sin embargo, la estabilidad o inestabilidad de los bucles frente al cambio climático dependerá de las decisiones sistémicas y articuladas que tomen los agentes urbanos para reducir los niveles de los GEI y su adaptarse al territorio.

Se resalta que Pasto haya adoptado el programa “Iniciativa de Ciudades Emergentes y Sostenibles” como una estrategia de mitigación y adaptación al cambio climático. Sin embargo, es importante dar continuidad, hacer seguimiento y evaluaciones periódicas a su implementación.

Estos resultados se obtuvieron con un enfoque sistémico basado en el método de análisis estructural que, a partir de la aplicación de una encuesta estructura y anónima (método Delphi) a seis expertos locales en diferentes áreas del conocimiento, se obtuvo un mapa de influencias y dependencias indirectas, así como el diagrama de influencias del sistema urbano, que fueron la base para construir un diagrama causal, el cual nos permitió identificar las principales relaciones del clima con los elementos urbanos, junto con sus procesos de retroalimentación (bucles).

## CAPÍTULO II

### IMPACTOS DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LOS ELEMENTOS URBANOS DEL MUNICIPIO DE PASTO (2004-2019)

#### **Resumen**

La zona urbana del municipio de Pasto (Colombia) es una de las principales ciudades intermedias y emergentes del nodo de los Pastos de la Cordillera de los Andes. Sin embargo, su morfología de montaña, su clima moderadamente húmedo y sus condiciones sociales, económicas y ambientales la hacen vulnerable a la variabilidad y al cambio climático. El objetivo de esta investigación es identificar y describir matemáticamente los impactos de la variabilidad climática en los principales elementos urbanos del Pasto. Para ello, se utiliza el método correlacional, que permite reconocer el tipo de relaciones y las trayectorias que se forman entre la variabilidad climática y la evolución de los elementos urbanos impactados durante el periodo 2004 a 2019. Los resultados muestran que la variabilidad climática en los rendimientos de los cultivos y en los eventos de inundación producen trayectorias cuadráticas negativas. Los eventos de deslizamientos de tierra, incendios forestales y la prevalencia de enfermedades diarreicas agudas (EDA) e infecciones respiratorias agudas (IRA) siguen modelos cuadráticos positivos. La disponibilidad de agua, la producción ganadera y la seguridad alimentaria siguen modelos lineales. Si bien el estadístico F no validó todos los modelos, con los datos disponibles se identificaron posibles tendencias en la evolución de las variables urbanas afectadas por la variabilidad del clima como por el crecimiento de la población y la interacción cultural. Los resultados muestran que los impactos del clima afectan de forma diferente a los elementos urbanos. Algunos, como los deslizamientos de tierra y los rendimientos de cultivos, son más significativos que los impactos en la salud pública.

**Palabras claves:** modelos correlacionales, cambio climático, variabilidad climática, impactos urbanos, desastres urbanos.

#### **Abstract:**

The urban area of the municipality of Pasto (Colombia) is one of the main intermediate and emerging cities of the Pastos node of the Andes Mountains. However, its mountainous morphology, its moderately humid climate and its social, economic, and environmental conditions

make it vulnerable to climate variability and change. The objective is to identify and mathematically describe the impacts of climate variability on the main urban elements of the municipality. To do this, we used the correlational method, which allowed us to recognize the type of relationships and trajectories formed between climate variability and the evolution of the impacted urban elements during the period 2004 to 2019. Results show that climate variability in crop yields and flood events produce negative quadratic trajectories. Landslide events, forest fires, the prevalence of acute diarrhoeal diseases (ADD), and acute respiratory infections (ARI) follow positive quadratic patterns. Water availability, livestock production and food security follow linear models. Although the F statistic did not validate all models, with the available data we were able to identify trends in the evolution of urban variables affected by climate variability as well as by population growth and cultural interaction. The results show a differentiated impact of climate on urban elements. Some, such as landslides and crop yields, are more significant than public health impacts.

**Keywords:** correlational models, climate change, climate variability, urban impacts, urban disaster.

## 2.1 INTRODUCCIÓN

El IPCC (2018) reconoce que la actividad humana es responsable del calentamiento global de más de 1°C respecto a los niveles preindustriales. Este calentamiento produce cambios en la superficie terrestre, en los océanos, en la criósfera, e incrementa la frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos, produciendo desertificación y degradación de tierra en muchas regiones del planeta, lo que amenazan la seguridad alimentaria de los territorios, debido a los cambios de las zonas climáticas como la expansión de las zonas áridas y la contracción de las zonas polares, así como la alteración de la actividad de muchas plantas y animales, entre otros (IPCC, 2019). Lo cual repercute en los medios de vida, la salud pública, las infraestructuras, el transporte, el turismo, el ocio y la cultura (IPCC, 2019a).

La magnitud de estos impactos depende de la ubicación geográfica, así como de las condiciones sociales, económicas y ambientales de las regiones (IPCC, 2013; IPCC, 2019a). En América Latina y el Caribe, los principales impactos del cambio climático se asocian con pérdidas en la producción agrícola, escasez de agua, sequías, inundaciones, pérdida de bosques y biodiversidad, propagación de enfermedades transmitidas por vectores, pérdida de infraestructuras

en zonas costeras y con el aumento de la pobreza (CEPAL, 2015). Por otra parte, los efectos de los eventos climáticos extremos (sequías, inundaciones, olas de calor y de frío), se miden en función del número de personas afectadas y en la valoración económica de los daños (Tschumi y Zscheischler, 2020). Sin embargo, estos desastres no solo dependen del clima sino también del crecimiento poblacional y de la inadecuada planificación urbana.

De acuerdo con Li et al. (2021), los eventos de calor y precipitación extrema derivados de la variabilidad y del cambio climático, amenazan la salud pública. Mientras que las inundaciones y los deslizamientos de tierra aumentan el riesgo de enfermedades transmitidas por el consumo de alimentos y por la exposición del agua a microorganismos patógenos (Lin et al., 2016, Chong et al., 2021), además de las condiciones de insalubridad generadas (Escalona et al., 2018). Por otra parte, el calor incrementa la mortalidad de enfermedades respiratorias y la desnutrición infantil (Ebi et al., 2018). De igual manera, contribuye con la propagación de enfermedades transmitidas por vectores patógenos como mosquitos, garrapatas y pulgas (WHO, 2019), entre ellos el dengue, la chikunguña y el zika, especialmente en la región pacífica (Filho et al., 2019). Además, incide en el incremento de enfermedades mentales (angustia), empeora las existentes, y aumenta las tasas de hospitalizaciones psiquiátricas y suicidios (Charlson et al., 2021).

En cuanto a los impactos del cambio climático sobre el rendimiento de los cultivos, Sheridan y Bicford (2011) identificaron una relación positiva entre el crecimiento de las plantas y la precipitación, y negativa respecto a la temperatura. Mientras que la producción ganadera su impacto se mide con el índice de temperatura y humedad que permite evaluar el confort animal y por lo tanto su producción (Valdivia-Cruz et al., 2021; López et al., 2016). La alteración sistémica del clima impacta la producción agrícola y ganadera, que son los principales componentes de la seguridad alimentaria de los pueblos (Bianchi and Szpak, 2016).

De acuerdo con Edward y Chao (2018), los vacíos que persisten en la adaptación climática urbana están relacionados con la gestión de datos urbanos, la evaluación de impactos interdisciplinarios y el desarrollo de políticas y mercados. De igual manera, González et al. (2021) manifiestan que los desafíos de la resiliencia climática de las ciudades están en el modelado de alta resolución, en la inclusión de las relaciones entre cambio climático, adaptabilidad, calidad del aire, salud, energía, planificación urbana, gobierno, agua y agricultura, y en la incorporación de procesos humanos, gestión de las bases de datos de las agencias gubernamentales, entre otros.

El objetivo de esta investigación es reconocer los impactos de la variabilidad climática sobre los elementos urbanos, a partir de las relaciones causales identificadas en el diagrama de dinámica de sistemas del capítulo I, y de los registros históricos disponibles de las diferentes instituciones de orden local, departamental y nacional. Estas relaciones se formularon con el método correlacional, donde el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) permitió definir el nivel de dependencia de las variables urbanas respecto a las variables climáticas, además de las trayectorias que se aproximan con modelos matemáticos parabólicos, lineales y logarítmicos.

Para ello se definió un periodo climático de referencia (1976-2005) como punto base para comparar la evolución del clima respecto al periodo climático de evidencias (2006-2019), y un periodo de evidencias de impactos (2004-2019) donde se establecen las correlaciones entre las variables climáticas y urbanas. El último periodo se eligió debido a que desde el año 2004 existe el registro de los eventos relacionados con la producción agrícola y ganadera y con los eventos de deslizamientos de tierra. En los años siguientes, se inició el registro de eventos urbano tales como, incidencia de enfermedades, inundaciones, incendios forestales entre otros.

La primera sección de este documento cuenta con una revisión bibliográfica que muestra una síntesis de los impactos del cambio climático producidos e identificados a nivel global. En la segunda sección, se identifican los posibles efectos de la variabilidad climática sobre el sistema urbano, de acuerdo con el diagrama causal de dinámica de sistemas establecidos en el capítulo I. En la tercera sección se establecen las correlaciones entre las variables climáticas (impactantes) y las variables urbanas (impactadas).

## **2.2 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.2.1 *Identificación de variables***

Inicialmente se hizo una revisión bibliográfica de los impactos que está produciendo el cambio climático, a partir de la cual se establecieron los posibles impactos que se pueden presentar en el municipio de Pasto respecto a su ubicación geográfica. Esta revisión se basó en artículos científicos, documentos publicados por entidades oficiales de orden internacional, nacional y local y, en los reportes del IPCC, teniendo en cuenta que es la principal autoridad internacional para evaluar los riesgos del cambio climático (Molina y Abadal, 2021; Aven y Renn, 2015), y además es el referente del conocimiento científico, técnico y socioeconómico (IPCC, 2020).

Lo anterior permitió identificar los posibles impactos del cambio climático que pueden ocurrir en Pasto. Luego, se recogió información local de variables y datos (series temporales) que explican los impactos identificados. A nivel local, se consultaron las diferentes secretarías de la Alcaldía Municipal de Pasto, así como las empresas de servicios públicos. A nivel departamental, la Gobernación de Nariño y Corponariño. Entre las instituciones nacionales, se consultaron las bases de datos de DANE, IDEAM, y la Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales (DIAN), entre otras. Con base en la información recolectada, se clasificaron las variables en impactantes (clima) e impactadas (urbanas), donde las variables impactantes son aquellas que influyen y alteran la evolución de las variables impactadas.

### **2.2.2 Período de evaluación**

A nivel global el IPCC (2013) definió al periodo comprendido entre 1986 y 2005 como periodo de referencia, y como escenarios RCP a los periodos 2016-2035, 2046-2065 y 2081-2100. En este mismo sentido, y teniendo en cuenta la mayor disponibilidad de información, a nivel local el IDEAM et al. (2015) definió el periodo de referencia entre 1976-2005 y los escenarios RCP en los periodos 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100. Por lo tanto, para identificar los impactos de la variabilidad climática en los elementos urbanos y con la información disponible, se definieron los siguientes periodos: i) periodo climático de referencia (1976-2005); ii) periodo climático de evidencias (2006-2019) y; iii) periodo de evidencias de impactos (2004-2019).

A partir del periodo climático de referencia se definió la magnitud de la perturbación del clima en el periodo climático de evidencias, mientras que en el periodo de evidencias de impactos se definieron las correlaciones entre el clima y los elementos urbanos. Respecto a la temporalidad, las variables urbanas y climáticas tienen diferentes escalas. Por ejemplo, la escala de producción agrícola es semestral y anual (según cultivo), la escala del crecimiento poblacional es anual, la escala de los eventos de riesgos de desastres es diaria y la escala de los eventos de salud es semanal. Por lo tanto, para comparar la magnitud de los impactos en los diferentes sectores se adoptó la escala anual, aunque con ello se limita el análisis interanual.

Los promedios anuales de las series de temperatura y precipitación se obtuvieron mediante isoyetas e isotermas, que son adecuadas para representar el clima de terrenos no uniformes (Dias, et al 2021; Chowdhury et al., 2016), como es el caso del municipio de Pasto. Las isotermas e isoyetas se realizaron con el *software* ArcMap 10.5, y los métodos determinísticos de interpolación

de distancia inversa ponderada (IDW) y de función polinomial (Spline) respectivamente. Estos métodos son sencillos y suelen tener mejores resultados que los métodos estocásticos (Alzate-Velásquez *et al.*, 2018).

### 2.2.3 Cálculo de variables

Los datos del caudal de agua superficial provinieron de los reportes de la estación meteorológica de la Universidad de Nariño, ubicada a 1.234 de latitud y -77.292 de longitud (registra los caudales de escorrentía de la parte alta y media de la cuenca del río Pasto), y de la estación meteorológica de la Cocha, ubicada a 0.989 de latitud y -77.157 de longitud (registra los caudales de la parte alta de la cuenca del río Guamuez) (Alcaldía de Pasto, 2014a). A partir de los datos anuales de caudal, precipitación, y la ecuación de escorrentía utilizada por Silva *et al.* (2021), que se presenta a continuación, se determina el coeficiente de escorrentía superficial ( $C_s$ ).

$$C_s = \frac{\text{Caudal}}{\text{Precipitación} * \text{Área}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Los impactos en la agricultura se definieron mediante correlaciones entre las variables temperatura (T), precipitación (P) y la relación precipitación/temperatura (P/T), respecto al rendimiento de los cultivos de maíz, repollo, frijol, fique, cebolla, papa, zanahoria, mora, trigo y coliflor. Según el CEDRE (2011), estos cultivos son los que más contribuyeron al PIB en el período 2005-2010. En la relación producción animal y clima, López *et al.*, (2016) utilizó el método del Índice de Temperatura y Humedad (ITH) (Ecuación 2), que define el confort animal, evaluado en una escala de 1 a 100, donde los valores menores a 72 indican normalidad, de 73 a 78 alerta, de 79 a 83 peligro, y los mayores a 83 emergencia.

$$ITH = (1.8 * Ta + 32) - [(0.55 - 0.55 * \frac{HR}{100}) * (1.8 * Ta - 26)] \quad (\text{Ecuación 2})$$

donde  $HR$  = Humedad relativa del aire (%) y  $Ta$  = Temperatura del aire (°C)

La seguridad alimentaria es función de la producción agropecuaria y de su capacidad de abastecer la demanda de la ingesta energética de la población del municipio de Pasto. En este sentido, la oferta energética resulta de multiplicar la producción agropecuaria (toneladas) por el contenido de energía (kcal) por unidad de peso de cada producto. El contenido de energía por

unidad de peso de los productos se obtuvo de la Tabla de Composición de Alimentos del Instituto Colombiano de Bienestar Familiar (ICBF, 2015). Posteriormente, con el número de personas clasificadas por sexo y edad y, con base en la resolución 3803 de 2016 que define la ingesta de energía requerida por una persona, se definió la oferta energética de la producción local como la diferencia entre la producción agropecuaria y la ingesta requerida por la población en kcal.

Para determinar los impactos en la salud humana, se compararon los impactos reportados en el Boletín Clima y Salud, con los Eventos de Notificación Obligatoria en Salud del municipio de Pasto. Posteriormente se seleccionan las enfermedades que existen en común y se identifican posibles correlaciones con el clima local. Para identificar el impacto del clima en el incremento de los riesgos de desastres, se solicitó a DGRD, el informe de los eventos de inundaciones, deslizamientos e incendios forestales ocurridos en Pasto para identificar posibles correlaciones con el clima.

Finalmente, los modelos matemáticos urbanos obtenidos se evaluaron con el estadístico F, donde la hipótesis nula ( $h_0$ ) no acepta la influencia del clima en la evolución de las variables urbanas, mientras que la hipótesis alternativa ( $h_1$ ) si la acepta. El análisis de estacionalidad de las series de temperatura y precipitación se hizo con la prueba de Mann-Kendall, debido a que su uso es común en series de lluvias, escorrentías y temperatura (Güçlü, 2018), donde  $h_0$  rechaza la estacionalidad, y  $h_1$  la acepta. En ambos casos, la aceptación o rechazo de hipótesis se estableció con un nivel de confianza de 95% (significancia de 0.05 y Z crítico 1.96), es decir,  $h_0$  se acepta si *p-valor* es mayor o igual al valor de significancia, en caso contrario se rechaza  $h_0$  y se acepta  $h_1$ .

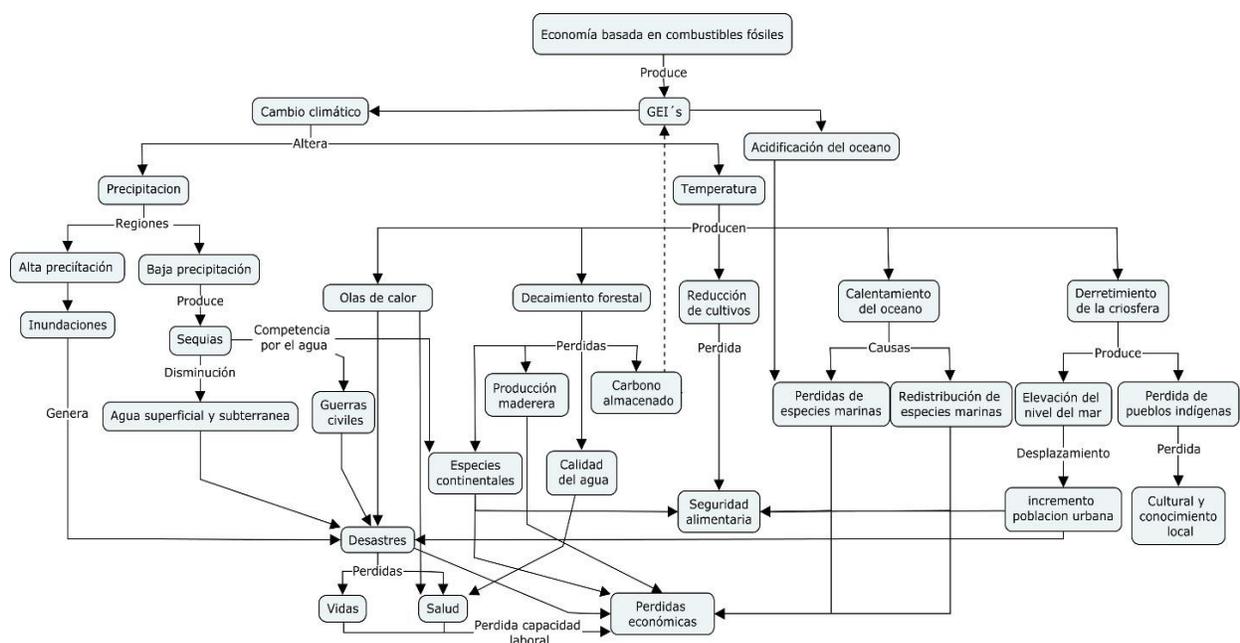
## **2.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **2.3.1 Impactos del cambio climático**

Los impactos del cambio climático dependen de la ubicación geográfica (IPCC, 2013) y de las condiciones locales de vulnerabilidad relacionadas con desigualdades, exposición, adaptación y mitigación (IPCC, 2018). En este sentido, se puede afirmar que estos impactos recorren el territorio siguiendo el diagrama causal de dinámica de sistemas, dando forma a una estructura similar a una reacción en cadena, que parte de una economía basada en combustibles fósiles, como la principal fuente de generación de GEI, los cuales alteran las condiciones de la atmósfera (precipitación y temperatura) y el océano (acidificación).

De acuerdo con Bárcena et al (2020), en América Latina y el Caribe los principales impactos que produce el cambio climático son inundaciones, sequías, olas de calor, decaimiento forestal, pérdidas de los medios de producción como la disminución del rendimiento de la producción agrícola y la disminución de la pesca tanto por la desaparición como por la redistribución de las especies, y la pérdida de territorios asociada con la desertificación de suelos y la elevación del nivel del mar.

Lo anterior incrementa los procesos migratorios no planificados hacia las ciudades más seguras, aumentando el número de personas afectadas por riesgos de desastres, disminución en la cobertura de servicios públicos y en la seguridad alimentaria, deterioro de la salud y pérdidas de vidas humanas, que en conjunto alteran la estabilidad socioeconómica, que es lo que se pretende mostrar en la Figura 2.1.



**Figura 2.1** Red global de impactos del cambio climático en América Latina y el Caribe.

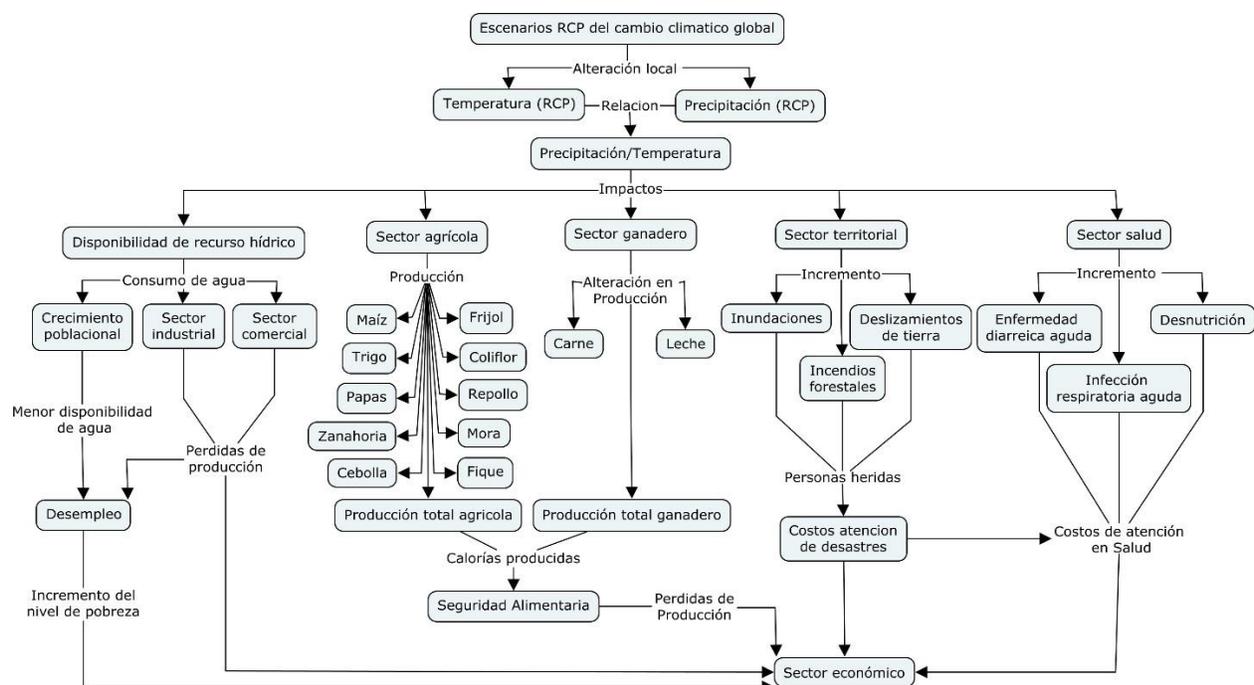
### 2.3.2 Identificación de posibles efectos locales del cambio climático

A partir de la dinámica de reacción en cadena y el diagrama causal de dinámica de sistemas propuesto en el capítulo I, se identificaron los impactos sobre los elementos urbanos relacionados con el ambiente, la economía, la salud, la funcionalidad y la economía. De forma directa el cambio climático altera la temperatura y precipitación, afectando con ello el suelo, la disponibilidad de

agua, que en conjunto inciden en la producción agropecuaria, la prestación de servicios de acueducto, generación de energía hidráulica, y el incremento de personas y bienes afectados por inundaciones, incendios forestales y deslizamientos de tierra, así como el incremento de la incidencia de las enfermedades EDA e IRA.

Por otra parte, se descarta la incidencia de enfermedades cardiovasculares, mentales y estrés térmico, asociada a eventos de olas de calor, ya que la temperatura máxima mensual proyectada por IDEAM (2016) en los escenarios RCP es de 15.49 °C, y el umbral de las olas de calor esta entre 22 °C y 32.3 °C (Chesini *et al.*, 2019). Se descartan también los impactos de la producción pesquera ya que este sector no aporta significativamente en el PIB (CEDRE, 2011).

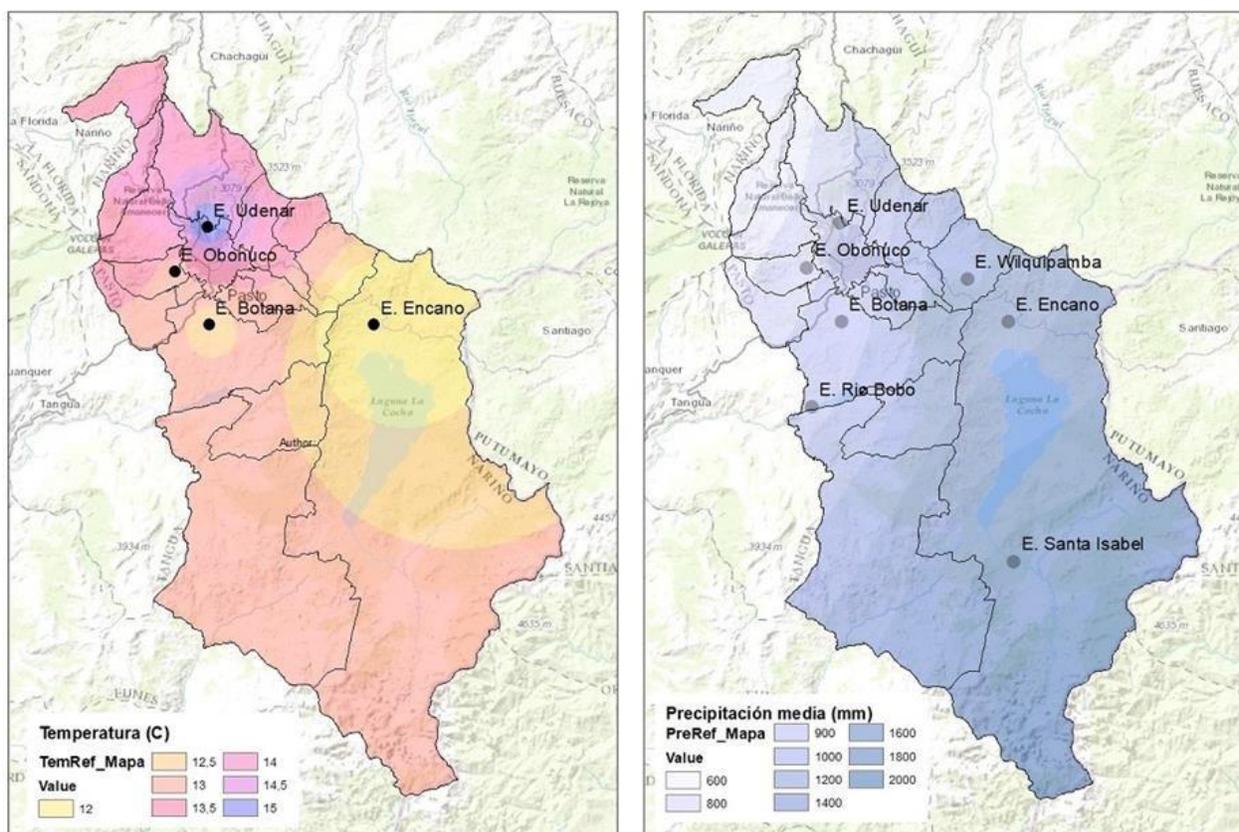
Sin embargo, con los registros históricos de algunas variables urbanas asociados con el crecimiento poblacional, fue posible identificar las trayectorias que genera la variabilidad del clima en los elementos urbanos del municipio de Pasto, especialmente en la disponibilidad de agua, en el rendimiento de los cultivos, el incremento de los riesgos de desastre (inundaciones, deslizamientos de tierra e incendios forestales) y en la salud pública. Estas trayectorias pueden desencadenar pérdidas de la seguridad alimentaria, incremento de los costos de atención de desastres y deterioro de la economía local como se muestra en la Figura 2.2, aunque también tendría efectos positivos en el turismo, en la apertura de nuevos negocios ligados a la producción de energía renovable y en el cultivo de nuevos productos agrícolas.



**Figura 2.2** Red local de impactos del cambio climático.

### 2.3.3 *Clima local*

La temperatura y la precipitación anual en el municipio de Pasto cambian en función de su ubicación sobre las provincias Norandina y Amazónica. Donde la provincia Norandina con menor disponibilidad de agua (precipitación de 600 mm a 1000 mm y una temperatura de 13.5 °C a 15 °C, según los reportes de las estaciones meteorológicas de Udenar, Obonuco y Botana), es la responsable de abastecer el área urbana que representa el 84% de la población total (DANE, 2019). Mientras que la provincia Amazónica, la menos habitada cuenta con mayor disponibilidad de agua (precipitación de 1000 mm a 2000 mm, y una temperatura de 12 °C a 13.5 °C, según los reportes de las estaciones meteorológicas de Encano y Santa Isabel). Los valores medios de temperatura y precipitación se obtuvieron con los métodos de isotermas e isoyetas, los cuales son útiles en zonas de montaña (Chowdhury et al., 2016). Los resultados obtenidos se muestra en la Figura 2.3.



**Figura 2.3** Distribución de la temperatura y la precipitación en el municipio de Pasto.

Al comparar estadísticamente las condiciones entre el periodo climático de referencia y el periodo climático de evidencias, se observa que en el periodo climático de evidencias la temperatura y la precipitación media aumentaron 2,1% y 11,8% respectivamente, de igual manera la precipitación mínima y máxima también se incrementaron en 67,2% y 11,78%, respectivamente. Utilizando la prueba de Mann-Kendall para las series de temperatura y precipitación en los dos periodos comparado, se tiene que en el periodo de referencia climática la temperatura es estacionaria y la precipitación tiene una tendencia creciente. Mientras que en el periodo climático de evidencias las condiciones se invierten, es decir, la temperatura cambia hacia una tendencia creciente y la precipitación aumenta, pero mantiene una tendencia no significativa decreciente (Tabla 2.1).

**Tabla 2.1.** Estadísticas climáticas de los periodos climáticos de referencia y evidencias

Características climáticas	Periodo de referencia		Periodo de evidencias	
	Temperatura(°C)	Precipitación(mm)	Temperatura(°C)	Precipitación(mm)
Media Anual	12.78	1338.33	13.05	1496.11
Desviación estándar	0.35	267.77	0.33	146.89
Máximo	13.23	1789.21	13.47	1754.30
Mínimo	12.16	719.82	12.23	1203.48
	<b>Valor de Z</b>	<b>Valor de Z</b>	<b>Valor de Z</b>	<b>Valor de Z</b>
Test Mann-Kendall Con $Z_{\text{crítico}} = 1.96$	0.1427	3.068	3.0155	-0.5447

Según el IPCC (2021), el cambio climático afecta a todas las regiones habitadas del planeta, del que Pasto no es la excepción. En este contexto, los resultados de la Tabla 2.1, muestran un cambio significativo en los promedios anuales de temperatura y precipitación en el periodo climático de evidencias, además de que en este mismo periodo se han presentado los eventos climáticos extremos más fuertes de los que se tiene registro, como el fenómeno de la Niña (2010 a 2011) y el fenómeno del Niño (2015 a 2016), siendo 2016 el año más cálido desde 1976 con 13.47 °C. Sin embargo, aún no es posible afirmar que el clima local está cambiando a causa del incremento de las emisiones de GEI, ya que los registros de temperatura y precipitación de Pasto en el periodo climático de evidencias (2006-2019) son sólo de 20 años y de acuerdo con Gil-Guirado (2019) se requiere un registro consecutivo de al menos 30 años para confirmar dicha tendencia.

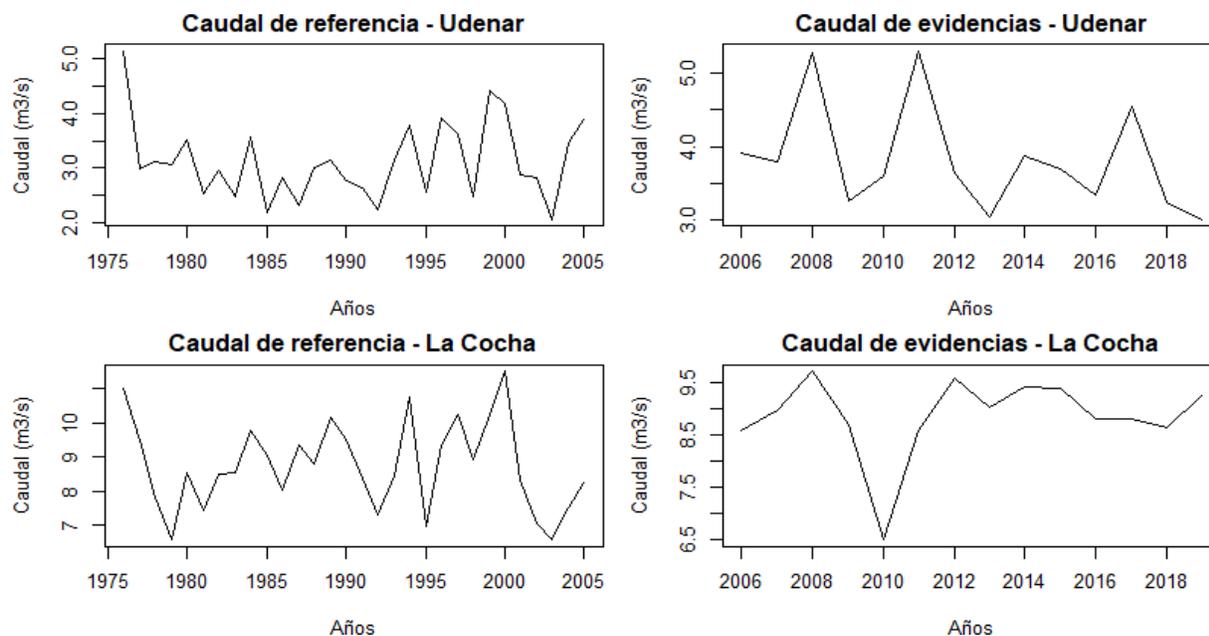
### 2.3.4 Impactos de la variabilidad climática en las variables urbanas

En esta sección se identifican las relaciones entre las variables climáticas y las variables urbanas, utilizando el método correlacional. Entre las variables climáticas seleccionadas se encuentran las siguientes: temperatura (T), precipitación (P), relación (P/T) y humedad relativa (HR), mientras que en las variables urbanas de las que se tiene registro a nivel local están: rendimiento de cultivos, índice de temperatura y humedad, seguridad alimentaria, número de personas y bienes afectados por los riesgos de desastres, y la incidencia de las enfermedades EDA, IRA y DNT.

#### 2.3.4.1 Influencia del clima en la disponibilidad de agua superficial.

De acuerdo con los datos de IDEAM (2020), se estableció que el caudal medio de la cuenca media del río Pasto en el periodo de referencia es 3.12 m<sup>3</sup>/s y en la parte alta de la cuenca del río

Guamuez es  $8.74 \text{ m}^3/\text{s}$ , para un total de  $11.86 \text{ m}^3/\text{s}$ . Por su parte, en el periodo climático de evidencias los caudales de río Pasto y del río Guamuez aumentaron a  $3.82 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $8.86 \text{ m}^3/\text{s}$  respectivamente, para un total de  $12.68 \text{ m}^3/\text{s}$  que equivale a un incremento de 7%, asociado al incremento de la precipitación (Figura 2.4).

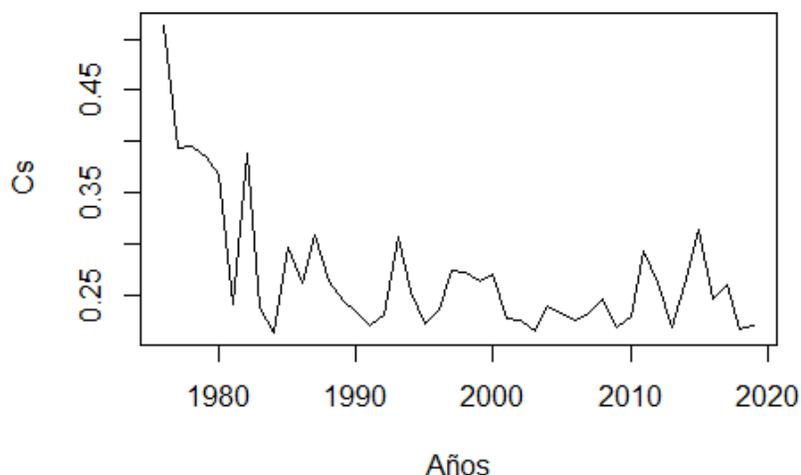


**Figura 2.4** Oferta hídrica del municipio de Pasto, obtenida en la parte alta y media de la cuenca del río Pasto (Udenar) y en la parte alta de la cuenca del río Guamuez (La Cocha).

Pese a la gran oferta hídrica local, existen conflictos por uso del agua, sobre todo en la cuenca del río Pasto, donde se asienta la zona urbana con el 84% de la población total (DANE, 2019). Estos conflictos se relacionan con el crecimiento poblacional, la expansión urbana, el sobredimensionamiento de caudales y el aumento de las concesiones de agua para uso agroindustrial, industrial y comercial (Perugache, 2020), que surgen principalmente por la inadecuada planificación urbana (Quesada y Jiménez, 2020).

Por otro lado, estos los conflictos se agudizan con los eventos climáticos extremos, como los ocurridos con el fenómeno de la Niña entre 2010-2011 y del Niño entre 2015-2016 que, sumado al contexto de infraestructura, crecimiento poblacional, cultura ciudadana y periodos de lluvia, ocasionaron en Pasto grandes eventos de inundaciones y deslizamientos. Mientras que en los periodos secos se incrementaron los incendios forestales, además de un descenso significativo en los caudales, que prendió las alertas por sequía y de un posible racionamiento de agua (Página 10,

2015). Pese a lo anterior, el cálculo del coeficiente de escorrentía ( $C_s$ ) del río Pasto (Figura 2.5), muestra que el caudal superficial se mantiene relativamente estable desde 1980. Pese a que este varía según el tipo y uso del suelo, pendientes, cobertura, desarrollo económico y las limitaciones del espacio físico (Chiarito *et al.*, 2018).



**Figura 2.5** Coeficiente de escorrentía ( $C_s$ ) en el municipio de Pasto.

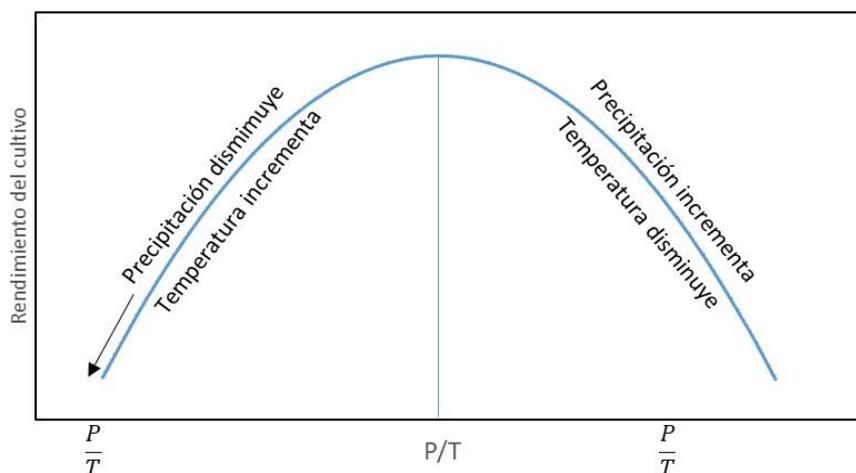
La prueba de Mann-Kendall permitió identificar que desde 1976 el coeficiente de escorrentía tiene una tendencia decreciente ( $Z_{critical} = -3,22$ ), y a partir de 1980 tiende a estabilizarse ( $Z_{critical} = -1,45$ , con una media de 0,252 y una desviación estándar de 0,036. Esto se puede explicar, por la configuración monocéntrica del área urbana de Pasto, y por la adopción del modelo de ciudad compacta (FINDETER, 2015).

#### **2.3.4.2 Influencia del clima en el rendimiento de los cultivos**

El municipio de Pasto dedica 8,862.8 ha para producir cultivos transitorios y permanentes. Entre los transitorios con ciclo de vida menor a un año, están los cultivos de papa, cebolla junca, trigo, y misceláneos como zanahoria, coliflor, repollo, remolacha, ulluco, haba, arveja, frijol, acelga y yuca. Entre los cultivos transitorios de ciclo anual se encuentran el frijol voluble y el maíz, mientras que en cultivos permanentes se cuenta con los cultivos de fique, mora y recientemente café, fresa y uchuva (Alcaldía de Pasto, 2014b). Sin embargo, estos cultivos dependen de varios factores, entre ellos la semilla, el manejo del cultivo y el clima, siendo este último uno de los más difíciles de controlar, pese a que actualmente se dispone de invernaderos y sistemas de riego (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2019).

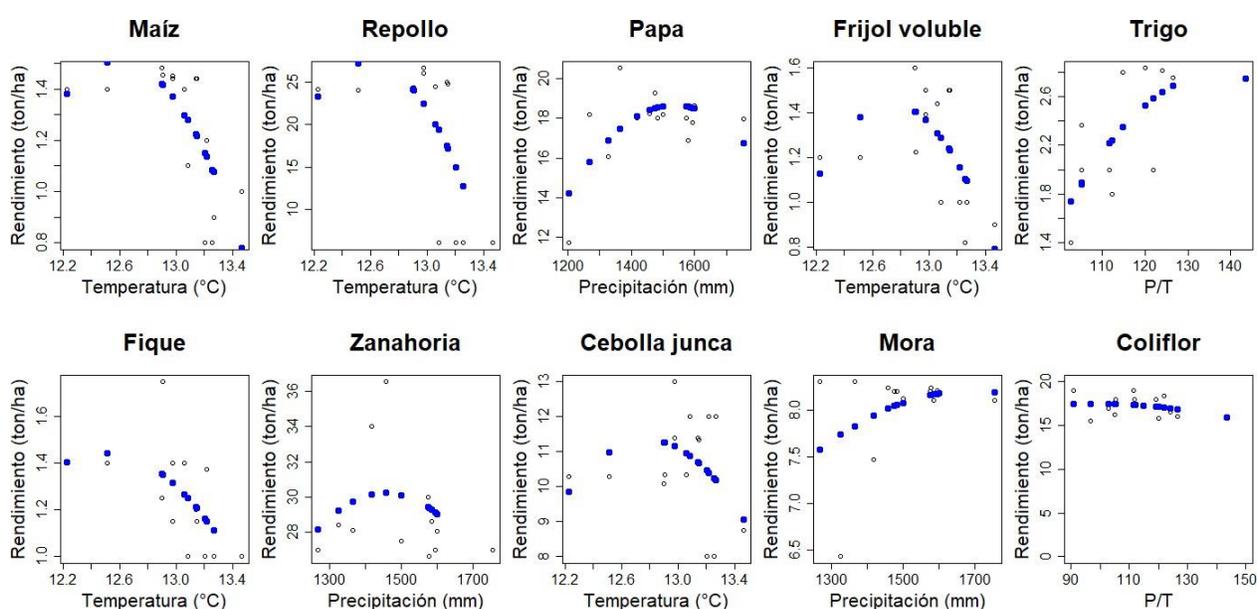
En el marco del cambio climático, el rendimiento de los cultivos presenta alteraciones importantes. Por ejemplo, Vergara et al. (2014) consideran que algunos cultivos aumentan su producción cuando sube la temperatura, disminuye la humedad del suelo y aumenta la fertilización de CO<sub>2</sub>. Contrariamente, el IPCC (2021) afirma que la pérdida de humedad del suelo produce sequías agrícolas, lo que disminuye gradualmente la producción hasta alcanzar el máximo nivel de tolerancia sobre los 2 °C. A nivel local, el método correlacional permitió identificar que las variaciones de temperatura y precipitación están produciendo una leve alteración en el rendimiento de los cultivos, que matemáticamente se ajusta a modelos cuadráticos negativos.

Un modelo cuadrático como el que muestra en la Figura 2.6, permite identificar tres factores importantes: i) el rendimiento óptimo del cultivo que se ubica en el vértice de la parábola; ii) Los impactos leves, que ocurren cuando las condiciones climáticas oscilan alrededor del rendimiento óptimo, y iii) impactos fuertes, cuando las condiciones climáticas se alejan exponencialmente del valor óptimo de rendimiento. El impacto exponencial indica una alteración sinérgica negativa, que hace disminuir significativamente el rendimiento en la medida que el clima empeora, por ejemplo, si incrementa la precipitación, aumenta la lixiviación del nitrógeno, produciendo erosión del suelo y pérdida de agua, que aceleran el impacto (Méndez y Araya, 2017; Monterroso-Rivas y Gómez-Díaz, 2021). Por lo tanto, el lado izquierdo de la parábola muestra las relaciones identificadas por Sheridan y Bicford (2011) positiva entre la precipitación y rendimiento, y negativa entre temperatura y rendimiento. Mientras que en el lado derecho las relaciones son contrarias, es decir, negativa respecto a la precipitación y positiva con temperatura.



**Figura 2.6** Curva de correlaciones entre P/T y el rendimiento de cultivos. Si P/T disminuye el clima es cálido y seco, pero si aumenta, el clima es frío y húmedo.

En este orden de ideas, el rendimiento de los cultivos de maíz, repollo, frijol voluble, fique y cebolla junca, parece disminuir en la medida que la temperatura sobrepasa los 12.5 °C, mientras que el rendimiento de los cultivos de papa, zanahoria y mora se incrementa alrededor de 1500mm de precipitación. En tanto que el rendimiento de los cultivos de trigo y coliflor reaccionan a la variación de P/T, donde el rendimiento del trigo mejora en condiciones de menor temperatura y mayor precipitación, y el cultivo de coliflor aumenta a mayor temperatura y menor precipitación (Figura 2.7). Estos modelos permitieron identificar las condiciones climáticas óptimas bajo las cuales se logra el máximo rendimiento de los cultivos.



**Figura 2.7** Correlaciones entre el rendimiento de cultivos y las variables climáticas.

El análisis con el estadístico F de las correlaciones entre el clima y el rendimiento de cultivos que se muestra en la Tabla 2.2, permitió validar únicamente los modelos de maíz, repollo, papa y frijol. Aunque las demás correlaciones no fueron validadas estadísticamente, se observa que mantienen la misma trayectoria que las correlaciones validadas. Además, existe suficiente información científica que en cierta forma valida las relaciones propuestas. Por ejemplo, Bárcena *et al.* (2020), manifiesta que el incremento de la temperatura en la parte sur de Suramérica está generando efectos positivos la agricultura que se ajusta con una relación exponencial (no lineal y heterogénea). De igual manera, Sheridan y Bicford (2011) identificaron que el exceso de CO<sub>2</sub> en condiciones adecuadas de temperatura, humedad y nutrientes incrementan el rendimiento de los

cultivos, siguiendo correlaciones positivas entre el crecimiento de las plantas y la lluvia, correlaciones negativas con la temperatura.

**Tabla 2.2.** Validación estadística de las correlaciones entre rendimiento de los cultivos y las variables climáticas

Cultivos	Clima	R <sup>2</sup>	Ecuaciones	p-valor	Validación
Maíz	Temperatura	0.51	$-0.95T^2+24.03T-149.77$	0.014	Se acepta H1
Repollo	Temperatura	0.50	$-32.2T^2+810.45T-5072.22$	0.029	Se acepta H1
Papa	Precipitación	0.45	$-0.00004e^{-5}P^2+0.12P-76.12$	0.027	Se acepta H1
Frijol voluble	Temperatura	0.43	$-1.21T^2+30.72T-194.15$	0.045	Se acepta H1
Trigo	P/T	0.43	$-0.0006(P/T)^2+0.18P/T-10.6$	0.064	Se acepta H0
Fique	Temperatura	0.38	$-0.56T^2+14.01T-86.09$	0.069	Se acepta H0
Zanahoria	Precipitación	0.20	$-0.000058P^2+0.17P-93.29$	0.367	Se acepta H0
Cebolla junca	Temperatura	0.17	$-4.85T^2+123.91T-780.50$	0.334	Se acepta H0
Mora	Precipitación	0.14	$-0.0000036P^2+0.012P-1.96$	0.428	Se acepta H0
Coliflor	P/T	0.11	$-0.0006(P/T)^2+0.13*P/T+11$	0.483	Se acepta H0

De igual manera, Vázquez et al. (2015) mediante correlaciones similares y proyecciones climáticas, identificaron que, si no se considera el efecto de la fertilización por CO<sub>2</sub>, el rendimiento de la caña de azúcar y de la papa disminuirá del 5 a 10% y del 40 a 45% respectivamente. Si se considera el efecto de la fertilización del CO<sub>2</sub>, el rendimiento de los cultivos de frijol, soya y arroz podría aumentar considerablemente. Para los cultivos de maíz, frijol y café, se espera que el rendimiento disminuya drásticamente debido a la variación de la precipitación y del incremento de la temperatura asociado al cambio climático. Lo cual a nivel territorial puede impactar negativamente en la seguridad alimentaria, el empleo y el incremento del precio de los alimentos (Lobell, Schlenker y Costa-Roberts, 2011).

Respecto a los cultivos de los modelos no validados estadísticamente, se puede afirmar que tienden a ser un poco más resistentes a la variabilidad climática que los cultivos validados, ya que, bajo las condiciones actuales del clima, no muestran alteraciones significativas que permitan validar las trayectorias de los modelos cuadráticos negativos identificados en los demás modelos.

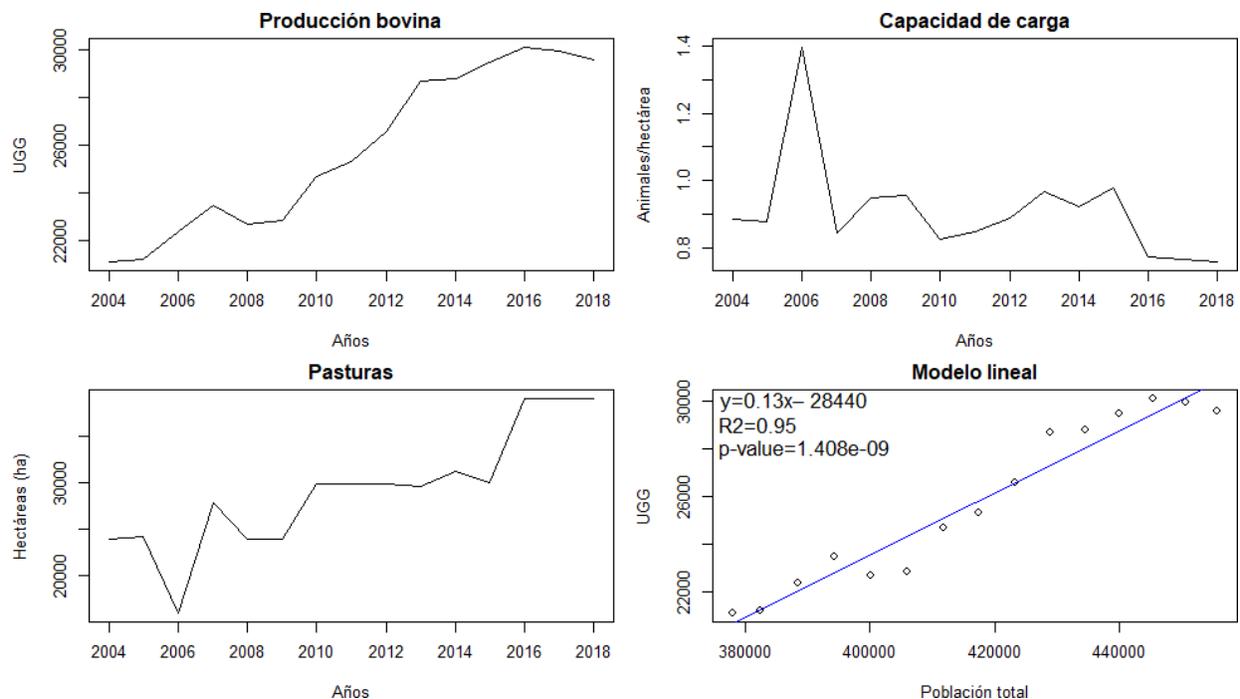
### 2.3.4.3 Influencia del clima en la producción pecuaria

En el municipio de Pasto se crían y comercializan varios tipos de ganados, entre ellos ganado vacuno, cerdos, aves de corral, peces y cuyes. Siendo el ganado bovino el que más aporta a la economía local (CEDRE, 2011), debido a que su producción se realiza con doble propósito (carne y leche) (Alcaldía de Pasto, 2014b). Según la información suministrada por la Secretaría de

Agricultura y Medio Ambiente de la Gobernación de Nariño, entre 2004-2018, la producción de ganado vacuno alcanzó 25,811 animales medidos en Unidad Gran Ganado (UGG). Sin embargo, esta producción se realiza a cielo abierto y con altos consumos de recursos naturales, lo cual incrementa su vulnerabilidad frente al cambio climático.

Al respecto, Lok (citado por Rodas-Trejo et al., 2017) considera que las principales amenazas del cambio climático para la ganadería bovina son los eventos climáticos extremos. Los cuales pueden influir en la economía y en la soberanía alimentaria local, siendo más relevantes en el periodo 2071-2100, si se consolida el escenario RCP8.5, donde la máxima temperatura de la serie es de 15.49 °C y una precipitación de 1511.07 mm (IDEAM, 2016). Sin embargo, para Henry et al. (2018) un ligero incremento de la temperatura y de la humedad puede ser adecuado para la producción de forraje.

De acuerdo con Rodas-Trejo et al. (2017) el confort animal se empieza a alterar si la temperatura sobrepasa los 26 °C, y es letal a partir de 37°C con una humedad relativa superior al 80%. Para determinar el confort animal, López et al. (2016) utiliza el Índice de Temperatura y Humedad (ITH), el cual lo aplicamos a nivel local para identificar el posible impacto del cambio climático en la producción de ganado bovino. El resultado obtenido, fue un ITH de 55.8, que se ubica en el rango de normalidad (0 - 72), lo que significa, que en las condiciones climáticas actuales no afectan la producción ganadera, pero en el futuras probablemente si lo hagan. Adicionalmente, se pudo identificar que la producción ganadera tiene una relación con el crecimiento poblacional, que se define mediante una función lineal validada con un con p-valor = 1.41e-09, como se muestra en la Figura 2.8.



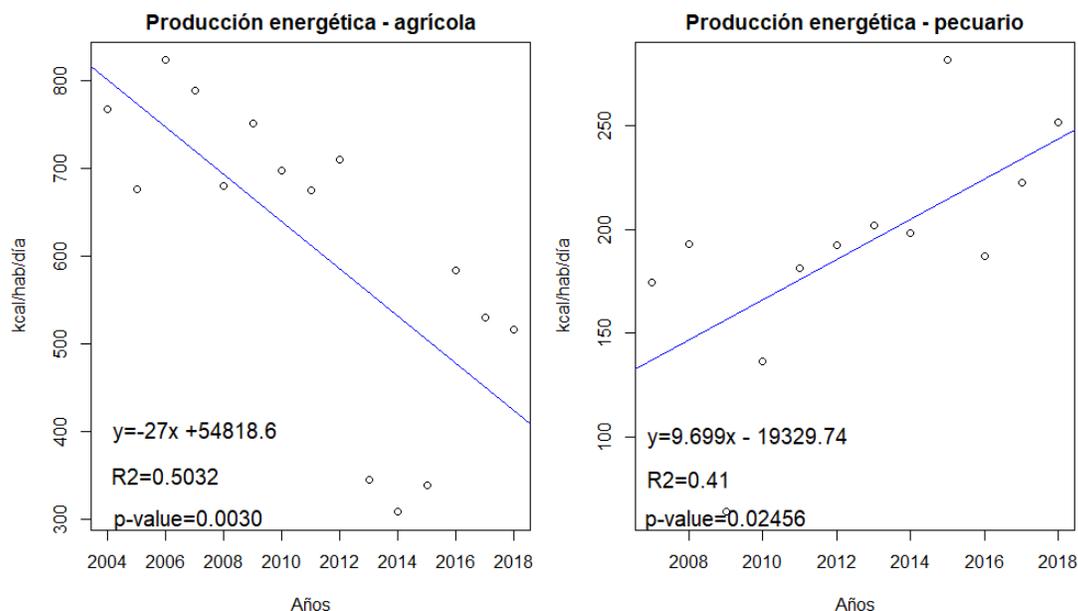
**Figura 2.8** Principales características de la producción local de ganado bovino.

Por otra parte, en Pasto la producción ganadera se realiza de manera insostenible con una capacidad de carga de 0,92 animales/hectárea, por lo que se recomienda tecnificar la producción para alcanzar una capacidad de carga no menor a 3 animales/ha, con lo que se espera garantizará la sostenibilidad social, económico y ambiental del sector (Contexto ganadero, 2015). Para aumentar la capacidad de carga existen diferentes alternativas, entre ellas se tiene el uso de sistemas silvopastoriles que, de acuerdo con López-Vigoa (2017), aumentan la producción (leche y carne) y ayudan a controlar el parasitismo del ganado, incentivando el crecimiento de la biomasa comestible, la biota edáfica (aumenta la descomposición de las bostas y reduce el parasitismo gastrointestinal en los animales), y el incremento de la fauna responsable de regular las poblaciones de garrapatas e insectos vectores.

#### 2.3.4.4 Influencia del clima en la seguridad alimentaria

La seguridad alimentaria local depende de la producción agropecuaria y de la importación de alimentos. Entre la producción agrícola y ganadera, en el municipio de Pasto se produce 150,320 ton/año, de las cuales el 75.18% corresponde al sector agrícola y el 24.82% al sector ganadero. Sin embargo, se observa que la producción agrícola se está desestimulando y, por lo tanto, la energía

alimentaria proveniente de este sector también se reduce siguiendo una función lineal negativa. Por otro lado, la producción energética proveniente del sector ganadero muestra una tendencia creciente modelada con una función lineal positiva, asociada con el crecimiento de la población (Figura 2.9).



**Figura 2.9** Energética alimentaria local deriva de la producción agrícola y ganadera.

En términos energéticos, esta producción representa una oferta de 767.52 kcal/hab/día (30,3% de la energía alimentaria requerida por una persona), mientras que el requerimiento per cápita de una persona promedio se calcula en 2500 kcal/hab/día. Es decir que hay un déficit energético de 1,732.48 kcal/hab/día (69.7%), el cual es cubierto con importaciones provenientes del nivel regional, nacional e internacional.

Sin embargo, la seguridad alimentaria, de acuerdo con Bianchi y Szpak (2016), no solo depende de la disponibilidad de alimentos (producción local o por la importación), sino también del acceso (forma de adquirir los alimentos), el modo de uso, las formas de conservación, y la existencia permanente de alimentos. De estos factores, la producción agrícola local es quizá la más sensible, debido al desestímulo del sector agropecuario, relacionado con la falta del apoyo gubernamental y al incremento continuo de las importaciones. Por ejemplo, en enero de 2021 se importaron 9,848 tn de leche en polvo (Forbes Staff, 2021), lo que afectó la economía nacional y los procesos de recuperación económica que se establecieron por la enfermedad de Covid-19.

A nivel nacional, las importaciones crecieron el 107% entre 2000 y 2015, lo que equivale al 30% de los alimentos que consumen los colombianos (Economía, 2016). Si bien las importaciones facilitan a las poblaciones más pobres el acceso a los alimentos, también desestimula al sector agrícola y genera nuevas dinámicas económicas como el desempleo, la pobreza y los procesos migratorios. Lo que conlleva a la vulnerabilidad de la soberanía alimentaria, que según Micarelli (2018), es el derecho de las comunidades a decidir su sistema alimentario, no solo en cuanto a disponibilidad y acceso, sino en quién y cómo se produce. De ahí que la producción de alimentos no solo depende de las condiciones climáticas, sino también de los aspectos económicos y sociales, como las políticas agrarias, los tratados de libre comercio y otros que en general inciden en la producción alimentaria local.

Por otra parte, el impacto climático es una amenaza global, por lo que promover la importación de alimentos genera dependencia del sistema local a otros sistemas, los cuales, según el IPCC (2021) no están exentos de este fenómeno. De ahí que una reducción significativa de la producción alimentaria a nivel global cambiaría drásticamente la dinámica del sistema urbano. Lo cual requiere de forma urgente, el fortalecimiento de los procesos locales de seguridad y soberanía alimentaria, para generar resiliencia frente a los peligros del cambio climático.

#### **2.3.4.5 Influencia del clima en los riesgos de desastres**

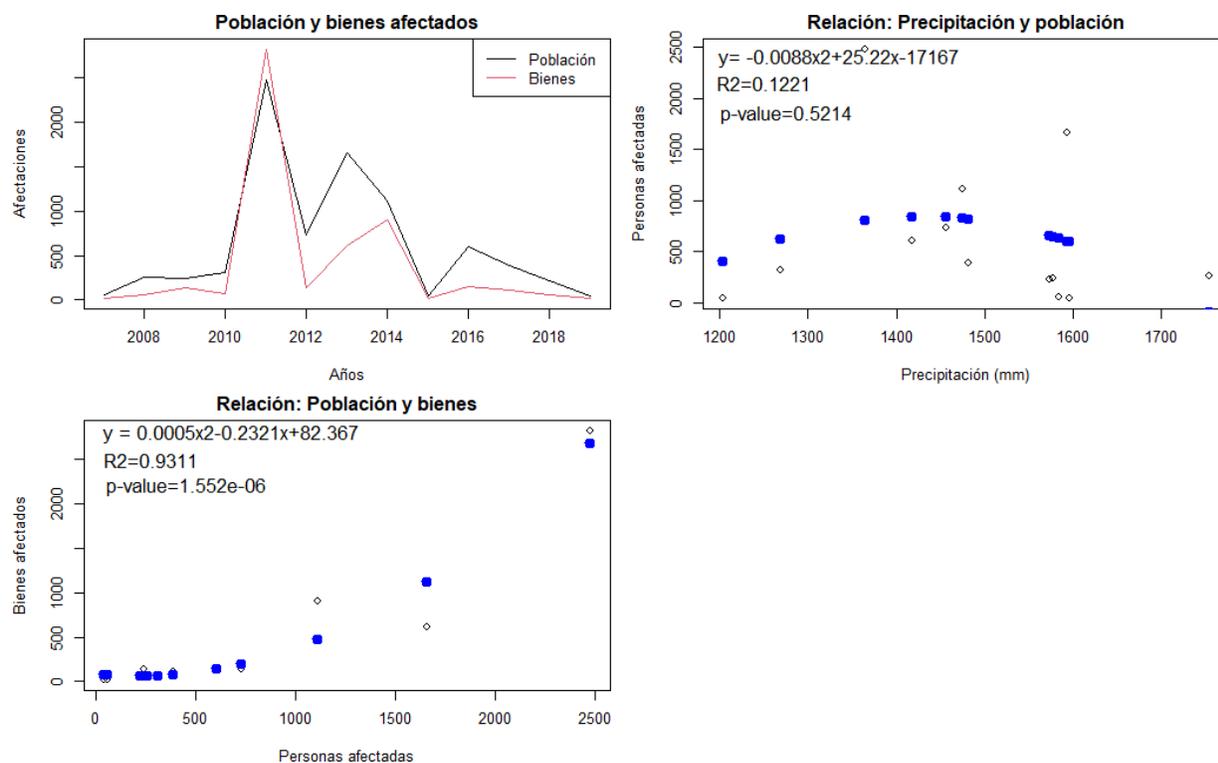
La variabilidad y el cambio climático incrementa los riesgos de desastres naturales, los cuales según Quesada-Román et al. (2021), son cada vez más frecuentes y sus impactos más severos en países con economías en desarrollo y con patrimonio urbano. A nivel local, se identifican los eventos de inundaciones, deslizamientos de tierra e incendios forestales como los riesgos de desastres asociados al clima, de los cuales la DGRD reporta el número de personas y bienes afectados, y las ayudas entregadas en forma de remesas, subsidios de arrendamientos, colchones, frazadas (los costos de arrendamientos son los únicos que económicamente se reportan). Los datos existentes datan de 2004 para deslizamientos de tierra, 2007 para inundaciones, 2015 para incendios forestales, y recientemente en 2018 para vendavales, por lo que respecto a estos últimos eventos aún no es posible inferir su evolución.

### **2.3.4.5.1 Efecto del clima en las inundaciones**

De acuerdo con Corponariño (2011), las inundaciones que se presentaron en el departamento entre 2010 y 2011 se asociaron tanto al fenómeno de la Niña, como a las acciones antrópicas de invasión de cauces con construcciones legales e ilegales, así como a la falta de mantenimiento de la infraestructura de saneamiento. A nivel local, este fenómeno ocasionó el mayor desastre de los que se tiene registro, debido al desbordamiento de la quebrada Guachucal al sur de la ciudad, que afectó la plaza de mercado Potrerillo y a 17 barrios aledaños, mientras que, en el sector rural, el desbordamiento de la Laguna la Cocha afectó a más de 250 familias, que obligó a declarar la emergencia invernal para atender este desastre (El Tiempo, 2011).

Según la DGRD el mayor impacto se produjo en los meses de febrero, abril, julio y octubre, con una precipitación media de 211.5 mm/mes, que dejó 2,479 personas y 2,823 propiedades afectadas. Pero desde 2015 estos impactos empezaron a disminuir, y corresponden a una media de afectación de 259 personas y 70 bienes afectadas pese a que la precipitación anual se mantiene relativamente estable (, excepto en diciembre de 2019 donde IDEAM (2020) reporto una fuerte precipitación de 218.5mm/mes, que de acuerdo con los datos de la DGRD no se presentó ningún tipo de afectación.

Esta disminución en el número de eventos de inundaciones se puede asociar a la construcción de 16 kilómetros de alcantarillado y a 41 km rehabilitados entre 2016 y 2018 (Empopasto, 2018), lo cual explica el cambio de la tendencia exponencial de la población afectada, por una tendencia parabólica negativa, respecto a la precipitación. Mientras que la relación entre población y bienes afectados sigue una tendencia parabólica positiva como se muestra en la Figura 2.10.



**Figura 2.10** Características de los eventos de inundaciones.

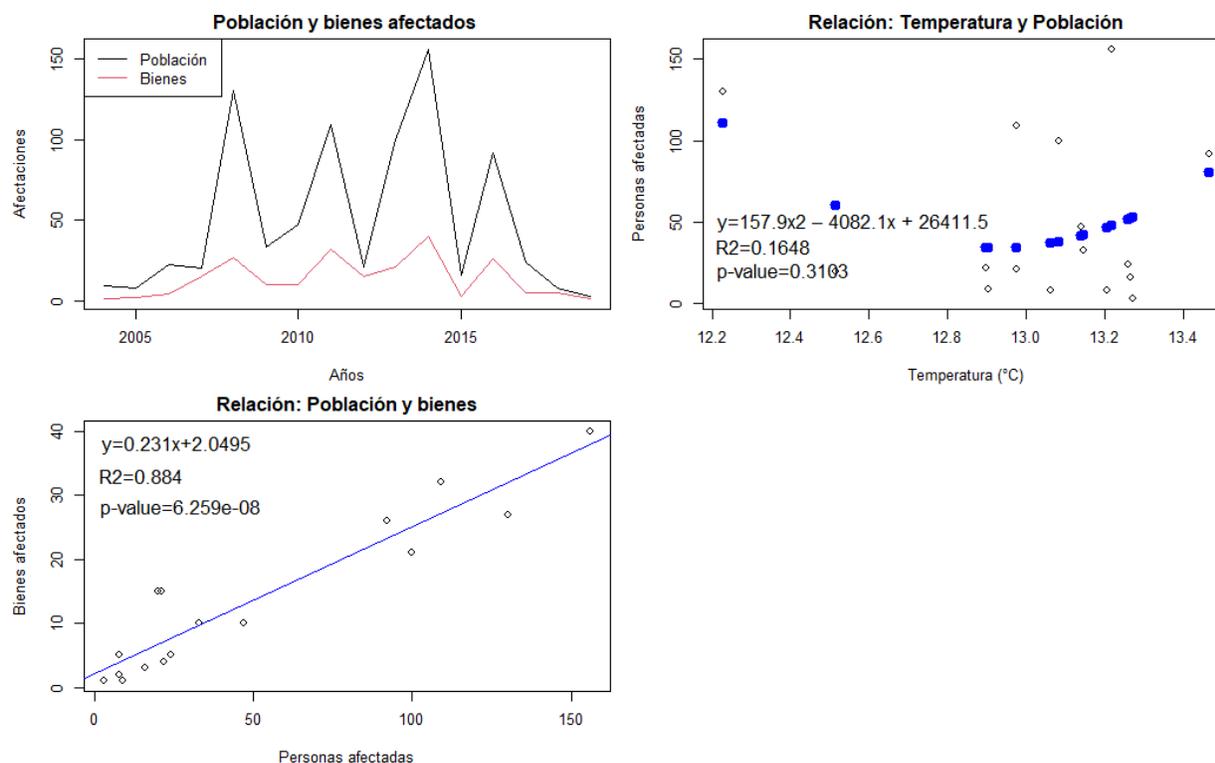
La prueba con el estadístico F no permitió validar la función parabólica entre precipitación y población afectada ya que los p-valor son mayores a 0.05. Esto se puede explicar porque las inundaciones a nivel local no solo se producen por la presencia de lluvias intensas, sino también por la disposición de los residuos sólidos en lugares inadecuados, como calles o en las fuentes hídricas que obstruyen el flujo del agua, causando desbordamientos e inundaciones (Diario del Sur, 2019; Molina-Prieto, 2016). Sin embargo, se identificó una relación exponencial entre bienes y población afectada que se validó estadísticamente (p-valor de 1.552e-06).

#### 2.3.4.5.2 Efecto del clima en los deslizamientos de tierra

Según los datos de la DGRD, los deslizamientos de tierra son recurrentes en todos los años, pero con mayor intensidad ocurrieron en el año 2010 en presencia del fenómeno de La Niña, y en los años 2014 a 2016 bajo la influencia del fenómeno de El Niño. El 2014 fue el año con mayor número de deslizamientos que dejaron 40 personas y más de 150 bienes afectados, que de acuerdo con Alcaldía de Pasto (2014c) ocurren principalmente en la zona urbana. En Colombia estos eventos son frecuentes en las grandes ciudades debido a su ubicación en zonas montañosas que

además de los riesgos, ofrecen condiciones para el desarrollo de la vida y la economía (Mergili et al., 2015).

Sin embargo, los deslizamientos de tierra ocurren por múltiples causas. A nivel local, la Alcaldía de Pasto (2014c), identificó la alteración del régimen de aguas subterráneas, el relieve montañoso (pendientes mayores a 45°) y los desniveles topográficos mayores a 2000 m como las principales causas. A nivel nacional, Mergili *et al.* (2015) los relaciona con el clima tropical húmedo, al fenómeno de la Niña y a la actividad de volcanes glaciados. Para Guzmán (2018), el cambio de temperatura y la variación de la presión de agua en el suelo, reduce la resistencia al corte y produce el movimiento de tierra. De ahí que los deslizamientos de tierra tengan mayor relación con la temperatura que con la precipitación, aunque es importante resaltar que en este periodo la temperatura y la precipitación se han incrementado respecto al periodo de referencia. Por lo tanto, la relación entre el número de personas afectadas por deslizamiento y la temperatura se explica mediante una función parabólica positiva. Donde el vértice de la parábola muestra el menor impacto en la población, pero aumenta exponencialmente si el clima empeora. Mientras que la relación entre población y bienes afectados sigue una función lineal creciente (Figura 2.11).

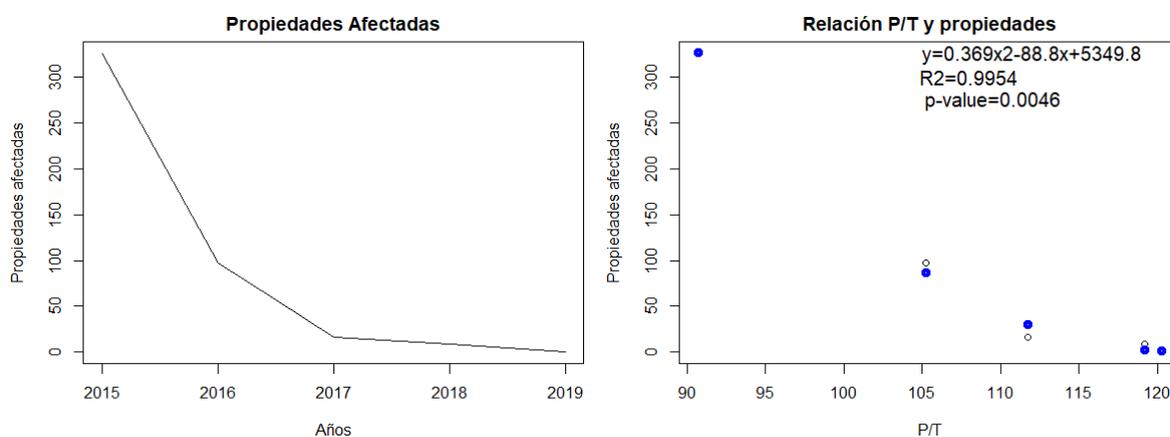


**Figura 2.11** Características de los eventos de deslizamientos de tierra.

El estadístico F permitió validar el modelo lineal positivo (p-valor de 6.259e-08), pero no el modelo cuadrático positivo entre temperatura y población afectada (p-valor es de 0.3103), esto se puede explicar al periodo de retraso entre el inicio de las lluvias y la ocurrencia del deslizamiento, que según Martínez, Corrales y Sánchez (2010) es el tiempo requerido para que el suelo se sature, lo cual depende de las condiciones naturales de las montañas. Por otra parte, los registros de los últimos años muestran una leve reducción de población y bienes afectados por estos eventos, debido posiblemente a la identificación de zonas de riesgo en el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) 2015-2027, aunque las medidas aplicadas aún no muestran un cambio favorable en la tendencia actual.

### 2.3.4.5.3 Efecto del clima en los incendios forestales

En cuanto a incendios forestales, en el año 2015 bajo la influencia del fenómeno del Niño se produjo el mayor número de incendios forestales de la historia del municipio de Pasto, que dejó una afectación de 326 predios lo que motivo a la DGRG a iniciar su registro, que actualmente se tiene una media de 90 predios afectados por año. Pese a la escasa disponibilidad de información, se identificó una trayectoria definida por una función cuadrática positiva acotada a la derecha para valores menores de 120.53 de P/T que se validó estadísticamente. Esto muestra que los incendios forestales se incrementan si la temperatura aumenta y la humedad disminuye (Figura 2.12), es decir, que las condiciones de estrés vegetal y los riesgos de incendios forestales, depende de la relación entre la temperatura máxima y la menor humedad (Farfán et al, 2021), similar a lo que ocurre con los ciclos ENOS.



**Figura 2.12** Características de los eventos de incendios forestales.

A nivel local, la causa del 99% de los incendios forestales que se producen en el departamento de Nariño son causados por la quema de residuos de cosechas que se asocian a las practicas tradiciones (se realizan con la creencia que mejorar la producción del suelo), muchas veces se salen de control y producen los grandes incendios (Alcaldía de Pasto, 2014c; CNC Noticias Pasto, 2019). Por lo tanto, se puede inferir que la relación P/T no es responsable directa de la ocurrencia de los incendios forestales, pero si es un elemento adicional que los favorece, especialmente cuando la precipitación baja y la temperatura aumenta, como ocurrió en el incendio forestal antrópico de 2015, que afecto a más de 300 bienes.

#### **2.3.4.6 Influencia del clima en la salud humana**

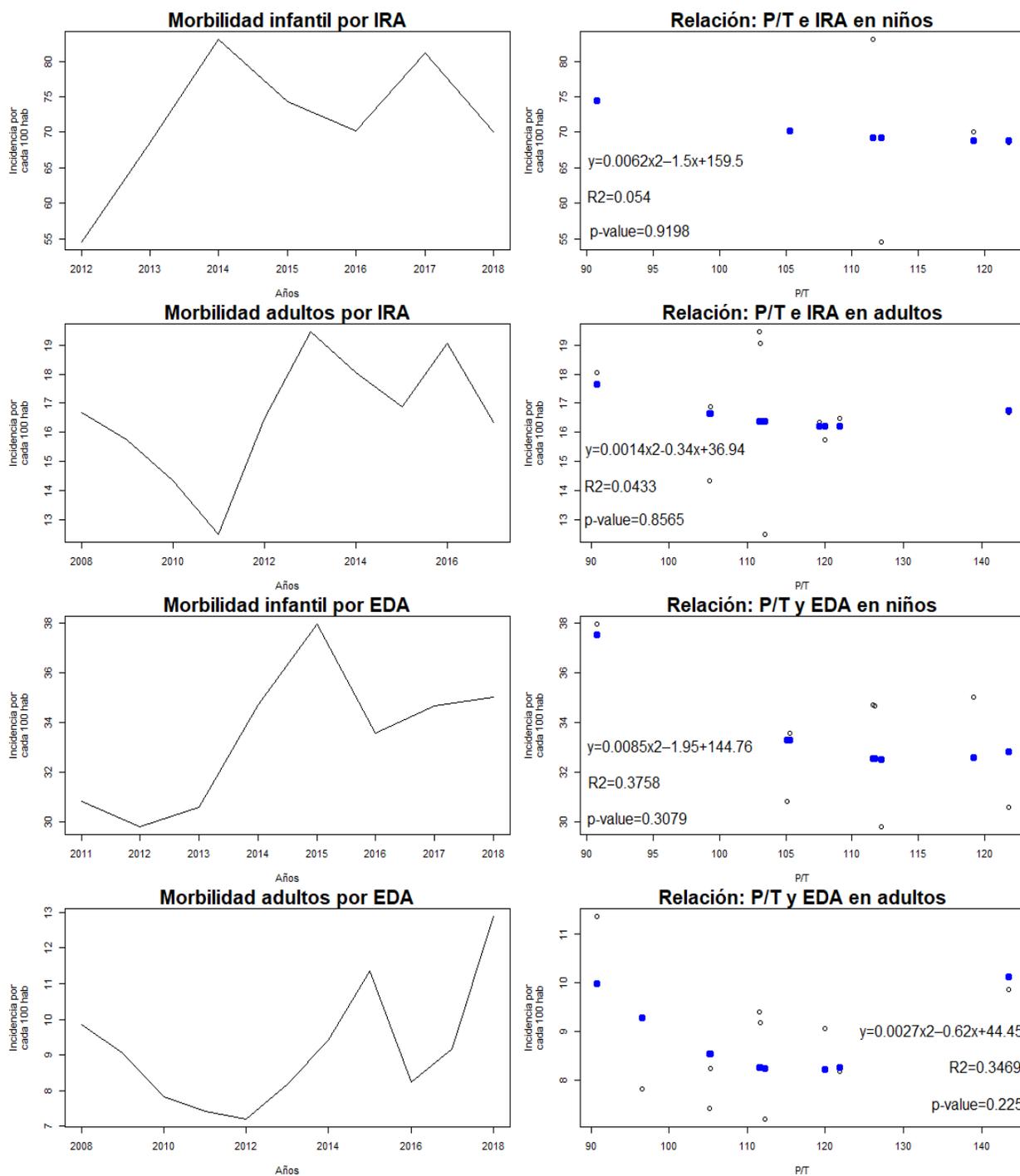
De acuerdo con la WHO (2018a) los impactos del cambio climático en la salud humana son directos e indirectos. Entre los impactos directos están los efectos psicológicos, el incremento de enfermedades no transmisibles como las enfermedades respiratorias, cardiovasculares, heridas e incluso la muerte, las dos últimas asociadas con sequías, inundaciones, olas de calor, tormentas e incendios forestales, y en los impactos indirectos están la seguridad alimentaria, la disponibilidad de agua para consumo humano y en la propagación de enfermedades infecciosas, esta última asociada al desplazamiento poblacional y al reducido acceso a los servicios de salud de los más pobres.

Desde 2017, el Boletín de Clima y Salud publica mensualmente alertas sobre la evolución de la incidencia de las enfermedades de salud pública que se incrementan a nivel nacional por efectos del cambio climático. Entre las enfermedades están las transmitidas por vectores, las zoonóticas, las infecciones respiratorias agudas (IRA), las diarreicas agudas (EDA), los golpes de calor y la exposición a la radiación solar (Ministerio de Salud et al., 2020). A nivel local, el IDSN (2020) no registra la prevalencia de enfermedades producidas directamente por el clima. Por lo tanto, se hizo una comparación con las enfermedades registradas en los Eventos de Notificación Obligatoria en Salud del municipio de Pasto con los informes del Boletín Clima y Salud, lo cual permitió identificar algunas relaciones del clima con las enfermedades EDA e IRA para menores de 5 años y para el resto de la población (población adulta). En este sentido, Mehdi *et al.* (2016) afirman que los menores de cinco años son los más vulnerables debido a que su metabolismo no se adapta fácilmente al estrés producido por la variación de la temperatura, la precipitación, la humedad relativa y la contaminación del aire, como si lo hacen los adultos.

Respecto a la IRA, D'Amato *et al.* (2016) manifiestan que la alteración del clima produce enfermedades respiratorias alérgicas y pulmonares obstructivas que disminuyen la función pulmonar y pueden producir la muerte, que de acuerdo con Mehdi *et al.* (2016), se incrementa aún más con los cambios meteorológicos extremos, como olas de calor, inundaciones, tormentas, sequías e incendios forestales. Por su parte, Ebi *et al.* (2018) and Santos *et al.* (2021) afirman que el calor también incrementa la mortalidad por desnutrición.

Generalmente la incidencia de EDA, aumentan después de fuertes lluvias o inundaciones (Levy *et al.*, 2016), debido a el agua se agita y los patógenos fecales se dispersan, permitiendo que entren en contacto con los humanos, afectando especial a la población infantil que es la más vulnerable (Wu *et al.*, 2015). De igual manera, Rodríguez-Pacheco *et al.* (2019), manifiestan que las altas temperaturas y las sequías aumentan su incidencia. Además, el abastecimiento de agua insalubre, y el inadecuado saneamiento son responsables del 88% de los casos de EDA (Escalona *et al.*, 2018).

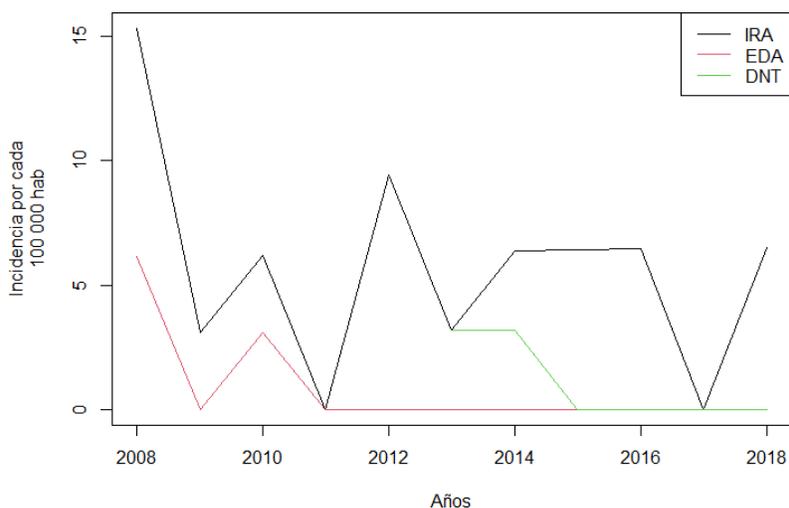
En concordancia con lo anterior y con la información disponible a nivel local, se identificó que los impactos de la variabilidad climática en la incidencia de las enfermedades relacionadas con EDA e IRA siguen trayectorias marcadas por funciones cuadráticas positivas respecto a la variable P/T, que muestran posible evolución de la incidencia de dichas enfermedades, tanto por el aumento o disminución de las variables de temperatura y precipitación. Donde el vértice de la parábola representa el menor impacto del clima en la salud humana cuando las condiciones climáticas son las más adecuadas, mientras que la concavidad representa el impacto exponencial que aumenta si el climáticas se vuelven progresivamente más adverso (clima más seco y cálido o más húmedo y frío), como se muestra en la Figura 2.13



**Figura 2.13** Incidencia del clima en la morbilidad por IRA y EDA. En el lado derecho de la figura se muestra las series de tiempo de la incidencia de las IRA y ERA en niños menores de 5 años y el resto de la población, mientras que en el lado derecho se muestra las correlaciones del clima con las respectivas incidencias.

En cuanto a la modelación matemática, los modelos construidos a nivel local mostraron tendencias poco definidas que no lograron superar la prueba del estadístico F. Esto se debe a que existen otros factores, entre ellos las condiciones económicas y la atención en salud, que inciden en su evolución. Pero aparte de lo anterior es posible inferir que las condiciones actuales del clima aún no representan un fuerte impacto en la incidencia de estas enfermedades, por lo que estadísticamente estas relaciones no son significativas. Sin embargo, las trayectorias identificadas permiten predecir cuál será su comportamiento en la medida que el cambio climático se agudice.

En cuanto a la desnutrición infantil (DNT), muchos autores como Mehdi *et al.* (2016), relacionan al cambio climático como precursor de esta enfermedad. Pese a ello, con los registros locales que datan de 2016, no se identificó ninguna tendencia respecto a las variables climáticas. No obstante, Hodson de Jaramillo *et al.* (2017), relacionan esta enfermedad con las condiciones de pobreza de la población. Al igual que Forero *et al.* (2014) y Elum *et al.* (2017), quienes coinciden en señalar a la pobreza como la principal responsable de este flagelo. Pese a lo anterior, a nivel local resulta alentador saber que en los últimos años la incidencia de la mortalidad por EDA y DNT se haya reducido a cero, excepto por las IRA, que aún se mantienen relativamente constantes (Figura 2.14). Por lo tanto, la reducción en los índices de EDA y DNT se pueden relacionar con los avances y la buena gestión del sistema de salud del municipio de Pasto, el cual ha sido considerado en varias ocasiones como uno de los mejores de Colombia (Salud, 2016). Sin embargo, la IRA sigue siendo la enfermedad más sensible a la variabilidad de clima, dado a que su mecanismo de transmisión es el aire.



**Figura 2.14** Incidencia de mortalidad infantil por IRA, EDA y DNT.

Por otro lado, a nivel local los trastornos de salud relacionados con enfermedades mentales, cardiovasculares, afecciones de la piel por exposición prolongada a la radiación solar ultravioleta, y las transmitidas por insectos, no se registran como trastornos relacionados con el clima, debido a que no existen informes de eventos climáticos extremos, como olas de calor por ejemplo, que se puedan asociar con las patologías anteriormente mencionadas, algo que si ocurre en otros lugares (por ejemplo, en Estados Unidos, donde mueren más personas por calor que por los demás desastres naturales juntos (Cheng et al., 2021; Goshua et al., 2021)).

## 2.4 CONCLUSIONES

Con base en los registros del clima, se pudo evidenciar que, a causa del incremento global de los GEI producidos por la actividad humana, la temperatura y la precipitación locales en el periodo climático de evidencias se han incrementado respecto al periodo climático de referencia. Sin embargo, por falta de datos en la serie del periodo climático de evidencias, no es posible confirmar que el clima local haya cambiado. No obstante, se identificó cómo la variabilidad anual del clima genera ciertas alteraciones sobre los elementos urbanos impactados, las cuales se pueden agudizar en la medida en que el cambio climático evolucione.

La variabilidad climática en el contexto local tiene la capacidad de generar cambios significativos en los elementos que conforman el sistema urbano y, por lo tanto, en la calidad de vida de la población y de los procesos productivos que ahí se desarrollan, en especial la producción agrícola, derivada en parte por la reducción del rendimiento de varios cultivos. Sin embargo, la importación de alimentos y el desestimulo de la producción local, parece ser la principal causa. Por otra parte, se observan efectos positivos en el rendimiento de algunos cultivos tradicionales como la papa, y la adaptación de nuevos productos como el café. Sin embargo, el balance final es negativo, ya que además de la producción puede traer repercusiones importantes en el precio de los productos y, especialmente en la seguridad alimentaria y el crecimiento económico local.

La producción pecuaria presenta un crecimiento continuo sin evidencias significativas asociadas a la variabilidad climática, especialmente en lo que tiene que ver con el confort animal. Sin embargo, esta forma de producir es insostenible, debido a su baja capacidad de carga animal, que en el futuro puede representar un riesgo para el crecimiento de este sector, además de los procesos de importación.

Existen avances significativos en la gestión del riesgo, en particular en el control de inundaciones, por lo que en los últimos años los registros de afectaciones han disminuido significativamente, al punto de invertir la tendencia. De igual manera, los deslizamientos de tierra también están disminuyendo de forma importante, aunque estadísticamente aún continúan con una tendencia creciente. Sin embargo, estos eventos están estrechamente ligados con los eventos climáticos extremos que genera el cambio climático, además, de las condiciones de pobreza y del crecimiento población, que empuja a las personas más vulnerables a ocupar zonas de riesgo, que en el futuro puede desestabilizar los avances logrados y afectar significativamente las finanzas del municipio de Pasto.

En cuanto a la salud pública, las EDA e IRA son las enfermedades más sensibles en reaccionar a los efectos del cambio climático. Aunque estadísticamente los modelos no fueron validados, se identificaron posibles tendencias que muestran la relación de la variabilidad climática con la incidencia de estas enfermedades. En parte esto demuestra que los efectos del cambio climático en la salud de las personas aún no son significativos, lo que evidencia la capacidad de adaptación de las personas.

A pesar de que no todos los modelos estadísticamente fueron validados, todos ellos generan tendencias coherentes con la evolución de los elementos urbanos respecto al clima. Por ejemplo, los modelos cuadráticos negativos del sector agrícola alcanzan el máximo rendimiento bajo condiciones climáticas adecuadas (similares a las actuales), y en la medida que las condiciones climáticas empeoran el rendimiento disminuye. Mientras que los modelos cuadráticos positivos de salud pública muestran el menor número de personas enfermas cuando las condiciones climáticas son las mejores, y en la medida que las condiciones del clima empeora, el número de personas afectadas se incrementa.

El método correlacional fue útil para identificar modelos matemáticos que muestran la alternación que sufren los elementos urbanos por la variabilidad del clima actual, por lo que a partir de estos modelos es posible predecir los riesgos a los cuales estarán expuestos los elementos urbanos en el marco del cambio climático. Sin embargo, estos modelos predictivos están sujetos a fuertes incertidumbres asociados a las proyecciones climáticas y a los cambios de tendencias según evolucionen las políticas globales del clima, así como la gestión que realicen los próximos gobiernos locales sobre el sistema urbano.

## CAPÍTULO III

### APROXIMACIÓN BAYESIANA PARA PREDECIR LOS RIESGOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL MUNICIPIO DE PASTO

#### **Resumen**

De mantenerse la tendencia actual en las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) a nivel global, es probable que a nivel local los riesgos urbanos relacionados con los deslizamientos, inundaciones, incendios forestales, producción de alimentos, salud y disponibilidad de agua se incrementen. Sin embargo, la alta incertidumbre asociada con los escenarios del cambio climático dificulta predecir con altos niveles de confianza, la evolución de dichos riesgos, debido a su naturaleza estocástica y localizada. Por lo tanto, el enfoque de Redes Bayesianas (RB), permitirá realizar una mejor aproximación a la evolución de los riesgos urbanos en corto, mediano y largo plazo. En este sentido, construimos una red bayesiana, en la que se incorporan los modelos correlacionales identificados en el capítulo anterior como creencias, y los escenarios locales de las trayectorias de concentración representativa (RCP) establecidos por el IDEAM como evidencia. A partir de estos insumos, se predicen los riesgos urbanos locales. Los resultados muestran riesgos significativos en el rendimiento de los cultivos, la seguridad alimentaria, la disponibilidad de agua y los desastres, pero ningún riesgo significativo en la incidencia de las enfermedades diarreicas agudas (EDA) e infecciones respiratorias agudas (IRA). No obstante, se esperan resultados positivos en la producción ganadera asociados principalmente con el crecimiento de la población. Este enfoque permite actualizar las creencias y obtener las probabilidades de ocurrencia de los eventos con información limitada.

**Palabras claves:** redes bayesianas, modelos correlacionales, cambio climático, escenarios de trayectorias de concentración representativas, riesgos urbanos.

#### **Abstract:**

If the current trend in global greenhouse gas (GHG) emissions continue, it is likely that urban risks related to landslides, floods, forest fires, food production, health and water availability will increase at the local level. However, the high uncertainty associated with climate change scenarios makes it difficult to predict with high confidence the evolution of these risks, due to their stochastic and localized nature. Therefore, we consider that the application of the Bayesian

Networks (BR) approach will allow a better approximation of the evolution of urban risks in the short, medium, and long term. In this sense, we build a Bayesian network, incorporating the correlational models identified in the previous chapter as evidence, and the local scenarios of the representative concentration trajectories (RCP) established by the IDEAM as a belief. From which we predict local urban risks. The results show significant risks in crop yields, food security, water availability and disaster risks, but no significant risk in the incidence of acute diarrheal diseases (ADEs) and acute respiratory infections (ARIs). However, we expect positive results in livestock production associated with population growth. This approach allows updating beliefs and obtaining probabilities of occurrence of events with limited information.

**Keywords:** bayesian networks, correlation models, climate change, representative concentration path scenarios, urban risks.

### 3.1 INTRODUCCIÓN

El cambio climático, es quizá la principal amenaza para la humanidad y predecir su evolución es su gran desafío. En especial porque el clima es un sistema físico complejo, caótico y con ciclos de retroalimentación no lineales que actúan en diferentes escalas de tiempo (Aven y Renn, 2015). Por lo tanto, para predicción el clima con mayor precisión considerando los impulsores antropogénicos, se han desarrollado varios tipos de escenarios futuros con diferentes niveles de emisiones de GEI (desde muy bajos, hasta muy altos). Entre estos escenarios se encuentran los escenarios A1B, A1FI, A1T, A2, B1 y B2 (IPCC, 2007), los escenarios RCP con forzamiento radiativo de 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5 (IPCC,2013) y, recientemente los escenarios de vías socioeconómicas compartidas (SSP, siglas en inglés) con forzamiento radiativo de 1-1.9, 1-2.6, 2-4.5, 3-7.0 y 5-8.5, que adicionalmente consideran los cambios de uso de la tierra y los contaminantes del aire, pero a menor escala regional que los escenarios anteriores (IPCC, 2021).

Evaluar los riesgos del cambio climático a nivel territorial es una tarea desafiante, debido a la alta incertidumbre en el comportamiento del clima. Por esto se han propuesto diferentes metodologías para aproximar su evolución y sus impactos, por ejemplo, la evaluación de los riesgos de inundación en las ciudades se ha abordado mediante técnicas como redes neuronales, matemáticas difusas y la teoría de la evidencia, que se basan en el conocimiento o experiencia para determinar el peso de los factores, así como simulaciones numéricas, modelos hidrológicos e

hidrodinámicos los cuales requieren varios tipos de datos que limitan su capacidad (Wu et al., 2019).

En este sentido, las RB tienen una gran ventaja, ya que permiten integrar en sus nodos información cualitativa y cuantitativa que procede del conocimiento aprendido de los datos reales, a partir de los cuales predicen y razonan (Couasnon et al., 2018). Las RB incorporan tecnologías de inteligencia artificial (razonamiento causal y probabilístico) para modelar y tomar decisiones en situaciones inciertas y complejas del mundo real (Nyberg et al., 2021).

No obstante, las relaciones causa-efecto de las RB se representa con grafos acíclicos formados por nodos y arcos, los cuales se articulan con la teoría de probabilidad para generar respuestas a los problemas planteados (Wu et al., 2018), es decir, predicen las variables no observadas a partir de las variables observadas, según la relación de dependencia y causalidad establecida (Molina et al., 2018). Por lo tanto, la distribución de probabilidad *a priori* de las variables observadas actualiza la información subjetiva de la distribución de probabilidad *a posteriori* de las variables no observadas, siguiendo una estructura acíclica (Dávila et al., 2016).

En cuanto al esquema, las RB constan de dos partes una cualitativa y otra cuantitativa (García, 2014), conocidas también como estructura y parámetros. La estructural define las relaciones de dependencia e independencia entre las variables, mientras que los parámetros definen las probabilidades (Nyberg et al., 2021; Molina et al., 2018). Lo anterior convirtió a las RB en herramienta eficaz para el modelado de variables continuas y discretas, según las relaciones de dependencia condicional definidas entre los nodos (Yuan et al., 2015). Por lo tanto, su aplicación se ha extendido en las áreas de economía, psicología, ciencias sociales y biológicas, que a la vez han promovido el desarrollo de softwares especializados en RB como Hugin, GeNie, Netica, AgenaRisk y BayesiaLab, entre otros (Nyberg et al., 2021).

En este sentido, las RB bayesianas son utilizadas para predecir, clasificar, diagnosticar y tomar decisiones (Simões *et al.*, 2015; Paulino y Huayna, 2019). Particularmente en las ciencias ambientales se tiene varias aplicaciones, como: i) compensar caudales entre el uso agrícola del agua y los caudales ecológicos (Jie, et al., 2018), ii) predecir la probabilidad de los impactos de las piedras en las canteras (Han, et al., 2020), iii) evaluar la oferta y demanda de los servicios ecosistémicos de agua dulce en el marco del cambio climático y de las intervenciones humanas (Pham et al., 2021), iv) evaluar la probabilidad de la sensibilidad climática de la tierra y de las medidas de mitigación futuras del cambio climático (Goodwin y Cael, 2021), v) identificar

sinergias y nexos entre alimentos, energía y agua (An et al., 2021), vi) reconstruir las precipitaciones (Chandra et al., 2021), entre otras.

Las RB también se pueden combinar con otras metodologías. Por ejemplo, El-Awady y Ponnambalam (2021), integraron las RB con simulaciones de cadena de Markov en el análisis de fallas de sistemas complejos, tales como el cambio climático, las nuevas tecnologías y los usos que requieren medidas de incertidumbre probabilísticas multidisciplinarias. Por su parte, Wu et al. (2019) utilizaron RB y sistemas de información geográfica (SIG) para evaluar los riesgos de las inundaciones urbanas y diagnosticar sus causas. Naderpour et al. (2020), combinaron RB con la lógica difusa y los SIG para estimar las probabilidades de incendios forestales. Mientras que Nyber et al (2021), propusieron una técnica para construir RB a partir de un proceso social estilo Delphi.

Por lo tanto, en esta investigación utilizamos el método de redes bayesianas para construir un modelo estocástico que predice los riesgos de los eventos asociados al cambio climático sobre los elementos urbanos del municipio de Pasto (ciudad intermedia y Andino de Colombia), de acuerdo con los escenarios RCP en los periodos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100, respecto al periodo de referencia 1976-2005. Los escenarios RCP son adecuados en este contexto, ya que se dispone de proyecciones locales de temperatura y precipitación para el periodo de referencia.

El documento describe los aspectos relevantes del modelo RB urbano aplicado al caso de estudio del municipio de Pasto, mostrando los principales resultados sobre disponibilidad de agua, producción agropecuaria, seguridad alimentaria, enfermedades transmitidas por el aire, y riesgos de desastres (inundaciones, incendios y deslizamientos de tierra).

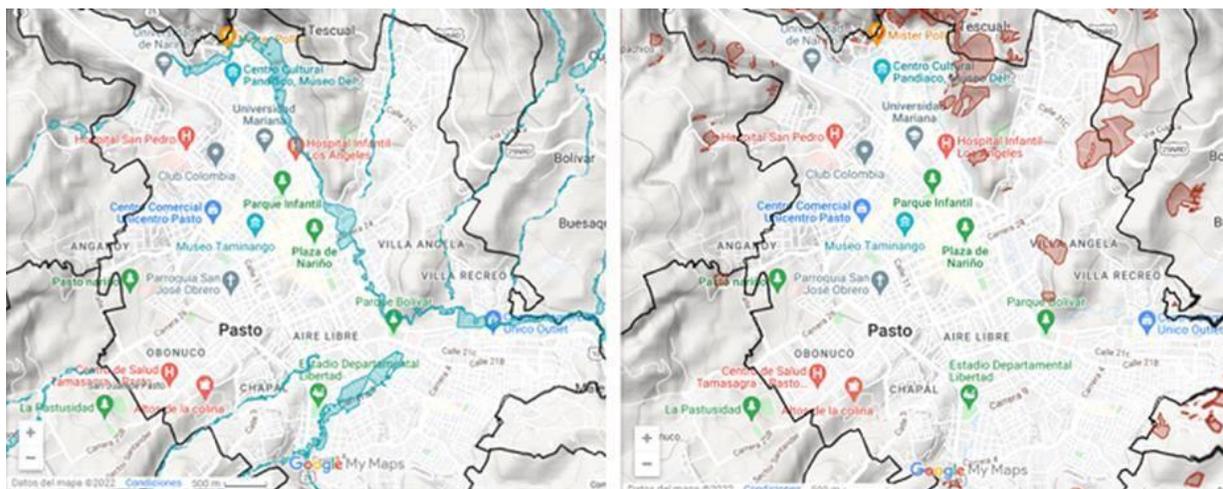
## **3.2 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **3.2.1 Caso de estudio**

El municipio de Pasto está ubicado entre las coordenadas 1°12'0"N y 77° 16'0"W, a más de 2500 metros sobre el nivel del mar, al sureste de Colombia en el departamento de Nariño, y a 83 km de la frontera con la República del Ecuador. Pasto se asienta sobre el nodo de los Pastos de la Cordillera de los Andes conformado por cadena montañosa con pendientes mayores a 45° (Alcaldía de Pasto, 2014a). Su clima es muy frío, húmedo y semihúmedo (IDEAM, s.f.), y cuenta con una población de 460,454 habitantes, de los cuales el 86% habita en el área urbana (DANE, 2019). Además, cuenta con una gran diversidad de ecosistemas debido a su ubicación sobre las

provincias de Amazonas y Norandina, donde nacen las cuencas de los ríos Pasto (afluente de la cuenca del Pacífico) y Guamúez (afluente de la cuenca del Amazonas), que según los datos del IDEAM (2020), su oferta hídrica es de 3,12 m<sup>3</sup>/s y 8,74 m<sup>3</sup>/s respectivamente.

En el marco del cambio climático, la ubicación geográfica y algunas costumbres, tradicionales como la quema de residuos de cosecha, son responsables del incremento de los riesgos de desastres relacionados con inundaciones y deslizamientos de tierra especialmente en la zona urbana (Figura 3.1), así como incendios forestales en la zona rural. Además de la pérdida de rendimiento de los cultivos, la alteración del ciclo hidrológico y los posibles efectos sobre la salud pública que, junto con el crecimiento de la población generan sinergias negativas al sistema. Situación que puede ser compartida por municipios con ciudades intermedias y andinas.



**Figura 3.1.** Mapas de inundaciones y deslizamientos de tierra del municipio de Pasto. De izquierda a derecha se presenta los mapas de inundaciones y deslizamientos de tierra. Fuente: DGRD (2015).

### 3.2.2 Selección del tipo de modelación

Para predecir el riesgo al que están expuestos los elementos urbanos en el municipio de Pasto en el marco de los escenarios RCP, se adoptó la modelación estocástica basada en el método de RB, teniendo en cuenta que en el capítulo II se identificaron los siguientes aspectos: i) los impactos del cambio climático se producen en el territorio siguiendo el modelo de reacción en cadena (acíclicos), ii) las correlaciones locales establecidas entre las variables urbanas y las climáticas generaron modelos matemáticos, de los cuales no todos fueron validadas con el estadístico F por los bajos coeficientes de determinación (alta incertidumbre), iii) existe información científica relevante que confirma las relaciones causa-efecto establecidas en los

modelos correlacionales, independiente de la validación estadística local, y vi) Las proyecciones locales establecidas con los escenarios RCP, tiene alta incertidumbre debido a que dependen de la evolución de las políticas climáticas globales.

Estas condiciones locales se ajustan con los requerimientos de las RB, ya que permiten incorporar la incertidumbre en las relaciones causales previamente establecidas, donde los escenarios de RCP se clasificaron como distribución de probabilidades a priori, (variables observadas o evidencia), y los modelos correlaciones como distribución de probabilidades a posteriori (variables no observadas o creencias), a partir de los cuales se estimaron los riesgos urbanos.

El teorema de Bayes es la base matemática de las RB que se extiende por toda la red (Canals, 2019), y según Cook y Lewandowsky (2016), el teorema de Bayes actualiza la creencia previa en una hipótesis H, es decir, calcula su probabilidad P (H) a partir de una nueva información P (E). Por lo tanto, la creencia actualizada *a posterior* de H [P(H|E)], es el producto de P(H) (creencia) por la probabilidad condicional P (E\H) dividida por la probabilidad de la evidencia P (E) dado que es verdadera, como se muestra la siguiente ecuación:

$$P(H|E) = \frac{P(H) * P(E|H)}{P(E)} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Según Wu et al. (2018), la probabilidad conjunta P(H|E) es obtenida de las tablas de probabilidad condicional, que provienen del entrenamiento de datos o de la recopilación del conocimiento de experto, y son la base para el cálculo de las probabilidades marginales P(E) y las probabilidades condicionales en cada nodo.

### 3.2.3 Componentes de la red bayesiana

La red bayesiana urbana está conformada por una componente cualitativa y otra cuantitativa. La cualitativa corresponden a las relaciones causales establecidas entre los escenarios RCP y los modelos matemáticos. Mientras que la componente cuantitativa corresponde a la base numérica. El modelo cuenta con variables discretas y continuas, que lo define como una red bayesiana híbrida que se puede ejecutar en modo discreto o continuo (Bayes Fusión LLC, 2020a). Sin embargo, por la configuración del modelo, la red bayesiana está programada para que se ejecute en modo continuo.

### 3.2.3.1 Componente cualitativa de la red bayesiana urbana

La RB urbana consta de dos secciones. La primera contiene los escenarios de simulación y la segunda los modelos correlacionales. Los escenarios de simulación corresponden a los nodos de probabilidad (variables discretas) de temperatura, precipitación y periodos de simulación, que se denominan nodos padres (sin predecesores). Los nodos hijos de la primera sección, son nodos de ecuaciones que se desprenden de los nodos padres (sin predecesores) y que los vinculan a sus respectivas series temporales (temperatura, precipitación, población total), de los que posteriormente surgen los nodos hijos que corresponden a las variables de Precipitación sobre temperatura (P/T), humedad relativa (HR), población rural y población menor de 5 años. En esta sección, la incertidumbre corresponde a las tablas de distribución de probabilidad a priori (BayesFusion, 2020b).

En la segunda sección, los nodos de ecuaciones (variables continuas) incorporan los modelos correlacionales de los riesgos urbanos (disponibilidad de agua, producción agrícola, producción ganadera, producción agropecuaria, seguridad alimentaria, desastres territoriales y salud humana), que son considerados hijos de los nodos de la primera sección que contienen las series temporales de las variables climáticas y poblacionales. Los nodos de la segunda sección representan los nodos de probabilidad *a posteriori* que definen los riesgos urbanos.

Mientras que el conjunto de flechas y algoritmos establecen las relaciones de influencia causal directa entre padres e hijos que se propagan por la red, generando la distribución de probabilidades *a posteriori*, que dependen de los valores asignados a las variables observadas por el usuario (Nyberg et al., 2021). Es decir, los nodos padres tienen probabilidades *a priori* que se actualizan a las probabilidades *a posteriori* de los nodos hijos a través de las probabilidades condicionales y la combinación de estados de los nodos (Wu et al., 2018), siguiendo la dirección sugerida por la evidencia (Cook & Lewandowsky, 2016). En la red urbana, la dirección de la evidencia se inicia en los escenarios RCP, que actualizan los modelos correlacionales para calcular los riesgos urbanos. Gráficamente, los nodos de probabilidad consisten en diagramas de barras o iconos con forma de óvalo, mientras que los nodos de ecuación consisten en dos óvalos y una virgulilla (~) (BayesFusion, 2020b), como se muestra en la (Figura 3.2).

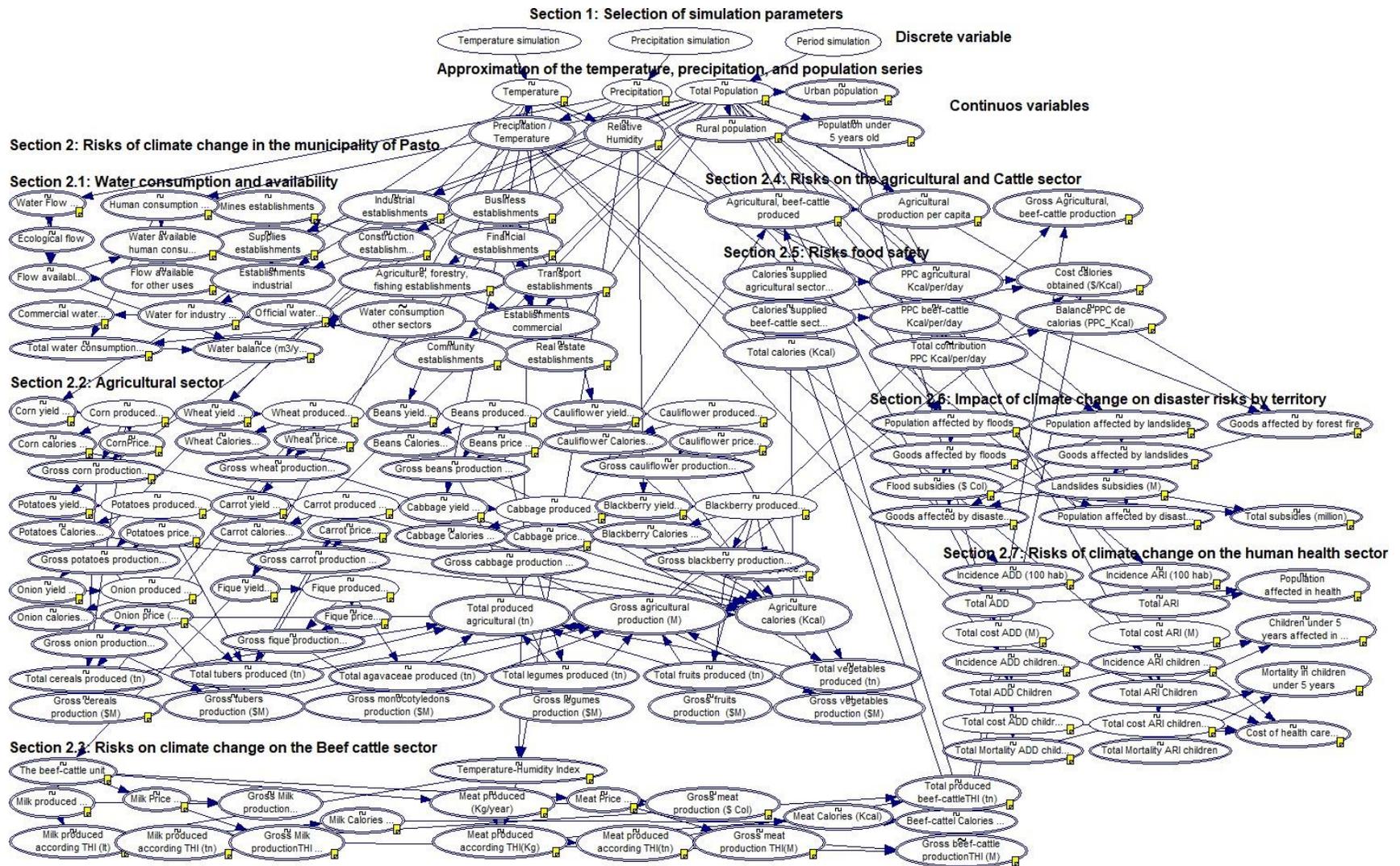


Figura 3.2 Estructura de la red bayesiana para predecir los riesgos urbanos.

### 3.2.3.2 Componente cuantitativa de la red bayesiana

La componente cuantitativa corresponde a la parte matemática del modelo. La primera sección de la red está conformada por nodos deterministas de las variables discretas de temperatura y precipitación (escenarios RCP). Cada variable contiene 14 datos, que representan el periodo climático de referencia (1976-2005), el periodo climático de evidencias (2006-2019), y el periodo de proyecciones que se subdivide de los periodos 2011-2040 (periodo 1: corto plazo), 2041-2070 (periodo 2: mediano plazo) y 2070-2100 (periodo 3: largo plazo), los cuales se asocian con el crecimiento población calculado o proyectada para cada periodo de simulación.

Debido a la gran cantidad de datos, se usan distribuciones paramétricas para ajustar las series temporales de temperatura, precipitación y población, las cuales están vinculadas a los periodos de modelación. Los datos corresponden a 33 series temporales (14 de temperatura, 14 de precipitación y 5 de población). A excepción de las series de las variables de producción agrícola, que son series cortas introducidas como datos reales utilizando la función personalizada PDF (distribución de probabilidad no paramétrica).

Por otra parte, las series de las anomalías de temperatura y precipitación proyectadas por el IDEAM (2016) para los escenarios RCP de Pasto, fueron calculadas únicamente con las estaciones meteorológicas de Obonuco y Botana, lo que explica por qué la desviación estándar de estas series es pequeña respecto a la desviación estándar del periodo de referencia. Sin embargo, en el marco del cambio climático lo esperado es que la desviación estándar aumente, debido al incremento de la frecuencia e intensidad de los eventos climáticos extremos (IPCC, 2021; OMS, 2018a). Por lo tanto, la desviación estándar de las anomalías proyectadas se aproximó a las condiciones de referencia.

Las series de tiempo de temperatura y precipitación del periodo de referencia se ajustaron a distribuciones normal  $[X \sim N(\mu, \sigma)]$ , que se validaron con la prueba de Kolmogorov-Smirnov al 95% de confianza. Así, la serie de temperatura se expresa como  $N(12.78 \text{ }^\circ\text{C}, 0.35 \text{ }^\circ\text{C})$  y la serie de precipitación como  $N(1264 \text{ mm}, 281.11 \text{ mm})$ . A partir de estos valores de referencia, se adicionó las anomalías esperadas en cada escenario RCP, restringiendo los valores negativos de temperatura y precipitación con la función normal truncada (Tabla 3.1). A partir de estas variables, se definen la humedad relativa (HR), relación (P/T), población total, población urbana y población menor de 5 años.

**Tabla 3.1.** Ajuste de series de temperatura y precipitación con distribuciones paramétricas

Periodo	Temperatura	P-valor	Precipitación	P-valor
Referencia	Normal (12.78,0.35)	0,2994	TrucNormal (1264.7,281.11,0)	0.9947
Evidencia	Normal (13.038, 031)	0.1367	Normal (1495.64, 289.75)	0.5488
RCP2.6_Periodo1	TrucNormal (12.78,0.35) + 0.55		TrucNormal (1264.7,281.11,0) - 4.17	
RCP2.6_Periodo 2	TrucNormal (12.78,0.35) + 0.75		TrucNormal (1264.7,281.11,0) + 19.24	
RCP2.6_Periodo 3	TrucNormal (12.78,0.35) + 0.75		TrucNormal (1264.7,281.11,0) - 8.42	
RCP4.5_Periodo 1	TrucNormal (12.78,0.35) + 0.56		TrucNormal (1264.7,281.11,0) + 19.82	
RCP4.5_Periodo 2	TrucNormal (12.78,0.35) + 0.96		TrucNormal (1264.7,281.11,0) + 29.05	
RCP4.5_Periodo 3	TrucNormal (12.78,0.35) + 1.17		TrucNormal (1264.7,281.11,0) + 35.22	
RCP6.0_Periodo 1	TrucNormal (12.78,0.35) + 0.46		TrucNormal (1264.7,281.11,0) + 15.54	
RCP6.0_Periodo 2	TrucNormal (12.78,0.35) + 0.90		TrucNormal (1264.7,281.11,0) + 41.04	
RCP6.0_Periodo 3	TrucNormal (12.78,0.35) + 1.38		TrucNormal (1264.7,281.11,0) + 67.54	
RCP8.5_Periodo 1	TrucNormal (12.78,0.35) + 0.58		TrucNormal (1264.7,281.11,0) + 26.14	
RCP8.5_Periodo 2	TrucNormal (12.78,0.35) + 1.35		TrucNormal (1264.7,281.11,0) + 63.67	
RCP8.5_Periodo 3	TrucNormal (12.78,0.35) + 2.23		TrucNormal (1264.7,281.11,0) + 164.46	

Adicionalmente, vinculamos las estimaciones de crecimiento poblacional a los escenarios del RCP. Estas estimaciones parten de la tendencia actual, que según el DANE (2019), la tasa de crecimiento disminuyó de 2,55% en el periodo 1993-2005 a 1,53% en el periodo 2005-2018. Bajo esta condición, se proyectó la población hasta el año 2100 con una función logarítmica validada con la prueba de Kolmogorov-Smirnov al 95% de confianza. Sin embargo, al desglosar esta serie por períodos, las nuevas series se ajustaron con las funciones normal y lognormal, que cumplen con las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling. ((Tabla 3.2). A partir de estas proyecciones, se obtuvo la población urbana, rural y de menores de 5 años mediante correlaciones con la población total.

**Tabla 3.2.** Ajuste de series de población con distribuciones paramétricas

Población	Función	P-valor	Parámetros	
			$\mu$	$\sigma$
Periodo de Referencia	Normal	0.9957	302,118	51,425.2
Periodo de Evidencias	Normal	0.9986	419,802	28,182.5
Periodo 2011-2040	LogNormal	0.9806	13.112	0.102
Periodo 2041-2070	Normal	0.9961	661,772	49,860
Periodo 2070-2071	Normal	0.9961	823,931	49,142.7

En la segunda sección, incorporamos los modelos correlacionales establecidos entre las variables climáticas (temperatura, precipitación, humedad relativa urbanas) y las variables urbanas

(disponibilidad de agua, producción agrícola y ganadera, seguridad alimentaria, salud pública y riesgos de desastre), a partir de las cuales calculamos los riesgos urbanos a largo, mediano y corto plazo. Estas correlaciones se ingresaron a la red bayesiana como nodos de ecuaciones (Tabla 3.3).

**Tabla 3.3.** Parámetros de la red bayesiana (base numérica)

Elemento	Dominio	Rango	Rango (unidad)	P-value
Agua disponible	$0.001(P)+1.95$	Caudal de escorrentía	m <sup>3</sup> /año	0.018
Agricultura	$-0.95(T^2) + 24.03(T)-149.77$	Maíz		0.014
	$-32.2(T^2) + 810.45(T)-5072.22$	Repollo		0.029
	$-0.00004e^{-5}(P^2) + 0.12(P)-76.12$	Papa		0.027
	$-1.21(T^2)+30.72(T)-194.15$	Frijol voluble		0.045
	$-0.0006(P/T)^2+0.18(P/T)-10.6$	Trigo	Rendimiento:	0.064
	$-0.56(T^2)+14.01(T)-86.09$	Fique	ton/ha	0.069
	$-0.000058(P^2)+0.17(P)-93.29$	Zanahoria		0.367
	$-4.85(T^2)+123.91(T)-780.50$	Cebolla Junca		0.334
Ganadería	$-0.0000036(P^2)+0.012(P)-1.96$	Mora		0.428
	$-0.0006(P/T)^2+0.13(P/T)+11$	Coliflor		0.483
	$0.13(Pob)-28440$	UGG	Unidad Gran Ganado	1.4e-09
	$-0.0088(P^2)+25.22(P)-17167$	PAI	Número de personas	0.5214
	$0.0005(PAF)^2+0.23(PAF)+82.37$	BAI	Número de bienes	1.55e-06
	$157.9(T)^2-4082.1(T)+26411.5$	PAD	Número de personas	0.3101
	$0.231(PAL)^2+2.0495$	BAD	Número de bienes	6.26e-08
	$0.369(P/T)^2-88.8(P/T)+5349.8$	BAIF	Número de bienes	0.0046
Salud humana	$0.0062(P/T)^2-1.5(P/T)+159.5$	IRA Niños		0.9198
	$0.0014(P/T)^2-0.34(P/T)+36.94$	IRA Adultos	Incidencia por 100 habitantes	0.8565
	$0.0085(P/T)^2-1.95(P/T)+144.76$	EDA Niños		0.3079
	$0.0027(P/T)^2-0.62(P/T)+44.45$	EDA Adultos		0.225

Nota: Temperatura (T), Precipitación (P), Población total (Pob), Personas afectadas por inundaciones (PAI), Bienes afectados por inundaciones (BAI), Personas afectadas por deslizamientos (PAD), Bienes afectados por deslizamientos (BAD), Bienes afectados por incendios forestales (BAIF). Si P-value  $P > 0.05$ , aceptamos hipótesis nula (variable del dominio no afecta el modelo), Si  $P < 0.05$ , aceptamos la hipótesis alternativa (variable del dominio afecta el modelo).

Mientras que las ecuaciones genéricas utilizadas para el calcular las variables auxiliares del modelo se muestran en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4.** Variables auxiliares del modelo

Elementos	Nodos	Ecuaciones
Agua disponible	Caudal ecológico (m <sup>3</sup> /s)	$y = 0.3 * \text{Caudal de escorrentía}$
	Agua para consumo humano (m <sup>3</sup> /s)	$y = 0.7 * \text{Caudal de escorrentía}$
	Suministro per cápita de agua (m <sup>3</sup> /s)	$y = 120 \text{ lt/hab/día}$
	Otros consumos (m <sup>3</sup> /s)	$y = \text{Industrial} + \text{Comercial} + \text{Oficial}$
	Balance de agua disponible (m <sup>3</sup> /s)	$y = \text{Balance de agua disponible} - \text{consumos}$
	Número de establecimientos (#)	$y = a(x) + b$
Agricultura		Correlación lineal con respecto a población total
	Producción del cultivo (tn)	$y = \text{área plantada} * (1 - \text{Perdidas \%}) * \text{rendimiento}$

Elementos	Nodos	Ecuaciones
	Precio del producto (\$)	$y = -a(x) + b$ Correlación lineal con respecto a producción
	Ingresos brutos (\$)	$y = \text{producción del cultivo} * \text{Precio del producto}$
	Producción total (tn)	Suma de toda la producción agrícola
Ganadería	Confort animal (índice)	$ITH = 1.8T + 32 - (0.55 - 0.55 * HR/100) * (1.8T - 26)$
	Producción de leche y carne (tn)	$y = a(x) + b$ Correlación lineal con respecto a UGG
	Precio de los productos (\$)	$y = a(x) + b$ Correlación lineal respecto a producción
	Producción total (tn)	Suma de toda la producción ganadera
Seguridad alimentaria	Producción de calorías (kcal)	$y = \text{Producción total} * \text{contenido calórico de alimentos según resolución 3803/2016}$
	Producción Per Cápita de calorías (kcal/hab/día)	$y = \text{Producción de calorías} / \text{Población total}$
	Balance de producción de calorías (kcal/hab/día)	$y = \text{Producción per cápita calorías} - \text{ingesta per cápita}$ Ingesta per cápita de calorías = 2500 kcal/hab/día
	Costo de calorías (\$)	$y = \text{Ingresos brutos} / \text{Producción total}$
Riesgos de desastres	Subsidios por inundaciones (\$)	$y = \ln(x)$ Función logarítmica respecto a BAI
	Subsidios por deslizamientos de tierra (\$)	$y = a(x) + b$ Correlación lineal con respecto a BAD
Salud humana	Casos totales de EDA e IRA	$y = (\text{Incidencia} * \text{Población total}) * 100 \text{ habitantes}$
	Costo total atención EDA e IRA	$y = \text{Casos totales de EDA e IRA} * \text{Normal}(x, \sigma)$ Función Normal de costos de atención en salud
	Mortalidad infantil	$y = \text{Casos totales de EDA e IRA} * \text{Niños muertos} (\%)$

Las ecuaciones descritas en la Tabla 3.3 y la Tabla 3.4 se introducen en la BN a través de los nodos denominados Ecuación, que en este caso corresponden a variables continuas, y su finalidad es generar simulaciones que muestren la evolución de las variables urbanas en función de los escenarios RCP y de los periodos de modelización (corto, medio y largo plazo).

### 3.2.4 Definición del riesgo

En esta investigación, el riesgo de las variables urbanas asociadas a los escenarios RCP se calcularon como la probabilidad de que las simulaciones de los escenarios futuros sean mayores que los límites de las distribuciones históricas, ya sea por debajo del percentil 5 (para las variables en las que los valores proyectados decrecen) o por encima del percentil 95 (para las variables en las que los valores proyectados crecen) respecto al periodo de referencia. El riesgo se clasificó como Alto (cuando el número de simulaciones obtenidos fue mayor o igual al 80% del total), Intermedio (cuando el número de simulaciones obtenidas fue mayor o igual al 40% y menor al

80%), bajo (cuando el número de simulaciones obtenidas era mayor al 0% y menor al 40%) y sin riesgo (cuando las simulaciones eran favorables e implicaban oportunidades en una escala de 0 a 100%).

### **3.2.5 Escala temporal del modelo**

La escala temporal de la RB urbana corresponde a series anuales. A partir de la información disponible, las correlaciones establecidas y con el objetivo de calcular los riesgos urbanos según los diferentes escenarios RCP, se definió la estructura temporal de la red bayesiana en tres periodos (referencia climática, evidencia climática y proyecciones climáticas). El periodo de referencia climática (1976-2005), corresponde a los promedios de las variables de temperatura y precipitación como valores de referencia con los que se comparan los riesgos urbanos obtenidos para los diferentes escenarios RCP. En el periodo de evidencia climática (2004- 2019), se establecieron las correlaciones entre las variables climáticas y las urbanas, teniendo en cuenta la disponibilidad de información de las variables de producción agrícola y ganadera, desastres, indicadores de salud pública, entre otros.

Para el periodo de proyecciones, el IPCC (2013) asumió cuatro escenarios de forzamiento radiativo del planeta (de 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5  $w/m^2$ ), denominados escenarios RCP, donde el escenario RCP2.6 supone un futuro con adecuadas políticas climáticas de bajas emisiones de GEI, los escenarios RCP4.5 y RCP6.0 representan las condiciones de estabilización, y el escenario RCP8.5 asume escasas políticas climáticas y elevados niveles de GEI. Lo anterior para los periodos 2016-2035, 2046-2065 y 2081-2100. A nivel nacional y local, las anomalías de temperatura y precipitación se establecieron para los periodos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100 (IDEAM *et al.*, 2015), los cuales fueron adoptados en el modelo como parte del periodo de proyecciones.

Por lo tanto, El modelo permite simular los riesgos urbanos a partir de la probabilidad anual de las variables climáticas, y con menor precisión los impactos por eventos extremos, ya que estos eventos ocurren de forma ocasional y son raros en una distribución estadística (IPCC, 2014). No obstante, para modelar eventos climáticos extremos, se requiere reducir la escala temporal a hora o días, ya que según Maxwell *et al.* (2018), estos eventos pueden ocurrir en un día, con consecuencias mayores a los promedios obtenidos en una escala anual. De ahí que, para el propósito de este estudio, se utiliza una escala anual que permita tener una visión global de los impactos del cambio climático en el territorio.

### **3.2.6 Construcción de la red bayesiana**

La red bayesiana híbrida, fue construida con el software GeNIe Academic versión 2.5.5408.0, con el fin de modelar los riesgos del cambio climático a corto, medio y largo plazo. La RB consta de 241 nodos, de los cuales 3 son nodos de probabilidad (variables discretas) y 238 son nodos de ecuación (variables continuas), unidos con 328 arcos o flechas (Fig. 1). Por su parte GeNIe, es un software de modelización de inteligencia artificial y aprendizaje autónomo diseñado para optimizar la toma de decisiones y la planificación estratégica. Sus aplicaciones incluyen el diagnóstico, la previsión, el análisis de datos, el modelado de decisiones, la captura de conocimiento experto y la construcción automática de modelos (BayesFusion LLC, 2020b). Además, explora y examina modelos de redes bayesianas, redes bayesianas dinámicas, diagramas de influencia, sistemas basados en ecuaciones y modelos híbridos (BayesFusion LLC, 2020c).

### **3.2.7 Configuración de la red híbrida bayesiana**

La RB urbana se configuró para ejecutarse con variables continuas y con un algoritmo de 100 000 muestras. No obstante, BayesFusion LLC (2020a), considera resultados más precisos con mayor número de muestras, aunque no existe una fórmula sencilla que defina esta relación, excepto por la relación lineal entre el número de muestras y el tiempo de ejecución. El número de muestras se eligió teniendo en cuenta el tiempo de ejecución, el requerimiento computacional y, sobre todo, que la cantidad de muestras fuera suficiente en comparación con los datos disponibles en las series de tiempo de las variables urbanas, que en el mejor de los casos es de 15 datos (un dato por año). En este sentido, Geduk y Ulusoy (2021), consideran que la estructura de un modelo es confiable si satisface una gran cantidad de datos, como ocurre en este caso.

Otras consideraciones de diseño son las siguientes: i) no se establecen límites en los nodos, con el fin de conservar todas las muestras; ii) la simulación de los riesgos urbanos se realiza en los nodos de las variables discretas, o ejecutando la opción "Case Manger", que almacena las simulaciones preestablecidas (Case Manager está disponible en la ruta "View Case Manager"); iii) la magnitud de los riesgos urbanos con respecto al clima, se definen como la diferencia porcentual entre los valores obtenidos en las variables de los periodos proyectados, y los valores obtenidos en el periodo de referencia, por esta razón, al ejecutar el modelo en el periodo de referencia la media de los riesgos es cercana a 0; y iv) la magnitud de los riesgos de las variables urbanas se define como positiva si es favorable y negativa si es desfavorable y se acompaña del signo menos (-).

### 3.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos obtenidos con GeNIe Academic (100 000 por cada variable) se organizaron en diagramas de cajas y bigotes, donde el eje horizontal corresponde a los periodos modelados, tales como: i) Referencia (Ref) entre 1976-2005; ii) Evidencias (Evi) entre 2004-2019; iii) Periodo 1 (Per1) entre 2011-2040; iv) Periodo 2 (Per2) entre 2041-2070 y v) Periodo 3 (Per3) entre 2071-2100. Mientras que, en el eje vertical, para identificar la evolución del clima según los escenarios RCP, se ubican las variables de temperatura y precipitación, y para los riesgos urbanos, se ubica el porcentaje del riesgo calculado para cada variable, según el escenario RCP modelado.

#### 3.3.1 Evolución del clima según los escenarios RCP

Según las proyecciones locales de precipitación y temperatura, las condiciones climáticas más críticas se esperan en el escenario RCP8.5, con un aumento medio de 2 °C (17,4%) en la temperatura y 164,3 mm (13%) en la precipitación (Tabla 3.5). Por otro lado, el IPCC (2021) afirma que con los compromisos globales actualmente vigentes reducir los GEI y evitar el calentamiento a más de 1,5 o 2 °C, será una tarea inalcanzable. Si lo anterior se cumple, es posible que las condiciones climáticas imperantes sean similares a las establecidas en el escenario RCP8.5. Por lo tanto, los riesgos del cambio climático que se presentan a continuación corresponden a las condiciones climáticas establecidas en ese escenario.

**Tabla 3.5.** Temperatura y precipitación media de los escenarios RCP para el periodo 3

Variables climáticas	Periodo de referencia	Escenarios RCP			
		RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
Temperatura		13.53°C	13.95°C	14.16°C	15.01°C
Diferencia	12.78°C	0.75°C (5.9%)	1.17°C (9.2%)	1.38°C (10.8%)	2.23°C (17.4%)
Precipitación		1256 mm	1299.9 mm	1332.2 mm	1429 mm
Diferencia	1264.7 mm	-8.7 (0.7%)	35.2 (2.8%)	67.5 (5.3%)	164.3 (13%)

En general, los resultados muestran que la temperatura y la precipitación aumentarán del escenario RCP2.6 al RCP8.5, siendo el periodo 3 del escenario RCP8.5 el más crítico. No obstante, en el periodo climático de evidencias se observa una importante alteración respecto a los demás periodos, por lo que es muy probable que el clima evolucione al escenario RCP8.5. Lo cual concuerda con las proyecciones del IPCC (2021), donde se espera que el calentamiento no sea

inferior a 2 °C. Por lo que, a nivel local, ese incremento descartará los RCP 2.6, 4.5 y 6.0, dejando como escenario más probable y crítico al escenario RCP8.5.

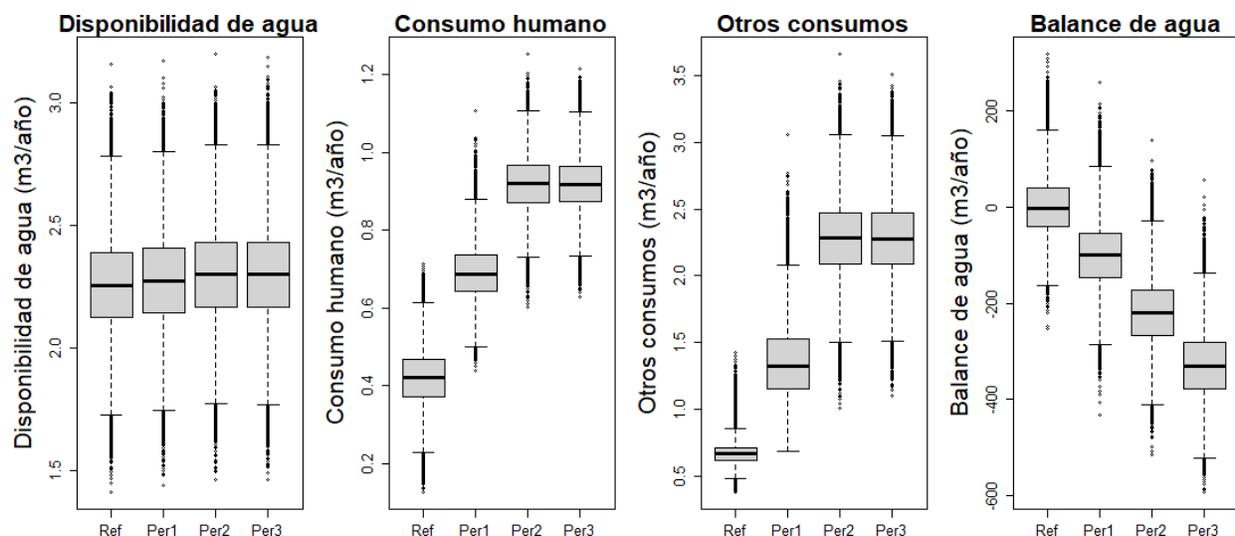
### **3.3.2 *Estimación de riesgos urbanos***

#### **3.3.2.1 Riesgos en la disponibilidad de agua**

Los nodos padres (primera sección) contienen las series de precipitación, temperatura y población, a partir de los cuales se define el balance hídrico de oferta y demanda, y mediante la ecuación de escorrentía superficial, se calcula la oferta de agua de la parte alta y media de la cuenca del río Pasto que abastece al 84% de los habitantes del área urbana (DANE, 2019). De acuerdo con Maturana et al. (2017), el crecimiento poblacional de la zona urbana se puede atribuir a la consolidación de la zona urbana como una ciudad intermedia y receptora de población migrante

Por lo tanto, el consumo de agua potable se estimó con una dotación neta per cápita de 120 lt/hab/día (resolución 330 de 2017), mientras que los consumos de agua del sector comercial, industrial y oficial, se obtuvo mediante los consumos de agua facturados por la empresa local de acueducto y alcantarillado (Empopasto), y de acuerdo con el número de establecimientos registros de la Cámara de Comercio Municipal (2019) entre 2006 y 2018. Respecto a la disponibilidad de agua en la cuenca del río Pasto, se espera una relativa estabilidad en los escenarios RCP2.6 y 4.5, y un ligero incremento en los escenarios RCP6.0 y 8.5, debido al aumento de la precipitación.

Por otro lado, la demanda de agua tanto para consumo humano como para los demás sectores aumentará progresivamente entre los diferentes periodos. Alcanzando en el periodo 3 un incremento de 172.9% y 391,5% respectivamente, generando un balance negativo entre oferta y demanda de 328.8%, que se traduce en un alto riesgo de déficit de agua, como se muestra en las simulaciones del escenario RCP 8.5 de la Figura 3.3.



**Figura 3.3** Simulación de la disponibilidad de agua superficial en la cuenca del río Pasto. Las siglas de las abscisas corresponden a: Ref (Referencia), Evi (periodo de evidencias), Per1 (periodo 1 proyectado), Per2 (periodo 2 proyectado) y Per3 (periodo 3 proyectado).

Aunque la disponibilidad de agua muestra un ligero aumento de los caudales superficiales asociados a una mayor precipitación, se espera un alto incremento en la demandas de agua de los diferentes consumo (humano, comercial, industrial y oficial), lo que implica que el riesgo de un balance hídrico negativo (déficit de agua) será cercano al 100% a partir del periodo 1 (Tabla 3.6).

**Tabla 3.6.** Riesgos en la disponibilidad de agua

Variables	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Riesgo	Percentil
Disponibilidad de agua	5.97%	7.95%	7.95%	Sin riesgo	P5
Consumo humano y otros consumos	99.25%	100.00%	100.00%	Alto	P95
Balance de agua	91.37%	100.00%	100.00%	Alto	P5

Actualmente, Pasto cubre su déficit de agua, con caudales alternativos de otros municipios. Sin embargo, en el futuro la escasez de agua posiblemente será el elemento limitante que promoverá la emigración, reducirá la inmigración y alterará la estructura social, económica y ambiental. Estas proyecciones se obtuvieron con los supuestos de que el crecimiento poblacional seguirá la tendencia actual (función logarítmica), el coeficiente de escorrentía se mantendrá similar siempre que el modelo de ciudad compacta adoptado se cumpla.

### 3.3.2.2 Riesgos del sector agrícola

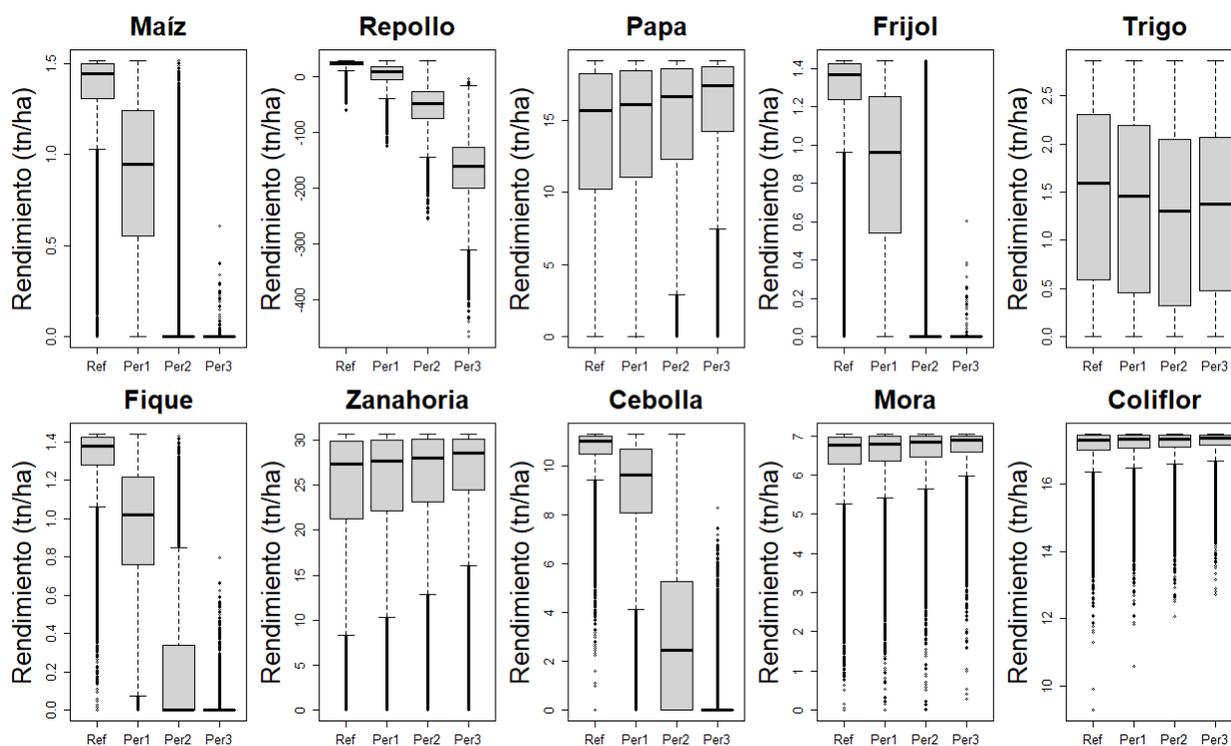
A partir de los modelos cuadráticos negativos establecidos entre los rendimientos de los cultivos y las variables climáticas, se obtiene la superficie plantada, el porcentaje de pérdidas, la producción agrícola, el aporte calórico y la producción monetaria bruta a valor presente (precio de venta in situ). Con estas variables, calculamos el riesgo para los rendimientos de los cultivos, la producción total y la producción monetaria bruta, suponiendo que la superficie media plantada se mantiene similar a la del periodo de pruebas climáticas.

Así, el dominio de este modelo corresponde a las variables climáticas de los periodos de referencia y de proyección, que se relacionan con los rendimientos de los cultivos mediante una función parabólica negativa. Donde el rendimiento óptimo de los cultivos se da en el vértice de la parábola cuando las condiciones climáticas satisfacen los requerimientos de los cultivos, como se muestra en la Tabla 3.7. En este sentido, la IPPC (2021) establece que un calentamiento global de 2°C superará los umbrales de tolerancia de la agricultura.

**Tabla 3.7.** Rango y dominio del rendimiento de los cultivos

Cultivos	Dominio	Rango Óptimo	Riesgos del escenario RCP8.5 (%)		
			Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3
Repollo	11.6 - 13.5 (°C)	12.5 °C	-56.68	-98.79	-100
Frijol V.	11.6 - 13.8 (°C)	12.73 °C	-33.05	-93.52	-99.99
Maíz	11.3 - 13.85 (°C)	12.5 °C	-36.21	-93.50	-99.99
Fique	10.9 - 14.1 (°C)	12.5 °C	-28	-85.528	-99.94
Cebolla J.	11.25 - 14.3 (°C)	12.78 °C	15.30	-72.06	-99.65
Trigo	76.8 - 208.6 (mm/°C)	142.7 mm/°C	-7.10	-14.48	-11.35
Coliflor	0 - 253.8 (mm/°C)	95.86 mm/°C	0.33	0.51	0.70
Mora	173.3-2826.6 (mm)	1500 mm	0.73	1.64	3.07
Zanahoria	734.9 - 2188.7 (mm)	1461.8 mm	2.15	4.73	8.13
Papa	851.5 - 2234.7 (mm)	1543 mm	3.26	7.45	15.84

Los rendimientos del cultivo de repollo, frijol, maíz, fique y cebolla disminuyen progresivamente hasta desaparecer en el periodo 3 (100% de pérdida), debido a que la temperatura proyectada (15.01 °C) supera significativamente el valor óptimo requerido 12.6 °C, excepto en el caso del trigo, donde las pérdidas serán menores porque el P/T se aleja ligeramente del rendimiento óptimo. Mientras que los rendimientos de los cultivos de coliflor, mora, zanahoria y papa aumentan porque las condiciones climáticas en los periodos proyectados se acercan u oscilan en torno a los valores óptimos de rendimiento. Sin embargo, el balance global para el periodo 3 es negativo, con pérdidas cercanas al 20% en la producción y del 58% en la producción bruta (Figura 3.4).



**Figura 3.4** Simulación del rendimiento de los cultivos bajo el cambio climático.

Estos modelos cuadráticos recogen las correlaciones parciales identificadas por (Sheridan & Bicford, 2011), positivas entre el crecimiento de las plantas y la precipitación, y negativas respecto a la temperatura. Así como, el impacto exponencial en los rendimientos de los cultivos cuando las condiciones climáticas empeoran (Méndez & Araya, 2017).

Los resultados muestran, que el riesgo de pérdidas de rendimiento de varios cultivos (maíz, col, frijol, fique y cebolla) será cercano al 50% en el periodo 1, llegando al 100% en el periodo 3, debido a que la temperatura superará el rango óptimo, mientras que la pérdida de rendimiento del trigo será del 16 y 19%, al disminuir ligeramente la relación P/T respecto al rango óptimo. Por otro lado, se espera que los rendimientos de cultivos de papa, zanahoria, coliflor y mora aumenten progresivamente (convirtiéndose en una oportunidad) entre un 5,24% y un 7,65%, debido al aumento de las precipitaciones. En general, se espera que la producción total y monetaria en el periodo 3 disminuya entre un 6,72% y un 30,62% respectivamente (Tabla 3.8).

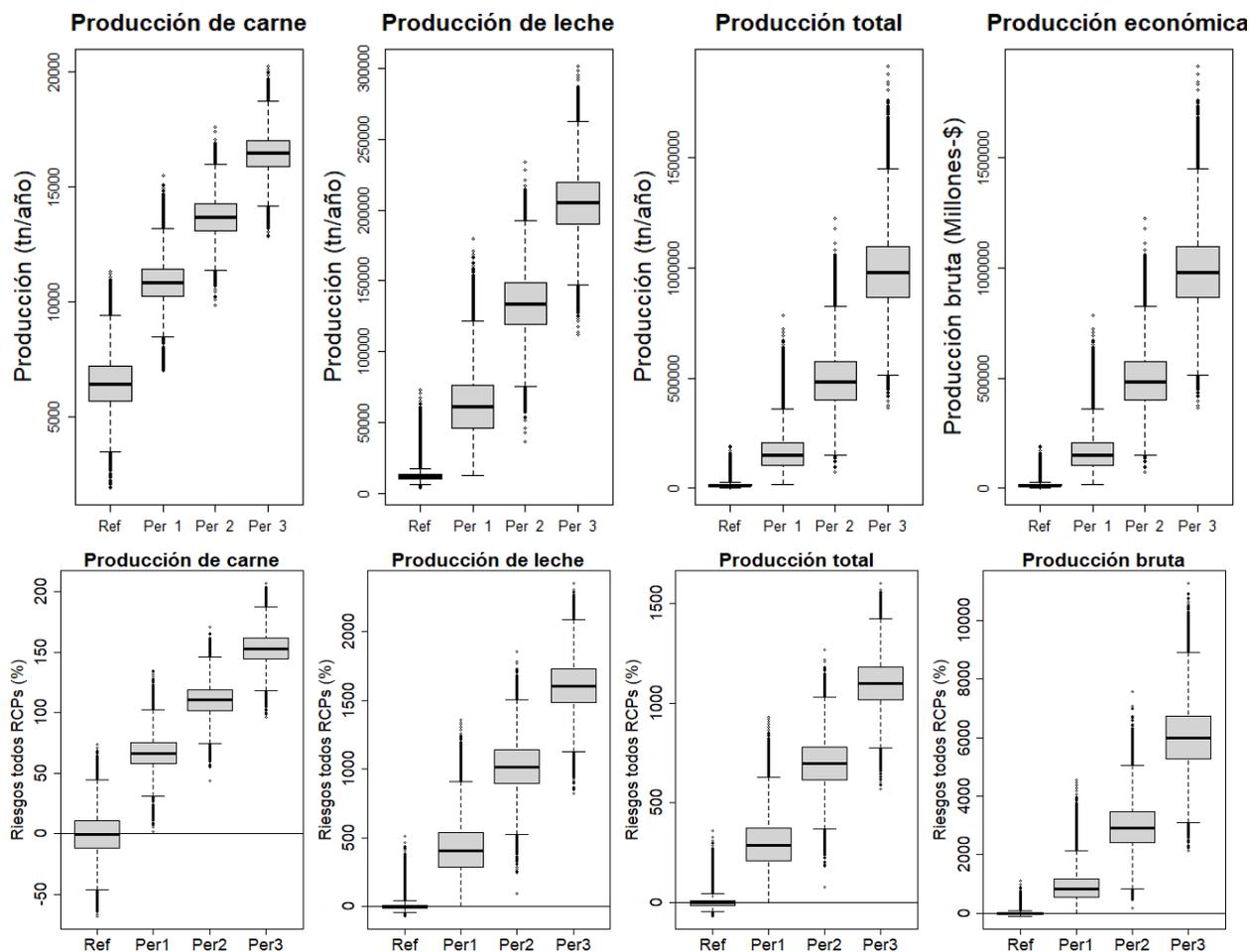
**Tabla 3.8.** Riesgos en la producción agrícola

<b>Rendimiento de los Cultivos</b>	<b>Periodo 1</b>	<b>Periodo 2</b>	<b>Periodo 3</b>	<b>Riesgo</b>	<b>Percentil</b>
Maíz	49.06%	98.59%	100.00%	Alto	P5
Repollo	49.26%	98.61%	100.00%	Alto	P5
Papa	5.51%	6.16%	7.65%	Sin riesgo	P95
Frijol	42.44%	97.86%	100.00%	Alto	P5
Trigo	17.52%	19.28%	16.38%	Bajo	P5
Fique	49.98%	98.69%	100.00%	Alto	P5
Zanahoria	5.39%	5.69%	6.41%	Sin riesgo	P95
Cebolla	37.94%	97.15%	100.00%	Alto	P5
Mora	5.40%	5.94%	6.86%	Sin riesgo	P95
Coliflor	5.24%	5.54%	5.93%	Sin riesgo	P95
Producción Total	5.63%	6.59%	6.72%	Bajo	P5
Producción monetaria bruta	5.54%	7.43%	30.62%	Bajo	P5

### 3.3.2.3 Riesgos del sector pecuario

La producción del ganado bovino depende del confort animal, y este a la vez depende del índice de temperatura y humedad (ITH), cuyos valores según López et al. (2016), se interpretan de la siguiente forma: i) Normal: ITH es menor o igual a 72, no genera pérdidas de producción; ii) Alerta: entre 72 y 78, las pérdidas serán de 5%; iii) Peligro: entre 78 y 83, las pérdidas serán del 10%; y iv) Emergencia: mayor a 83, las pérdidas serán del 15%. Según Ruiz-García et al. (2018), estos efectos son difíciles de estimar porque también dependen de la nutrición animal y de los factores ambientales. Sin embargo, al desarrollar el ITH de acuerdo con las proyecciones esperadas en el periodo crítico, se obtuvo un valor de 58.87 (Normal), es decir, que es muy probable que este sector no se vea afectado significativamente por el cambio climático.

Por otra parte, se identificó que la producción de este sector depende directamente de los patrones de consumo humano y del crecimiento poblacional. En el supuesto que estos patrones se conservan en el tiempo, es probable que la producción de carne y leche del periodo 3 aumenten a 153% y 1609% respectivamente (Figura 3.5).



**Figura 3.5** Simulación de la producción ganadera bajo el cambio climático.

Este tipo de producción depende de los patrones de consumo humano y del crecimiento de la población (directamente proporcional). Si estos factores se mantienen similares en el tiempo, es muy probable que la producción de carne y leche aumente en escenarios futuros (

Tabla 3.9). Lo anterior con los supuestos de que la tasa de consumo de productos pecuarios se mantenga igual a la tasa en el período de evidencia, y que la capacidad de carga animal alcance las 4 UGG/ha.

**Tabla 3.9.** Riesgos en la producción ganadera

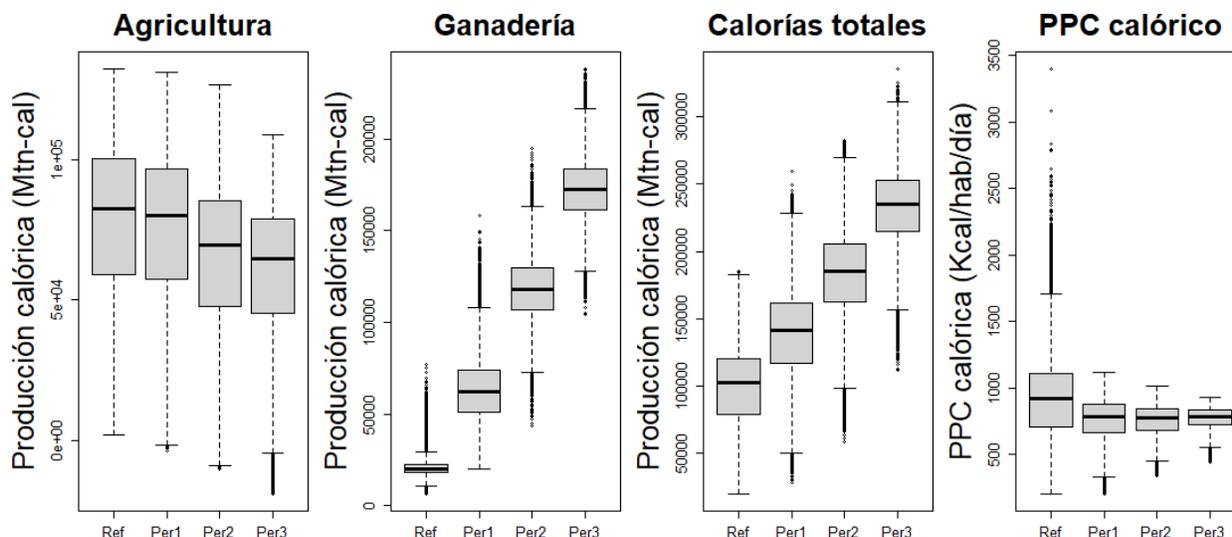
<b>Variabes</b>	<b>Periodo 1</b>	<b>Periodo 2</b>	<b>Periodo 3</b>	<b>Riesgo</b>	<b>Percentil</b>
Producción de carne y leche	99.18%	100.00%	100.00%	Sin riesgo	P95
Producción monetaria bruta	99.18%	100.00%	100.00%	Sin riesgo	P95

La demanda de los productos cárnicos resulta incierta de predecir, debido a que existen diferentes campañas, avances científicos y estrategias de comercialización que desestimulan su consumo. Por ejemplo, Becker & Lawrence (2021), identificaron que la producción insostenible, insalubre y poco ética de la carne, está generando que las personas dejen su consumo.

#### **3.3.2.4 Riesgos para la seguridad alimentaria**

La seguridad alimentaria local se define en función de la energía calórica generada por la producción agropecuaria, la ingesta energética per cápita de la población y la pirámide poblacional del municipio de Pasto. Con base en lo anterior y con la Tabla de Composición de Alimentos de Colombia (ICBF, 2015), establecimos los requerimientos nutricionales de una persona que realiza una actividad física moderada en 2500 kcal/hab/día, y a partir de esta información y la producción agropecuaria local, estimamos que la producción energética del sector agropecuario es de 906 kcal/hab/día. Por tanto, en el periodo de referencia la producción energética local abastece el 36.24% de ingesta de calorías requerida por persona, de las cuales el 79,5% proceden del sector agrícola y el 20.5% del sector ganadero. Esto significa que el municipio no tiene la capacidad de cubrir el 100% de la demanda nutricional, generando un déficit de 1.594 kcal/hab/día (63,76%), que se debe cubrir con la producción de otras regiones.

En cuanto a las proyecciones, esperamos que el balance calórico (diferencia entre la producción de alimentos per cápita y el consumo de energía necesario per cápita) aumente negativamente, debido al crecimiento de la población, al impacto del cambio climático en el rendimiento de los cultivos, y a la limitada superficie dedicada a la producción agrícola y ganadera. Por tanto, el déficit del balance calórico en los periodos 1, 2 y 3 con respecto al periodo de referencia será de -9,49% (1742.7 kcal/hab/día), -9,73% (1745 kcal/hab/día) y -8,59% (1728.6 kcal/hab/día) respectivamente (Figura 3.6). En este contexto, el 28% de la producción alimentaria local provendrá del sector agrícola y el 72% del sector ganadero.



**Figura 3.6** Simulación de la producción calórico de los alimentos bajo el cambio climático.

Los resultados muestran un riesgo entre el 6,11% y el 7,6% en la pérdida de energía alimentaria procedente de la agricultura, mientras que la probabilidad de crecimiento de la energía alimentaria procedente de la ganadería será del 100% (convirtiéndose en una oportunidad). Aunque el riesgo en la producción calórica total per cápita es bajo, el crecimiento de la producción ganadera compensará dicha pérdida. Mientras que la producción total se reducirá a 773,7 kcal/habitante/día, de las cuales el 26,06% provendrá de la producción agrícola y el 76,94% de la ganadera (Tabla 3.10).

**Tabla 3.10.** Riesgos en la producción agropecuaria

<b>Variables</b>	<b>Periodo 1</b>	<b>Periodo 2</b>	<b>Periodo 3</b>	<b>Riesgo</b>	<b>Percentil</b>
Calorías de la agricultura	6.11%	8.92%	- 7.60%	Bajo	P5
Calorías del ganado	99.23%	100.00%	100.00%	Alto	P95
Calorías totales	55.26%	90.97%	99.89%	Alto	P95
PPC calórica	1.43%	0.03%	0.00%	Bajo	P5

Sin embargo, si a nivel nacional se contigua con la política de promueve la importación de alimentos al país, los sectores agrícolas y ganaderos locales tenderán a desaparecer. Un ejemplo de ello es la importación de 9,848 toneladas de leche en polvos desde los Estados Unidos, en pleno proceso de recuperación económica de la pandemia Covid-19 (Forbes Staff, 2021), lo que desestimula la producción agropecuaria y, por lo tanto, amenazará la seguridad alimentaria local.

### 3.3.2.5 Riesgos de desastres

Las relaciones entre el número de personas y de bienes afectados por inundaciones, deslizamientos de tierra e incendios forestales, se establecieron con funciones cuadráticas respecto a las variables climáticas y al crecimiento poblacional. El número de personas afectados por inundaciones se modeló con una función cuadrática negativa asociada a la precipitación, con un dominio entre 1123.3 mm y 1753.8 mm, y un rango de 0 a 906 personas afectados, en este caso una función cuadrática negativa se asocia a los esfuerzos de las administraciones locales por reducción el riesgo. Mientras que los bienes afectados por inundaciones (rango) se modelaron con una función cuadrática positiva acotada a la izquierda, respecto a las personas afectadas (dominio).

La relación entre persona afectadas por los deslizamientos de tierra (rango) y la temperatura (dominio) se estableció con una función cuadrática positiva acotada a la izquierda, mientras que los bienes afectados (rango) se modelaron respecto a las personas afectadas (dominio) con una función lineal. De igual manera, la relación entre persona afectadas por incendios forestales (rango) y la relación P/T (dominio), se definió con una función cuadrática positiva acotada a la derecha, donde a partir de los valores de P/T menores de 120.32, los incendios forestales se incrementan exponencialmente, ya que el clima tiende a ser más cálido y seco. En la Tabla 3.11, se observa el aumento de los riesgos de desastres, en la medida que la alteración del clima aumenta.

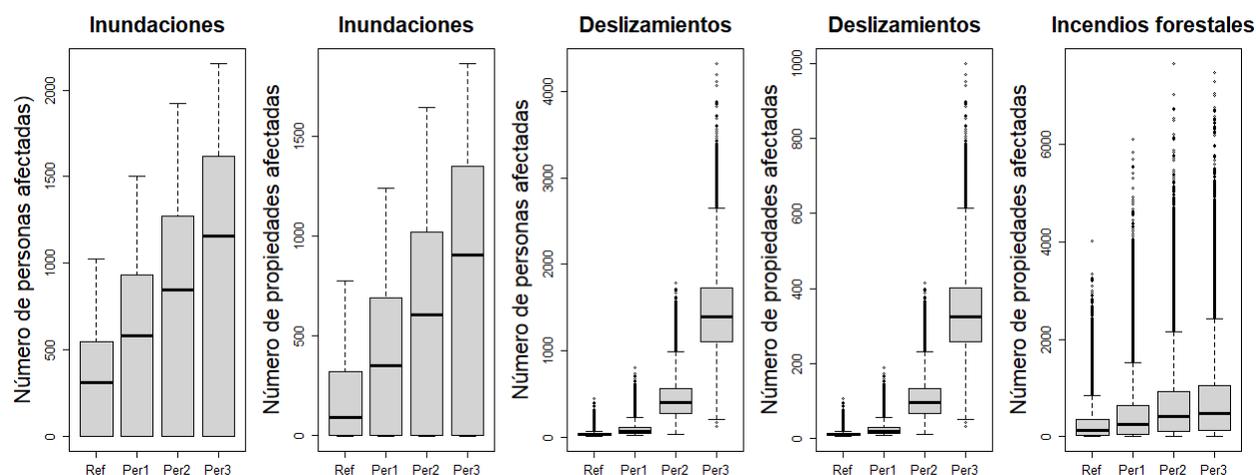
**Tabla 3.11.** Rango y dominio de los riesgos de desastres

Riesgos	Dominio	Rango Óptimo	Riesgos del escenario RCP8.5 (%)		
			Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3
Población afectada por inundaciones	1123.3 -1753.8 mm	1433 mm	-71.0	-138.5	-213
Población afectada por deslizamientos	$\mathbb{R}^+$ (°C)	12.9 °C	-150.31	-1085.865	-3822.2
Bienes afectados por incendio forestales	0 - 120.32 (mm/°C)	117.65 mm/°C	-77.632	-157.86	-191.1

Nota: Números reales positivos ( $\mathbb{R}^+$ ).

De acuerdo con los cambios esperados en el periodo 3 del escenario RCP8.5, el riesgo de personas y bienes afectados por inundaciones será de 213% y 797,7% respectivamente. Por deslizamientos de tierra el riesgo de personas y bienes afectados será de 3822% y 3079% respectivamente, mientras que la simulación de los bienes afectados por incendios forestales será de 207,38% (no se reportan personas afectadas por incendios forestales) (Figura 3.7).

El hecho de que los modelos de incendios forestales y de deslizamientos de tierra generen resultados muy altos (exponenciales), se explica porque los valores generados por estos modelos se obtienen de funciones cuadráticas positivas, y esto se debe a que las medidas implementadas a nivel local para controlar estos riesgos aún no son significativas para cambiar su tendencia a funciones cuadráticas negativas, como si ocurrió con los eventos de inundación. No obstante, en la mayoría de los desastres, las personas más afectadas son aquellas que pertenecen a los grupos más vulnerables (Cabello, Véliz, Moncada-Arce, García-Huidobro & Juillerat, 2021), que por sus condiciones sociales y económicas se ven obligadas a ocupar zonas de alto riesgo (Atienza et al., 2019). Esta situación hace que los costos de atención en salud se incrementen alrededor del 1439.82%.



**Figura 3.7** Simulación de personas y bienes afectados por desastres bajo el cambio climático.

Si las condiciones de gestión del riesgo y el crecimiento de la población se mantienen similares a las tendencias definidas en el período de referencia, los riesgos de catástrofes para los escenarios futuros aumentarán exponencialmente (funciones cuadráticas positivas), siendo los riesgos asociados a los deslizamientos los más importantes (Tabla 3.12).

**Tabla 3.12.** Riesgos de desastres

<b>Variables</b>	<b>Periodo 1</b>	<b>Periodo 2</b>	<b>Periodo 3</b>	<b>Riesgo</b>	<b>Percentil</b>
Personas y propiedades afectadas por las inundaciones	42.64%	54.32%	62.12%	Intermedio	P95
Personas y propiedades afectadas por deslizamientos de tierra	40.88%	98.94%	100%	Alto	P95
Propiedades afectadas por incendios forestales	15.40%	25.70%	29.79%	Bajo	P95

Según Novillo (2018) estos desastres son comunes en varias ciudades intermedias de América Latina (Brasil, México, Argentina, Venezuela, Colombia y Perú), que experimentan el mayor número de desastres asociados al cambio climático, siendo probable que estos desastres se intensifiquen en el futuro.

Si bien los modelos de desastres tienden a ser exponenciales, la identificación de las áreas de inundación y de deslizamientos de tierra, junto con las medidas estrictas de ocupación y el fortalecimiento de programas de educación ambiental que lidere las administraciones municipales, contribuirán a reducir significativamente la probabilidad de que estos eventos se produzcan.

### **3.3.2.6 Riesgos para la salud pública**

Las relaciones causales entre la incidencia de morbimortalidad de las EDA e IRA, y el clima (P/T), se establecieron con funciones cuadráticas positivas, que se ajustan con las evidencias identificadas con otros autores. Por ejemplo, Levy et al. (2016) identificaron que las EDA se incrementan después de fuertes lluvias. Mientras que Rodríguez-Pacheco et al. (2019) identificaron que las EDA, también se incrementan en condiciones de altas temperaturas y sequías, asociadas a las condiciones de insalubridad. De igual manera, ocurre con las IRA, como lo sugieren Mehdi et al. (2016), quienes identificaron que estos casos se incrementan bajo condiciones climáticas extremas como olas de calor, inundaciones, tormentas, sequías e incendios forestales.

A nivel local, se observó que la incidencia de EDA e IRA afecta de forma diferente según los grupos de edad. La primera corresponde a los niños menores de 5 años y la segunda al resto de la población (adultos). Mientras que la incidencia de mortalidad por EDA e IRA afecta sólo a la población menor de 5 años (IDSN, 2020). Según (Mehdi et al., 2016), esto ocurre porque el organismo de los niños pequeños no se adapta fácilmente al estrés producido por la variación del clima y la contaminación atmosférica, como si lo hace el organismo de los adultos.

A partir de estas relaciones se obtuvo la población total afectada, el índice de mortalidad (porcentaje de niños fallecidos respecto a los enfermos) y los costos de atención en salud a valor presente. Los costos de atención de EDA para menores de 5 años se estimaron en USD 1866 ± 1119 y, para la población adulta se reduce el 30% (Galeano y Largo, 2015), mientras que los costos por IRA para toda la población se estimaron en USD 257 ± 41 (Bernal-Aguirre *et al.*, 2017).

En este sentido, el dominio de las funciones cuadráticas positivas establecidas a nivel local corresponde a los valores posibles de la variable P/T (números reales positivos), mientras, el rango muestra los valores de la incidencia de EDA e IRA (números reales positivos) según la condición de P/T y, por lo tanto, el vértice de estas funciones indica la menor incidencia, cuando las condiciones climáticas son las adecuadas. (Tabla 3.13).

**Tabla 3.13** Rango y dominio del riesgo de incidencia de las EDA y las IRA

Salud	Dominio	Rango Optím0	Riesgos del escenario RCP8.5 (%)		
			Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3
EDA Incidencia Niños	90 - 130 (mm/°C)	115.2 mm/°C	-0.7541	-2.086	-0.0010
EDA Incidencia Adultos	90 - 150 (mm/°C)	115.1 mm/°C	-0.9729	-2.5	-0.0909
IRA Incidencia Niños	90 - 130 (mm/°C)	121.2 mm/°C	-0.5829	-1.326	-0.3565
IRA Incidencia Adultos	90 - 150 (mm/°C)	120.1 mm/°C	-0.5811	-1.189	-0.3494

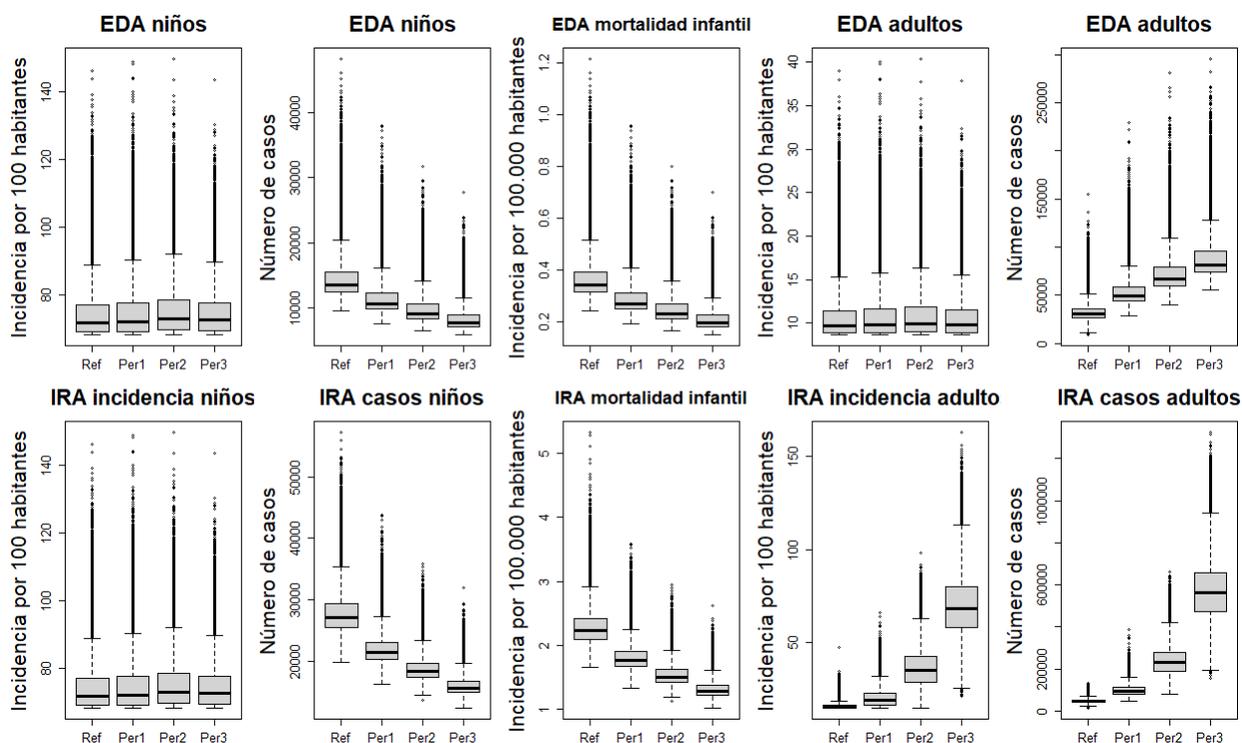
La incidencia de EDA e IRA en los periodos de proyección, tanto en niños menores de 5 años como en la población adulta aumentará ligeramente debido al aumento de P/T (es decir, cuando las condiciones climáticas son más cálidas y húmedas). Según D'Amato *et al.* (2016), estas nuevas condiciones favorecerán el aumento de las IRA, debido al incremento de alérgenos ambientales como el polen y el moho, los cuales según Paudel *et al.* (2021) se relacionan positivamente con la temperatura y las precipitaciones.

El aumento de la EDA se relaciona con la ocurrencia de eventos de precipitación extrema, especialmente después de períodos secos prolongados, donde aumenta la presencia de giardiasis y criptosporidiosis (Chetri *et al.*, 2017). Además, la contaminación de los alimentos y el agua con microorganismos patógenos asociada a las inundaciones y los desprendimientos de tierra (Lin, Sun, Fitzgerald y Hwang, 2016).

En los periodos de proyección, los riesgos de EDA o IRA para los menores de 5 años disminuirán en 41,71% y 42,07%, respectivamente, al igual que las tasas de mortalidad. Sin embargo, esto se debe a la drástica reducción de la población menor de 5 años (DANE, 2019) y no

a las condiciones climáticas que de acuerdo con los modelos correlacionales entre clima e incidencia de EDA e IRA no se observan alteraciones significativas.

Lo mismo ocurre con la incidencia de EDA e IRA en la población adulta, salvo por el crecimiento poblacional de este grupo, donde los riesgos de padecer EDA e IRA aumentarán 172,94% y 173,7% respectivamente, incrementando los costos de atención en salud en 173,5% (a valor presente) (Figura 3.8). El modelo asume que las condiciones de salud se mantendrán similares al periodo climático de evidencia. Aunque estos riesgos dependerán de las políticas en salud que se implementen en el futuro. Además, se espera que, con un calentamiento de 2 °C, alcance los umbrales críticos de tolerancia para la salud (IPCC, 2021).



**Figura 3.8** simulación de la dinámica de la salud pública bajo el cambio climático.

En los periodos de proyección, la incidencia de EDA e IRA tanto en menores de 5 años como en la población adulta aumentará ligeramente, mientras que el número de casos de morbilidad y mortalidad en la población infantil se reducirá significativamente (convirtiéndose en un resultado favorable), en contraste con la población adulta, que aumentará significativamente. Esto se debe a la posible disminución de la población infantil que experimentará el municipio en los próximos años (DANE, 2019) (Tabla 3.14). Aunque estos riesgos también dependerán de las

políticas sanitarias que se implementen en el futuro, el IPCC (2021) señala que el umbral de tolerancia sanitaria se alcanzará cuando se llegue a los 2 °C.

**Tabla 3.14** Riesgos en salud pública

<b>Variables</b>	<b>Periodo 1</b>	<b>Periodo 2</b>	<b>Periodo 3</b>	<b>Riesgo</b>	<b>Percentil</b>
Incidencia de EDA en niños	5.43%	5.85%	4.09%	Bajo	P95
Casos de morbilidad y mortalidad por EDA	62.23%	81.20%	93.72%	Sin riesgo	P5
Incidencia del EDA en adultos	5.43%	5.84%	4.09%	Bajo	P95
Casos de EDA en adultos	44.38%	98.31%	100.00%	Alto	P95
Incidencia de IRA en niños	5.50%	5.93%	4.17%	Bajo	P95
Casos de morbilidad y mortalidad por IRA	79.16%	96.66%	99.82%	Sin riesgo	P5
Incidencia de IRA en adultos	44.28%	97.95%	100.00%	Alto	P95
Casos de IRA en adultos	100.00%	100.00%	100.00%	Alto	P95

### **3.3.3** *Validez de los riesgos previstos e implicaciones para la gestión de la ciudad*

Los altos niveles de incertidumbre en la predicción de la evolución del sistema urbano basado en los escenarios RCP y las tendencias identificadas en el periodo climático de evidencias se deben a que globalmente existen muchos caminos de decisión para combatir el cambio climático, mientras que localmente también existen muchas alternativas para intervenir el territorio, las cuales pueden incidir significativamente en las tendencias actuales, como ocurre con el riesgo de inundación. Sin embargo, con los supuestos establecidos es posible inferir que los impactos del cambio climático no colapsarán al sistema urbano, pero si generarán cargas significativas en su gestión, si no se implementan medidas pertinentes.

Por otra parte, la información disponible con la que se nutre la RB del sistema urbano es muy escasa, por lo que algunos modelos aún no tienen una estructura claramente definida y otros generan resultados aparentemente desbordados. No obstante, las corridas de las simulaciones con el método de RB se hacen con una gran cantidad de muestras (100,000) con la que se intenta reducir la incertidumbre. Además, en la medida que evolucionen las intervenciones sobre el modelo urbano, la RB permite incorporar la nueva información que se vaya generando, al mismo tiempo que actualiza las creencias del razonamiento probabilístico. Las principales intervenciones que busca implementar en el municipio de Pasto son las siguientes: i) Ciudad Sostenible y Competitiva como parte de la Iniciativa de Ciudad Emergentes y Sostenibles (ICES); ii) declaratorias de UNESCO como Ciudad Creativa en Artesanía y Arte Popular; iii) Patrimonio Cultural e Inmaterial de la Humanidad (Carnavales de negros y blancos); iv) Patrimonio Inmaterial

de la Humanidad en Calidad de Salvaguardia (Barniz de Pasto); y v) Programa de Biodiversidad, liderado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en el marco de la COP26 de Glasgow. En general estas estrategias tienen el propósito de mejorar el bienestar y la calidad de vida de las personas, mediante el impulso a economías sostenibles que integren y prioricen la biodiversidad, el desarrollo urbano sostenible, la riqueza natural y las acciones para hacer frente al cambio climático.

### 3.4 CONCLUSIONES

La novedad de esta investigación consiste en la evaluación integral de los impactos del cambio climático, en el municipio de Pasto mediante el método de redes bayesianas, donde las relaciones causales se obtuvieron con los métodos de análisis estructural, Delphi y dinámica de sistemas. Mientras que las evidencias se asumieron con los escenarios RCP, y las creencias con los modelos de correlaciones, que permitieron predecir los riesgos del sistema urbano en el marco del cambio climático.

En los escenarios RCP las anomalías de temperatura y precipitación muestran tendencias alcistas, donde el escenario RCP8.5, es el que mayor riesgo representa para el sistema urbano. Sin embargo, las condiciones actuales del clima parecen indicar que seguirán las tendencias establecidas en el escenario RCP8.5, a pesar a los compromisos mundiales de mantener la temperatura por debajo de 1.5°C.

Actualmente la oferta hídrica es inferior a la demanda, por lo que el agua podría convertirse en un elemento limitante del desarrollo, si su población humana continúe creciendo al ritmo actual. Si bien, el incremento de la precipitación aumentará la disponibilidad de agua, la falta de gestión y/o la inadecuada planificación del territorio, incrementará exponencialmente las inundaciones y deslizamientos de tierra, que además de los bienes, también impactaran en la salud de las personas, pero especialmente en la población menor de 5 años.

La alteración progresiva del clima afectará el rendimiento de los cultivos de forma exponencial. El cultivo de repollo será el más sensible, por lo que su producción desaparecerá a partir del periodo 2 del escenario RCP2.6 (escenario más favorable), seguido de los cultivos de frijol y maíz que desaparecerán a partir del periodo 2 del escenario RCP4.5. Un poco más resistentes parecen ser los cultivos de fique y cebolla junca, donde las pérdidas de rendimientos empezarán a partir del periodo 3 del escenario RCP6.0, y el menos afectado será el trigo, aunque

su producción tendrá alta incertidumbre. No obstante, los cultivos de coliflor y mora tendrán un ligero rendimiento positivo y en mayor medida los cultivos de zanahoria y papa. Por lo que se requiere más investigación científica, orientada a promover la adaptabilidad de los cultivos autóctonos mediante el mejoramiento del material genético. Respecto al sector ganadero no se esperan riesgos significativos en el confort animal, aunque su principal amenaza se cierne en el crecimiento de los movimientos sociales que desestimulan el consumo de sus productos, debido a la insostenibilidad de la producción y a los efectos negativos en la salud de las personas.

La seguridad alimentaria entendida como la capacidad de un territorio para generar su propia energía alimentaria parece estar en riesgos debido a varios factores, entre ellos, el cambio climático que alterará el rendimiento de los cultivos; la importación de alimento que desestimulará la producción nacional y local, generando dependencia hacia otros países, los cuales no estarán exentos de los impactos del cambio climático; así como la limitada disponibilidad de tierra para la producción agropecuaria, que aumentará el déficit de la producción local si la población continúa creciendo al ritmo establecido.

Todos los riesgos de desastres asociados al cambio climático se incrementarán, siendo los deslizamientos de tierra los más significativos, seguidos de inundaciones y en menor medida los incendios forestales. Sin embargo, el crecimiento poblacional, la ocupación de zonas de riesgo por población vulnerable, el desarrollo económico y la gestión local, serán determinantes en su evolución.

El periodo de simulación es muy largo, por lo que los supuestos adoptados en este modelo dejarán de ser válidas muy rápidamente, y definir su tendencia es casi imposible. Sin embargo, este tipo de modelos permiten redefinir las tendencias y creencias, en cuanto se disponga de nueva información para incorporar en el modelo.

Pese a que la información de las variables urbanas es escasa, los modelos de correlaciones propuestos permitieron identificar las trayectorias que seguirán las variables urbanas respecto a la evolución del cambio climático, por lo que, es importante continuar recopilando esta información, con el fin de ajustar, confirmar o rechazar las trayectorias identificadas y, por lo tanto, los riesgos.

Se recomienda reevaluar los escenarios RCP en el marco del Sexto informe de evaluación del IPCC, ya que la serie de precipitación del periodo 2006-2019 es mayor que las proyectadas, por lo que se infiere que el escenario más probable es el RCP8.6.

## CONCLUSIONES GENERALES

Teniendo en cuenta la evolución actual del clima a nivel mundial, podemos afirmar que sus impactos a nivel local son difíciles de rastrear, ya que aún no se manifiestan con una intensidad significativa. Sin embargo, esos impactos existen, pero pasan inadvertidos por las comunidades y los gobiernos locales, o en el mejor de los casos se vinculan a los impactos de las actividades antrópicas locales. No obstante, el diseño metodológico propuesto en esta investigación, nos permitió identificar estadísticamente los impactos y la manera en que ellos inciden en los elementos urbanos del municipio de Pasto, y a partir de ellos predecir los riesgos a corto, mediano y largo plazo.

En este sentido, en el capítulo I definimos los elementos principales que inciden en el desarrollo del territorio, los describimos e identificamos sus principales características (funciones, entropías y sinergias). Posteriormente definimos las relaciones causales entre economía, cultura, gobierno, urbanismo, medios de vida, recursos naturales y salud, los cuales inciden en el nivel y la calidad de vida de la población. De esta manera, encontramos que las principales relaciones entre los elementos urbanos se dan entre economía, salud y educación, seguidas de las relaciones entre gobernabilidad, clima, ambiente, funcionalidad, demografía y energía, y en menor grado entre seguridad salud y economía. El clima es un elemento explicativo o de poder que incide en el desarrollo local, sin embargo, el incremento de los GEI a corto o mediano plazo podrá alterar su equilibrio de manera irreversible, convirtiéndolo en un elemento limitativo del desarrollo. Lo anterior se puede agudizar en un esquema de planificación territorial que aún no se aborda desde un visión holística y sistémica.

En el capítulo II, partiendo de las relaciones identificadas en el capítulo anterior y la información disponible a nivel local, definimos las variables y las series de tiempo que describen los elementos urbanos. Posteriormente realizamos pruebas de estacionalidad en las series de temperatura y precipitación correspondientes al periodo de referencia (1976-2005) y al periodo climático de evidencias (2006-2019). Al comparar las pruebas de estabilidad en los dos periodos, encontramos cambios importantes en dichas series, lo que indica que la temperatura y la precipitación en el periodo 2006-2019, están experimentando perturbaciones en su comportamiento respecto al periodo de referencia.

Con base en esta información, establecimos modelos correlacionales entre las variables urbanas (con registro desde 2004) y las variables climáticas. Los principales hallazgos muestran que el impacto del clima en las variables urbanas se expresa mediante funciones cuadráticas respecto a la variabilidad del clima, lo cual significa que pequeños cambios en la temperatura y precipitación (exceso o defecto) pueden generar cambios significativos en las variables urbanas. Aunque no todas las correlaciones fueron validadas estadísticamente, los modelos correlacionales generaron tendencias similares a las reportadas en diferentes artículos científicos revisados.

En el capítulo III, con las ecuaciones obtenidas en los modelos correlacionales y con las proyecciones climáticas de los escenarios RCP elaborados por el IDEAM, construir un modelo estocástico con redes bayesianas que nos permitió predecir el riesgo de las variables urbanas a corto, mediano y largo plazo. Los riesgos más significativos a nivel local se encuentran en el escenario RCP8.5, además de ser el más probable. A nivel de variables, encontramos que Pasto a corto plazo y en el marco de un crecimiento población que siga la tendencia actual, tendrá que afrontar un gran déficit de agua. De igual manera, en todos los escenarios se espera un aumento de los eventos de desastres territoriales, especialmente en los eventos de deslizamientos de tierra, seguido de las inundaciones, y en menor medida los incendios forestales. Lo anterior estará sujeto a las medidas que se adopten a nivel municipal para prevenir la ocurrencia de estos desastres.

Respecto a los medios de vida se espera una disminución importante en el rendimiento de la mayoría de los cultivos y, por lo tanto, de su producción (excepto los cultivos de papa, zanahoria y mora), lo cual incidirá de forma negativa en la seguridad alimentaria, y se agudizará en la medida que la población aumente. Finalmente, no se esperan incrementos importantes en la incidencia de las enfermedades IRA y EDA, debido probablemente a la capacidad de los seres humanos para adaptarse con mayor facilidad a los cambios de clima.

Por lo tanto, y con base en los resultados obtenidos, la respuesta a la pregunta de investigación corresponde a la hipótesis alternativa, la cual establece que los riesgos significativos para el municipio de Pasto y su ciudad intermedia de la región Andina de Colombia, en el marco de los escenarios de cambio climático proyectados por el IDEAM para los periodos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100, están relacionados con la alteración de la disponibilidad de agua, la pérdida de la producción agrícola, repercusiones en la seguridad alimentaria, el número de desastres territorial y la incidencia de enfermedades de salud pública.

De ahí que adoptar medidas como reubicar los asentamientos humanos de las zonas de riesgo, promover actividades para el mejoramiento del material genético de los cultivos y para la adaptación de otros, fomentar campañas de uso eficiente y ahorro del agua, hacer un adecuado control demográfico, y estimular la generación de nuevas formas de economías locales para disminuir la brecha entre ricos y pobres, ayudará a que los impactos previstos del cambio climático a nivel local no generen alteraciones significativas que pongan en riesgo la estructura socioeconómica y ambiental del municipio.

Por otra parte, una identificación temprana y una gestión oportuna pueden contribuir a reducir los riesgos del cambio climático en el municipio de Pasto, por lo que se invita a los gobiernos locales y a la comunidad en general, a seguir promoviendo iniciativas que permitan consolidar a Pasto como un municipio resiliente y sostenible, que genere nuevas dinámicas entre las relaciones sociales, económicas y ambientales, basadas en la protección de los recursos naturales y en la calidad humana de su gente.

## REFERENCIAS

- Abrutzky, R., Torres, A., Ossorio, M. y Ferrero F. (2017). Impacto de la contaminación atmosférica y el clima en las consultas a un departamento de emergencias pediátrico en la ciudad de Buenos Aires. *Revista de la Facultad de Ciencias Médicas de Córdoba*, 74(4), 365-371. <http://dx.doi.org/10.31053/1853.0605.v74.n4.17495>
- Aguilar, A., Aguilar, M., Reyes, H. y Guzmán, M. (2018). Gobernanza ambiental y pagos por servicios ambientales en América Latina. *Sociedad y Ambiente*, (16), 7-31. <http://www.scielo.org.mx/pdf/sya/n16/2007-6576-sya-16-7.pdf>
- Alcaldía de Pasto. (2021). POT – 2015 – 2027. <https://www.pasto.gov.co/index.php/component/phocadownload/category/396?Itemid=810>
- Alcaldía de Pasto, Unidad de Planeación Minero-Energética y Embajada de Suiza (2019). Iniciativa Ciudad Energética – Estrategia Energética Local de Pasto Resumen Ejecutivo.
- Alcaldía de Pasto. (2015) Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Pasto 2015 – 2027 Pasto Territorio Con – Sentido (Acuerdo Numero 004). Emitido el día 14 de abril de 2015. <https://www.pasto.gov.co/index.php/nuestras-dependencias/secretaria-de-planeacion/plan-de-ordenamiento-territorial>
- Alcaldía de Pasto. (2014a). Documento diagnóstico ambiental. <https://www.pasto.gov.co/index.php/component/phocadownload/category/397-cuadernos-diagnosticos-pot-2015-2027>
- Alcaldía Municipal de Pasto. (2014b). Cuaderno diagnostico gestión del riego. <https://www.pasto.gov.co/index.php/component/phocadownload/category/397-cuadernos-diagnosticos-pot-2015-2027>
- Alcaldía de Pasto. (2014c). Documento diagnóstico urbano. <https://www.pasto.gov.co/index.php/component/phocadownload/category/397-cuadernos-diagnosticos-pot-2015-2027>
- Alcaldía de Pasto. (2014d). Plan de Ordenamiento Territorial - Económico. <https://www.pasto.gov.co/index.php/component/phocadownload/category/397-cuadernos-diagnosticos-pot-2015-2027>

- Álvarez, F.S. y Marín, L.A. (2018). Las guaguas de pan, tradición, semiótica y cultura andina de Nariño. *VMIDEA*, 6, 10-13. <https://revia.areandina.edu.co/index.php/ASD/article/view/1475/1419>
- Alzate-Velásquez, D.F., Araujo-Carrillo, G.A., Rojas-Barbosa, E.O., Gómez-Latorre, D.A., y Martínez-Maldonado, F.E. (2018). Interpolación Regnie para lluvia y temperatura en las regiones Andina, Caribe y Pacífica de Colombia. *Colombia Forestal*, 2(1), 102-118. <http://www.scielo.org.co/pdf/cofo/v21n1/0120-0739-cofo-21-01-00102.pdf>
- An, R., Liu P., Cheng, L., Yao, M., Li, H, Wang, Y. (2021). Network analysis of the food–energy–water nexus in China's Yangtze River Economic Belt from a synergetic perspective. *Environmental Research Letters*, 16(5). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe25e>
- Aprada, C., D'Ambrosio, V., & Martino, F.D. (2019). A climate vulnerability and impact assessment model for complex urban systems. *Environmental Science & Policy*, 93, 11-26.
- Arango, X., y Cuevas, V. (2014). Método de análisis estructural: matriz de impactos cruzados multiplicación aplicada a una clasificación (MICMAC) [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, México].
- ARUP. (2018). Índice de resiliencia de la ciudad. <https://cityresilienceindex.org/#/>
- Atienza, M., Eadie, P. & Tan-Mullins, M. (2019). Urban poverty in the wake of environmental disaster: rehabilitation, resilience, and typhoon Haiyan (Yolanda) (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315210056>
- Aurrekoetxea, Maite (2018) “Deconstruyendo la resiliencia urbana”. OBETS. *Revista de Ciencias Sociales*, 13(Extra 1): 229-255. <https://doi.org/10.14198/OBETS2018.13.1.09>
- Aven, T. and Renn, O. (2015), An Evaluation of the Treatment of Risk and Uncertainties in the IPCC Reports on Climate Change. *Risk Analysis*, 35, 701-712. <https://doi.org/10.1111/risa.12298>
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2016). Guía Metodológica iniciativa ciudades emergentes y sostenibles. <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Gu%C3%ADa-Metodol%C3%B3gica-Programa-de-Ciudades-Emergentes-y-Sostenibles-Tercera-edici%C3%B3n.pdf>
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2015). Las ciudades intermedias con mayor potencial en Colombia, un sistema de identificación.

- <https://publications.iadb.org/es/publicacion/13859/las-ciudades-intermedias-con-mayor-potencial-en-colombia-un-sistema-de>
- Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento (BIRF) y Banco Mundial (BM). (2017). Doing Business en Colombia 2017. <https://espanol.doingbusiness.org/content/dam/doingBusiness/media/Subnational-Reports/DB17-Sub-Colombia.pdf>
- Bárcena, A., Samaniego, J.L., Peres, W., y Alatorre, J. E. (2020). La emergencia del cambio climático en América Latina y el Caribe: ¿seguimos esperando la catástrofe o pasamos a la acción?”, Libros de la CEPAL, N° 160 (LC/PUB.2019/23-P), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Barati, A., Azadi, H., Dehghani, M., Lebailly, P., & Qafori, M. (2019). Determining Key Agricultural Strategic Factors Using AHP-MICMAC. *Sustainability*, 11(14), 3947. doi: <https://doi.org/10.3390/su11143947>
- Bárcena, A., Samaniego, J., Galindo, L., Ferrer, J., Alatorre, J., Stockins, P., Reyes, O., Sánchez, L. y Mostacedo, J. (2018). La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: una visión gráfica (LC/TS.2017/84/Rev.1), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)
- BayesFusion, LLC. (2020a) ‘GeNIe Modeler USER MANUAL’, BayesFusion, LLC. <https://support.bayesfusion.com/docs/GeNIe.pdf>
- Bayes Fusion, LLC (2020b). Welcome to BayesFusion website. <https://www.bayesfusion.com/>
- Bayes Fusion, LLC (2020c). Our Software: A Complete Modeling Environmentt. Retrieved from <https://www.bayesfusion.com/product-list/>
- Bayón, M. (2018). El neoinstitucionalismo y el Banco Mundial: gobernabilidad y gobernanza. *Economía y Desarrollo*, 160(2). <http://scielo.sld.cu/pdf/eyd/v160n2/0252-8584-eyd-160-02-e12.pdf>
- Becker, E., & Lawrence, N. (2021). Meat disgust is negatively associated with meat intake – Evidence from a cross-sectional and longitudinal study. *Appetite* 164(1), 105299. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2021.105299>
- Bernal-Aguirre C, Carvajal-Sierra H, y Alvis-Zakzuk N. (2017). Costos económicos de la infección respiratoria aguda en un Municipio de Colombia. *Rev Univ Ind Santander Salud*, 49(3), 470-477. <http://dx.doi.org/10.18273/revsal.v49n3-2017005>

- Bianchi, E., Szpak, Carolina. (2016). Seguridad Alimentaria y el Derecho a la Alimentación Adecuada. *Revista Brasileira de Estudos Jurídicos*. 11(2), 37-45. [https://assetssetelagoas.fasa.edu.br/arquivos/old/arquivos/files/RBEJ%20v\\_11,%20n\\_2\\_2\\_016.pdf#page=37](https://assetssetelagoas.fasa.edu.br/arquivos/old/arquivos/files/RBEJ%20v_11,%20n_2_2_016.pdf#page=37)
- Bonet-Morón, J., Ricciulli-Marín, D., Pérez-Valbuena, G., Galvis-Aponte, L., Haddad, E., Araújo, I. y Perobelli, F. (2020). Impacto económico regional del Covid-19 en Colombia: un análisis insumo-producto. *Banco de la Republica Centro de Estudios Económicos regionales (CEER) – Cartagena*, 288. <https://doi.org/10.32468/dtseru.288>
- Cabello, V.M., Véliz, K.D., Moncada-Arce, A.M., García-Huidobro M.I., & Juillerat, F. (2021). Disaster risk reduction education: Tensions and connections with sustainable development goals. *Sustainability*, 13(19). doi: 10933. 10.3390/su131910933
- Cabo, V. (2020). Reflexiones en torno a la gestión del conocimiento territorial en el municipio de Jamundí, Valle del Cauca. *Revista Gestión y Desarrollo*, 14(1)
- Camacho, T. (2012). Arquitectura religiosa en San Juan de Pasto. [https://2016-2019.xn--nario-rt-a.gov.co/inicio/files/Publicaciones/ARQUITECTURA\\_RELIGIOSA\\_EN\\_SAN\\_JUAN\\_DE\\_PASTO\\_TRABAJO\\_FINAL\\_CORREGIDO.pdf](https://2016-2019.xn--nario-rt-a.gov.co/inicio/files/Publicaciones/ARQUITECTURA_RELIGIOSA_EN_SAN_JUAN_DE_PASTO_TRABAJO_FINAL_CORREGIDO.pdf)
- Cámara de Comercio de Pasto de Pasto (2021). Pasto designada por la UNESCO como “Ciudad Creativa en Artesanía y Arte Popular 2021”. <https://www.ccpasto.org.co/pasto-designada-por-la-unesco-como-ciudad-creativa-en-artesania-y-arte-popular-2021/>
- Cámara de Comercio de Pasto (2019). Boletines estadísticos. <https://www.ccpasto.org.co/boletines-estadisticos/>
- Cámara de Comercio de Pasto (2016). Informe Coyuntura Económica Regional Departamento de Nariño. <https://www.ccpasto.org.co/wp-content/uploads/2017/03/Informe-de-Coyuntura-Economica-Regional-2016.pdf>
- Canals., M. (2019). Bases científicas del razonamiento clínico: inferencia Bayesiana. *Revista médica de Chile*, 147(2), 231-237. <https://dx.doi.org/10.4067/s0034-98872019000200231>
- Capano, G., Howlett, M. y Ramesh, M. (2015) Bringing Governments Back in: Governance and Governing in Comparative Policy Analysis. *Journal of Comparative Policy Analysis: Research and Practice*, 17(4), 311-321. <https://doi.org/10.1080/13876988.2015.1031977>

- Cárdenas, L. (2015). La epistemología del análisis económico estructural. *Cinta de Moebia, Revista de Epistemología de Ciencias Sociales*, 54, 218-239. <https://scielo.conicyt.cl/pdf/cmoebio/n54/a01.pdf>
- Cárdenas, S., Muñoz, D., Reales, C., Zabala, A., & Gelves, O. (2020). *Modelo de dinámica de sistemas para el progreso del sras-cov- 2 (covid-19) en Colombia*. Bogotá - Colombia: Universidad Santo Tomás. Doi: [10.13140 / RG.2.2.33665.89448](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33665.89448)
- Cardona, F. (2018). Pasto, La ciudad que se enfrentó a la independencia. *Revista Nova et Vetera*, 3(34). <https://urosario.edu.co/Revista-Nova-Et-Vetera/Vol-3-Ed-34/Columnistas/Pasto-La-ciudad-que-se-enfrento-a-la-independenci/>
- Centro de Estudios de Desarrollo Regional y Empresarial (CEDRE). (2011) Cuentas económicas del municipio de Pasto. 2005 – 2010. San Juan de Pasto. Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas, Universidad de Nariño.
- Chandra, R., Cripps, S., Butterworth, N., Muller, R. (2021). Precipitation reconstruction from climate-sensitive lithologies using Bayesian machine learning. *Environmental Modelling & Software*, 19, 105002. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105002>
- Chapman, R., Howden-Chapman, P., y Capon, A.G. (2016). Understanding the systemic nature of cities to improve health and climate change mitigation. *Environment international*, 94, 380-387. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.04.014>
- Charlson, F., Ali, S., Benmarhnia, T., Pearl, M., Massazza, A., Augustinavicius, J., Scott, J.G. (2021). Climate change and mental health: A scoping review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(9),4486. <https://doi.org/10.3390/ijerph18094486>
- Chatziioannou, I. y Alvarez-Icaza, L. (2017). Un método de análisis estructural para la gestión de la infraestructura de transporte urbano y su entorno urbano, *Cogent Engineering*, 4(1). 1326548. <https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1326548>
- Cheng, W., Li, D., Liu, Z., Brown, R. (2021). Approaches for identifying heat-vulnerable populations and locations: A systematic review. *Science of The Total Environment*, 799, 149417. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721044910?via%3Dihub>

- Chesini, F., Abrutzky, R., de Titto, E. Mortalidad por olas de calor en la ciudad de Buenos Aires, Argentina (2005-2015). *Cadernos de Saúde Pública* [online], 35(9) e00165218. <https://doi.org/10.1590/0102-311X00165218>
- Chhetri, B., Takaro, T., Balshaw, R., Otterstatter, M., Mak, S., Lem, M., Zobel, M., Lysyshyn, M., Clarkson, L., Edwards, J., Fleury, M., Henderson, S., Galanis, E. (2017). Associations between extreme precipitation and acute gastro-intestinal illness due to cryptosporidiosis and giardiasis in an urban Canadian drinking water system (1997–2009). *Water Health*, 15(6), 898–907. <https://doi.org/10.2166/wh.2017.100>
- Chiarito, E., Zimmermann, E. y Méndez, S. (2018). Metodologías para la estimación del coeficiente de escorrentía en áreas urbanizadas mediante teledetección. <https://doi.org/10.35305/curiham.v24i0.126>
- Chong, K., Chan, E., Lee, T., Kwok, K., Lau, S., Wang, P., Lam, H., Goggins, W., Mohammad, K., Leung, S., Chan, P. (2021). A 21-year retrospective analysis of environmental impacts on paediatric acute gastroenteritis in an affluent setting. *Science of The Total Environment*, 764, 142845. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142845>.
- Chowdhury, M., Kabir, M., Sayed, A. & Hossain, S. (2016). Estimation of rainfall patterns in Bangladesh using different computational methods (arithmetic average, Thiessen polygon and isohyet). *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences (JBES)*, 8(1), 43-51. [https://www.researchgate.net/profile/Md-Ashraful-Chowdhury/publication/309935619\\_Assessment\\_of\\_river\\_encroachment\\_and\\_land-use\\_patterns\\_in\\_Dhaka\\_city\\_and\\_its\\_peripheral\\_rivers\\_using\\_GIS\\_techniques/links/6083f21e907dcf667bbdf66/Assessment-of-river-encroachment-and-land-use-patterns-in-Dhaka-city-and-its-peripheral-rivers-using-GIS-techniques.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Md-Ashraful-Chowdhury/publication/309935619_Assessment_of_river_encroachment_and_land-use_patterns_in_Dhaka_city_and_its_peripheral_rivers_using_GIS_techniques/links/6083f21e907dcf667bbdf66/Assessment-of-river-encroachment-and-land-use-patterns-in-Dhaka-city-and-its-peripheral-rivers-using-GIS-techniques.pdf)
- CNC Noticias Pasto. (2 sep. 2019). Emergencias en Nariño por incendios forestales. [Video]. <https://www.youtube.com/watch?v=0N9gxGq3x9w>
- Cócola, F. (2017). Integrando la teoría del apego al modelo sistémico, cibernético y constructivista. *Revista de Psicoterapia relacional e intervenciones sociales*, (35), 11-20. <http://www.redesdigital.com.mx/index.php/redes/article/view/192/151>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2020). Salud y economía: una convergencia necesaria para enfrentar el COVID-19 y retomar la senda hacia el desarrollo sostenible en América Latina y el Caribe. Santiago

- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2015). La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe. Paradojas y desafíos del desarrollo sostenible. Santiago de Chile.
- Consejo Privado de Competitividad y Universidad del Rosario. (2020). Índice de Competitividad de ciudades. <https://compite.com.co/indice-de-competitividad-de-ciudades/>
- Contexto ganadero. (31 de julio de 2015). Ganadería sostenible. CONtextoganadero. <https://www.contextoganadero.com/ganaderia-sostenible/numero-de-vacas-por-hectarea-se-duplica-en-fincas-tecnificadas>
- Cook, J., Lewandowsky, S. (2016). Rational Irrationality: Modeling Climate Change Belief Polarization Using Bayesian Networks. *Topics in Cognitive Science* 8(1), 160-179 <https://doi.org/10.1111/tops.12186>
- Corporación Autónoma Regional de Nariño (Corponariño). (2011). Plan de acción para la atención de la emergencia y la mitigación de sus efectos - PAAEME, temporada invernal 2010–2011. <http://www.corponarino.gov.co/expedientes/planeacion/PAAEME.pdf>
- Corporación Autónoma Regional de Nariño (Corponariño). (2009). Diagnostico POMCH Pasto. <https://es.scribd.com/document/407049299/3-DIAGNOSTICO-POMCH-PASTO-pdf>
- Couasnon A, Sebastian A, Morales-Napoles O. 2018. A Copula-based Bayesian Network for modeling compound flood hazard from riverine and coastal interactions at the catchment scale: an application to the Houston Ship Channel, *Texas. Water*, 10(9), 1–19. <https://doi.org/10.3390/w10091190>
- Cultura. (15 de diciembre 2020). El Barniz de Pasto ya es patrimonio de la humanidad. *EL TIEMPO*. <https://www.eltiempo.com/cultura/arte-y-teatro/el-barniz-de-pasto-es-patrimonio-de-la-humanidad-554836>
- Da Silva, J., Kernaghan, S y Luque, A. (2012) Un enfoque de sistemas para enfrentar los desafíos del cambio climático urbano, *International Journal of Urban Sustainable Development*, 4: 2, 125-145. <https://doi.org/10.1080/19463138.2012.718279>
- D'Amato, G., Pawankar, R., Vitale, C., Lanza, M., Molino, A., Stanziola, A., Sanduzzi, A., Vatrella, A., y D'Amato, M. (2016). Climate change and air pollution: effects on respiratory allergy. *Allergy, Asthma Et Immunology Research*, 8(5), 391-395. doi: <https://doi.org/10.4168/air.2016.8.5.391>

- Dávila, G., Ortiz, F. y Cruz, F. (2016). Cálculo del valor en riesgo operacional mediante redes bayesianas para una empresa financiera. *Contaduría y administración*, 61, 176-201. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cya.2015.09.009>
- D'Eramo, D. (2017). Gobernabilidad, gobernanza... en definitiva, el estado. *Administración Pública Y Sociedad (APyS)*, 0(3), 126 - 135. <https://revistas.psi.unc.edu.ar/index.php/APyS/article/view/15314>
- Delgado A., Ruiz S., Arévalo L., Castillo G., Viles N. (Eds). 2008. Plan de Acción en Biodiversidad del departamento de Nariño 2006 – 2030 - Propuesta Técnica. Corponariño, Gobernación de Nariño - Secretaría de Agricultura, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales - UAESPNN - Territorial Surandina, Universidad de Nariño, Universidad Mariana y Asociación para el Desarrollo Campesino. Pasto.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE). (2021). Déficit de vivienda. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/pobreza-y-condiciones-de-vida/deficit-de-vivienda>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE). (2020). Perspectivas territoriales de desarrollo socioeconómico valor agregado de las estadísticas económico. Pasto, Nariño. <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/planes-desarrollo-territorial/280120-Info-Regional-Pasto.pdf>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE). (2019). Estadísticas por tema demografía y población. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE). (2018). Información general Pasto. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion>
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2014). Misión sistema de ciudades - una política nacional para el sistema de ciudades colombiano con visión a largo plazo. [https://oscpr.dnp.gov.co/administrator/components/com\\_publicaciones/uploads/Misin\\_Sistema\\_de\\_Ciudades.pdf](https://oscpr.dnp.gov.co/administrator/components/com_publicaciones/uploads/Misin_Sistema_de_Ciudades.pdf)
- Diario del Sur (5 de noviembre de 2019). Estragos en 19 sectores de Pasto por las lluvias. <https://diariodelsur.com.co/noticias/local/estragos-en-19-sectores-de-pasto-por-las-lluvias-572231>

- Diario del Sur (2016). En Nariño parque automotor aumenta desenfrenadamente. <https://diariodelsur.com.co/noticias/local/en-narino-parque-automotor-aumenta-desenfrenadamente-238445>
- Dirección para la Gestión del Riesgo de Desastres Pasto (DGRD). (2021). Mapas de Amenazas. <http://www.gestiondelriesgopasto.gov.co/new/index.php/cartografia/mapa-zava>
- Dias, É. C., Penner, G. C., do Nascimento, J. S., Monteiro, M. J. G., y Lopes, P. V. N. 2021. Determinação comparativa da precipitação anual média na região metropolitana de Belém-PA. *Research, Society and Development*, 10(4), 24510414133. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i4.14133>
- Diffenbaugh, N. S., & Burke, M. (2019). Global warming has increased global economic inequality. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(20), 9808–9813. <https://doi.org/10.1073/pnas.1816020116>
- Dodman, D., Diep, L., & Colenbrander, S. (2017). Making the case for the nexus between resilience and resource efficiency at the city scale. *International Journal of Urban Sustainable Development*, 9:2, 97-106. <https://doi.org/10.1080/19463138.2017.1345740>
- Duran, P., Monroy, P. (2015). Sabores de Nariño. <https://repository.urosario.edu.co/flexpaper/handle/10336/11976/Tesis%20Paula%20Monroy%20y%20Paulo%20Duran.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ebi, K.L., Boyer, C., Bowen, K.J., Frumkin, H., & Hess, J. (2018). Monitoring and evaluation indicators for climate change-related health impacts, risks, adaptation, and resilience. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(9), 1943. <https://doi.org/10.3390/ijerph15091943>
- Economía. (21 de julio de 2016). Colombia importa 30% de los alimentos que consume. EL HERALDO. Recuperado de <https://www.elheraldo.co/economia/colombia-importa-30-de-los-alimentos-que-consume-273145>
- Edward, N., Chao, R. (2018). China's adaptation to climate & urban climatic changes: A critical review. *Urban Climate*, 23, 352-372. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.07.006>
- El Tiempo (27 de enero de 2021). Así es como Australia y Nueva Zelanda lograron controlar el covid-19. *EL TIEMPO*. <https://www.eltiempo.com/mundo/mas-regiones/como-lograron-australia-y-nueva-zelanda-disminuir-contagios-de-covid-19-562780>

- El Tiempo. (29 de julio 2011). La Alcaldía declaró emergencia invernal en Pasto. *EL TIEMPO*. <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-10051104>
- Resolución No. 3803. Diario Oficial No. 49.976, Bogotá, Colombia, 22 de agosto de 2016.
- Elum, Z., Modise, D. y Marr, A. (2017). Percepción de los agricultores del cambio climático y estrategias de respuesta en tres provincias seleccionadas de Sudáfrica. *Gestión de riesgos climáticos*, 16, 246-257. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2016.11.001>
- El-Awady, A., Ponnambalam, K. (2021). Integration of simulation and Markov Chains to support Bayesian Networks for probabilistic failure analysis of complex systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 211,107511. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107511>
- Empresa de Obras Sanitarias de Pasto (Empopasto). (2018). Informe de gestión 2018. <http://www.empopasto.com/wp-content/uploads/2019/02/INFORME-DE-GESTION-2018.pdf>
- Escalona, E., Cuéllar, L., Lorente, Y. y Yáñez, A. (2018). Conocimientos y actitudes respecto al saneamiento básico ambiental y enfermedades diarreicas agudas, VIII Jornada Científica de la SOCECS. <http://edumedholguin2019.sld.cu/index.php/2019/2019/paper/view/97/0>
- Faguet, J. (2016) Transformation from below in Bangladesh: decentralization, local governance, and systemic change. *Modern Asian Studies*. [http://eprints.lse.ac.uk/66239/1/Faguet\\_Transformation%20form%20below%20in%20Bangladesh.pdf](http://eprints.lse.ac.uk/66239/1/Faguet_Transformation%20form%20below%20in%20Bangladesh.pdf)
- Farfán, M., Domínguez, C., Espinoza, A., Jaramillo, A., Alcántara, C., Maldonado, V., Tovar, I., Flamenco, A. Forest fire probability under ENSO conditions in a semi-arid region: a case study in Guanajuato. *Environmental Monitoring and Assessment* 193 (684). <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09494-0>
- Filho, W.L., Scheday, S., Boenecke, J., Gogio, A., Maharaj, A., Korovou, S. (2019). Climate change, health, and mosquito-borne diseases: Trends and implications to the pacific region. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(24),5114. <https://doi.org/10.3390/ijerph16245114>
- Financiera de Desarrollo Territorial y Banco Interamericano de Desarrollo. (FINDETER) (2015). Plan de Acción 2038 Pasto Recorrer el Buen Camino. <https://www.pasto.gov.co/index.php/decretos/154-noticias-alcaldia/ciudades->

[sostenibles/ciudades-sostenibles-principal/5832-plan-de-accion-pasto-2038-uno-de-los-mejores-de-colombia-y-latinoamerica](https://sostenibles/ciudades-sostenibles-principal/5832-plan-de-accion-pasto-2038-uno-de-los-mejores-de-colombia-y-latinoamerica)

- Folleco, M. (2017). Aplicación de una herramienta de gestión haciendo uso del modelo Weap como soporte de decisión en las microcuencas La Tebaida, Las Helechas y Bermúdez del departamento de Nariño [Tesis de maestría, Universidad Tecnológica de Pereira]. <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/8528/36361F667.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Folch, R. y Bru, J. (2017). Ambiente, territorio y paisaje. Barcelona, España: Editorial Barcino SA. <https://www.fundacionaquae.org/wp-content/uploads/2017/12/AMBIENTE-TERRITORIO-Y-PAISAJE.pdf>
- Forbes Staff. (06 de enero de 2021). ¿Por qué Estados Unidos tiene en aprietos a los ganaderos colombianos? *Forbes*. <https://forbes.co/2021/01/06/negocios/por-que-estados-unidos-tiene-en-aprietos-a-los-ganaderos-colombianos/>
- Forero, E. L., Hernández, Y. T., y Zafra, C. A. (2014). Percepción latinoamericana de cambio climático: metodologías, herramientas y estrategias de adaptación en comunidades locales. una revisión. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 17(1), 73-85. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0123-42262014000100009&lng=en&tlng=](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262014000100009&lng=en&tlng=)
- Forero, G. Barniz de Pasto [Archivo de video] (2019). <https://normasapa.com/como-citar-referenciar-videos-de-youtube-o-otra-web-con-normas-apa/>
- Galeano, A.V. y Largo, X. (2015). *Costos médicos directos del tratamiento de la enfermedad diarreica aguda en niños menores de 5 años en Colombia* [Tesis de pregrado, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, Bogotá D.C., Colombia].
- Galvis-Aponte, L.A y Hahn-De-Castro, L.W. (2016). Crecimiento municipal en Colombia: el papel de las externalidades espaciales, el capital humano y el capital físico. *Sociedad y economía*, 31. 149-174.
- García, J. M. (2020). Ciencias de la complejidad, Teoría general de sistemas, pensamiento sistémico y sus aplicaciones prácticas en las ciencias económicas, ambientales y sociales. Madrid, España.

- Viviani, P. (2014). *Análisis de sensibilidad a la evidencia en Redes Bayesianas Gaussianas* [Tesis de doctorado, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España]. <https://eprints.ucm.es/id/eprint/27661/>
- Geduk, S., & Ulusoy, I. (2020). A practical analysis of sample complexity for structure learning of discrete dynamic Bayesian networks. *Optimization*. <https://doi.org/10.1080/02331934.2021.1892105>
- Gil-Guirado, S. y Pérez-Morales, A. (2019). Variabilidad climática y patrones termopluviométricos en Murcia (1863-2017). Técnicas de análisis climático en un contexto de cambio global. *Investigaciones Geográficas*, (71), 27-54. <https://doi.org/10.14198/INGEO2019.71.02>
- Giraldo, P. (2018). La materialización de la cultura. *Novum*, 8(1), 119-130 <https://revistas.unal.edu.co/index.php/novum/article/view/69937/64574>
- Global Carbon Project. (2020). Global Carbon Atlas. <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>
- Godet, M. y P. Durance (2011), *Prospectiva estratégica para las empresas y los territorios*, París, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO)/Dunod.
- Godet M. (2002) *La caja de herramientas de la prospectiva estratégica*, Cuaderno No. 5. Cuarta edición, cuaderno publicado por gerpa con la colaboración de electricité de France, mission oprospective. Cuaderno de LIPSOR
- Gómez, D. J. y Morán, R. G. (2015). Análisis energético urbano usando metodologías de gestión integral de energía: un caso de estudio en la ciudad de Pasto. *Energética*, (45), 23
- González, J., Ramamurthy, P., Bornstein, R., Chen, F., Bou-Zeid, E., Ghandehari, M., Luvall, J., Mitra, C. & Niyogi, D. (2021). Urban climate and resiliency: A synthesis report of state of the art and future research directions. *Urban Climate*, 38 (2021),100858. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100858>
- Goodwin, P., Cael, B. (2021). Bayesian estimation of Earth's climate sensitivity and transient climate response from observational warming and heat content datasets. *Earth System Dynamics*, 12(2), 709-723. <https://doi.org/10.5194/esd-12-709-2021>

- Guerrero, J.C., Pantoja A. D., Castillo, J. F. (2016). Metodología para el aprovechamiento del potencial energético con biomasa forestal en el departamento de Nariño: caso de estudio, *Ingeniería Solidaria*, 12(20), 43-59. <http://dx.doi.org/10.16925/in.v19i20.1415>
- Güçlü, YS. (2018). Múltiples análisis de tendencias innovadores y prueba parcial de Mann-Kendall. *Revista de hidrología*, 566. 566:685–704. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169418307285>
- Gobernación de Nariño (2019). Plan departamental de extensión agropecuaria del departamento de Nariño PDEA–Nariño, documento técnico de formulación. <https://www.minagricultura.gov.co/ministerio/direcciones/Documents/PDEA%27s%20Aprobados/PDEA%20Nari%C3%B1o.pdf>
- Goshua, A., Gómez, J., Erny, B., Burke, M., Luby, S., Sokolow, S., LaBeaud, A., Auerbach, P., Gisondi, M. (2021). Addressing Climate Change and Its Effects on Human Health: A Call to Action for Medical Schools. *Academic Medicine* 6(3), 324-328. doi: 10.1097 / ACM.0000000000003861
- Guzmán, S. (2018). Las interacciones suelo-atmósfera en un deslizamiento superficial. Análisis de datos auscultados en Cercs (Pre-Pirineo Oriental) [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España].
- Han, H., Armaghani, D., Tarinejad, R., Zhou, J. y Tahir. M. (2020). Random Forest and Bayesian Network Techniques for Probabilistic Prediction of Flyrock Induced by Blasting in Quarry Sites. *Natural Resources Research*, 29, 655 - 667. <https://doi.org/10.1007/s11053-019-09611-4>
- Hanif, N. & Arshed, N. (2016). Relationship between School Education and Economic Growth: SAARC Countries. *International Journal of Economics and Financial Issues*, 6(1), 294-300. <https://www.econjournals.com/index.php/ijefi/article/view/1605/pdf>
- Henry, B.K., Eckard, R.J., & Beauchemin, K.A. (2018). Review: Adaptation of ruminant livestock production systems to climate changes. *Animal* 12(2), s445-s456. doi: <https://doi.org/10.1017/S1751731118001301>
- Hodson de Jaramillo, E., Castaño, J., Poveda, G., Roldán, G., Chavarriaga, P. (2017). Seguridad alimentaria y nutricional en Colombia, In: M. A. Montes (Ed.). Retos y oportunidades de la seguridad alimentaria y nutricional en las Américas. El punto de vista de las Academias de Ciencias (pp. 221-249)

- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. (2015). Escenarios de Cambio Climático para Precipitación y Temperatura para Colombia 2011-2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Estudio Técnico Completo: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2020). Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos. <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- Instituto Colombiano de Bienestar Familiar (ICBF). (2015). Tabla de Composición de Alimentos Colombianos (TCAC). [https://www.icbf.gov.co/sites/default/files/tcac\\_2015\\_final\\_para\\_imprimir.pdf](https://www.icbf.gov.co/sites/default/files/tcac_2015_final_para_imprimir.pdf)
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2016). Index of / Datos Tercera Comunicación. [http://bart.ideam.gov.co/Datos\\_Tercera\\_Comunicacion/](http://bart.ideam.gov.co/Datos_Tercera_Comunicacion/)
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (s.f). Atlas del clima. <http://atlas.ideam.gov.co/presentacion/>
- Instituto Departamental de Salud de Nariño (IDSN). (2020). Informe ENOS por Municipios y Departamento a Semana 29 / 2012 – 2020. <http://www.idsn.gov.co/index.php/subdireccion-de-salud-publica/epidemiologia/429-eventos-de-notificacion-enos>
- Instituto Departamental de Salud de Nariño (IDSN). (2019). Análisis de la situación de salud del departamento de Nariño con el modelo de los determinantes sociales. [http://www.idsn.gov.co/images/documentos/epidemiologia/asis/Departamento\\_Nari%C3%B1o\\_ASIS\\_2019.pdf](http://www.idsn.gov.co/images/documentos/epidemiologia/asis/Departamento_Nari%C3%B1o_ASIS_2019.pdf)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2020). Most recent IPCC special reports. <https://www.ipcc.ch/languages-2/spanish/>

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019a). Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.- O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. Weyer (eds.)]. In press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019b). Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018). Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5 ° C, IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 ° C relative to pre-industrial levels and the corresponding trajectories that global greenhouse gas emissions will follow, in context strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor y T. Waterfield (eds.)].
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. enhen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jie, X., Dongwei, G., Jiaqiang, L., Huaiwei, S., Fanjiang, Z. y Xinlong, F. (2017). A hybrid Bayesian network approach for trade-offs between environmental flows and agricultural water using dynamic discretization. *Advances in Water Resources* 445-458. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.10.022>
- Keivani, R. (2010). A review of the main challenges to urban sustainability. *International Journal of Urban Sustainable Development*, 1:1-2, 5-16. <https://doi.org/10.1080/19463131003704213>
- Levy, K., Woster, A., Goldsterin, R. and Carlton, E. (2016). Untangling the impacts of climate change on waterborne diseases: a systematic review of relationships between diarrheal diseases and temperature, rainfall, flooding, and drought. *Environmental Science & Technology*, 50 (10), 4905-4922. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b06186>
- Li, L., Jiang, C., Murtugudde, R., Liang, X.-Z., Sapkota, A. (2021). Global population exposed to extreme events in the 150 most populated cities of the world: Implications for public health. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18(3), 1-11. <https://doi.org/10.3390/ijerph18031293>
- Lin, S., Sun, M., Fitzgerald, E., Hwang, SA. (2016). Did summer weather factors affect gastrointestinal infection hospitalizations in New York State? *Science of The Total Environment* 550(15), 38-44. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.153>
- Liu, W., Yue, X. G., & Tchounwou, P. B. (2020). Response to the COVID-19 epidemic: The Chinese experience and implications for other countries. *International Journal of Environmental Research & Public Health*, 17(7), 1. <https://doi.org/10.3390/ijerph17072304>.
- Ljubenović, M. y Mitković, P. (2018). Uso del análisis estructural para identificar factores clave en el desarrollo futuro de la ciudad de Niš. *Revista de Urbanismo y Desarrollo*, 144(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000460](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000460)

- Lobell, D., Schlenker, W. y Costa-Roberts, J. (2011). Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, s.l., 333(6042): 616-620. doi: 10.1126/science.1204531
- López, G., Brizuela, A., Rondan, G., Lissaso, C., Kemerer, A., y Santos, M. (2016). determinación del Índice de Temperatura y Humedad (ITH) para vacas lecheras, en el departamento Nogoyá, Entre Ríos. *Revista Científica Agropecuaria*, 20(1-2): 57-65. <http://ith.uner.edu.ar/publicaciones/8.pdf>
- López-Gómez, E. (2018). El método Delphi en la investigación actual en educación: una revisión teórica y metodológica. *Educación XXI*, 21 (1), 17-40. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=706/70653466002>
- López-Vigoa, Onel, Sánchez-Santana, Tania, Iglesias-Gómez, Jesús Manuel, Lamela-López, Luis, Soca-Pérez, Mildrey, Arece-García, Javier, & Milera-Rodríguez, Milagros de la Caridad. (2017). Los sistemas silvopastoriles como alternativa para la producción animal sostenible en el contexto actual de la ganadería tropical. *Pastos y Forrajes*, 40(2), 83-95. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0864-03942017000200001&script=sci\\_arttext&tlng=pt](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0864-03942017000200001&script=sci_arttext&tlng=pt)
- Madanian, S. y Costa, C. (2017). Un modelo para evaluar la planificación de un cinturón verde en la ciudad de Qazvin (Irán) utilizando el método MICMAC. *Model. Earth Syst. Reinar*, 3, 1503-1513. <https://doi.org/10.1007/s40808-017-0373-1>
- Martínez, A., Corrales, J., y Sánchez, F. (2010). Relación de los deslizamientos y la dinámica climática en Colombia. En V. Guerrero; V. F. Garzón y J. J. Carmona. (Eds) *Experiencias en el Uso y Aplicación de Tecnologías Satelitales para Observación de la Tierra* (pp. 79-97). [https://www.academia.edu/21733141/Relaci%C3%B3n\\_de\\_los\\_deslizamientos\\_y\\_la\\_din%C3%A1mica\\_clim%C3%A1tica\\_en\\_Colombia](https://www.academia.edu/21733141/Relaci%C3%B3n_de_los_deslizamientos_y_la_din%C3%A1mica_clim%C3%A1tica_en_Colombia)
- Maturana, F., Beltrão, M.E., Bellet, C., Henríquez, C. y Arenas, F. (2017). *Sistemas urbanos y ciudades medias en Iberoamérica*. Serie GeoLibros, Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- Maxwell, SL., Butt, N., Maron, M., McAlpine, CA., Ullmann, A., Segan, DB. y Watson, JE. (2018). Consecuencias para la conservación de las respuestas ecológicas a fenómenos meteorológicos y climáticos extremos. *Diversity and Distribution*, 25. 613-625. <https://doi.org/10.1111/ddi.12878>

- McPhearson, T., Haase, D., Kabisch, N. y Gren, A. (2016). Advancing understanding of the complex nature of urban systems. *Ecological Indicators*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.054>
- Mehdi, M., Hooman, M., Mojdeh, T., Arash, S., Michael, C., and Dean S. (2016). Climate Change and Respiratory Infections. *Annals of the American Thoracic Society*, 3(8), 1223-1230, doi: 10.1513/AnnalsATS.201511-729PS
- Méndez, C., Araya, R. (2017). *Cambio climático y producción de cultivos anuales esenciales. una mirada desde la seguridad alimentaria en Chile*. <https://doi.org/10.26797/rpye.v0i129.75>
- Mergili, M., Marchant, C. y Moreiras, S. (2015). Causas, características e impacto de los procesos de remoción en masa, en áreas contrastantes de la región Andina. *Revista Colombiana de Geografía*, 24(2), 113-131. <http://www.scielo.org.co/pdf/rcdg/v24n2/v24n2a7.pdf>
- Micarelli, G. (2018). Soberanía alimentaria y otras soberanías: el valor de los bienes comunes. *Revista Colombiana de Antropología*, 54(2), 119-142. <https://doi.org/10.22380/2539472X.464>
- Miceli, Marina. (2014). Arup lanza una herramienta para entender la resiliencia de las ciudades. <https://www.arup.com/es-es/news-and-events/arup-launches-a-tool-for-city-resilience>
- Ministerio de Salud y Protección Social (2015). Importancia e interpretación de la pirámide poblacional. *Boletín Asis - análisis de situación de salud*. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/ED/PSP/boletin-asis-Vol.-3-No.%205.pdf>
- Ministerio de Salud y Protección Social, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Nacional de Salud, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Ministerio de Minas y Energía. (2020). *Boletín Clima y Salud*. <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/boletin-clima-y-salud>
- Molina, B. y González-Cancelas, N., y Soler-Flores, F. (2018). Gestión de la sostenibilidad portuaria basada en un modelo de redes bayesianas. Aplicación al sistema portuario español. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 26(4), 631-644. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052018000400631>
- Molina-Prieto, L. (2016). Resiliencia a inundaciones: nuevo paradigma para el diseño urbano. *Revista de Arquitectura*, 18(2), 82-94. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2016.18.2.8>

- Molina, T. Abadal, E. (2021). The Evolution of Communicating the Uncertainty of Climate Change to Policymakers: A Study of IPCC Synthesis Reports. *Sustainability*, 13(5), 2466. doi. <https://doi.org/10.3390/su13052466>
- Monterroso-Rivas, A. I., y Gómez-Díaz, J. D. 2021. Impacto del cambio climático en la evapotranspiración potencial y periodo de crecimiento en México. *Terra Latinoamericana*, 39, e774. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792021000100105&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792021000100105&script=sci_arttext)
- Naderpour, M., Rizeei, H., Ramezani, F. (2020). Wildfire prediction: Handling uncertainties using integrated bayesian networks and fuzzy logic. IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pp. 1-7. doi: 10.1109 /FUZZ48607.2020.9177700.
- Novelo, S. (2017). Enfoque Sistémico del Principio Vital: el Factor Inteligente de los Sistemas Biológicos. *La Homeopatía de México*, 86(710), 12-20. <https://biblat.unam.mx/hevila/LahomeopatiadeMexico/2017/vol86/no710/2.pdf>
- Novillo, N. (2018). Cambio climático y conflictos socioambientales en ciudades intermedias de América Latina y el Caribe. Letras Verdes. *Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, (24), 124-142. <https://doi.org/10.17141/letrasverdes.24.2018.3323>
- Nyberg, E., Nicholson, A., Korb, K., Wybrow, M., Zukerman, I., Mascaro, S., Thakur, S., Alvandi, A., Riley, J., Pearson, R., Morris, S., Herrmann, A., Azad, A., Bolger, F., Hahn U., Lagnado, D. (2021). BARD: A Structured Technique for Group Elicitation of Bayesian Networks to Support Analytic Reasoning. *Risk Analysis*, 0(0), 1-24. <https://doi.org/10.1111/risa.13759>
- Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR). (2017). Campaña mundial desarrollando ciudades resilientes: Mi ciudad se está preparando. <https://www.eird.org/camp-10-15/>
- Orbes, J., Vallejo, W., (2013). Investigación exploratoria de sistema de energía eléctrica renovable orientada a la búsqueda de soluciones energéticas en el departamento de Nariño [Tesis de pregrado, Universidad de Nariño, Pasto, Colombia].
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2019). Cambio climático y Seguridad Alimentaria y nutricional en América Latina y el Caribe. Santiago, Chile. <http://www.fao.org/3/ca2902es/CA2902ES.pdf>

- International Organization for Standardization (ISO). (2018). ISO 37120: 2018 Sustainable cities and communities — Indicators for city services and quality of life <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:37120:ed-2:v1:en>
- Organización Internacional del Trabajo (OIT). (junio de 2020). Panorama Laboral en tiempos de la COVID-19. Impactos en el mercado de trabajo y los ingresos en América Latina y el Caribe. Obtenido de [https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---americas/---ro-lima/documents/publication/wcms\\_749659.pdf](https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---americas/---ro-lima/documents/publication/wcms_749659.pdf)
- Ortiz, E. (2015). Bienestar y felicidad: Un estudio de datos panel en el Municipio de Pasto, Colombia 2008 – 2010. *Universidad y Salud* 18(1), 88-101. <https://doi.org/10.22267/rus.161801.22>
- Orum, A. & Jenks, M. (2020). Compact city. *The Wiley Blackwell Encyclopedia of Urban and Regional Studies*. <https://doi.org/10.1002/9781118568446.eurs0530>
- Página 10. (25 de diciembre de 2015). Pasto no tendrá racionamiento de agua. <https://pagina10.com/web/pasto-no-tendra-rationamiento-de-agua/>
- Paradiso, M. y Gómez, C. (2017). El dilema entre conservación y renovación para el desarrollo urbano de los centros históricos. Una aproximación a san Juan de Pasto, Colombia.
- Paudel, B., Chu, T., Chen, M., Sampath, V., Prunicki, M., & Nadeau, K. (2021). Increased duration of pollen and mold exposure are linked to climate change. *Scientific Reports* 11, 12816, 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92178-z>
- Paulino, L. y Huayna, A. (2019). Sistema Experto Probabilístico basado en Redes Bayesianas para la predicción del cáncer de cuello uterino. *Revista Peruana de Computación y Sistemas*, 2 (1):15-26. <https://doi.org/10.15381/rpcs.v2i1.16360>
- Paulus, C. & Fauzi, A. (2017). Factors Affecting Sustainability of Alternatives Livelihood in Coastal Community of Nembrala, East Nusa Tenggara: an Application of Micmac Method. *Jurnal Ekonomi Pembangunan*. <https://doi.org/10.23917/jep.v18i2.4397>
- Pavón, L. (2015). Los rasgos culturales en la conformación de la competitividad y del crecimiento sostenible. *Revista De Estudios Empresariales. Segunda Época*, (2). <https://doi.org/10.17561/ree.v0i2.2741>
- Pelorosso, R., Gabattoni, F. y Leone, A. (2017). The low-entropy city: A thermodynamic approach to reconnect urban systems with nature. *Landscape and Urban Planning*, 168, 22-30. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.10.002>

- Pérez, J. (2016). “El temor al envejecimiento demográfico” en Joan Subirats Humet et. al. (2016) *Edades en transición. Envejecer en el siglo XXI*. Barcelona, Ed. Ariel, pp. 44-54
- Perugache, J.A. (2020). Procesos de configuración territorial y conflictos por el agua en el municipio de Pasto, Colombia. *Collectivus, Revista de Ciencias Sociales*, 7(2), 86-111. <https://doi.org/10.15648/Collectivus.vol7num2.2020.2674>
- Pham, H., Sperotto, A., Furlan, E., Torresan, S., Marcomini, A., Critto, A. (2021). Integrating Bayesian Networks into ecosystem services assessment to support water management at the river basin scale. *Ecosystem Services* 50, 101300. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101300>
- Pineda, S. (2017). Procedimiento metodológico para determinar líneas estratégicas de desarrollo municipal. Caso de estudio: Nuevitas. *Retos de la Dirección*, 11(2), 136-157. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S230691552017000200009&lng=es&tlng=pt](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S230691552017000200009&lng=es&tlng=pt).
- Posada, A., Paredes, A. y Ortiz, G. (2016). Enfoque sistémico aplicado al manejo de parques metropolitanos, una posición desde Bogotá D.C. – Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica*, 19(1), 207-217. <http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v19n1/v19n1a24.pdf>
- Pulistar, B. y Morales, H. (2017). Marketing Urbano I. En Bolaños, A., López, C., (Ed), *Escenarios Investigativos*, 173-180. Pasto, Colombia: Institución Universitaria Cesmag.
- Quintero, D. y López, S. (2010). Análisis estructural: un apoyo para el modelado con dinámica de sistemas. *Avances en Sistemas e Informática*, 7(3), 152-162. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/avances/article/view/26663>
- Quesada, M. y Jiménez, K. (2020). Characterization of the surface runoff of the El Estero microbasin, San Ramón, Alajuela, Costa Rica. *Iberian-African-American Journal of Physical Geography and Environment*, 2(1), 101-113. <https://doi.org/10.21814/physisterrae.2565>
- Quesada-Román, A., Villalobos-Portilla, E., Campos-Durán, D. (2021). Hydrometeorological disasters in urban areas of Costa Rica, Central America. *Environ. Hazards*, 20, 264–278. doi: <https://doi.org/10.1080/17477891.2020.1791034>

- Radio Nacional de Colombia (2015). Alerta roja en Nariño por incendios forestales. (14 de septiembre de 2015). <https://www.radionacional.co/noticia/alerta-roja-en-narino-por-incendios-forestales>
- Reboussin, DM., Kris-Etherton, PM., Lichtenstein, A.H., Li, Z., Sabate, J., Matthan, N.R., Petersen, K., Rajaram, S., Vitolins, M., & Ford, N. (2021). The design and rationale of a multi-center randomized clinical trial comparing one avocado per day to usual diet: The Habitual Diet and Avocado Trial (HAT). *Contemporary Clinical Trials* 110, 106565. <https://doi.org/10.1016/j.cct.2021.106565>
- Redacción Educación. (2018). Pastusos arrasaron en calidad de la educación colombiana. El Espectador. <https://www.elespectador.com/noticias/educacion/pastusos-arrasaron-en-calidad-de-la-educacion-colombiana-articulo-788824>
- Rettberg, A. (2020). Violence in Latin America Today: Varieties and Impacts. *Revista de Estudios Sociales* 73, 2-17. <https://doi.org/10.7440/res73.2020.01>
- Resolución 330 de 2017 (2017, 17 de junio). Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/0330-2017.pdf>
- Resolución 3803 de 2016 (2016, 25 de agosto). Ministerio de Salud y Protección Social. [https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/resolucion\\_minsaludps\\_3803\\_2016.htm](https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/resolucion_minsaludps_3803_2016.htm)
- Riquelme, Y. y Azorín, M. (2019). Variables claves para el ordenamiento territorial del sistema económico productivo de Cienfuegos. *Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana*. <https://www.eumed.net/rev/oel/2019/04/sistema-economico-cienfuegos.html>
- Rius, J., Sánchez, M. (2015). Modelo Barcelona y política cultural: usos y abusos de la cultura por parte de un modelo emprendedor de desarrollo local. *Eure*, 41(122), 103-123. <https://scielo.conicyt.cl/pdf/eure/v41n122/art05.pdf>
- Rodas-Trejo, J., Medina, L., Chang, D., Ocampo-González, Paola., Marín, E., Carrillo M., (2017). Impactos y adaptaciones ante los efectos del cambio climático: un caso de estudio en una comunidad ganadera en Chiapas, México. *Revista Electrónica de Veterinaria*, 18(10), 1-14. <https://www.redalyc.org/pdf/636/63653470020.pdf>
- Rodriguez de Caires, C. (2018). *La influencia del alcalde y la sociedad civil en la institucionalización del presupuesto participativo: análisis del caso de Pasto, Colombia (1995-2016)* [Tesis de maestría, FLACSO, Ecuador].

- Rodríguez-Pacheco, F., Jiménez-Villamizar, M. y Pedraza-Álvarez, L. (2019). Efectos del cambio climático en la salud de la población colombiana. *Duazary*, 16(2), 319-331. <http://dx.doi.org/10.21676/2389783X.3186>
- Rodríguez-Páez, F., Vaca, D. y Manrique, L. (2012). Revisión de los conceptos de territorio, población y salud en el contexto colombiano. *Ciencia y Tecnología para la Salud Visual y Ocular*, 10(2), 79-92. <https://doi.org/10.19052/sv.1437>
- Rubio, D. (2016). El reto de las ciudades intermedias ante el cambio climático. *Sostenibilidad Huella*, 56-59. [https://repositorio.findeter.gov.co/bitstream/handle/123456789/500/PU03\\_VF\\_56-59.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.findeter.gov.co/bitstream/handle/123456789/500/PU03_VF_56-59.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Ruiz-García, L.F, Carcelén-Caceres, F. y Sandoval-Monzón, R. (2018). El índice temperatura-humedad máximo y la producción de leche de los establos en Lima-Perú. *Archivos de Zootecnia*, 67(257), 99-107.
- Salud. (16 de enero de 2016). Nariño, un oasis en la gestión de la salud. *Semana*. <https://www.semana.com/nacion/articulo/narino-el-buen-ejemplo-del-sector-salud/456791-3/>
- Santos, U., Abdo, M., Ferreira, A., Futoshi, R., Delfinie, J., Terra, M. y Chatkin, J. 2021. Environmental air pollution: respiratory effects. *Jornal Brasileiro de Pneumologia*. 47(1), e20200267. <https://doi.org/10.36416/1806-3756/e20200267>
- Schlutow, A., Schröder, W. (2021). Rule-based classification and mapping of ecosystem services with data on the integrity of forest ecosystems. *Environmental Sciences Europe* 33 (50). <https://doi.org/10.1186/s12302-021-00481-3>
- Serna-Gómez, H.M., Barrera-Escobar, A. & Castro-Escobar, E. S. (2020). Índice de riesgo a la pérdida del empleo en Colombia durante la coyuntura COVID-19. ORMET, Universidad de Manizales. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3587200>
- Sheridan, J., Bickford, D. (2011). Shrinking body size as an ecological response to climate change. *Nature Climate Change* 1, 401–406 (2011). <https://doi.org/10.1038/nclimate1259>
- Silva, A., Souza, S., Coelho Filho, O., Eloy, L., Salmons, Y. B., & Passos, C. J. S. (2021). Water Appropriation on the Agricultural Frontier in Western Bahia and Its Contribution to Streamflow Reduction: Revisiting the Debate in the Brazilian Cerrado. *Water* 13, 1054. <https://doi.org/10.3390/w13081054>

- Simões, P., da Silva, G., Moretti, G., Simon, C., Winnikow, E., Nassar, S., Medeiros, L., Rosa, M. (2015). Meta analysis of the use of Bayesian networks in breast cancer diagnosis. *Cadernos de Saude Publica* 31(1), 26-38. <https://doi.org/10.1590/0102-311X00205213>
- Sommaruga, R., & Eldridge, H.M. (2021). Production d'avocat: empreinte hydrique etimplicaciones socio-économiques Producción de aguacate: Wasser-Fußabdruck und sozio-ökonomische Auswirkungen. *EuroChoices*, 20(2), 48-53. <https://doi.org/10.1111/1746-692X.12289>
- Somoza-Cabrera, J. (2019). La aplicación de la caja de herramientas prospectiva a la construcción de escenarios energéticos. *Anuario Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales*, (10), 17-36. <https://anuarioeco.uo.edu.cu/index.php/aeco/article/view/4959>
- Tapia, E., Tapia, S., Moscoso, J. y Ortiz, H. (2017). Economía solidaria: estrategia alternativa para el desarrollo local. *Visión gerencial*, 2, 313-323. <https://www.redalyc.org/journal/4655/465552407006/html/>
- Terraza, H., Rubio, D. y Vera, F. (2016). De ciudades emergentes a ciudades sostenibles. Santiago de Chile: ARQ. recuperado de <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/De-ciudades-emergentes-a-ciudades-sostenibles.pdf>
- Timarán, A. P. (2017). El patrimonio cultural como propuesta de valor para una región. Caso de Estudio: Carnaval de Negros y Blancos de Pasto. En Bolaños, A., López, C., (Ed), *Escenarios Investigativos*, 103-116. Pasto, Colombia: Institución Universitaria Cesmag.
- Tschumi, E. and Zscheischler, J. (2020). Countrywide climate features during recorded climate-related disasters. *Climatic change* 158, 593–609. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02556-w>
- United Nations (UN). (2019). Cities: a 'cause of and solution to' climate change. UN News. <https://news.un.org/en/story/2019/09/1046662>
- United Nations Department of Economic and Social Affairs (UNDESA). (2019). Growing at a slower pace, world population is expected to reach 9.7 billion in 2050 and could peak at nearly 11 billion around 2100. <https://www.un.org/en/desa/growing-slower-pace-world-population-expected-reach-97-billion-2050-and-could>

- United Nations Human Settlements Programme (UNHABITAT). (2016). Urbanization and Development: Emerging Futures -World Cities Report 2016. <https://unhabitat.org/sites/default/files/download-manager-files/WCR-2016-WEB.pdf>
- United Nations Human Settlements Programme (UNHABITAT). (2015). Temas Habitat III. [https://uploads.habitat3.org/hb3/Issue-Paper-11\\_Public\\_Space-SP.pdf](https://uploads.habitat3.org/hb3/Issue-Paper-11_Public_Space-SP.pdf)
- United Nations Human Settlements Programme. (UNHABITAT). (2011). Global report on human settlements. Cities and climate change. <https://unhabitat.org/global-report-on-human-settlements-2011-cities-and-climate-change>
- Universidad de Nariño (UDENAR). (2019). Liceo Universidad de Nariño el Mejor Colegio Público del País. <http://www.udenar.edu.co/liceo-universidad-de-narino-el-mejor-colegio-publico-del-pais/>
- Universidad de Nariño (UDENAR), Corporación Autónoma Regional de Nariño (CORPONARIÑO). (2007). Estado del arte de la información biofísica y socioeconómica de los páramos de Nariño, Tomo II Pasto, Nariño, Colombia. <http://corponarino.gov.co/expedientes/intervencion/biodiversidad/tomo02caracteristicasbiofisicas.pdf>
- Valdivia-Cruz, J. C., Reyes-González, J. J., & Valdés-Paneque, G.R.. (2021). Efecto del índice de temperatura y humedad (ITH) en las respuestas fisiológicas de vacas lecheras en pastoreo. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 55(1), 21-29. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2079-34802021000100003&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2079-34802021000100003&lng=es&tlng=es).
- Valença, A. y D Carvalho, G. (2013). Copa del Mundo 2014. Estructuras argumentativas como arquetipos sistémicos. [https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=GhBADwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT4&dq=arquetipos+sistemicos&ots=fdlnkXonwZ&sig=Hq8HZvXPgCRXtlZ3\\_8hNR9rjICs&redir\\_esc=y#v=onepage&q=arquetipos%20sistemicos&f=false](https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=GhBADwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT4&dq=arquetipos+sistemicos&ots=fdlnkXonwZ&sig=Hq8HZvXPgCRXtlZ3_8hNR9rjICs&redir_esc=y#v=onepage&q=arquetipos%20sistemicos&f=false)
- Van Meeteren, M. (2019). Urban systems. [https://www.researchgate.net/publication/331547088\\_Urban\\_System](https://www.researchgate.net/publication/331547088_Urban_System)
- Varisco, A. (2016). Turismo rural, propuesta metodológica para un enfoque sistémico. *Revista de Turismo y Patrimonio Cultural*, 14(1), 153-167. <https://doi.org/10.25145/j.pasos.2016.14.010>

- Vázquez, M. (2020). Política y Religión: Un enfoque para abordar las relaciones entre tradición y modernidad en la Independencia de la Nueva Granada (1808-1819). *Autoctonía. Revista De Ciencias Sociales E Historia*, 4(1), 65-76. <https://doi.org/10.23854/autoc.v4i1.153>
- Vázquez, R.J., Durán, O., y Baca. (2015). *Modelos de impacto en la agricultura teniendo en cuenta los escenarios de la agricultura del cambio climático*. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v1i1.2140>
- Vergara, W., Ríos, A., Trapido, P., y Malarín, H. 2014. Agricultura y clima futuro en América Latina y el Caribe: Impactos sistémicos y posibles respuestas. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Viguera, B., Martínez-Rodríguez, M.R., Donatti, C., Harvey, C.A. y Alpízar, F. (2017). Impactos del cambio climático en la agricultura de Centroamérica, estrategias de mitigación y adaptación. Materiales de fortalecimiento de capacidades técnicas del proyecto CASCADA (Conservación Internacional-CATIE). [https://www.conservation.org/docs/default-source/publication-pdfs/cascade\\_modulo-2-impactos-del-cambio-climatico-en-la-agricultura-de-centroamerica.pdf](https://www.conservation.org/docs/default-source/publication-pdfs/cascade_modulo-2-impactos-del-cambio-climatico-en-la-agricultura-de-centroamerica.pdf)
- Vilches, A., Gil, D., Toscano, J.C. y Macías, O. (2014). Crecimiento demográfico y Sostenibilidad [artículo en línea]. OEI. ISBN 978-84-7666-213-7. <http://www.oei.es/decada/accion.php?accion=4>
- Villota, Y. (2017). Sensibilidades en las dinámicas festivas del carnaval de negros y blancos [Tesis de maestría, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia].
- Viloria de la Hoz, J. (2007). Economía del departamento de Nariño: ruralidad y aislamiento geográfico. *Banco de la Republica Centro de Estudios Económicos regionales (CEER) – Cartagena*.
- Yuan, Z., Khakzad, N., Khan, F., Amyotte, P. (2015). Risk analysis of dust explosion scenarios using Bayesian networks. *Risk Analysis*, 35, 278–291. <https://doi.org/10.1111/risa.12283>
- Webb, R., Bai, X., Smith, M., Constanza, R., Griggs, D., Moglia, M, Neuman M., Neuman, P., Newton, P., Norman, B., Ryan, C., Schandl, H., Steffen, W., Tapper, B. y Thomson, G. (2018). Sustainable urban systems: Co-design and framing for transformation *Ambio*, 57-77. *Ambio* 47, 57–77. <https://doi.org/10.1007/s13280-017-0934-6>
- World Council on City Data (WCCD). (2019). WCCD ISO 37120:2018 Series On City Data. <https://www.dataforcities.org/wccd-iso-37120-series-on-city-data>

- World Health Organization (WHO). (2019). Climate change and health: Key facts. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>
- World Health Organization (WHO). (2018a). *COP24 Special report - health & climate change*.
- World Health Organization (WHO). (2018b). Health benefits far outweigh the costs of meeting climate change goals. <https://www.who.int/es/news-room/detail/05-12-2018-health-benefits-far-outweigh-the-costs-of-meeting-climate-change-goals>
- World Health Organization (WHO). (2018c). Climate change and health. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>
- Wu, Z., Shen, Y., Wang, H., Wu, M. (2019). Assessing urban flood disaster risk using Bayesian network model and GIS applications. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1), 2163-2184. <https://doi.org/10.1080/19475705.2019.1685010>
- Wu, J., Fang, W., Hu, Z. & Hong B. (2018). Application of Bayesian Approach to Dynamic Assessment of Flood in Urban Underground Spaces. *Water*, 10(9),1112. <https://doi.org/10.3390/w10091112>
- Wu, X., Lu, Y., Zhou, Sen., Chen, L. and Xu, B. (2015). Impact of climate change on human infectious diseases: Empirical evidence and human adaptation. *Environment International*, 86, 14-23. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.09.007>
- Zambrano, F., Rodríguez, I. y Durango, S. (2019). Girona sistema urbano: análisis del clima urbano de un sistema de ciudades medias catalanas usando Remote Sensing. En XIII CTV 2019 Proceedings: XIII International Conference on Virtual City and Territory: “Challenges and paradigms of the contemporary city”: UPC, Barcelona, October 2-4, 2019. Barcelona: CPSV, 2019, p. 8623. E-ISSN 2604-6512.DOI <http://dx.doi.org/10.5821/ctv.8623>

## APÉNDICE

### 6.1 Apéndice A

#### Aplicación del Método Delphi

**Objetivo:** identificar la percepción que tienen los expertos con respecto a las relaciones directas que existen entre los principales componentes urbanos del municipio de Pasto.

**Metodología:** La encuesta es de carácter anónimo y se realiza en dos fases. La primera fase consiste en el llenado de la Matriz de Impactos Directos (MID) y la segunda fase consiste en la retroalimentación de los resultados obtenidos.

#### Fase I: Llenado de la matriz de impactos directos

##### 1. Componentes urbanos:

En la siguiente tabla se presentan los componentes del sistema urbano y su alcance

Componentes	Alcances
Ambiente	Calidad de los recursos naturales (aire, agua, suelo, flora y fauna)
Cultura	Etnias, manifestaciones culturales, costumbres y tradiciones
Salud	Afectación a la salud a nivel físico, mental y social por exposición a factores externos (físicos, químicos o biológicos)
Educación	Nivel de formación, cobertura y calidad de la educación formal ofrecida.
Demografía	Número de habitantes, distribución y procesos migratorios.
Funcionalidad	Urbanismo, cobertura y calidad de los servicios públicos como agua, aseo, comunicaciones, transporte, otros.
Riesgos	Exposición de la población a factores de riesgos de desastres como inundaciones, sequías, deslizamientos en masa, otros
Clima	Precipitación, temperatura y los procesos de mitigación al cambio climático.
Economía	Competitividad y productividad de los sectores económicos
Gobernabilidad	Capacidad de liderazgo por parte de las instituciones públicas
Energía	Tipo de energía disponible (combustibles fósiles, principal fuente de energía en el municipio)
Seguridad	Situaciones de violencia en la calle (atracos, asesinatos, otros)

## 2. Llenado de la matriz de impactos directos:

La matriz de impactos directos es una matriz cuadrada de doble entrada que permite relacionar de forma directa todos los componentes del sistema entre sí. Al llenar cada celda de la matriz se debe preguntar: *¿Cómo influye el componente i sobre el componente j?* Los componentes i, están al lado izquierdo y los componentes j en la parte superior de la matriz, así como se muestra en la gráfica.

## 3. Parámetros de evaluación

El llenado de las celdas de la matriz se debe realizar de acuerdo con la percepción que Usted tiene sobre las condiciones del municipio de Pasto, teniendo en cuenta la siguiente escala de valor:

- (0) Si no existe ninguna influencia
- (1) Si la influencia es débil
- (2) Si la influencia es media
- (3) Si la influencia es fuerte
- (P) influencia Potencial, aplica si se crea que la influencia pueda ser importante en el futuro.

Tenga en cuenta que las relaciones no siempre se dan en doble vía, ni con la misma intensidad. A manera de ejemplo se puede dar que, si A influye en B y la relación es fuerte la valoración sería 3, pero es posible que B no influya en A por lo tanto la valoración sería 0.

La matriz se envía también en un archivo de Excel.

#### 4. Diligenciamiento de la matriz

**CONSULTA A EXPERTOS  
PERCEPCIÓN SOBRE LA RELACIÓN ENTRE LOS COMPONENTES URBANOS DEL  
MUNICIPIO DE PASTO**

**Nombre:** \_\_\_\_\_

**Profesión:** \_\_\_\_\_

**Institución donde trabaja:** \_\_\_\_\_

**Dependencia:** \_\_\_\_\_

**Área específica de desempeño** \_\_\_\_\_

	Ambiente	Cultura	Salud	Educación	Demografía	Funcionalidad	Riesgos	Clima	Economía	Gobernabilidad	Energía	Seguridad
Ambiente												
Cultura												
Salud												
Educación												
Demografía												
Funcionalidad												
Riesgos												
Clima												
Economía												
Gobernabilidad												
Energía												
Seguridad												

**Fase II:** Retroalimentación de resultados obtenidos

**Gracias por su colaboración**

**Datos de los participantes consultados:**

LIDA CARMENZA CALVACHE BENAVIDES

Contadora Pública, Especialista en Gerencia Financiera, Magister en Gestión Empresarial

Docente en el área de Administración y Finanzas - Universidad Minuto de Dios

Sector de Emprendimiento

ANA CAROLINA BENAVIDES MARTÍNEZ

Administradora de empresa, Magister en Responsabilidad Social y Sostenibilidad

Candidato al Concejo Municipal de Pasto, 2019

Sector Político

CESAR MAURICIO CALDERÓN

Sociólogo, Magister en Relaciones Internacionales

Docente en el área de Ciencias Humanas y Sociales – Universidad Minuto de Dios

Sector Social

MARYORI ORTEGA

Profesional en Enfermería, Magister en Salud Pública

Coordinadora del Sistema Nacional de Vigilancia en Salud Pública (SIVIGILA) en el municipio de Nariño

Sector Salud

STELLA ZARAMA BENAVIDES

Economista, Magister en Estudios Interdisciplinarios de Desarrollo

Docente en el área Ambiental e Investigación – Universidad de Nariño

Sector Económico

FRANCISCO MAFLA CHAMORRO

Ingeniero Sanitario, Magister en ciencias de la ingeniería, Mención Recursos Hídricos

Docente en el área de Recursos Hídricos – Universidad Mariana – Consultor independiente

Sector Ambiental