DETECCIÓN DE ZONAS DE EXPANSIÓN URBANA USANDO IMÁGENES ORTORRECTIFICADAS. CASO DE ESTUDIO: CIUDAD PEREIRA – RISARALDA

Autor

Carlos Iván Gallego Álvarez

Directora

María de Pilar Camacho Hernández

Ingeniera Catastral y Geodesta, Colombia

Especialista en Catastro Multipropósito, Universidad de Jaén, España

Magíster en Geografía, Universidad Pedagógica y Tecnológica, Colombia

Docente Tiempo Completo Universidad Santo Tomás

Docente (r) Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Universidad Distrital Francisco José De Caldas

Facultad Tecnológica - Maestría en Ingeniería Civil

Bogotá, Colombia

2025.

DETECCIÓN DE ZONAS DE EXPANSIÓN URBANA USANDO IMÁGENES ORTORRECTIFICADAS. CASO DE ESTUDIO: CIUDAD PEREIRA – RISARALDA

Autor

Carlos Iván Gallego Álvarez

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar por el título de Magíster en Ingeniería Civil.

Directora

María de Pilar Camacho Hernández, Ing. Catastral y Geodesta

Esp. En Catastro Multipropósito, Mag. En Geografía

Línea de Profundización:

Construcción y Hábitat.

Universidad Distrital Francisco José De Caldas

Facultad Tecnológica - Maestría en Ingeniería Civil

Bogotá, Colombia

2025.

NOTA DE ACEPTACIÓN

FIRMA TUTORA

DEDICATORIA

"A Dios, por ser mí guía espiritual y fortaleza en todos los momentos de mi vida; a mis padres Nohora Patricia Álvarez Roa y Carlos Mario Gallego Sáenz, por darme el don preciado de la vida, por todo su amor, dedicación, apoyo y por enseñarme a ser perseverante, resiliente, valiente y por creer en mí siempre; a mi hija Luciana Gallego Prieto, por ser mi motivación constante y la luz de mis ojos"

"Todos tenemos sueños. Pero para convertir los sueños en realidad, se necesita una gran cantidad de determinación, dedicación, autodisciplina y esfuerzo"
(Jesse Owens)

AGRADECIMIENTOS

Primero quiero agradecer a Dios por ser mí norte y mí fortaleza.

A mi familia, mi gran motivación, mi punto de partida, que con sus voces de aliento y apoyo constante permitieron que perseverara hasta poder lograr este tan anhelado sueño y meta forjada.

Doy las gracias a mí alma máter la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y al Proyecto Curricular de Maestría en Ingeniería Civil, en especial a su coordinador el Doctor Jorge Arturo Pineda Jaimes y a la ingeniería María del Pilar Camacho Hernández, por brindarme su apoyo y colaboración en darme la posibilidad de sacar adelante este proyecto personal.

Agradezco de igual manera a todas las personas (docentes, amigos, compañeros, colegas, conocidos, etc.), que de una u otra manera me acompañaron y me apoyaron en el desarrollo de este estudio.

¡Gracias!

"Tú eres el proyecto más importante de tu vida, reiníciate, enfócate, vuelve a comenzar las veces que sean necesarias, pero jamás te rindas"

CONTENIDO

RESUMEN 14

PALABRAS CLAVE 14

ABSTRACT 15

KEYWORDS 15

INTRODUCCIÓN 16

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 18

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 18

1.2. ANTECEDENTES Y CONTEXTO DEL PROBLEMA 24

1.3. FORMULACIÓN Y SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA 29

2. OBJETIVOS 31

2.1. OBJETIVO GENERAL 31

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 31

3. JUSTIFICACIÓN 33

4. MARCO DE REFERENCIA 43

4.1. ESTADO DEL ARTE 43

4.2. MARCO TEÓRICO 64

4.3. MARCO CONCEPTUAL 77

4.4. MARCO ESPACIAL 77

4.5. MARCO LEGAL 81

5. METODOLOGÍA 82

5.1. COMPONENTE GENERAL 84

5.2. COMPONENTE ESPECÍFICO 84

5.2.1. CARACTERIZACIÓN DE IMÁGENES Y PREPROCESAMIENTO 84

5.2.2. CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES POR ÁREA URBANA 108
5.2.3. DETECCIÓN DE CAMBIOS DE CRECIMIENTO URBANO 115
5.2.4. MODELO DE IDONEIDAD – ACCESIBILIDAD TERRITORIAL 130
5.2.5. COMPARACIÓN DE CLASIFICACIÓN 2019 Y LUGARES IDÓNEOS 139
5.2.6. SINOPSIS DEL DESARROLLO CONCEPTUAL Y METODOLÓGICO 140
6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS 141
6.1. CLASIFICACIÓN DE LAS IMÁGENES 141
6.2. DETECCIÓN DE ÁREAS URBANAS 142
6.3. PROCESAMIENTO Y EXTRACCIÓN DE ÁREAS URBANAS 142
6.4. DETECCIÓN DEL CRECIMIENTO URBANO 143
6.5. ANÁLISIS POR MUNICIPIO 143
6.6. RESULTADOS EXPORTADOS 143
6.7. RESULTADOS Y COMPARACIÓN DEL MODELO DE IDONEIDAD 143
6.8. SINTESIS DE LOS RESULTADOS ALCANZADOS 145
6.9. EVALUACIÓN DE LOS DIFERENTES RESULTADOS 147
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 150
8. RECURSOS Y PRESUPUESTO 154
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 155
ANEXOS 161

Lista de Figuras

		pág.
Figura 1.	Población en ciudades de Colombia proyectado	20
Figura 2.	Población urbana vs población rural en Colombia	21
Figura 3.	Suelo urbano y de expansión municipio de Pereira	21
Figura 4.	Definición del problema	24
Figura 5.	Formulación usos del suelo y su aplicación	34
Figura 6.	Suelo urbano y de expansión y categorías de protección - Pereira	34
Figura 7.	Concentración de la población en Pereira	39
Figura 8.	Áreas construidas en el periodo 2003 - 2019	40
Figura 9.	Imágenes multitemporales	44
Figura 10.	Extensión del área Urbana zona metropolitana de la Ciudad de México	45
Figura 11.	Evolución de las superficies artificiales (1984 – 2011)	49
Figura 12.	Municipios con mayor tasa de crecimiento urbano en Hidalgo - México	51
Figura 13.	Índices basados en tamaños múltiples de simulación (2003-2018)	54
Figura 14.	Simulaciones basadas en autómatas celulares (2014-2018)	55
Figura 15.	Procesamiento de imágenes satelitales nocturnas	56
Figura 16.	Cartografía Sintesis de un proceso de conurbación	57
Figura 17.	Evolución NDBI para imágenes 2000, 2012 y 2017.	58
Figura 18.	Imágenes de clasificación multitemporal 2000, 2012, 2017	58
Figura 19.	Imágenes proyectadas 2025 y 2030	59
Figura 20.	Distribución espacial de los datos que influyen en las inundaciones	60
Figura 21.	Distribución de ciudades mundiales	62
Figura 22.	Distribución del crecimiento global	62
Figura 23.	Representación supervisada y no supervisada de forma urbana	63
Figura 24.	Clasificación por pixeles – Segmentación semántica	71
Figura 25.	Clasificación por pixeles – Representación del terreno	71
Figura 26.	Componentes Planificación simple basada en datos	74
Figura 27.	Sinopsis concepto calidad de vida	76
Figura 28.	Sinopsis y estructura conceptual	77

Figura 29. Localización detallada Cabecera Municipal Pereira - Risaralda 78
Figura 30. Localización espacial Cabecera Municipal Pereira - Risaralda 79
Figura 31. Localización Departamento Risaralda - Colombia 79
Figura 32. Descripción de las fases metodológicas 82
Figura 33. Desarrollo metodológico del estudio de caso 83
Figura 34. Plataforma para la escogencia de imágenes satelitales 86
Figura 35. Categorías de Nubosidad en Pereira 87
Figura 36. Imagen Landsat 1986 88
Figura 37. Imagen Landsat 1989 88
Figura 38. Imagen Landsat 1998 89
Figura 39. Imagen Landsat 1999 89
Figura 40. Imagen Landsat 2004 90
Figura 41. Imagen Landsat 2007 90
Figura 42. Imagen Landsat 2012 91
Figura 43. Imagen Landsat 2015 91
Figura 44. Imagen Landsat 2019 92
Figura 45. Imagen Landsat 2019 92
Figura 46. Imagen Sentinel 2012 93
Figura 47. Imagen Sentinel 2017 93
Figura 48. imágenes escogidas sensor Landsat 94
Figura 49. Caracterización imágenes escogidas sensor Landsat 94
Figura 50. Creación de usuario plataforma Google Earth Engine 95
Figura 51. Código GEE_1989.py 96
Figura 52. Código GEE_1998.py 97
Figura 53. Código GEE_2019.py 97
Figura 54. Generación de imágenes Base 98
Figura 55. Imágenes descargadas de GEE - 1989 98
Figura 56. Imágenes descargadas de GEE - 1998 99
Figura 57. Imágenes descargadas de GEE - 2019 99
Figura 58. Área de estudio – Huella Urbana de Pereira 100
Figura 59. Selección del área de Interés (AOI) 101
Figura 60. Imagen de recorte - 1989 (AOI) 101
Figura 61. Imagen de recorte - 1998 (AOI) 102

Figura 62. Imagen de recorte - 2019 (AOI) 102
Figura 63. Geoprocesamiento cálculo de índice NDBI - 1989 103
Figura 64. Resultado cálculo de índice NDBI - 1989 103
Figura 65. Método de combinación de bandas 104
Figura 66. ScriptTools NDBI Composicion Bands Imagen final 105
Figura 67. Variables definidas de entrada y salida (parámetros) 105
Figura 68. Descripción de la herramienta construida 106
Figura 69. Datos salidas finales NDBI (1989,1998 y 2019) 106
Figura 70. Imagen Final año 1989 107
Figura 71. Imagen Final año 1998 107
Figura 72. Imagen Final año 2019 108
Figura 73. Imagen muestras de clasificación supervisada 109
Figura 74. Creación archivo en formato ECD (árboles aleatorios) 110
Figura 75. Clasificación Ráster para cada una de las imágenes 110
Figura 76. Corrección y clasificación pixel por pixel-1989 111
Figura 77. Corrección y clasificación pixel por pixel-1998 111
Figura 78. Corrección y clasificación pixel por pixel-2019 112
Figura 79. Herramienta para extracción de área urbana de cada imagen 112
Figura 80. Clasificación de área urbana (1989) 113
Figura 81. Clasificación de área urbana (1998) 113
Figura 82. Clasificación de área urbana (2019) 114
Figura 83. Diseño de herramienta Model Builder – Clasificación de imágenes 115
Figura 84. Código Script – Detección de cambios.py 116
Figura 85. Parámetros establecidos para la Detección de cambios 116
Figura 86. Geoprocesamiento Detección de cambios crecimiento urbano 117
Figura 87. Mapa área Urbana - 1989 118
Figura 88. Mapa solo Suelo Urbano - 1989 118
Figura 89. Mapa área Urbana - 1998 119
Figura 90. Mapa solo Suelo Urbano - 1998 119
Figura 91. Mapa área Urbana - 2019 120
Figura 92. Mapa solo Suelo Urbano - 1998 120
Figura 93. Mapa crecimiento 1989 - 1998 121
Figura 94. Mapa crecimiento 1998 - 2019 121

Figura 95. Plataforma de datos abiertos – POT Pereira - Risaralda 131
Figura 96. Información vectorial Datos Modelo de Idoneidad 131
Figura 97. Variables feature class – Modelo Idoneidad 132
Figura 98. DEM generado corte AOI 133
Figura 99. Implementación de la herramienta Distance Accumulation 136
Figura 100. Reclasificación conversión formato ráster modelo de idoneidad 137
Figura 101. Parametrización Distance Acculumulation 138
Figura 102. Diseño Model Builder para variables del modelo de idoneidad 138
Figura 103. Mapa lugares idóneos ubicación área urbana en Pereira-Risaralda 139
Figura 104. Distribución del área urbana de Pereira según idoneidad – año 2019 139
Figura 105. Diagrama de flujo sinopsis del desarrollo conceptual y metodológico 140

Lista de Tablas

		pág.
Tabla 1.	Determinación de Suelos de Expansión Urbana en Colombia	26
Tabla 2.	Población de Pereira según Censos Nacionales	40
Tabla 3.	Tipos y características de sensores remotos	69
Tabla 4.	Información catastral del municipio de Pereira	78
Tabla 5.	Caracterización imágenes satelitales SPOT	86
Tabla 6.	Resumen cambio urbano Pereira - Risaralda	114
Tabla 7.	Cuadro área de municipios – año 1989	122
Tabla 8.	Cuadro área de municipios – año 1998	122
Tabla 9.	Cuadro área de municipios – año 2019	122
Tabla 10.	Cuadro Resumen por año - cambio urbano en los municipios	123
Tabla 11.	Cuadro escogencia variables modelo de idoneidad	135
Tabla 12.	Presupuesto proyectado	154

Lista de Gráficas

pág.

Gráfica 1. Población Urbana Vs Población Rural Mundial 19
Gráfica 2. Población Urbana y Rural Colombia (1951-2050py) 19
Gráfica 3. Crecimiento Pereira y Dosquebradas - 1989 (m2) 128
Gráfica 4. Crecimiento Pereira y Dosquebradas - 1998 (m2) 128
Gráfica 5. Crecimiento Pereira y Dosquebradas - 2019 (m2) 128
Gráfica 6. Área Urbana Pereira – Dosquebradas (Ha) 129
Gráfica 7. Área Urbana de crecimiento Pereira – Dosquebradas desde 1989 (Ha) 129
Gráfica 8. Área Urbana de crecimiento Pereira desde 1989 (Ha) 129
Gráfica 9. Área Urbana de crecimiento Dosquebradas desde 1989 (Ha) 130

RESUMEN

El estudio de caso desarrolla una propuesta práctica de análisis para la ventana temporal comprendida en los años ***1989, 1998 y 2019***, implementando la utilización y el procesamiento de imágenes *-ortorrectificadas-* del satélite ***Landsat*** bajo los sensores 4, 5 y 8, empleando recursos y herramientas tecnológicas para considerar lo que llamamos como crecimiento y ocupación urbana de la cabecera municipal de Pereira – Risaralda – Colombia.

Catalogada como *ciudad intermedia* de acuerdo a la clasificación y categorización dada por organizaciones internacionales donde son descritas como "*áreas urbanas funcionales*" por su incremento permanente tanto demográfico como urbano, la ciudad de Pereira requiere de un análisis que posteriormente entregue una metodología que guíe el proceso de decisión y la ejecución de medidas en la planeación adecuada del uso del suelo, la forma en que se ocupa el territorio y se estructuran las zonas para permitir el crecimiento urbano.

La herramienta espacial de Sistemas de Información Geográfica - SIG, como la que se diseñó en esta investigación, facilita la identificación prospectiva de áreas de ampliación de la huella urbana durante el periodo de tiempo escogido, de igual manera, a través del análisis de los resultados, permite ofrecer alternativas que puedan ser utilizadas para garantizar las circunstancias mínimas de habitabilidad y calidad de vida a través de establecer patrones de accesibilidad territorial y adquisición de bienes y servicios por parte de las personas, además de orientar las formas de disminución de las consecuencias ambientales y económicas adversas en pro de la utilización consciente de los recursos naturales, respeto por el medio ambiente y compromiso con el desarrollo sustentable.

PALABRAS CLAVE

Imágenes Satelitales, Crecimiento Urbano, Sistemas de Información Geográfica, Accesibilidad Territorial, Planificación Territorial.

ABSTRACT

The case study develops a practical analysis proposal for the time window between 1989, 1998, and 2019, implementing the use and processing of orthorectified images from the Landsat satellite under sensors 4, 5, and 8, using technological resources and tools to consider what we call urban growth and occupation in the municipal capital of Pereira, Risaralda, Colombia.

Classified as a medium-sized city according to the classification and categorization given by international organizations, which describe them as *"functional urban areas"* due to their permanent demographic and urban growth, the city of Pereira requires an analysis that will subsequently provide a methodology to guide the decision-making process and the implementation of measures in the proper planning of land use, the way in which the territory is occupied, and the structuring of areas to allow for urban growth.

The Geographic Information System (GIS) spatial tool, such as the one designed in this research, facilitates the prospective identification of areas of urban sprawl during the chosen time period. Similarly, through the analysis of the results, it allows for the offering of alternatives that can be used to guarantee minimum conditions of habitability and quality of life by establishing patterns of territorial accessibility and acquisition of goods and services by the population, as well as guiding ways to reduce adverse environmental and economic consequences in favor of the conscious use of natural resources, respect for the environment, and commitment to sustainable development.

KEYWORDS

Satellite Images, Urban Growth, Geographic Information Systems, Territorial Accessibility, Territorial Planning.

INTRODUCCIÓN

La idea inicial del presente estudio de caso, surge a partir del fenómeno del crecimiento demográfico y urbano de las ciudades denominadas *intermedias* según su población, de acuerdo a la (OECD, 2015)[1], que categoriza aquellas *r*egiones de acuerdo con: *"a. áreas pequeñas con una población inferior a 200.000 habitantes, b. espacios de muestra intermedia con una población entre 200.000 y 600.000 habitantes, c. zonas metropolitanas con una población entre 600.000 y 1,5 millones de habitantes, y d. amplias áreas metropolitanas con una población superior a 1,5 millones de habitantes.",* con un factor exponencial de desarrollo en infraestructura civil, que tiene implicaciones económicas y sociales y, genera efectos en las regiones circundantes. Esta expansión urbana, en muchas ocasiones no adecuadamente planificada ni regulada, produce impactos importantes sobre el medio ambiente alterando el Desarrollo Sostenible y, simultáneamente, ocasionando detrimentos patrimoniales y pérdida de recursos económicos; de acuerdo a esto, considero que al realizar un estudio de análisis en un sistema basado en la investigación a través de los años ***(1989, 1998 y 2019)*** del aumento del tejido urbano de la ciudad y de la configuración espacial de las áreas proyectadas y propensas a ser expandidas teniendo en cuenta factores de accesibilidad territorial a servicios básicos por parte de las personas, se podrá contrarrestar y mitigar este tipo de consecuencias que suelen derivar en daños de carácter irreversible.

Para este estudio se escogió la Cabecera Municipal de Pereira – Risaralda – Colombia, por clasificarse como *ciudad intermedia* por su número de habitantes de aproximadamente 482.483, y dado a que posee el índice más alto de suelos de expansión urbana en el país; según (DANE - Business, 2024) *"con más de 1500 hectáreas disponibles"*, se clasifica en esta categoría, ya que atendiendo a criterios topográficos y poblacionales internacionales es catalogada como *área urbana funcional* y, por lo tanto, susceptible de crecimiento y expansión.

De igual manera, y al revisar los informes de revisión y análisis del Plan de Ordenamiento Territorial (2016-2027), y según un estudio elaborado por (Planeación, Formulación revisión

[1] Organización para la cooperación y el Desarrollo Económico

e implementación de los instrumentos de planificación del OT de Pereira, 2024), la población disminuyó en los últimos años pasando de 0,85% frente a 3,67% según datos históricos; por lo que, es claro indicar que como método de conservación de suelo, según el desarrollo del estudio, no existe la pretensión de habilitar más para el desarrollo de vivienda, de igual manera, al analizar estos factores de allí se recalca que de acuerdo a estas cifras existe una clara desarticulación entre los Planes de Desarrollo y los Programas de Ejecución del POT[2]; a su vez, el perímetro urbano cuenta con 160 hectáreas de suelo urbanizable – no urbanizado, lo que permitirá que las herramientas geoespaciales generadas en actuales investigaciones y disertaciones promuevan alternativas que orienten el desarrollo de suelos de expansión en búsqueda de una planificación adecuada que estructure la disposición urbana actual, de acuerdo con el modelo de ocupación definido en el POT desarrollado por el municipio.

En consecuencia, resulta imperioso hallar soluciones que guíen a los territorios y a las administraciones en la consecución de sus POT; en el actual análisis de caso conducente a la caracterización, utilización y el procesamiento de imágenes -*ortorrectificadas*- Landsat 4, 5 y 8 que orienten, en primera instancia, la determinación de la evolución de la huella urbana en la superficie de estudio; en segundo lugar, el diseño o la construcción de una herramienta espacial SIG[3] que permita ubicar, identificar y reconocer en una relación espacio - tiempo zonas propensas a ser urbanizadas, y que sean además adecuadas para la habitabilidad y el bienestar de las personas; y en tercer lugar, detectar en estas áreas algunos patrones de adecuación para el mejoramiento de la vida de las personas en cuanto, a accesibilidad territorial y la adquisición de los servicios de primera necesidad.

Como resultado, se destaca la importancia de una planificación territorial apropiada en nuestro país con el fin de promover el desarrollo sostenible en aquellas zonas que, debido a las peculiaridades de su ubicación, tienen el potencial de favorecerse a largo plazo de los adelantos en las disertaciones que, a nivel nacional como internacional, se están logrando en Medio Ambiente, Hábitat, Geomática e Ingeniería Civil.

[2] Plan de Ordenamiento Territorial
[3] Sistemas de Información Geográfica

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

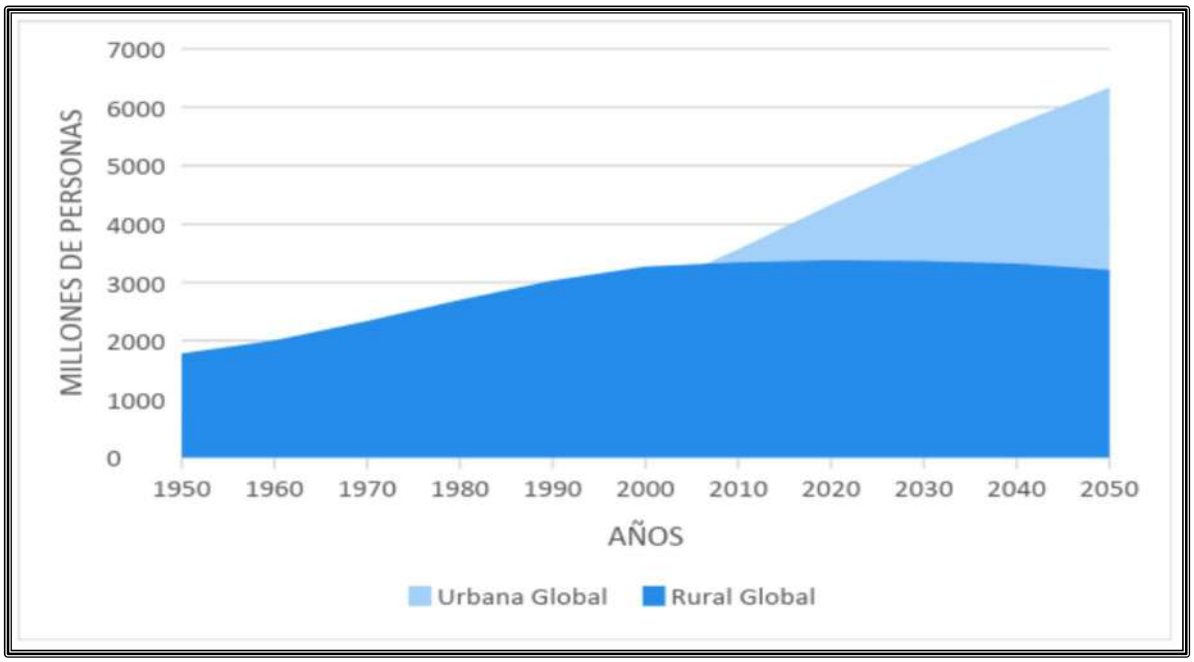
La identificación de zonas de crecimiento urbano con el apoyo de técnicas de procesamiento y análisis de imágenes -*ortorrectificadas*-, como estudio de caso localizado en la cabecera municipal de Pereira – Risaralda - Colombia, podría ser un aporte a la solución de la problemática generada por la desmedida y desordenada expansión que constituye un problema común en la generalidad de los entornos urbanos de las ciudades, municipios y regiones de Colombia.

De acuerdo a la investigación desarrollada por (Planeación, Manual de la Innovación - Expansión Urbana Ordenada, 2017), la expansión urbana ha sido asociada como un fenómeno negativo a lo largo del tiempo, por lo que se tiene en cuenta, que esta ocurrencia en gran medida se da por los asentamientos informales que frecuentemente se presentan en zonas de alto riesgo, o en aquellas áreas de gran impacto o alcance ambiental o también aquellas áreas que no presentan disponibilidad para la provisión efectiva de servicios básicos a la ciudadanía.

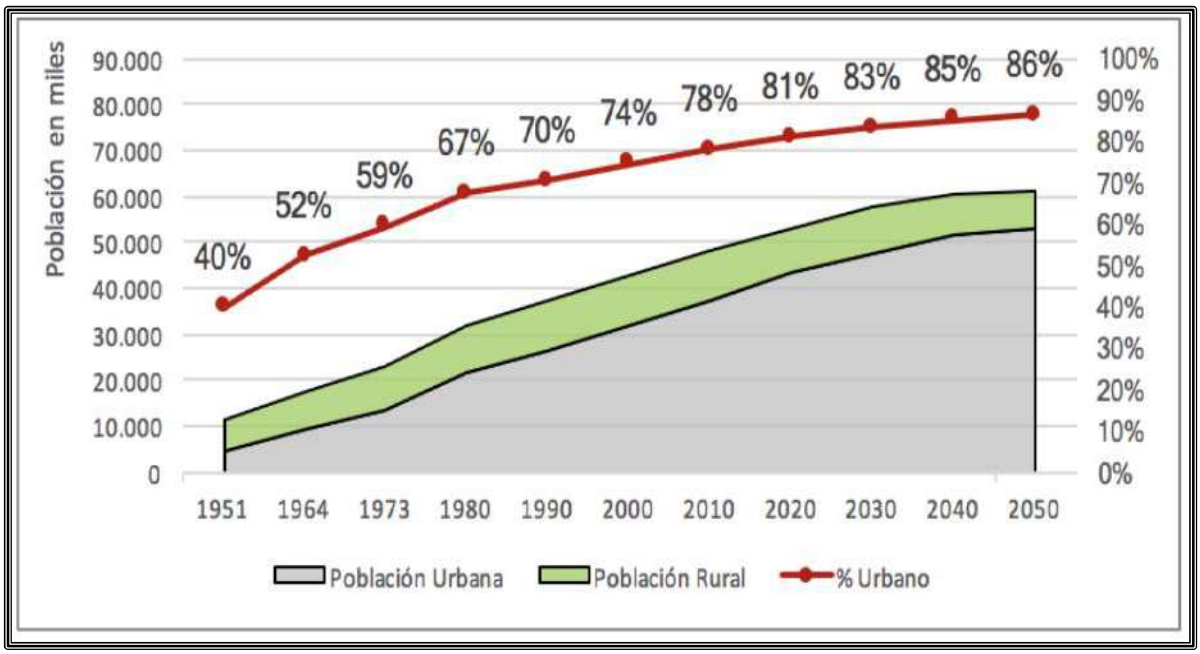
Lo anterior, y según las tendencias descritas para este tipo de análisis y estudios, se puede concluir que los procesos de crecimiento y de aumento urbano se han venido incrementando exponencialmente en los últimos tiempos, de acuerdo al mismo estudio, (Planeación, Manual de la Innovación - Expansión Urbana Ordenada, 2017), en el año 1950 tres de cada diez personas a nivel mundial habitaban en zonas urbanizadas, ya para el año 2015, este valor sobrepasó el umbral del 50% y con una proyección a futuro en 2024 y finales del siglo XXI donde se espera sea sobrepasada la cifra del 80%, es relevante argumentar que según este análisis, este factor de incremento se da sobretodo en ciudades altamente desarrollables como Pereira y en un país como Colombia en constante proceso de evolución visto desde todos los enfoques posibles.

El desconocimiento de los estudios sobre el uso de los tipos de suelos en Colombia ha conducido a manejarlos incorrectamente en las políticas de desarrollo urbano de muchas de las cabeceras municipales, afectando las interacciones de carácter social, económico y

ambiental en las que se sustenta el concepto de Desarrollo Sostenible, concepto de aplicabilidad casi obligada según acuerdos y reglamentaciones nacionales e internacionales.



Gráfica 1. Población Urbana Vs Población Rural Mundial
Fuente: Departamento Nacional de Planeación - 2017



Gráfica 2. Población Urbana y Rural Colombia (1951-2050py)
Fuente: Sistemas de Ciudades y DANE

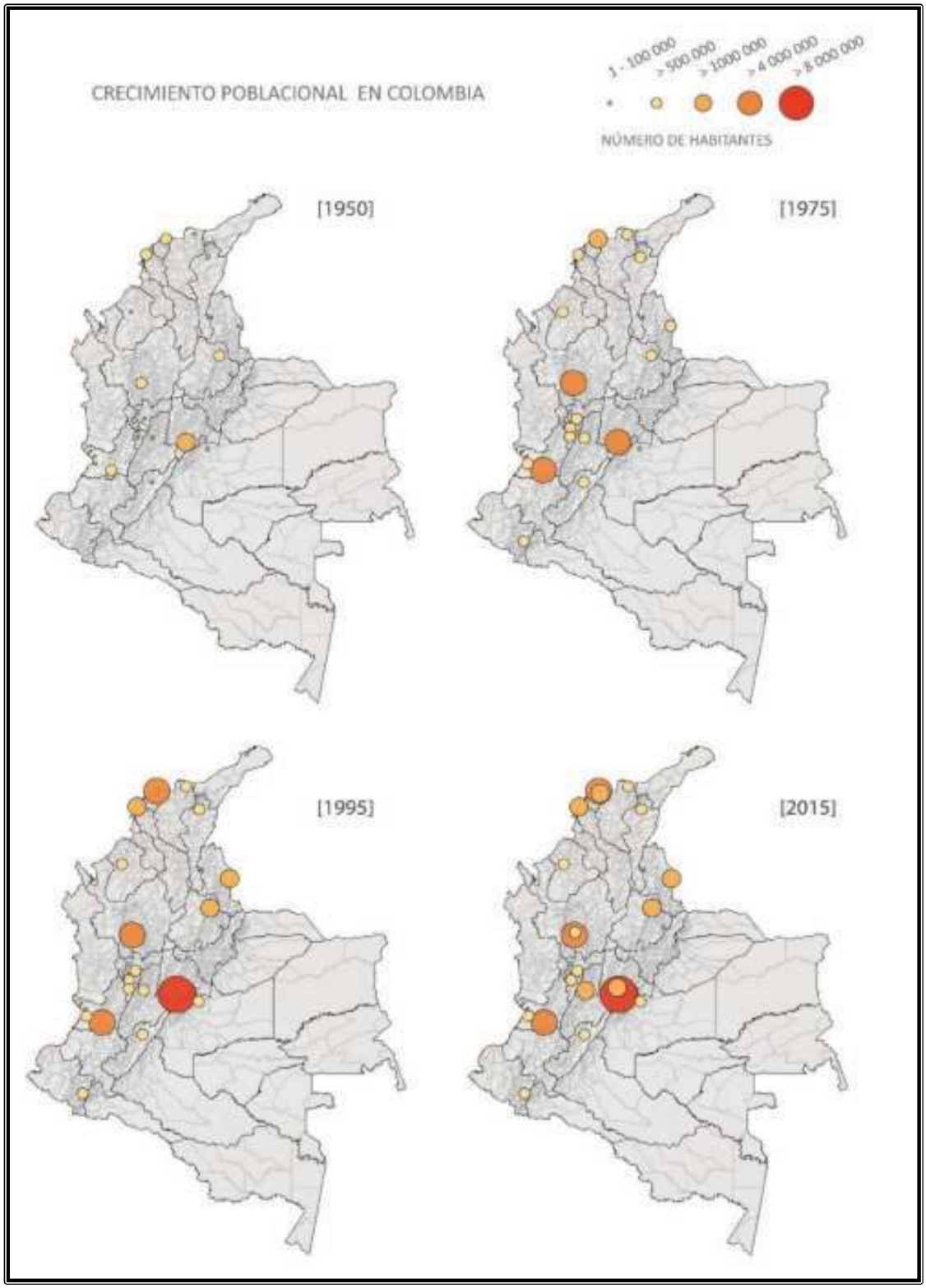


Figura 1. Población en ciudades de Colombia proyectado
Fuente: Manual de la Innovación Expansión Urbana Ordenada

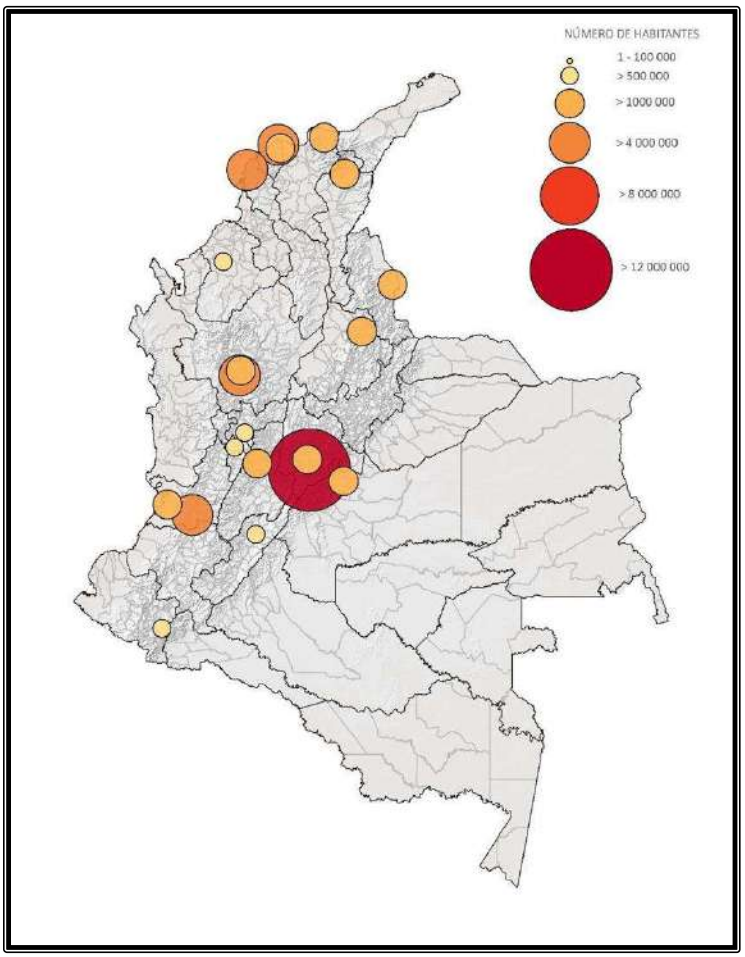


Figura 2. Población urbana vs población rural en Colombia
Fuente: Manual de la Innovación Expansión Urbana Ordenada

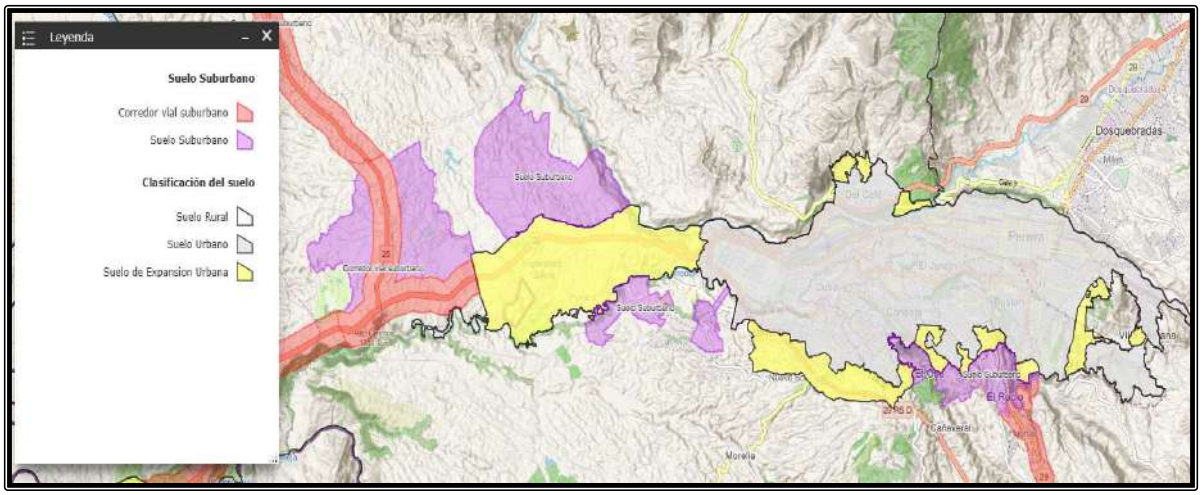


Figura 3. Suelo urbano y de expansión municipio de Pereira
Fuente: POT Pereira 2016 - 2027

El desarrollo urbanístico de las diferentes ciudades está determinado por el POT, el cual presenta diferentes parámetros y variables tanto cuantitativas como cualitativas. Estos planes presentan un alto grado de subjetividad debido a que están influenciados por los tomadores de decisiones y no son estructurados de manera técnico-científica. En consecuencia, las ciudades en Colombia crecen de forma desordenada, sin tener en cuenta el territorio, la oferta de recursos ecosistémicos y la actividad antrópica.

En Colombia, la incorporación de nuevas áreas a los perímetros urbanos, por ocasiones producto de una incorrecta planificación y equivocada formulación de aquellos planes parciales, genera serias distorsiones en la planeación urbana de las ciudades y/o municipios, y que aun así son adoptadas en los POT, no obstante, la integración de estas regiones al perímetro metropolitano debía considerarse una realidad inevitable, y la nueva legislación debía modificarse para adaptarse a las repercusiones de este hecho específico.

De acuerdo a lo anterior, tomar las decisiones adecuadas al respecto implica identificar localizaciones de expansión territorial lo cual, requiere asumir los estudios sobre la clasificación y la ubicación geográfica que las entidades competentes han hecho de nuestros suelos, y optar por aquellos que reúnan las condiciones para el uso urbano y el crecimiento poblacional respetando patrones de sostenibilidad y accesibilidad territorial; de esta manera se haría uso de este recurso natural según su perfil y, en caso de ser necesario, se estaría también facilitando la implementación de las alternativas adecuadas para su recuperación.

En la medida que la ciudad de Pereira comprende un área urbana también afectada por la situación descrita, el presente estudio se encaminó a aportar alternativas de manejo y solución a este fenómeno, que se resume y se analiza de acuerdo con el siguiente problema central denominado:

"Insuficientes estudios de utilización y aplicación de imágenes satelitales para la generación de herramientas tecnológicas, que permitan la visualización, identificación y análisis a través del tiempo del crecimiento desbordado de la huella urbana y la delimitación de las zonas de expansión urbana en la ciudad de Pereira – Risaralda - Colombia"

La interpretación de este fenómeno permite establecer posibles causas como:

- La insuficiente aplicación de las políticas de expansión urbana vigentes para regular el crecimiento de los asentamientos en la cabecera municipal del área de estudio.

- La ambigüedad conceptual relacionada con los suelos rurales y urbanos, su caracterización y su importancia.

- Los vacíos en los planes de gobierno que orientan los procesos urbanísticos y la regulación del uso de los recursos naturales disponibles, como el suelo.

- La falta de actualización y/o aplicación de los recursos técnicos y tecnológicos que facilitan el acceso a datos sobre los sectores de desarrollo en el entorno urbano.

- El desaprovechamiento o uso inadecuado de las herramientas y recursos de georreferenciación para la ubicación de los suelos susceptibles de urbanización.

Los impactos temporales inmediatos, intermedios y prolongados que puede generar esta problemática estarían asociados principalmente a:

- Los inconvenientes para determinar la magnitud de las consecuencias en el ámbito social, económico y ambiental de la urbanización descontrolada.

- Las dificultades para establecer relaciones regionales con otros municipios y con las áreas rurales con los cuales se puede eventualmente formar redes regionales.

- El detrimento de la calidad de los suelos que no son urbanizables.

- Las afectaciones en el bienestar general de la población que habite estas zonas periféricas.

- La conformación y el establecimiento de Centros Poblados Rurales y Barrios subnormales o marginales.

- Las dificultades del gobierno municipal para asegurar la distribución de los servicios básicos y la accesibilidad que aseguren el bienestar y la dignidad a todas las familias.

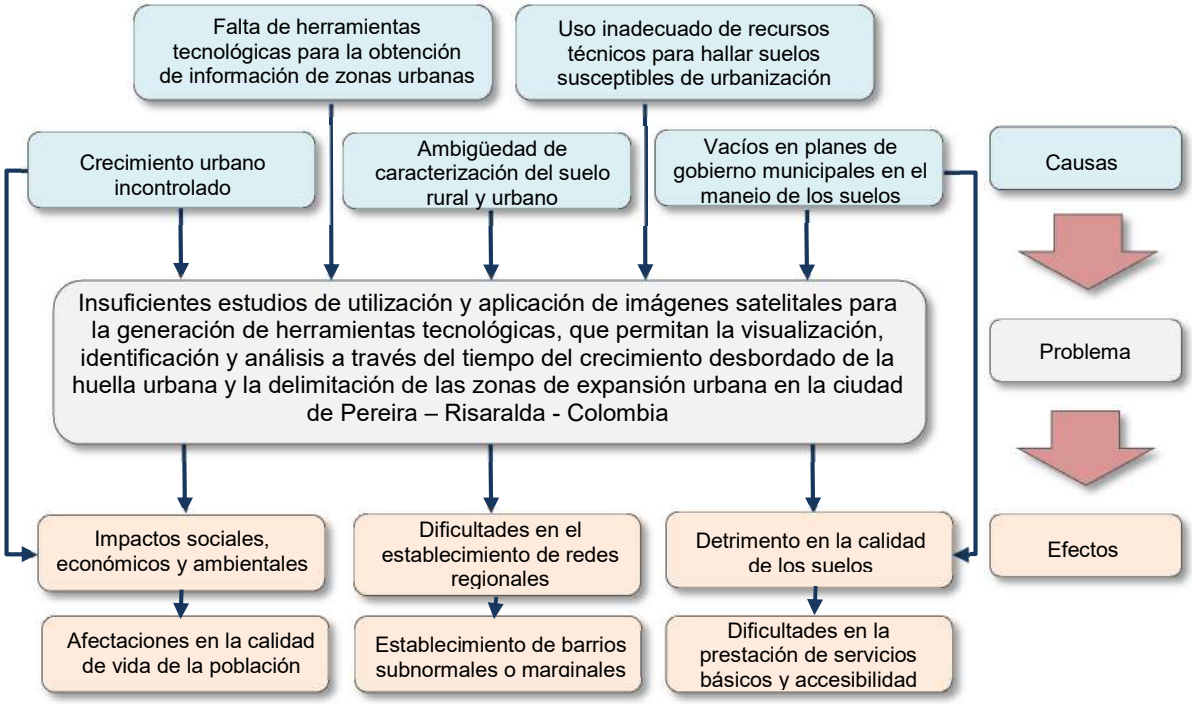


Figura 4. Definición del problema
Fuente: El autor

1.2. ANTECEDENTES Y CONTEXTO DEL PROBLEMA

Es necesario indicar inicialmente, que una de las problemáticas relacionadas tiene su origen en el desconocimiento de la información sobre variables de cobertura y análisis de crecimiento urbano en los territorios y el correcto aprovechamiento de los suelos propensos a ser urbanizables y no urbanizables.

Con base en lo descrito por (FONADE, 2017)[4]. Dentro del contexto para Colombia, el suelo de expansión urbana se encuentra *"determinado desde diferentes perspectivas y a diferentes niveles lo que permiten el análisis y la comprensión del territorio, sus particularidades, su progresión a lo largo del tiempo y el comportamiento dinámico, fundamentalmente, se centra en los espacios que conforman el ordenamiento territorial en el ámbito municipal y distrital, diferenciados entre zonas urbanas y rurales"*.

De igual manera (FONADE, 2017), argumenta que, *"el crecimiento urbanístico contempla una metodología que permite calcular tanto el crecimiento poblacional como la demanda de suelo; identificar áreas aptas para la expansión territorial; salvaguardar los terrenos frente a ocupaciones ilegales; incorporar los asentamientos informales dentro de los planes de expansión, y elaborar cartografía temática en lugar de limitarse únicamente a representar la zonificación que debería ser; para demarcar los elementos principales de los planes de crecimiento"*.

Con base en lo expuesto, el estudio de las interacciones demográficas en las diferentes jurisdicciones territoriales proporciona argumentos para comprender sus condiciones y contar con información precisa sobre su proyección de crecimiento. A su vez, a lo largo del siglo XX, Colombia experimentó un acelerado proceso de urbanización, caracterizado por el desplazamiento masivo de población desde las zonas rurales y municipios de baja categoría hacia los centros urbanos. Esta concentración poblacional en las ciudades generó una elevada demanda de vivienda y servicios públicos, lo que genera desafíos prioritarios que los gobiernos municipales deben atender.

Siguiendo por esta misma línea expuesta por (FONADE, 2017), se argumenta, que *"el estudio físico relacionado con la extensión y las características del suelo ocupado por una ciudad o municipio para sus diversos desarrollos urbanos tiene importantes repercusiones en la formulación de la estructura urbana proyectada, así como en la dimensión y naturaleza de las zonas destinadas a la expansión. El uso del suelo no se limita únicamente a la construcción de viviendas, sino que también abarca los espacios requeridos para la instalación de nuevos servicios, como equipamientos colectivos, espacios públicos, infraestructuras viales y actividades económicas, entre otros"*.

[4] Fondo Financiero de Proyectos de Desarrollo

Aspectos territoriales objeto de diagnóstico	Fuentes de información y herramientas técnicas	Resultados del análisis diagnóstico
-. Dimensión de las áreas clasificadas como suelo urbano, rural y de expansión. -. Correspondencia entre el perímetro de expansión proyectado y el límite sanitario. -. Incremento de asentamientos humanos fuera del perímetro urbano establecido. -. Patrones de ocupación en suelos rurales. -. Nivel de desarrollo del suelo de expansión durante la vigencia del POT. -. Identificación de procesos de sub-urbanización o conurbación. -. Configuración y subdivisión predial del territorio. -. Presencia de conflictos derivados de la clasificación del suelo y de las directrices del ordenamiento social de la propiedad.	-. Plano de clasificación del suelo conforme al POT vigente. -. Plano planimétrico del sistema sanitario. -. Aerofotografías actualizadas. -. Estadísticas de crecimiento poblacional dentro del periodo de vigencia del plan. -. Datos demográficos actuales del municipio. -. Licencias urbanísticas emitidas dentro de las zonas de expansión vigentes. -. Cartografía de asentamientos humanos. -. Planos topográficos. -. Plano catastral actualizado. -. Información catastral y registral de predios. -. Documentos técnicos, académicos y oficiales: estudios especializados, fuentes institucionales, expediente municipal y el POT correspondiente.	-. Plano actualizado de clasificación del suelo. -. Identificación precisa de la localización, características y volumen de predios en desarrollo o susceptibles de intervención. -. Diagnóstico sobre conflictos socio-territoriales. -. Diagnóstico temático de desarrollo territorial sostenible (DTS). -. Determinación del umbral de suburbanización vigente.

Tabla 1. Determinación de Suelos de Expansión Urbana en Colombia
Fuente: El autor

En un estudio realizado en el año 2002 por él (IGAC, 2002)[5], mediante documento denominado Informe de Gestión, se puntualiza que *"el uso del suelo se torna conflictivo cuando las prácticas actuales exceden o contradicen la oferta y las condiciones ambientales del territorio, por lo que en Colombia un 15% de estos se encuentran sobreutilizados y un 13% subutilizados".* Además el (SIAC, 2017)[6], dentro de un informe técnico elaborado en el

[5] Instituto Geográfico Agustín Codazzí
[6] Sistema de Información Ambiental en Colombia

año 2017, manifiesta que *"entre los factores que contribuyen a la degradación y al manejo no sostenible de los suelos del país, se asume que, el aumento en la solicitud de bienes y servicios, el desconocimiento generalizado sobre las funciones ecológicas y la relevancia del suelo, así como sobre las opciones disponibles para su recuperación, restauración y rehabilitación; además de procesos de planificación y ordenamiento territorial que no consideran adecuadamente las particularidades físicas, biológicas y funcionales del recurso suelo, además de evidenciar la falta de articulación entre instituciones y la falta de regulación normativa y herramientas que contribuyen a un desarrollo sustentable".*

Por consiguiente, es necesario enfatizar en la importancia de la información disponible sobre los suelos en Colombia y su relación con la infraestructura civil y los procesos de urbanización, además de hacer un llamado de atención a los factores políticos y económicos para que adopten e implementen propuestas tendientes a aplicar herramientas que favorezcan el aprovechamiento del suelo y eliminen o reduzcan los efectos del crecimiento urbano desorganizado.

Según la (ONU, 2007)[7], *"A nivel global, la población que vive en entornos urbanos ya supera a la rural, y las estimaciones demográficas prevén que, hacia el año 2050, el número de habitantes en ciudades será el doble que en las áreas rurales".* Lo que conlleva a establecer una adecuada regulación de la ocupación de los espacios rurales y de expansión, y a emplear estrategias de planificación acorde con el Desarrollo Sostenible de cada ciudad o región. En el mismo sentido, el Banco Mundial de Desarrollo en el año 2007 (BMS, 2007), recalca que *"los hacedores de politicas y los planificadores urbanos deberían cambiar el paradigma actual de la zonificación para el uso del suelo (residencia, comercio, industria, etc.), para tener áreas con mezcla de usos en las que las de oferta laboral estén más cerca o mezcladas con las áreas residenciales."*

De acuerdo con lo mencionado, es necesario comprender la dinámica y analizar el crecimiento particular de cada ciudad relacionando con ella el progreso económico y la sostenibilidad ambiental, cabe señalar que inicialmente se debe conocer y analizar lo dispuesto por las regulaciones dadas por el estado y la descripción propia del alcance de cada una de las regiones en su autonomía para desarrollar este tipo de planificación.

[7] Organización de las Naciones Unidas

El (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2011, pág. 28), estipuló en el año 2011 que "*corresponde a los municipios establecer normativas específicas sobre los usos del suelo en las zonas urbanas, rurales y de expansión. Conforme a la legislación vigente, se debe promover un uso eficiente del territorio y articular los planes de ordenamiento territorial con las políticas nacionales. Esta regulación busca garantizar tanto la coherencia territorial como la autonomía local, fomentando al mismo tiempo un desarrollo socioeconómico equilibrado en la región"*.

Atendiendo a estos estudios es necesario desarrollar propuestas que aborden los problemas que surgen de una inadecuada planeación e incorrecta adecuación de los entornos urbanos como de aquellos rurales que atañen directamente al uso del suelo y que guardan relación a su constante incremento, como sucede en la ciudad de Pereira para este caso.

Se debe revisar detenidamente que dificultades metodológicas hasta la actualidad podrían estar presentes en la consolidación de este tipo de información, y permitir realizar la escogencia de las herramientas adecuadas que contribuyan en disminuir y mitigar fallas en el planteamiento de ocupación espacial inicialmente planteado por la alcaldía de esta ciudad.

Según la investigación realizada por (J. Achicanoy, 2018), "*La extensión del área urbana ocasiona alteraciones ambientales que afectan negativamente a los ecosistemas, modificando su estructura interna y las funciones ecológicas que desempeñan"*.

De allí se deduce que la expansión urbana y más la que no contempla estudios a profundidad puede presentar la pérdida de áreas naturales con alto valor paisajístico, así como de suelos destinados a actividades agrícolas o cubiertos por vegetación nativa. A su vez, este crecimiento continuo genera una fuerte imposición sobre el territorio y sus recursos, lo que hace necesario implementar mecanismos de planificación y financiamiento orientados a incentivar la construcción en suelo urbano consolidado y en zonas de expansión, mediante planes parciales debidamente estructurados y adoptados.

La memoria justificativa vigente y producida en el año 2016 por la Alcaldía de la ciudad de Pereira (Pereira, Plan de Ordenamiento Territorial - Memoría Justificativa, 2016), sustenta,

a través de la normatividad vigente, la necesidad de conciliar el planteamiento de un POT con nuevas dinámicas necesarias para el desarrollo del territorio y su armonización con los aspectos socio-económicos de la población, y en consonancia con la Ley 388/1997 – *"Ley de Desarrollo Territorial",* en este contexto se reafirma la formulación de estrategias orientadas al uso, apropiación y gestión del suelo, conforme a metas de carácter económico, social y ambiental. De allí, que se debe configurar al interior del perímetro una ciudad equilibrada, a través de la ordenación del suelo urbano con densidades eficientes, y asumir el reto en contribución con la cabecera municipal en cuanto a la implementación de nuevos instrumentos de gestión de este recurso natural, que faciliten el desarrollo de sus diferentes categorías.

El crecimiento urbano, si bien refleja el dinamismo de las ciudades, plantea desafíos complejos en términos de sostenibilidad territorial, equidad social y conservación ambiental. En este contexto, resulta indispensable una planificación integrada que equilibre el desarrollo con la protección de los recursos y la calidad de vida de las generaciones presentes y futuras.

La presente investigación contribuiría, en razón de los estudios anteriores, a regular el proceso expansivo de la zona policéntrica de la ciudad, incentivando la creación y el uso de nuevas herramientas que permitan identificar las áreas de expansión urbana, y por ende, ayudar con la resolución de los conflictos relacionados con los servicios públicos, la movilidad y el déficit habitacional, teniendo en cuenta, la extensión de suelos urbanos en la región de estudio, según la Alcaldía de la ciudad de Pereira (Pereira, Informe Anual , 2019), que de 1542 hectáreas de suelo de desarrollo urbano en la región de observación, solo se han decretado 939,12 hectáreas, lo que indicó una falta de planificación para 602,86 hectáreas.

1.3. FORMULACIÓN Y SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA

A partir del planteamiento del problema, el principal interrogante que se afronta en el estudio es:

¿En qué medida, la utilización de imágenes satelitales puede favorecer la visualización, identificación y análisis a través del tiempo del crecimiento de la huella urbana y la

delimitación de las zonas de expansión urbana en la ciudad de Pereira – Risaralda - Colombia?

Consideremos ahora, los interrogantes complementarios:

¿Cómo ha sido el incremento a través del tiempo de la huella urbana y cómo es posible realizar su detección con la información aportada por imágenes satelitales –ortorrectificadas- en la zona de estudio?

¿Qué cambios en los procesos de expansión urbana se pueden detectar con la información aportada por imágenes satelitales –ortorrectificadas-, y con la construcción de una herramienta espacial SIG para el análisis de la zona de estudio?

¿Qué efectos produciría en la habitabilidad y accesibilidad territorial de la población (movilidad, adquisición de bienes y servicios, etc.), la información aportada por las imágenes –ortorrectificadas- en la ciudad?

¿Cómo contribuiría la aplicación de una herramienta espacial SIG, en el Desarrollo Sostenible de la ciudad?

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

El alcance de la presente investigación se concretó en el esclarecimiento de los siguientes objetivos los cuales presentaron una estructura articulada dentro de la cual uno depende del otro; son medibles ya que se emplearon recursos físicos y estuvieron vinculados a una delimitación de lapso temporal condicionada por la duración del proyecto. Estos objetivos y las actividades desarrolladas permitieron plantear una alternativa que orientara las acciones primero a la identificación del crecimiento urbano a través del tiempo de la ciudad y segundo a la reorganización prospectiva de zonas de expansión urbana en la cabecera municipal, además resultó pertinente y oportuno considerar un enfoque de análisis a partir de la utilización de imágenes satelitales ***Landsat*** que coadyuvara a prevenir la sobreutilización, mitigar la subutilización del suelo, y emplear alternativas de mejoramiento continuo en los procesos para su ocupación en esta zona de Colombia, el cual podría eventualmente llegar a implementarse en cualquier otro territorio.

En este sentido, el objetivo general de este proyecto fue:

- *Elaborar un estudio de caso, que permita generar una metodología basada en el análisis de imágenes satelitales –ortorrectificadas-, para analizar el crecimiento de la huella urbana y detectar zonas de expansión urbana en la cabecera municipal de Pereira-Risaralda-Colombia.*

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- *Caracterizar las imágenes satelitales –ortorrectificadas- adecuadas, para analizar su utilización en la detección del crecimiento urbano y la localización de zonas de expansión urbana en el área de estudio.*

- *Construir una herramienta espacial SIG por medio de un software especializado, para la detección de zonas de expansión urbana en el área de estudio.*

- *Evaluar la aplicabilidad del estudio para obtener una metodología, teniendo en cuenta patrones de expansión urbana para la accesibilidad e integración territorial en el área de estudio.*

3. JUSTIFICACIÓN

El estudio de caso *"Detección de zonas de expansión urbana usando imágenes satelitales -ortorrectificadas- en la ciudad de Pereira – Risaralda - Colombia",* utiliza instrumentos y opciones tecnológicas para la generación de productos que permitan analizar el desarrollo del crecimiento de la huella urbana y el comportamiento relacionado con la localización de zonas de expansión, como medida para prevenir y mitigar los impactos derivados de una planificación deficiente en la ocupación del suelo urbano, según un estudio de la UNGRD[8] señala que *"una proporción significativa de los desastres registrados a nivel nacional y donde resalta que aproximadamente el 88% se relaciona con eventos como inundaciones, movimientos en masa, periodos de sequía y flujos de lodo. En el contexto específico de la ciudad, las condiciones topográficas y la heterogeneidad de los suelos hacen necesario aplicar enfoques metodológicos que contribuyan a restringir el crecimiento urbano en áreas caracterizadas por una alta susceptibilidad a este tipo de amenazas".*

La presente investigación se enmarca en los objetivos globales de sostenibilidad, en particular en consonancia con el Objetivo de Desarrollo del Milenio número 7 de las Naciones Unidas, orientado a garantizar la sostenibilidad del entorno natural. De forma específica, guarda relación con la Meta 7A, que promueve la incorporación de principios de desarrollo sostenible en las políticas públicas y programas nacionales, así como la mitigación de la pérdida de recursos naturales. Del mismo modo, el estudio se articula con los postulados del Plan Nacional de Desarrollo 2022–2026, el cual impulsa el uso de tecnologías para recopilar y analizar información demográfica y territorial, tanto a nivel local como nacional.

Esta investigación se fundamenta en los lineamientos definidos por la Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, expedida por el Ministerio del Interior y de Justicia de Colombia, la cual establece que la organización del espacio territorial debe orientarse hacia un equilibrio entre el crecimiento económico y la sostenibilidad ambiental, con el fin último de garantizar condiciones de vida adecuadas para la población. Además, dicha normativa resalta la importancia de que cada región mantenga su autonomía e integridad territorial

[8] Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres

como elemento clave para alcanzar un desarrollo socioeconómico equitativo. En este marco, el estudio propone una herramienta técnica que contribuya al cumplimiento de las disposiciones legales, en especial en lo relativo a la regulación de los usos del suelo en zonas urbanas, rurales y de expansión.

De igual manera, el trabajo busca estar en sintonía con los lineamientos definidos por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio respecto a la estructuración del componente urbano en las distintas regiones del país. El objetivo general consiste en destacar los marcos normativos aplicables a la gestión del suelo urbano y de expansión, incentivando a los municipios a incorporar en sus POT criterios que respondan a las características físicas específicas de cada área.

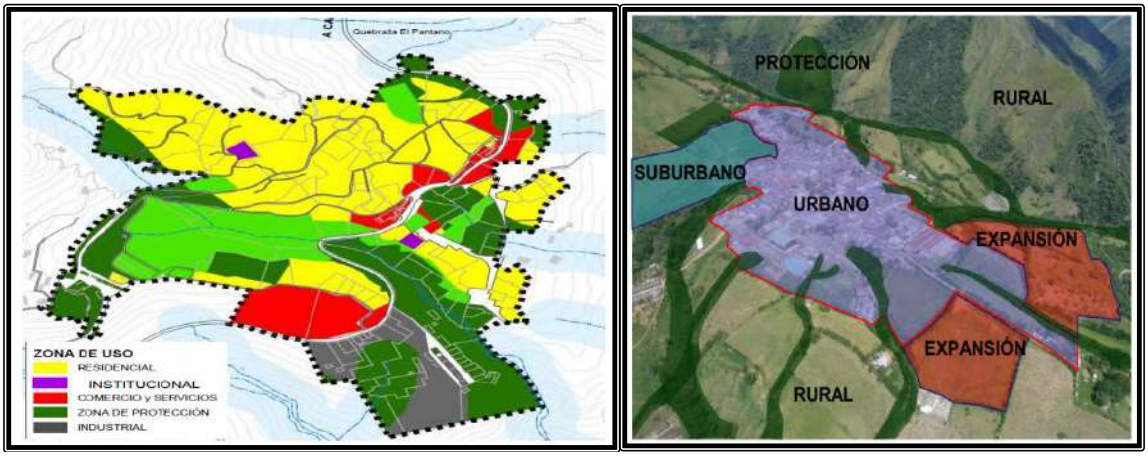


Figura 5. Formulación usos del suelo y su aplicación
Fuente: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia

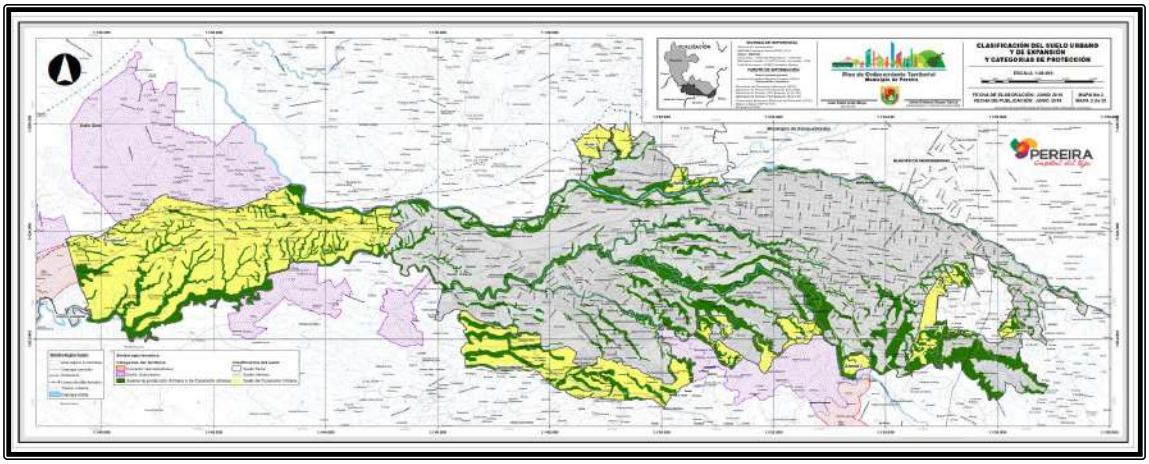


Figura 6. Suelo urbano y de expansión y categorías de protección - Pereira
Fuente: POT 2016-2027

Consecuentemente, resulta también indispensable analizar las causas que generan el crecimiento urbano para Colombia y también de manera particular para la ciudad de Pereira, y como a través de políticas públicas establecidas se puede hacer un acompañamiento regulado y controlado de este fenómeno, de acuerdo con esto en Colombia esta variable ha sido un fenómeno sostenido y complejo, influenciado por múltiples factores de orden social, económico, institucional y territorial. Su comprensión requiere una mirada que combine análisis estructural y experiencias locales. Pereira, como núcleo urbano representativo del eje cafetero, constituye un caso ilustrativo de cómo se materializan estas dinámicas en el contexto regional. Por consiguiente, se analiza lo siguiente:

1. Factores estructurales del crecimiento urbano en Colombia

Uno de los principales impulsores de la urbanización en el país ha sido el desplazamiento progresivo de la población desde las áreas rurales hacia los centros urbanos. Este fenómeno ha estado condicionado por procesos históricos como la violencia armada, la reconfiguración del mercado laboral y la concentración de servicios públicos en las ciudades. En efecto, la búsqueda de mejores oportunidades económicas, educativas y de atención en salud ha estimulado una migración constante hacia zonas urbanas.

La débil articulación entre el crecimiento demográfico y la planeación urbana ha contribuido a la proliferación de asentamientos informales, a la ocupación de suelos no aptos para la urbanización, y al deterioro de ecosistemas estratégicos. La institucionalidad urbana, en muchos casos, no ha logrado anticiparse a estas transformaciones, limitando su capacidad de gestión.

2. Especificidades del fenómeno urbano en Pereira

Pereira ha experimentado un crecimiento significativo como resultado de su papel como centro logístico, comercial y de servicios del centro occidente colombiano, su ubicación estratégica entre importantes corredores viales y su consolidación como nodo interdepartamental han generado un flujo constante de población proveniente tanto de zonas rurales como de municipios vecinos.

Otro aspecto relevante ha sido la expansión de zonas periféricas, como Cerritos, Galicia y La Florida, donde la urbanización ha avanzado rápidamente, muchas veces sin una infraestructura adecuada o sin una planificación coherente con las dinámicas ambientales y sociales del territorio y que resultan de gran interés, esta expansión urbana en la periferia ha generado tensiones con zonas rurales y áreas de importancia ambiental, como las cuencas hidrográficas del río Otún.

Ahora con todo lo mencionado anteriormente, las políticas públicas como instrumentos de regulación urbana frente a este panorama, podemos manifestar que Colombia ha formulado un marco normativo e institucional que permite intervenir el crecimiento urbano de manera planificada, la Ley 388 de 1997 representa el eje central de la política de ordenamiento territorial, al establecer los principios que deben guiar el desarrollo del espacio urbano y rural.

En el caso de Pereira, el POT actualizado para el período 2023-2035 ha incorporado enfoques de sostenibilidad ambiental, gestión del riesgo y desarrollo orientado al transporte, buscando consolidar una ciudad más compacta, eficiente y resiliente, este instrumento propone estrategias como la densificación en áreas ya urbanizadas, la protección de zonas ecológicas sensibles y la implementación de mecanismos para el control del uso del suelo.

Entre los mecanismos operativos utilizados se encuentran los instrumentos de gestión del suelo, como el reparto equitativo de cargas y beneficios, la captura de plusvalías y los proyectos de renovación urbana, estos buscan generar equilibrio entre los intereses públicos y privados, y promover un desarrollo urbano más justo y eficiente.

Dentro de las recomendaciones para el acompañamiento regulado del crecimiento urbano y para que las políticas públicas sean efectivas en el control del crecimiento urbano, es necesario fortalecer la articulación entre los niveles nacional y local, y promover una planificación metropolitana que trascienda los límites administrativos. En el caso de Pereira, una estrategia de gobernanza regional que incluya a municipios como Dosquebradas y La Virginia es clave para una gestión coherente del territorio; Asimismo, es fundamental consolidar mecanismos de participación ciudadana en la toma de decisiones sobre el uso del suelo, garantizar la transparencia en los procesos de urbanización y promover la incorporación de criterios técnicos y ambientales en los proyectos de desarrollo.

En este sentido, el acompañamiento institucional debe incluir no solo medidas regulatorias, sino también procesos pedagógicos y de sensibilización, así como la inversión en infraestructura urbana que promueva la equidad territorial.

Es por esto, que resaltando la importancia de nuestra investigación en valerse de recursos como las imágenes satelitales *-ortorrectificadas-*, según lo analizado por (J. Recio, 2019), radica en el hecho de que *"se puede obtener información sobre diversas construcciones urbanas y la incertidumbre del entorno ambiental relacionado con las regiones en crecimiento mediante el análisis automático del desarrollo urbano utilizando imágenes satelitales y fotografías aéreas"*; por lo que se corrobora la pertinencia del manejo de las imágenes satelitales en este estudio, en la medida que son de gran valor técnico para la identificación y la caracterización de zonas de crecimiento urbano y para la profundización de una clasificación multiespectral que permita detectar estas áreas y su evolución.

Está establecido que la evolución urbana puede afectar recursos naturales y, por ende, generar impactos ambientales, por lo que resulta de gran necesidad emplear herramientas SIG y desarrollar actividades de teledetección, primero para el análisis de coberturas y clasificación de tipos de suelo, y segundo, para la localización geográfica de zonas de expansión urbana, empleando imágenes satelitales del sensor ***Landsat 4, 5, y 8***, y a partir de esto alcanzar un adecuado procedimiento que contribuya en idear la conformación estratégica bajo soporte técnico de estas zonas y acortar las consecuencias negativas sobre el ambiente.

A partir del examen de las diferentes referencias y estudios previos que sustentan los lineamientos, objetivos y el enfoque metodológico de esta investigación, se identifica que las técnicas de teledetección constituyen una herramienta adecuada para la delimitación de áreas específicas urbanas, conocer su magnitud y su evolución; en consecuencia uno de los desafíos que se derivaron tuvo que ver con la construcción de una herramienta espacial SIG que coadyuvara a encontrar en un periodo determinado de tiempo años ***1989, 1998 y 2019,*** estas zonas de crecimiento urbano, previa la recopilación de la información resultante proporcionada por las imágenes escogidas y el análisis requerido para la interpretación, diferenciación y clasificación de coberturas del suelo, y así poder dar una inferencia clara sobre aquellos lugares de posible extensión de asentamientos urbanos relacionados con la ocupación que se le da al suelo en ciudades como la del objeto de estudio.

Es necesario explicar el porqué de la importancia de emplear acciones que permitan una vez se haya podido establecer todo el análisis de detección de zonas de expansión urbana, involucrar las alternativas que tendría la población en cuanto a facilidad de redes de accesibilidad territorial y de adquisición de bienes y servicios.

¿De igual manera, por qué la cabecera municipal de Pereira? Según estudio de la Alcaldía Municipal (DANE - Business, 2024), *"la ciudad tiene el índice más alto de suelos de crecimiento urbano en Colombia con más de 1500 hectáreas disponibles"*. A su vez, el (DANE, 2019)[9], mediante informe elaborado, prevé que al 2024, la ciudad tendrá un crecimiento poblacional de apenas un 0,63% en el espacio urbano y un 0,33% en la superficie rural. Esto significa que del total de la población unas 12.700 personas ocuparán el suelo rural, lo que conlleva a formular acciones conducentes a un adecuado POT.

Con su población actual, de aproximadamente 482.483 habitantes, Pereira se clasifica dentro de las denominadas *Ciudades Intermedias* que a nivel internacional son catalogadas como "*áreas urbanas funcionales*". Según criterios relacionados con el componente físico y poblacional. También es necesario indicar que dado lo descrito por (CAF, 2019)[10], *"las ciudades intermedias desempeñan un papel clave en el crecimiento socioeconómico de América Latina, albergando aproximadamente al 32% de la población de la región. Estas urbes cumplen funciones esenciales dentro de los sistemas logísticos y de transporte. Diversos estudios señalan que su papel será crucial para mejorar la competitividad y productividad a nivel nacional y regional".* Así mismo, (M. Morales, 2019), considera que *"en la actualidad, las ciudades intermedias cumplen una función estratégica dentro de los sistemas urbanos nacionales, al generar vínculos e interacciones con otras ciudades de su región, ya sean estas de menor o mayor jerarquía en la estructura territorial";* es el caso de la ciudad de Pereira que por su proximidad con ciudades como Armenia y Manizales, y también de acuerdo a su contacto permanente con ciudades principales como Cali, Ibagué y Bogotá. *De acuerdo con este alto grado de dinamismo y proceso de crecimiento relevante, es una zona que amerita ser objeto de estudio en materia de urbanismo.*

Dentro de este contexto se escogió esta cabecera municipal por contemplar áreas con baja conectividad en las zonas perimetrales lo cual genera deficiencias en la conformación del

[9] Departamento Administrativo Nacional de Estadística
[10] Banco de Desarrollo de América Latina

hábitat, y por requerir el fortalecimiento de los instrumentos de planificación y gestión para dinamizar el uso del suelo.

Así mismo, su crecimiento demográfico a través del tiempo muestra claramente la necesidad de establecimiento de asentamientos humanos y por ende el incremento del modelo de la huella urbana, no necesariamente teniendo criterios adecuados de organización y planificación, se considera un área de análisis ideal para desarrollar estudios académicos, técnicos y tecnológicos.

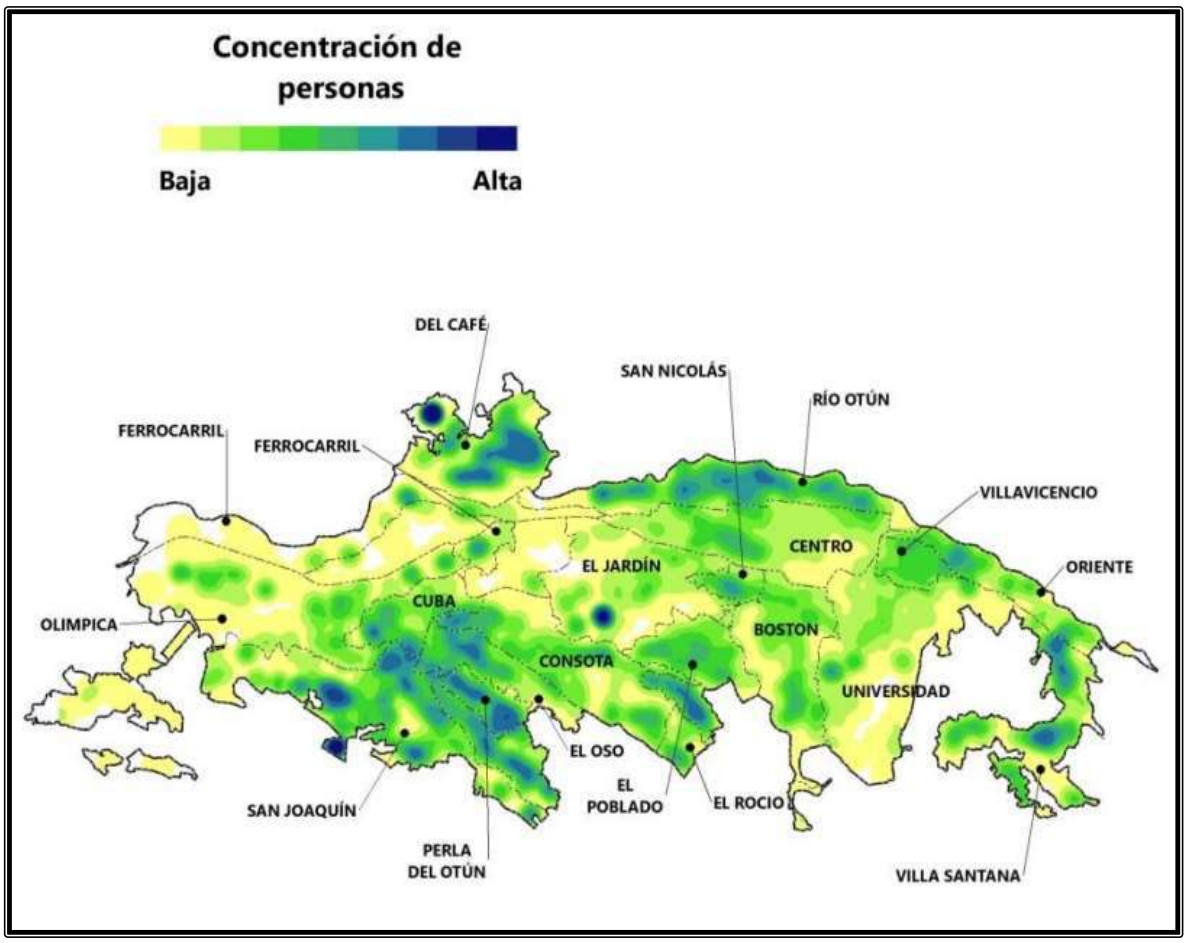


Figura 7. Concentración de la población en Pereira
Fuente: Departamento Nacional de Estadística – DANE – 2019

El crecimiento urbano en Colombia y en ciudades como Pereira, mediado por políticas públicas efectivas, ofrece herramientas clave para orientar un desarrollo urbano sostenible, equitativo y regulado.

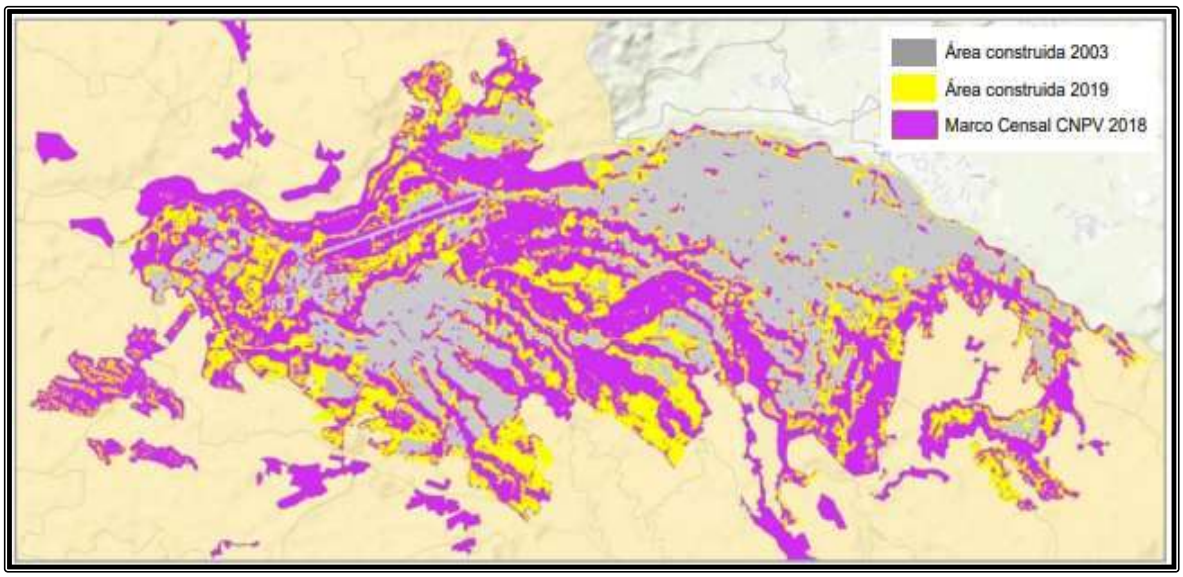


Figura 8. Áreas construidas en el periodo 2003 - 2019
Fuente: Departamento Nacional de Estadística – DANE – 2019

POBLACIÓN DE PEREIRA SEGÚN CENSOS NACIONALES		
AÑO	**NÚMERO DE HABITANTES**	**% CRECIMIENTO (Habitantes)**
1870	633	*
1905	19036	3007,27
1918	23584	123,89
1928	50699	214,97
1938	60492	119,32
1951	115342	190,67
1964	188365	163,31
1973	227498	120,78
1985	300224	131,97
1993	414013	137,90
2005	443554	107,14
2024	482483	108,78

Tabla 2. Población de Pereira según Censos Nacionales
Fuente: El autor

Los anteriores análisis y argumentos, dejan ver la exigencia de poder tener en cuenta un estudio de caso que admita analizar paulatinamente como ha sido el aumento urbano de cabecera, así como, poder detectar aquellas zonas con potencial urbano y correcta ocupación del suelo que estén acordes con lo identificado en la cabecera municipal de Pereira, y evidenciar la necesidad de realizar actividades de teledetección con la contribución de imágenes satelitales, para poder desarrollar una herramienta espacial SIG para la localización de aquellas áreas y, por consiguiente, dar alternativas para la

organización de sistemas de accesibilidad y elementos de primera necesidad. De acuerdo, al estudio de las investigaciones científicas, en esta región no se han hecho análisis de este tipo, y el enfoque tradicional que hasta el momento se ha venido desarrollando no permite dar certeza completa de una buena planificación de lo urbano, lo social y lo ambiental.

En este contexto, la investigación busca, además, reorientar el proceso de desarrollo urbano mediante la formulación de estrategias que promuevan un modelo de ocupación territorial sustentado en una estructura compacta y densificada. Este enfoque, propio de una planificación urbana sostenible, procura optimizar el uso del suelo mediante la consolidación de vacíos urbanos y la intensificación del desarrollo sobre los principales ejes estructurantes, facilitando así un entorno propicio para la integración equilibrada de funciones residenciales, productivas, comerciales, institucionales y de servicios.

Adicionalmente, los aportes de lo analizado en este estudio van ligados a encontrar la forma más adecuada y propicia para garantizar las condiciones mínimas vitales de la población, ya que al identificar aquellas zonas urbanísticas se pretende sean articuladas con patrones de accesibilidad territorial como equipamientos, espacio público, vías, etc.

El principal aporte de esta tesis, radica en ofrecer insumos técnicos que fortalezcan la capacidad institucional de los entes territoriales, contribuyendo a distribuir de manera más equilibrada la responsabilidad que actualmente recae sobre los tomadores de decisiones en lo referente a la asignación y regulación de los usos del suelo, en particular a lo que tiene que ver con la localización de zonas de expansión urbana y los criterios más allá del crecimiento urbano exponencial que puede presentar un territorio, y disminuir a su más mínima proporción el cambio de suelo rural a expansión urbana, en unos criterios técnicos que son irrefutables.

En este momento se pueden contradecir todos los parámetros y criterios que se tienen, ya que solo determinan es si hasta allá se garantizan servicios públicos, pero no sabemos si se encuentran en alto riesgo de amenaza por inundaciones, deslizamientos, etc, tampoco se sabe si el tipo de suelo es fértil, o es una zona de degradación alta o ubicada en alguna falla geológica.

El aporte de este estudio es poder contribuir en mejorar esos criterios, de tal manera que se vuelva más automático en función de una herramienta que proporciona un software especializado y unos criterios técnicos actuales a la cual hay que calibrar con un modelo, a través de la escogencia de unas variables específicas descritas en la metodología, a partir de allí, es donde entra el valor agregado de nuestra investigación.

De igual manera, el modelo está referido como una herramienta práctica para el tomador de decisiones con la cual pueda proyectar de manera sustentable la expansión urbanística de la ciudad, a su vez, el modelo contribuirá como un aporte para reducir la incertidumbre que se evidencia actualmente en términos de desarrollo urbanístico no estructurado y reducir de esta manera la entropía urbanística presente en la cabecera municipal.

Pero también resulta, que más allá del valor agregado que para esta investigación lógicamente resulta ser relevante en lo que tiene que ver con el ámbito académico y técnico, lo que se busca es ofrecer alternativas de conocimiento en búsqueda de reducir la brecha entre lo que está pasando actualmente contra lo que realmente se debería hacer, por eso para su realización se hace uso de las herramientas tecnológicas que me brinda la Maestría en el enfoque de hábitat; y la información dispuesta en portales geográficos abiertos, la disposición documental y cartográfica digital proporcionada por la formulación del POT de la ciudad de Pereira y nuestro insumo principal con la obtención para la descarga, utilización y análisis de unas imágenes satelitales -*ortorrectificadas*- del sensor ***Landsat*** 4, 5 y 8, que posteriormente me permitirán diseñar una herramienta matemática simple, que muestre como ha sido el desarrollo del modelado urbano en una ventana temporal dispuesta específicamente en los años ***1989, 1998 y 2019***, modelar estas zonas de expansión urbana y realizar un análisis multitemporal con información pre-existente para posteriormente efectuar un análisis teniendo en cuenta criterios habitacionales.

Cabe señalar también, que este tipo de análisis radica en su capacidad para apoyar la orientación de decisiones en planificación territorial, gestión ambiental y formulación de políticas públicas sostenibles. Además, proporciona una base técnica robusta para la implementación de modelos urbanos más resilientes y adaptados al contexto geográfico y socioeconómico de Pereira, una ciudad que enfrenta desafíos asociados al crecimiento acelerado y la conservación de su biodiversidad.

4. MARCO DE REFERENCIA

En la determinación de las variables que constituyeron el problema, y que conllevaron a analizar la implementación de un modelo metodológico enfocado en la determinación de espacios con vocación para ser incorporados al tejido urbano, suelos con capacidad adecuada para soportar estos tipos de infraestructura, el cual se considera una situación exponencial debido al crecimiento constante en ciudades intermedias como Pereira, es necesario argumentar que la deficiencia implicada puede ser resuelta a través del tratamiento de imágenes satelitales -*ortorrectificadas*-, estableciendo una herramienta que tenga en cuenta aspectos que permitan la determinación de aquellas zonas y reconozca la adecuación de las condiciones de accesibilidad y adquisición de bienes y servicios por la población. Se trata, además de contemplar que pueden existir otros tipos de soluciones y acciones producto de la estructura y evolución de las dimensiones gubernamentales, comunitarias y económicas en el ámbito territorial.

4.1. ESTADO DEL ARTE

El desarrollo de la revisión de los antecedentes se efectuó teniendo en cuenta factores asociados al crecimiento de la huella urbana y a la detección de zonas de expansión urbana bajo la utilización de imágenes satelitales -*ortorrectificadas*-, ya sean fotografías aéreas o aquellas producto del manejo de sensores remotos satelitales.

(E. Buendía, 2002), la investigación desarrollada en 2002, "s*e enfatiza la relevancia de emplear imágenes provenientes de los sensores Landsat y Spot, junto con técnicas de filtrado, para llevar a cabo la clasificación del uso del suelo. El estudio plantea cuatro procedimientos para refinar los datos obtenidos: corrección geométrica, análisis de componentes, estudio de texturas y aplicación de filtros mediante convolución. Finalmente, se concluye que la precisión global de las imágenes Landsat se ve influenciada por la combinación de las distintas resoluciones espectrales presentes en las imágenes analizadas"*.

(R. Lunetta, 2006), el estudio realizado en 2006, *"Se sugiere el desarrollo de una metodología orientada a detectar transformaciones en la superficie terrestre, utilizando el análisis del NDVI[11] y comparándolo con imágenes aéreas antiguas. Como parte del procedimiento, se aconseja depurar la información eliminando datos atípicos, con el fin de asegurar la calidad del análisis multitemporal. Además, se plantea la necesidad de realizar muestreos que permitan distinguir entre las zonas que han experimentado modificaciones y aquellas que se han mantenido sin cambios dentro de un intervalo temporal específico"*.



Figura 9. Imágenes multitemporales
Fuente: (S. Lunetta, J. Knight, J. Ediriwickrema, J. Lyon, L. Dorsey, 2006)

(Cerda, 2007), por parte del investigador, *"se dispone de un trabajo determinado por la aplicación de distintas técnicas de medición de la urbanización dispersa y la modelación urbana de Santiago de Chile. Presenta un listado de los rasgos principales atribuidos al fenómeno de la urbanización teniendo en cuenta factores de conversión del uso del suelo, el cambio demográfico, el tráfico en cuanto a distancia y tiempo recorrido, etc. Utilizó técnicas para el manejo de sensores remotos y SIG, y realizó la escogencia de algunas variables para caracterizar la urbanización dispersa. En segunda instancia, empleó técnicas estadísticas para calcular la expansión discontinua en términos urbanísticos con base en variables espaciales, socioeconómicas y de movilidad; y a partir de estas hizo un análisis*

[11] Normalized Difference Vegetation Index

exploratorio para la determinación del crecimiento demográfico y el índice del impacto de la movilidad".

La importancia de esta referencia radica en los elementos que aporta para el reconocimiento de aquellas áreas y/o zonas potenciales de expansión urbana, teniendo en cuenta factores de accesibilidad territorial, como movilidad y transporte, y aspectos sociales y económicos que redunden en beneficios de la población.

La principal diferencia, y de acuerdo con lo más cercano posible al planteamiento de esta propuesta de trabajo de grado, corresponde a que se emplearon técnicas estadísticas para predecir zonas de expansión urbana, en lugar de construir un algoritmo o herramienta tecnológica como la que se está proponiendo para la obtención de estos resultados.

(V. López, 2008), en el estudio presentado en 2008, *"Se llevó a cabo un estudio sobre las transformaciones en el uso del suelo en el área metropolitana de la Ciudad de México, derivadas de su expansión urbana. Para ello, se aplicó una metodología que combinó técnicas de clasificación supervisada basadas en imágenes satelitales, el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y análisis estadísticos, con el propósito de examinar los cambios ocurridos en distintos periodos de tiempo en las zonas en proceso de urbanización. Se emplearon imágenes captadas por el sensor Landsat, junto con cartografía temática sobre el uso del suelo. Asimismo, se elaboró una proyección de áreas con potencial de crecimiento urbano mediante el uso de una matriz de tabulación cruzada. Como parte de los resultados, se generaron representaciones gráficas de la cobertura del suelo correspondiente a los años 1990 y 2000".*

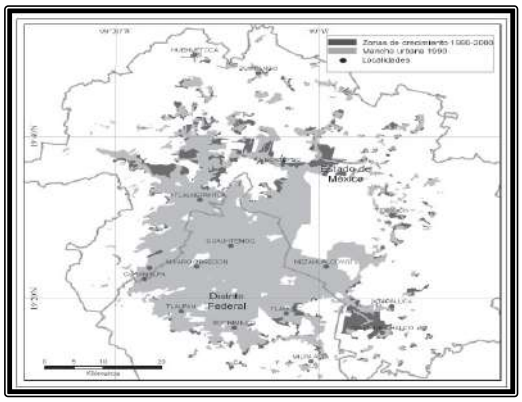


Figura 10. Extensión del área Urbana zona metropolitana de la Ciudad de México
Fuente: (V. López, W. Plata, 2008)

(S. Navarro, 2009), el estudio realizado en el año 2009 por los autores de este trabajo, corresponde al trabajo que hicieron para *"cuantificar y delimitar el crecimiento de la urbe de la ciudad de Santo Domingo a partir de la utilización de inventivas de interpretación analítica de imágenes satelitales Landsat. Plantearon tres enfoques sistemáticos del ejercicio del territorio, uno regulado a través de factores normativos, otro alusivo a la población y sus habitantes, y un tercero que constituye una variable morfológica para la puesta en marcha de los análisis de la representación construida. Hicieron una interpretación detallada de los años 1978,1986 y 2000, y analizaron el cambio que ha tenido la zona ocupada en el casco urbano; y se compararon estos cambios con los datos demográficos del año 2002. También se analizó el fenómeno por lo que se incrementan las zonas de expansión encontrando un proceso migratorio interno hacia la periferia debido al deterioro físico-ambiental de la capital de República Dominicana"*.

A diferencia de nuestra propuesta, y de acuerdo a los resultados alcanzados en esta investigación, buscaron obtener información del crecimiento urbano a partir del análisis únicamente de lo arrojado por el tratamiento multiespectral de imágenes en un análisis entre años, y de datos estadísticos de censos poblaciones; en cambio, lo que en esta propuesta se busca desarrollar, además de realizar un análisis de imágenes *ortorrectificadas***,** es encontrar parámetros de expansión urbana articulada con patrones de habitabilidad y de accesibilidad territorial, involucrando, adicionalmente una herramienta tecnológica generada para este estudio.

(C. Rojas, 2010), el trabajo desarrollado en el año 2010, *"describió un estudio de crecimiento urbano en la región de Concepción en Chile, en los años 2001 a 2009 teniendo en cuenta factores de tipo espacial, social, económico, biofísico, aproximación a variables de primera necesidad y de planeación; para su validación se utilizó el parámetro ROC*[12] *que permitió un cotejo práctico entre la cartografía de crecimiento de factores urbanos y las salidas representadas que se han obtenido de diferentes modelos desarrollados, lo cual se concluye que las variables biofísicas y la altitud topográfica son los factores más influyentes en la identificación de nuevas zonas para el tratamiento urbano".*

[12] Relative operating characteristic

Se destaca en este trabajo, la necesidad de corroborar la vulnerabilidad de aquellas zonas urbanas proclives a los efectos geográficos de factores como la altitud.

(M. Gutierrez, 2010), según lo desarrollado en el 2010 por los investigadores, *"donde a partir de imágenes con sensor Landsat, llevaron a cabo un estudio en un estado del Norte de México por un periodo de dos décadas que permitió reconocer los componentes del suelo y sus variaciones, conducentes a un adecuado uso urbano del área"*.

La contribución para nuestra propuesta radica en las ventajas que tiene el tratamiento de imágenes ya sea bien satelitales o en cual otro tipo de formato con características de precisión, para analizar el suelo con un área urbana para la determinación de su variabilidad, un eventual desarrollo poblacional y la protección de los recursos naturales.

(Bazant, 2010), por parte del autor en el 2010, *"se estableció una metodología para la jerarquización económica, demográfica y funcional de las zonas urbanas clasificadas como ciudades menores; para tal efecto analizó la conformación de diferentes acotaciones prácticas con otras localidades urbanas que estén intrínsecamente en la misma área territorial, y contempló, como factor principal, la simulación del aumento de la población".*

Este tipo de investigaciones considera la orientación urbana y el rumbo físico - espacial como indispensables en la investigación de un buen ordenamiento del territorio; pero con la salvedad, que a diferencia de esta propuesta de investigación, se realizó una simulación a partir del análisis del crecimiento poblacional y migratorio de la población, pero no utilizando alguna herramienta tecnológica que permitiera representar dentro de los resultados alcanzados información precisa, lo que condujo a obtenerlos de manera ponderada y aproximada.

(A. Merlotto, 2012), el tema que aquí nos interesa según el estudio realizado para el periodo 2012, consideró *"un análisis sobre la evolución espacial y las transformaciones en los patrones de uso y cobertura del suelo en la zona urbana correspondiente a las localidades de Necochea y Quequén, situadas en la provincia de Buenos Aires, Argentina; se utilizaron imágenes de alta precisión Landsat, Spot y Quickbird, así como fotografías aéreas de los años 1967 a 1984; se llevó a cabo un proceso de entendimiento visual utilizando insumos con alta precisión, proyectados sobre un mapa base, con el propósito de elaborar una salida*

gráfica detallada del uso del suelo. Posteriormente, se efectuó un análisis comparativo de las transformaciones ocurridas en la zona de estudio, lo que permitió representar gráficamente la evolución del núcleo urbano en relación con la expansión demográfica. Finalmente, se integraron los datos censales correspondientes a los años 1960, 1970, 1980, 1991 y 2001, a fin de interpretar el crecimiento poblacional y su vinculación con el desarrollo de las principales actividades económicas del área analizada".

Conocer el crecimiento y la trazabilidad que se ha tenido a través del tiempo de una zona urbana en proceso, e interpretar las dinámicas socioeconómicas y el crecimiento poblacional que conducen a hallar las causas que se incorporan a la evolución urbana, son las ideas principales que aporta al trabajo referido.

(N. Picone, 2014), el desarrollo de la investigación realizada en el 2014, propone *"implementar estrategias metodológicas que puedan ser aplicadas en contextos urbanos diversos y que faciliten el estudio de los procesos vinculados a la urbanización, y que permitan la identificación de la extensión construida dentro del ámbito urbano, diferenciando las diversas concentraciones de edificaciones presentes en dicho espacio. Las técnicas que emplearon fue la utilización de insumos Landsat, y el espacio de análisis fue la ciudad de Tandil – Argentina para los años 1989 – 2011; las deducciones obtenidas consistieron en el registro de la dimensión y la forma de expansión durante los pasados 20 años"*.

Quiero destacar que para esta investigación se podrían obtener datos de avance de las superficies edificadas y el reconocimiento de los tipos predominantes de cimentación y de los niveles de concentración constructiva de la ciudad de Pereira.

(L. Fernández, 2015), el estudio planteado en 2015 explora, "*la implementación de imágenes Landsat de mayor resolución espacial en la determinación de las relaciones entre la transformación del suelo en superficies impermeables y la progresiva reducción de áreas con cobertura natural. Inicialmente se verificó la viabilidad de la utilización de imágenes para la detección de cambios en el espacio urbano de la ciudad de Valencia - España; luego se analizó la acuciosa franja de tiempo y determinar los cambios urbanos en el tiempo comprendido entre 1984-2011, se realizaron prácticas de campo que determinaron las alteraciones del suelo y su cobertura y posteriormente se utilizaron las imágenes para cuantificar la ampliación urbana; los autores se apoyaron en segundas fuentes como*

imágenes con sensor Spot y ortofotos y en herramientas como Idrisi, ArcGis y Envi. Se resalta la consecución de un Modelo de Evaluación y Predicción para determinar el nivel de significación y estimación de las zonas de expansión urbana".

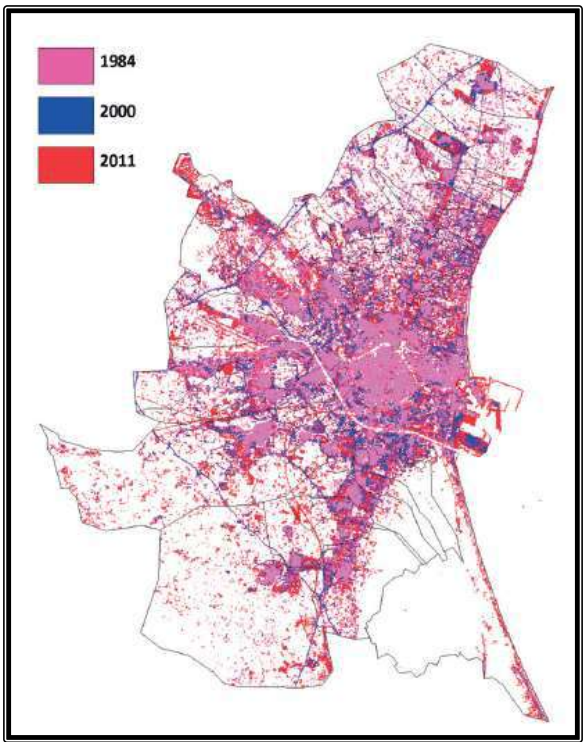


Figura 11. Evolución de las superficies artificiales (1984 – 2011)
Fuente: (F. Gimeno, L. López, 2015)

(Torres, 2015), el estudio elaborado en *2015, "comprende la importancia de determinar los factores de la movilidad de las poblaciones que abandona los espacios urbanos centrales buscando espacios más accesibles o atractivos. Este estudio examina los movimientos migratorios estabilizados en el País Vasco entre los años 1991 y 2010, junto con los cambios demográficos ocurridos en distintas zonas de su territorio. La investigación aplica un enfoque cuantitativo centrado en el análisis de las tasas de migración, considerando variables como las características demográficas municipales y los niveles de accesibilidad. A partir del análisis, se identifican dos categorías principales de áreas receptoras, diferenciadas por sus condiciones de accesibilidad y calidad tanto urbana como ambiental. Los resultados reflejan la consolidación de municipios periféricos como espacios urbanos homogéneos, con un impacto significativo en el contexto de la ciudad global".*

Se resalta en este estudio la importancia de comprender la dinámica de las zonas potenciales de incremento de la huella urbana y el sentido del desarrollo demográfico dado en la ciudad de Pereira, y cuáles son las causas que han llevado a la población a movilizarse hacia ciertos sectores aledaños al centro urbanístico.

(León, 2016), los autores en su investigación del año 2016, "*consideran dos procesos técnicos para el análisis de crecimiento urbano en la ciudad de Quito – Ecuador; el primero relacionado con el proceso de clasificación denominada como supervisada, y el segundo con la concreción del argumento hallado como índice del área consolidada como construida. Para este trabajo utilizaron imágenes satelitales Landsat y software de acceso libre como QGis; este proceso técnico requirió la captura manual de diferentes elementos y patrones del espacio geográfico lo que, a su vez, requirió el correcto manejo de los pixeles de las imágenes para lo cual utilizaron una herramienta matemática definida bajo diferentes tipos de parámetros basado en una distribución de probabilidad con comportamiento normal según el modelo de Gauss".*

El objetivo fue obtener una representación gráfica de las zonas implementadas y definidas como construidas para detallar las diferentes proporciones para levantar edificaciones y salvaguardar los factores inherentes a la vegetación, según píxeles.

(L. Cano Salinas, 2017), la investigación desarrollada en 2017, "*desarrolló un análisis investigativo para el estado de Hidalgo – México cuyo objetivo fue lo ideal que se requiere para el desarrollo de este trabajo y es nuevamente analizar en un lapso comprendido por los años 2000 y 2014 utilizando el sensor Landsat para hallar áreas de bastante aprovechamiento urbanístico. Implementaron la aplicación de seis grupos de tomas, la lectura de elementos cartográficos y el software Erdas. Inicialmente realizaron un reconocimiento de todas las variables idóneas para el estudio para lo cual emplearon la metodología Jensen que les permitió obtener resultados de los cambios producidos en el suelo y su procesamiento para la identificación de zonas urbanas de interés"*.

Información donde se debe dar relevancia a que a través de la utilización de otros diferentes tipos de software, permite involucrar técnicas articuladas para dar solución a problemas enfrentados correspondientes a las características que atañen para esta investigación en relación al crecimiento permanente, continúo y constante en una región.

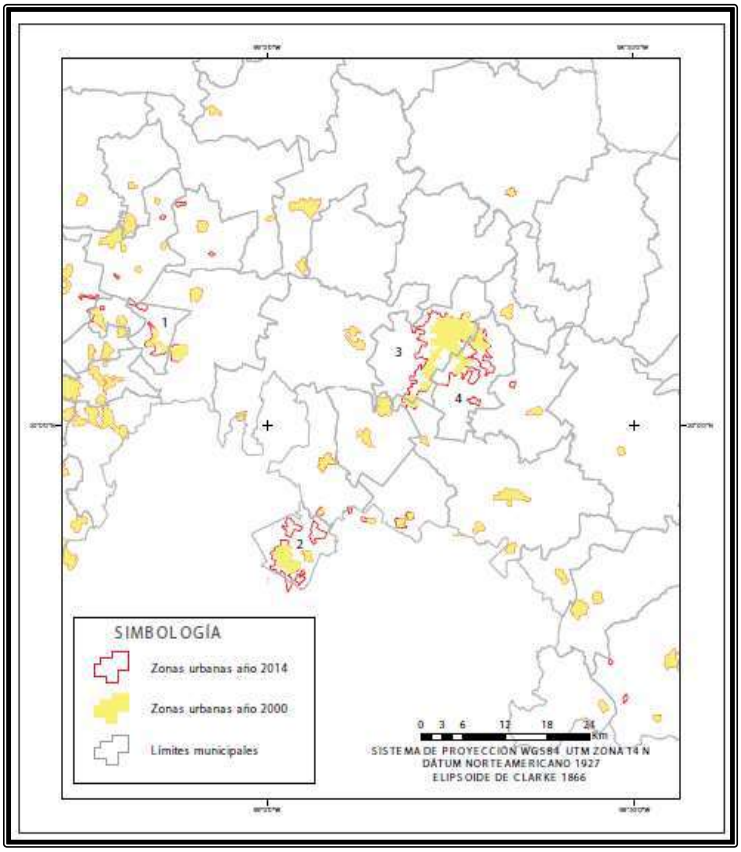


Figura 12. Municipios con mayor tasa de crecimiento urbano en Hidalgo - México
Fuente: (L. Cano Salinas, 2017)

(J. Borras, 2017), el estudio realizado en 2017, por los autores se enfoca en "*hallar la mejor técnica para la clasificación del recurso natural como el que ya hemos venido mencionando y denominado suelo empleando imágenes del sensor Sentinel en áreas pertenecientes a zonas perimetrales de Valencia – España, así como también en una región de Buenos Aires – Argentina. La investigación basó la fotointerpretación de imágenes –ortorrectificadas- para la determinación del método más apropiado para la identificación de tipos de suelos y su catalogación con base en objetivos de tipo residencial, comercial, industrial, agrícola, etc. Se utilizó la metodología LDA*[13]*, método de categorización que emplea el procesamiento de datos de entrada mediante algoritmos, donde, tras la determinación de una función discriminante, se definen de manera explícita los límites que permiten distinguir entre las distintas regiones objeto de análisis*".

[13] Linear Discriminant Analysis

Se tuvieron en cuenta características en cuanto a la recepción de la adquisición de imágenes por parte del sensor Sentinel, donde su mayor relevancia está en la detección para la producción de cartografía de utilización del suelo, de cambios a lo largo del tiempo, de riesgo y de imágenes para la prevención de desastres, así como aspectos relacionados con cambios en la vegetación, etc.

Lo cual es un análisis que aportaría de manera significativa al objeto de estudio de este trabajo.

(M. Sandler, 2018), la investigación desarrollada en 2018, presenta *"un modelo de utilización de imágenes satelitales para pronosticar la probabilidad de localización y cambios en el suelo de aquellas grandes llanuras del norte de los Estados Unidos y valorar de manera evidente sus impactos en el ámbito social y en el entorno natural. Fueron elementos del trabajo, entre otros: tamaño, muestra y modelo específico, aparentes orientadores de inferencias de escala, reflexiones de tierras sucesoras o restringidas, suposiciones y tolerancias"*.

(M. Morales, 2019), Una investigación desarrollada en Chile por un equipo de especialistas en 2019, *"analizó los patrones espaciales vinculados al crecimiento urbano en ciudades intermedias. En este contexto, se modelaron dos escenarios de expansión para la localidad de San Fernando, identificando variables espaciales asociadas tanto a la ampliación del tejido urbano consolidado como a áreas rurales que, aunque actualmente no presentan urbanización, podrían incorporarse en función de las proyecciones establecidas. El estudio contempló parámetros espaciales relacionados con la expansión del área urbana, incluyendo la proximidad a las principales vías de comunicación, redes de transporte, acceso a mercados laborales y disponibilidad de bienes de consumo. Entre los enfoques metodológicos utilizados, se incorporó un modelo de simulación basado en análisis metaheurísticos de patrones urbanos, calculando el potencial de cambio de uso del suelo mediante unidades espaciales discretas representadas como píxeles. Además, se implementó una simulación estocástica apoyada en Cadenas de Markov, utilizando proyecciones de cambio en la cobertura del suelo para evaluar y anticipar la evolución urbana del área de estudio. Todo el proceso requirió el uso e interpretación de imágenes satelitales Landsat y fotografías aéreas"*.

(Jiménez, 2019), El estudio publicado en 2019, *"propone una metodología orientada a simular el crecimiento del área metropolitana de Toluca, México, mediante el uso de técnicas metaheurísticas como las Cadenas de Markov. El enfoque se fundamenta en modelar la dinámica del sistema urbano para interpretar tanto el crecimiento de la mancha urbana como las transformaciones en los usos del suelo, incorporando nociones como tiempo discreto, momento inicial y final del proceso. El algoritmo utilizado permite comparar información contenida en mapas ráster a través de análisis probabilísticos. Para representar los datos espacialmente, se empleó información georreferenciada y se utilizaron Sistemas de Información Geográfica (SIG), lo que facilitó tanto el análisis detallado como la representación cartográfica de los resultados"*.

Revisando estos antecedentes se corrobora la importancia de los lineamientos, propósitos y el enfoque metodológico de esta investigación se estructuran considerando que las herramientas de teledetección resultan especialmente adecuadas para la delimitación y análisis de áreas urbanas, conocer su magnitud y su evolución; se ratifica en consecuencia la importancia de la innovación de una herramienta SIG, que forje la identificación, en periodos de tiempo determinados, de zonas susceptibles de crecimiento urbano.

Igualmente, se ratifica la necesidad de innovar en la implementación de nuevas herramientas que orienten los procesos urbanísticos, teniendo en cuenta además que la transmisión de información y procesamiento de datos requiere, cada vez más, la participación del ser humano y de las máquinas para ir más allá de los análisis convencionales de la información, por lo que, el uso de instrumentos de análisis espacial y técnicas de teledetección no solo permite una comprensión más precisa de los procesos de urbanización, sino que también proporciona información clave para respaldar de manera apropiada la toma de adecuadas decisiones fundamentadas en la gestión territorial.

Teniendo en cuenta, cual sería el aporte al desarrollo de nuestra propuesta podemos indicar que mediante este tipo de análisis se pueden determinar y conocer las probabilidades de que la información georreferenciada muestre el crecimiento urbano de un determinado lugar.

(Ulloa Espíndola & Pérez Albert, 2020), De acuerdo a lo planteado por los autores en la investigación en mención, "*requiere de un insumo importante que también tengo en cuenta*

en este estudio, como son las imágenes satelitales, en el desarrollo del trabajo utilizaron datos que son arrojados a través del análisis de crecimiento urbano multitemporal en un sector ubicado en las periferias nororientales de la ciudad de Quito – Ecuador, de allí diseñaron una herramienta espacial para modelar el cambio que a futuro a través de análisis de predicción podría tener la ciudad en el tiempo utilizando variables que otorga el enfoque metodológico basado en el uso combinado de la técnica de pesos de evidencia y modelos de autómatas celulares, de allí, lo que obtuvieron fueron resultados asociados a proyecciones de población en comparación con lo arrojado por el modelo y lo que se tuvo a la actualidad representado por la realidad del territorio".

Es importante poder indicar, que este tipo de estudios y como el que se propone, resultan ser relevantes e imperiosos en orientar las necesidades de un territorio a diseñar herramientas que contribuyan en realizar una metodología acorde con las necesidades de una región, y de igual manera, que se encuentren en sintonía o en la misma dirección a las políticas de las administraciones territoriales y las decisiones en planificación tomadas para el adecuado manejo del suelo y sus necesidades, todo en búsqueda del bienestar de las personas.

Es bueno argumentar en esta investigación, que la utilización de diferentes metodologías de análisis espacial, poblacional y de crecimiento de alguna variable del suelo o de un territorio, se puede resaltar que nunca serán estudios desaprovechados sino por el contrario necesarios en tiempos donde la tecnología forma parte indispensable de estudios de gran importancia a nivel mundial y local.

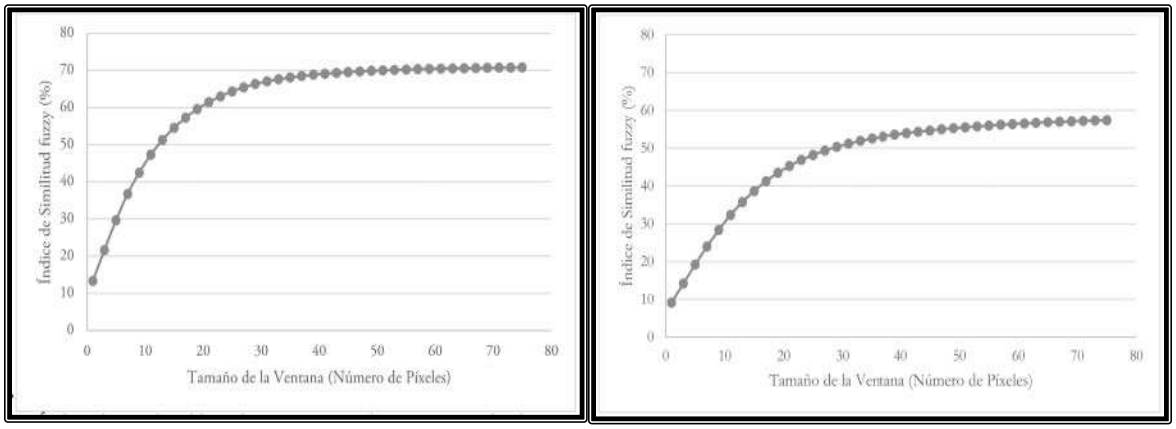


Figura 13. Índices basados en tamaños múltiples de simulación (2003-2018)
Fuente: (Ulloa Espíndola & Pérez Albert, 2020)

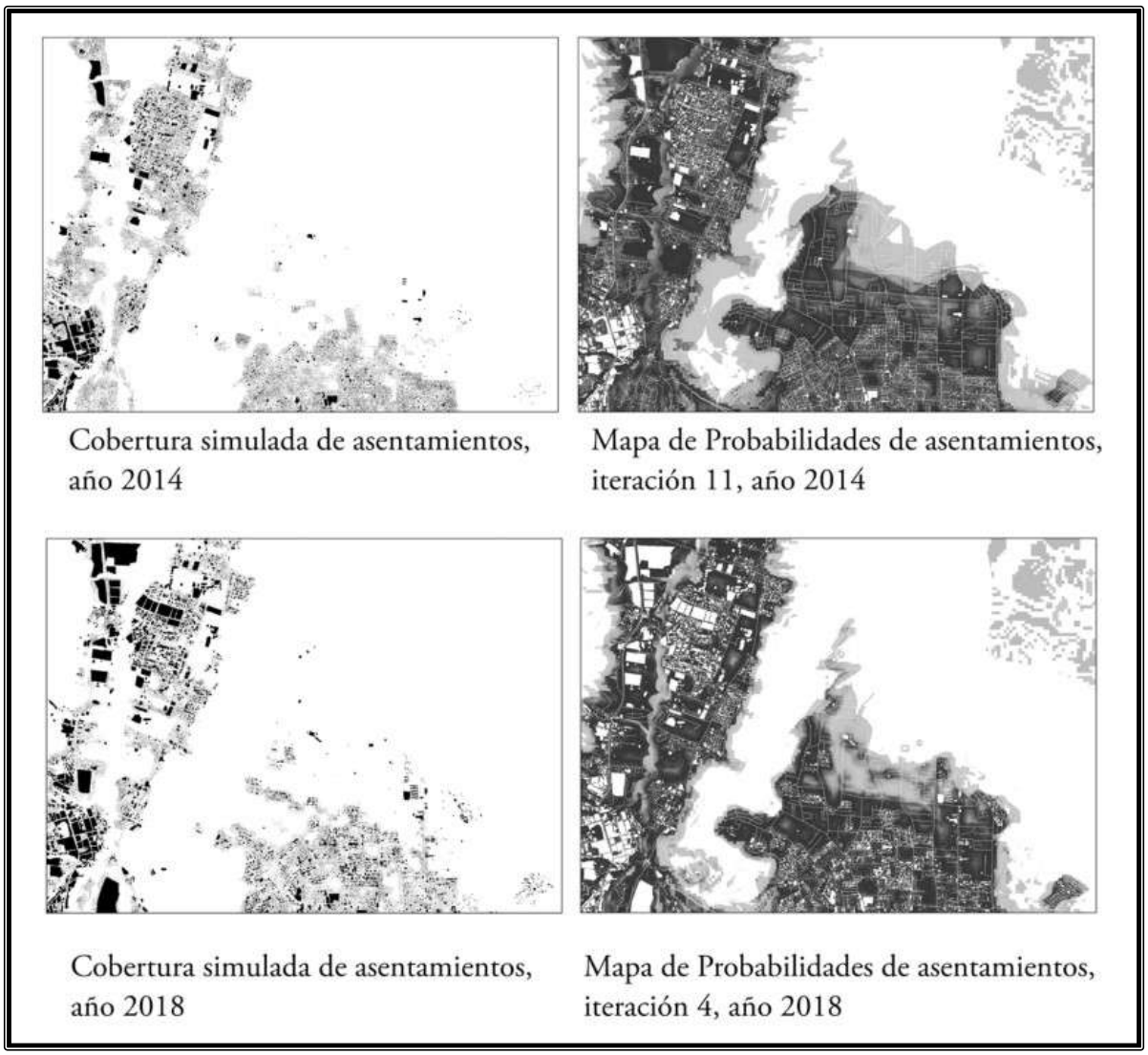


Figura 14. Simulaciones basadas en autómatas celulares (2014-2018)
Fuente: (Ulloa Espíndola & Pérez Albert, 2020)

(Buzai & Montes Galbán, 2020), Es importante esta investigación, *"debido a que se utilizan imágenes satelitales en este caso nocturnas, tratamiento realizado a aquellas a través de la tecnología empleada por el software TerrSet, con este análisis y la buena lectura de los pixeles a través de la resolución espacial de las mismas, se concluyó que no todos aquellos con valor mayor a cero (0) correspondían a las áreas de huella urbana, por lo que, posteriormente se emplearon mapas preexistentes de coberturas urbanas para realizar actividad de álgebra de mapas de imágenes nocturnas, y de allí, poder realizar un procedimiento denominado no supervisado de clasificación a través de imágenes Landsat*

5 que permitiera extraer valores de pixeles mínimos que al promediarlos se pudiese llegar a establecer el crecimiento urbano en la megaciudad de Buenos Aires, con todo este proceso, se pudo confirmar factores de expansión urbana y conurbación a través de una ventana temporal, las variables o ejes fundamentales utilizados guardaron relación con factores de área urbana consolidada, urbanización difusa, densidad de población, vías de comunicación y tendencias espaciales".

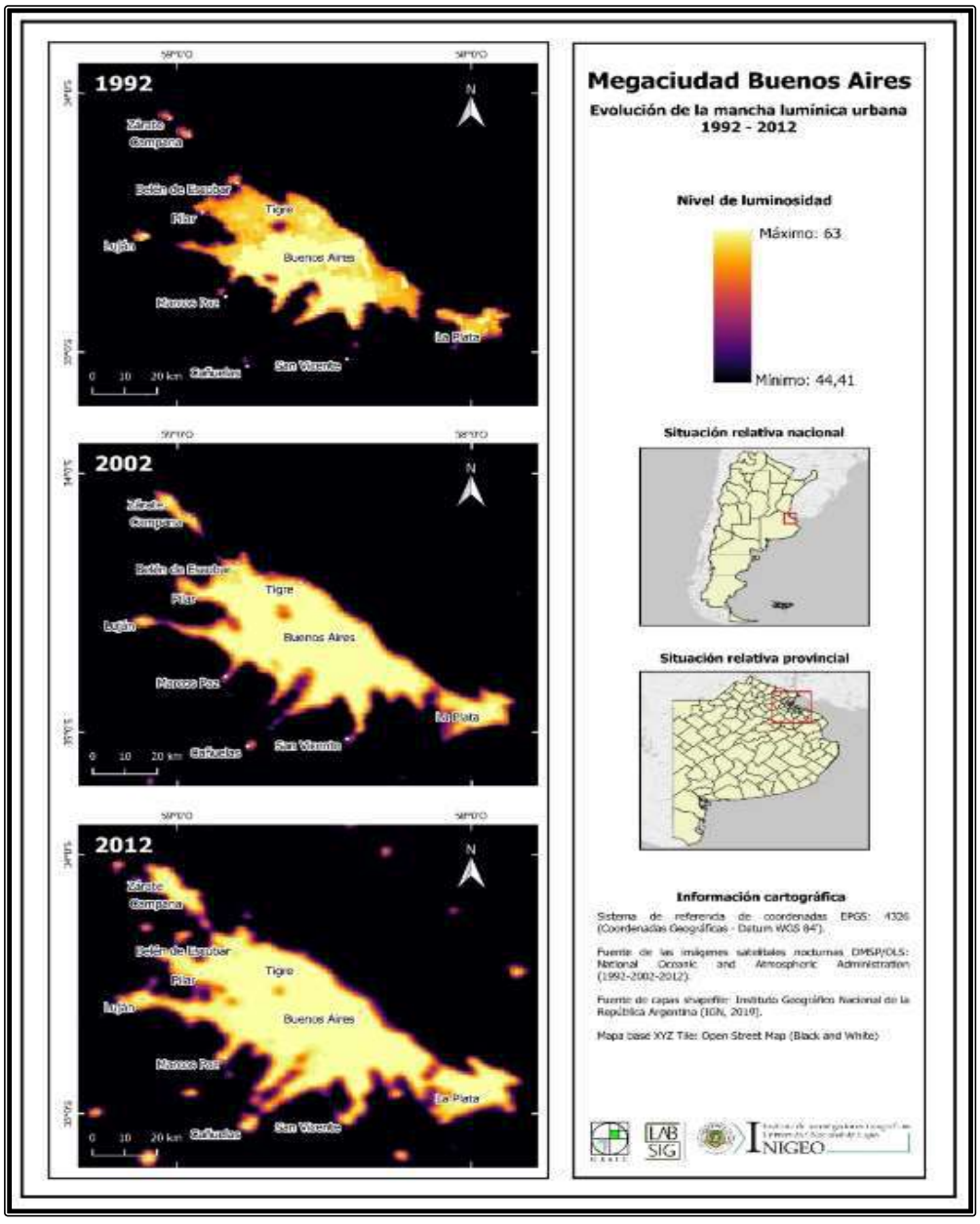


Figura 15. Procesamiento de imágenes satelitales nocturnas
Fuente: Buzai & Montes Galbán, 2020

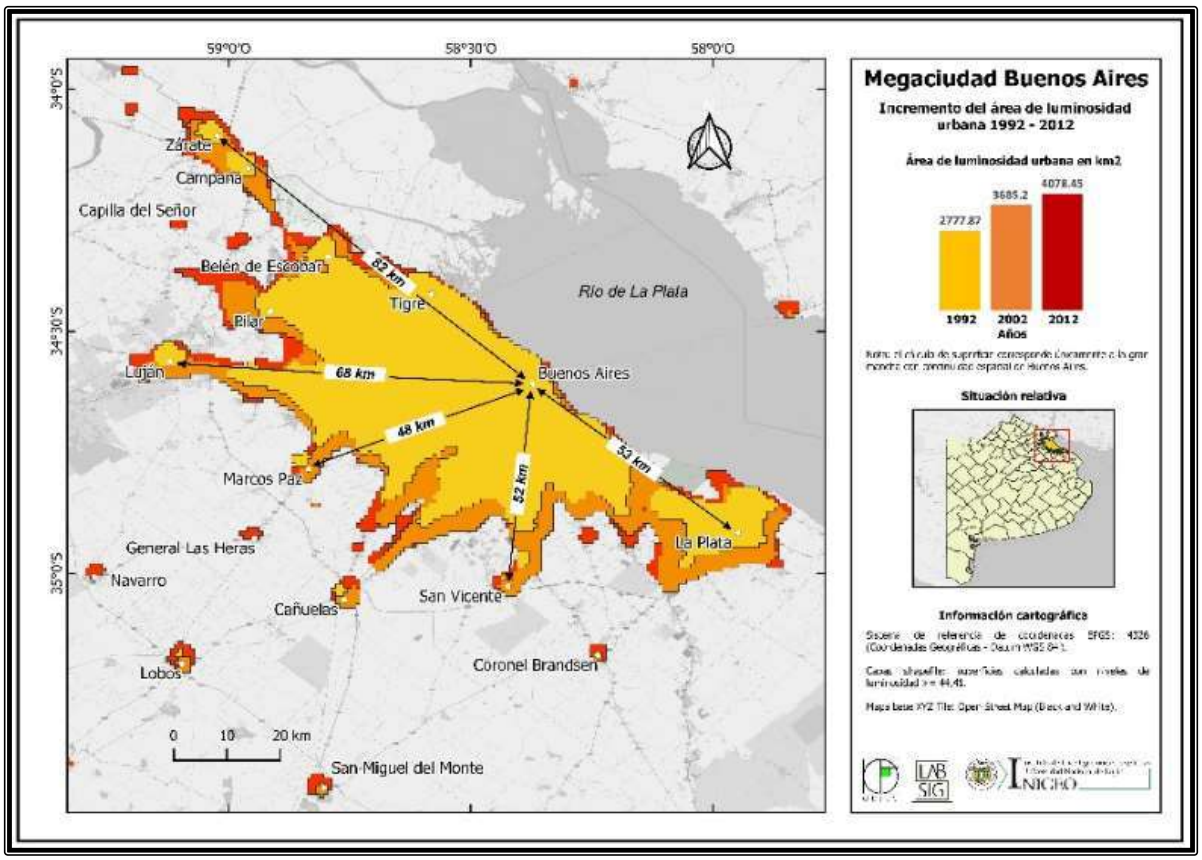


Figura 16. Cartografía Sintesis de un proceso de conurbación
Fuente: Buzai & Montes Galbán, 2020

Como aspecto relevante, es claro poder indicar que este tipo de estudios deja percibir claramente que la utilización de herramientas espaciales como los SIG y aquellas diferentes imágenes ofrecidas por diferentes tipos de satélite, permite poder realizar análisis en torno a crecimiento urbano y expansión urbana en una región y/o territorio, que de acuerdo a esto, nuestro estudio y lo que se propone como valor agregado podría involucrarse como una injerencia marcada de lo que es real con lo proyectado y predictivo, a su vez, que la implementación de diferentes tecnologías (hardware, software, fuentes, datos, etc), son importantes en los estudios fenomenológicos de cualquier campo de la ingeniería y la Maestría en Ingeniería Civil cursada.

Es importante tener en cuenta que mí estudio, propone una metodología que va en sintonía de las investigaciones actuales en torno a la utilización de los SIG y las herramientas espaciales que estas ofrecen.

(Rojas Gamba, Fonseca Salamanca, Pérez Rueda, & Blanco Suárez, 2020), En el desarrollo de esta investigación, *"se tuvieron en cuenta varios pasos para la visualización del crecimiento urbano en la ciudad de Tunja – Colombia, para el tratamiento en el desarrollo del proceso mantuvieron como fases de elaboración, la implementación y preprocesamiento de imágenes satelitales, clasificación de las mismas en una ventana temporal y generación de mapas de coberturas, postprocesamiento para validar la herramienta y la clasificación estas en el modelamiento de escenarios de predicción; pero lo que resulta relevante en este trabajo, es la forma de realizar la validación de aquel modelo diseñado donde lo que se propuso fue calibrar el modelo de predicción a los resultados arrojados en años anteriores con los mapas preexistentes"*.

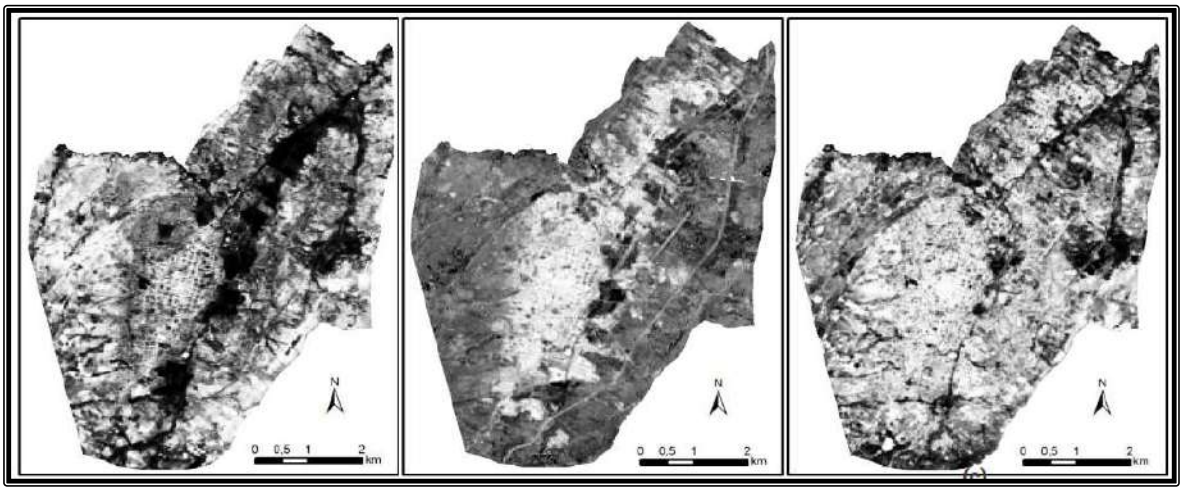


Figura 17. Evolución NDBI para imágenes 2000, 2012 y 2017.
Fuente: Rojas Gamba, Fonseca Salamanca, Pérez Rueda, & Blanco Suárez, 2020

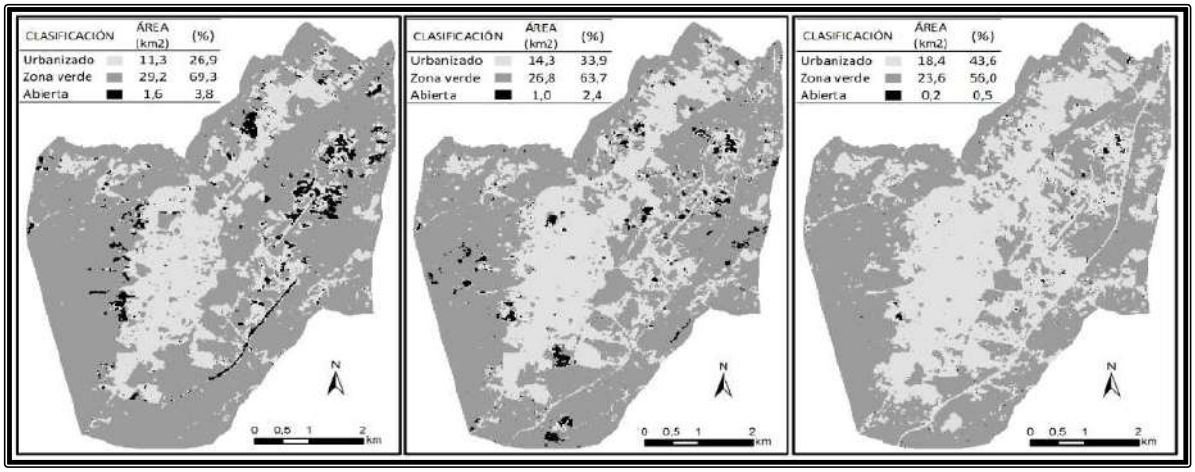


Figura 18. Imágenes de clasificación multitemporal 2000, 2012, 2017
Fuente: Rojas Gamba, Fonseca Salamanca, Pérez Rueda, & Blanco Suárez, 2020

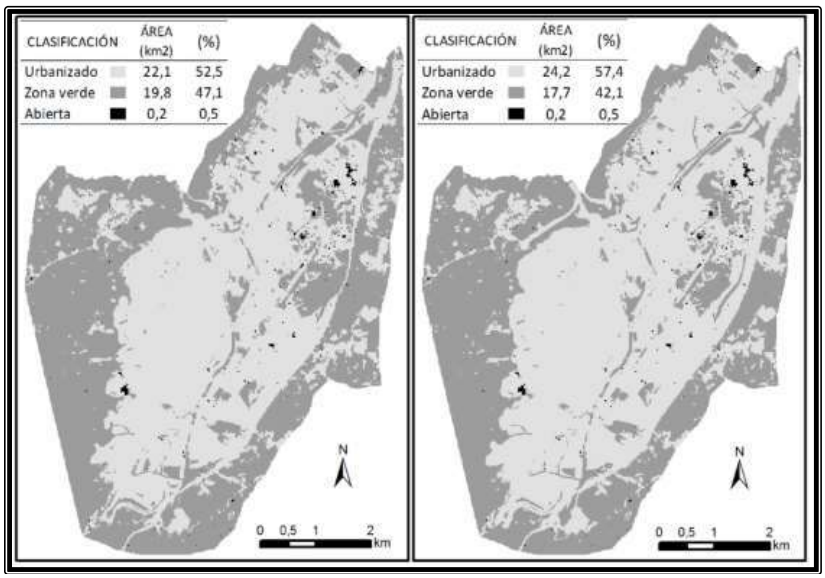


Figura 19. Imágenes proyectadas 2025 y 2030
Fuente: Rojas Gamba, Fonseca Salamanca, Pérez Rueda, & Blanco Suárez, 2020

Como bien se ha visto en esta investigación se desarrolla un estudio en donde las características de similitud y factores relevantes tienen que ver con lo relacionado en lo inicialmente ideado en mi formulación de trabajo, en este de igual manera, se relaciona una escogencia de imágenes, en segunda instancia se realiza una caracterización de las mismas y por último un proceso de análisis para la constatación de la expansión del área ocupada por el tejido urbano y la predicción que se tiene de aumento urbano a futuro; sin embargo, el valor agregado por mi parte tiene que ver con el diseño de un modelo que contemplará a través de su utilización la visualización aproximada de los datos arrojados, así como, vincular variables o patrones de bienestar e interés de la población.

(Mohamadiazar, Ebrahimian, & Hosseiny, 2024), Es necesario indicar, *"que en esta investigación que se sale de la orientación que tiene que ver con la relación implícita relacionada con el desarrollo del crecimiento urbano, es relevante hacer especial alusión a la utilización en una nueva investigación de la utilización de imágenes de satelitales en este caso del sensor Sentinel e imágenes Lidar para enfocar su estudio en el análisis de superficies del suelo idóneas para los desarrollos urbanos, en este estudio, también enfocan mecanismos y herramientas en torno a factores de predicción y mapeo de las extensiones de fenómenos asociados a los riesgos por inundación, características*

necesarias para ser estudiadas y que articuladamente guardan relación con una buena planificación territorial".

Con la utilización de los procedimientos actuales como por ejemplo el desarrollo de las inteligencias artificiales, se aclara un poco más la idea de esta investigación, en donde a través de los nuevos modelos, software y tecnología diseñada permite entrever lo importante de la idea planteada para lograr los objetivos fijados.

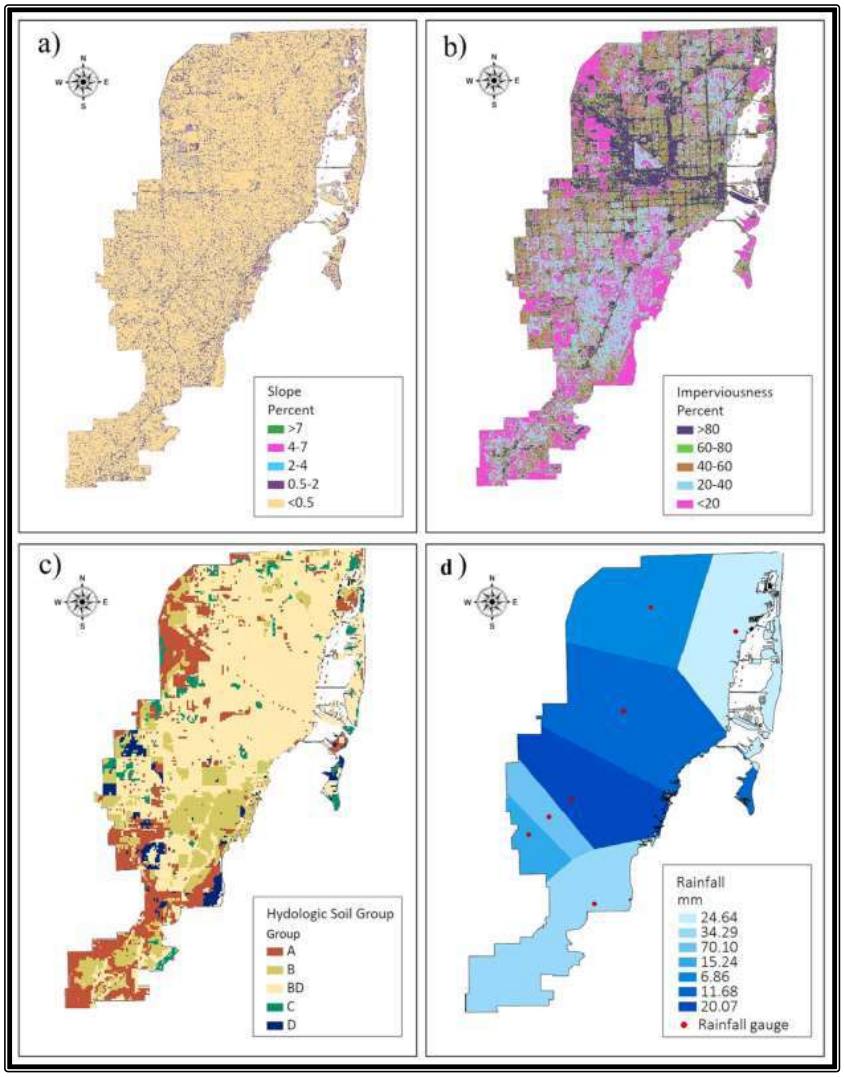


Figura 20. Distribución espacial de los datos que influyen en las inundaciones
(Mohamadiazar, Ebrahimian, & Hosseiny, 2024

(Chen, y otros, 2025), En el desarrollo del estudio, los investigadores dejan ver *"la importancia de argumentar que el crecimiento urbano y la especificidad de sus*

características son relevantes en el desarrollo de un territorio, en esta investigación, resaltan que la huella urbana contribuye en otorgar elementos claves para determinar las complejidades y los patrones de cambio de las diferentes ciudades a nivel mundial, sin embargo, manifiestan que actualmente se carece de elementos para caracterizar de manera adecuada las variaciones generales encontradas en torno a este elemento".

En el estudio propusieron establecer la forma urbana a través de las tipologías entregadas por formas urbanas modulares locales, que contienen tres categorías naturales y dieciocho categorías creadas, todo en búsqueda de poder modelar el espacio urbano de un territorio.

A través de los resultados, los autores revelan dos patrones distintos: el aumento del tamaño de la población urbana conlleva a que la caracterización de la forma local a través de los edificios de mayor relevancia disminuya, y el otro aspecto tiene que ver a que magnitud se acrecientan los niveles de ingreso de la ciudadanía, la muestra de los edificios consolidados y en proyección disminuyen.

En qué sentido se pudieron interpretar los resultados, como aquellos que guardan relación con el mapeo global que muestra la diversificación y el avance de la forma de las ciudades con distintos valores y tamaños de población, y los ingresos que se obtienen por parte de la comunidad, haciendo énfasis en la búsqueda constante del desarrollo urbano sostenible.

Como insumo utilizado, nuevamente se deja ver clara la necesidad de la implementación de las imágenes satelitales, las cuales permiten de manera general poder explicar de manera específica a través del tiempo los datos cambiantes en torno al fenómeno estudiado.

Y reiterar en que mí investigación constituye constantemente y de acuerdo a las investigaciones revisadas, en que los análisis que abarcan en primera instancia la utilización de las herramientas geográficas y los SIG y el entorno que las rodea como el análisis de datos y su procesamiento, en segunda instancia la utilización de fuentes de información como el empleo de datos provenientes de sensores satelitales en el análisis realizado multitemporal de algún territorio, y en tercera todo en búsqueda de propender por desarrollar mejorar la vida de las personas y garantizar constantemente el desarrollo determinado como sostenible a nivel global y local.

Este estudio lo consideré importante, teniendo en cuenta que se percibe que cada vez es más el avance tecnológico y de puesta en marcha de herramientas de desarrollo territorial, los datos mundiales de población, variables y patrones territoriales son recurrentemente más robustos, lo que permite incentivar la realización de análisis investigativos relacionados con iniciativas para garantizar ideas innovadoras en relación con las formas adecuadas y ordenadas de planificación.



Figura 21. Distribución de ciudades mundiales
Fuente: Chen, y otros, 2025

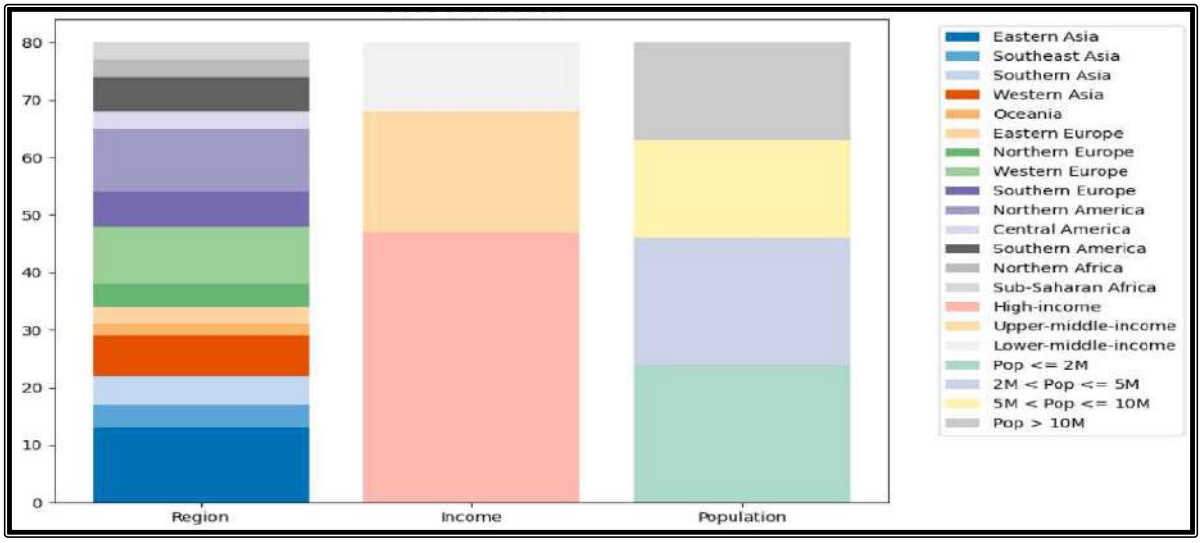


Figura 22. Distribución del crecimiento global
Fuente: Chen, y otros, 2025

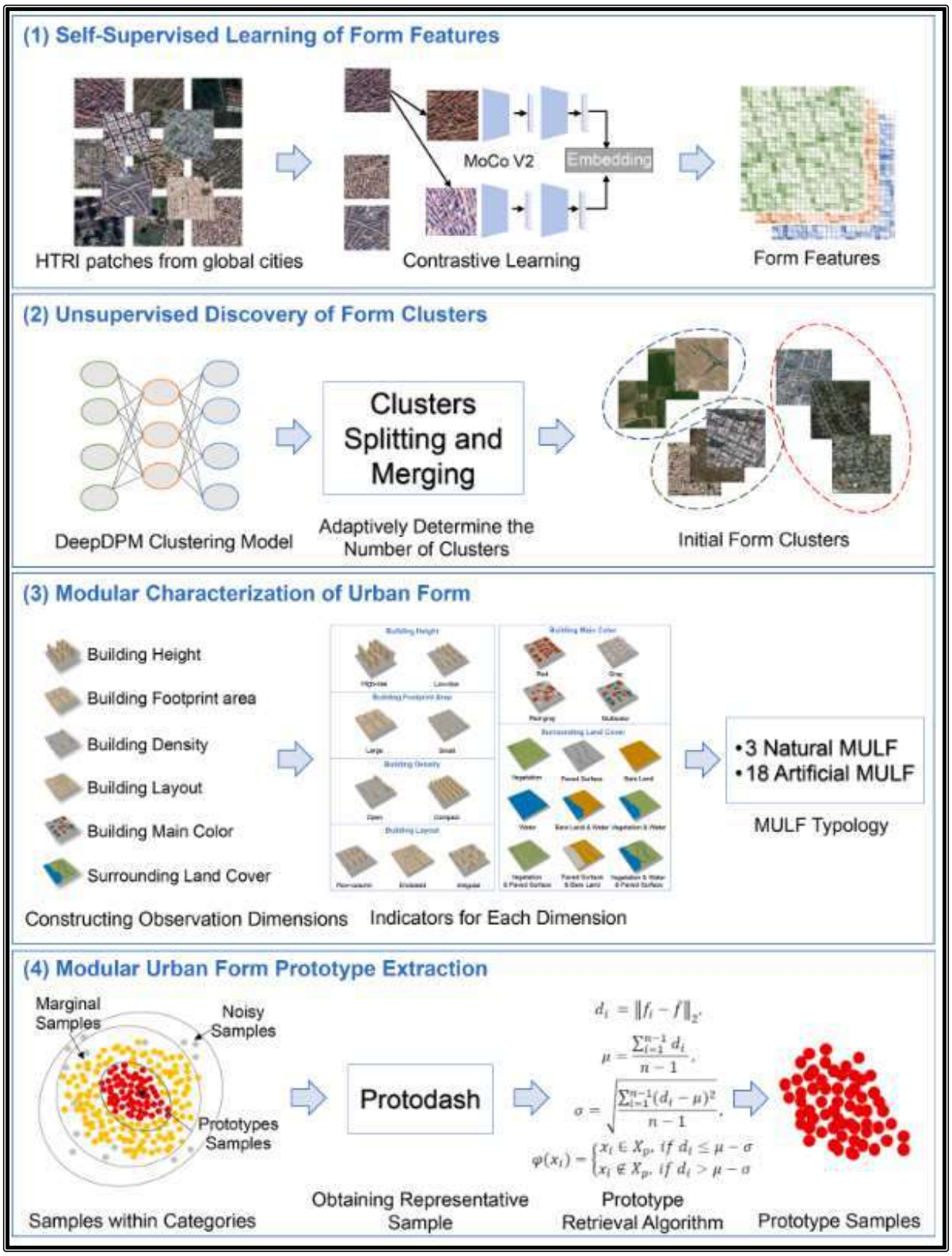


Figura 23. Representación supervisada y no supervisada de forma urbana
Fuente: Chen, y otros, 2025

4.2. MARCO TEÓRICO

Para la elaboración de este estudio y el alcance de los objetivos de la propuesta, se ha tomado como base teórica las siguientes definiciones. Se describen de acuerdo fundamentalmente a la división de tres etapas:

En la primera de ellas se dan nociones del comportamiento, uso y dinámica del suelo, técnicas de sistemas de información geográfica y bases de datos geográficos, tratamiento, procesamiento y clasificación de imágenes de alta precisión y aquellas herramientas espaciales SIG.

En segunda instancia, se hace una revisión de los conceptos que enmarcan la teoría de expansión urbana, crecimiento demográfico, planificación territorial, sostenibilidad e impacto ambiental.

En la tercera, se relacionan criterios y conceptos alrededor de la accesibilidad territorial, organización del territorio, bienes y servicios y calidad de vida de las poblaciones.

- **Suelo**

Este concepto posee un gran número de definiciones, por lo que su estudio y el análisis que este conlleva permite descifrar distintas variables que se requieren para el desarrollo de cualquier tipo de investigación en el entorno de la Ingeniería Civil.

En la definición descrita por (Lambin, 2001), concreta lo siguiente: *"El suelo como recurso natural, es un elemento imprescindible alrededor del cual las sociedades emergen; se convierte así, en el soporte para la integración y estructuración de los asentamientos humanos. Actualmente, la magnitud y alcance espacial de las alteraciones humanas a la superficie de la tierra no tienen precedente"*. Por esto de la necesidad de controlar y dar un correcto análisis a la estructura del suelo como hábitat natural y poblacional que signifique la conservación de este recurso y la sostenibilidad ambiental. Del mismo modo, (Carter, 1997), dentro de la terminología que describe para este recurso manifiesta que: *"La calidad debe interpretarse como la utilidad del suelo para un propósito específico en una escala amplia de tiempo"*.

- **Uso del Suelo**

Es así como, (Nature, 1944), sugiere que, *"para determinar relevancia al desarrollo de este enfoque investigativo, es importante tener en cuenta que más allá del análisis del crecimiento de huella urbana en la ciudad de Pereira, y la localización de zonas de expansión urbana se debe tener en cuenta que siempre se debe propender por el cuidado de un recurso natural como lo es el suelo y su adecuada utilización, de acuerdo con esto se conceptualiza que su uso es originado por las acciones que desarrolla el hombre sobre el mismo, es decir, se trata de patrones primordialmente culturales"*. Lo que nos permite analizar que únicamente es el hombre quien define de acuerdo con su necesidad como podría dar utilidad a este recurso natural y que tipo de productividad podría recibir de este, sin embargo, también es responsabilidad del hombre darle un adecuado tratamiento.

- **Ocupación del Suelo**

Ahora bien, es indispensable no llegar a confundir el concepto de uso del suelo con el de ocupación al mismo, este último ya relaciona fundamentalmente la incorporación de herramientas técnicas y tecnológicas para sacar el mejor provecho de este, y que a su vez sea sustentable, según su concepto la orientación más arraigada y que a lugar coincide, por lo que (Chuvieco, Aportaciones de la Teledetección espacial a la cartografía de ocupación del suelo, 1985), permite manifestar que *"los estudios de ocupación del suelo tienen como misión fundamental la cartografía e inventario de la cobertura o utilización de un determinado espacio geográfico. Esta definición engloba dos concepciones distintas de este tipo de estudios. Por un lado, el de la ocupación o cobertura del suelo que designa los materiales que se presentan en un momento concreto sobre la superficie de la tierra; por otro, el de la utilización del suelo, referido más a la actividad humana que se desarrolla en ese espacio"*. Es así como comprendemos la necesidad de analizar qué tipo de relación suelo – hombre se pretende, lo que buscamos con este tipo de estudio es afianzar la necesidad de dar un correcto aprovechamiento a este recurso ante la imperiosa necesidad de lograr una adecuada utilización en torno al aprovechamiento poblacional.

- **Sistemas de Información Geográfica (SIG)**

Hoy en día la utilización de los software que hacen parte del desarrollo de los SIG, son parte fundamental para desarrollar diferentes estudios como el actual, según la ponencia y artículo científico publicado por (E. López, 2006), se entrega una idea clara de la diversidad de conceptos que abarca lo que denominamos Sistemas de Información Geográfica, sin embargo algo que allí se describe claramente considera lo siguiente, *"un SIG es un sistema de información compuesto por hardware, software y procedimientos para capturar, manejar, manipular, analizar, modelizar y representar datos georreferenciados, con el objetivo de resolver problemas de gestión y planificación"*. Lo que implica que con este recurso se puede analizar el territorio a través de distintas fuentes de información regionales como lo son redes hidrográficas, sistema de asentamientos, infraestructuras civiles carreteras, urbanización y construcciones, etc. De esta manera cualquier tipo de investigador puede analizar cada una de la información que se requiere dependiendo de los objetivos de lo que se quiere estudiar. De acuerdo con lo definido y manifestado por (Cebrian, 1988). *"Una de las principales fortalezas de los SIG radica en su capacidad para integrar múltiples capas de datos, lo que les confiere un notable potencial analítico. Esta funcionalidad permite dar respuesta a consultas complejas y generar mapas derivados que representan tanto condiciones reales como escenarios simulados, útiles para diversos fines de análisis y planificación"*.

De otro lado, (Dominguez, 2000), sugiere que *"Un SIG puede entenderse como un conjunto de métodos y procedimientos orientados al manejo de datos espaciales, que facilita la integración eficiente de información cartográfica con datos alfanuméricos, permitiendo así la generación de conocimiento derivado sobre el territorio analizado"*. Por lo que, para adelantar este proyecto investigativo y/o estudio de caso considera ser una gran parte de utilidad para el análisis y los criterios convenientes que permitan dar resultado y cumplimiento de los objetivos.

- **Bases de datos geográficas**

Es relevante recalcar que la construcción de bases de datos geográficas o espaciales y lo que en su entorno las rodea (almacenamiento eficiente de datos, análisis geográfico, visualización de información en aproximación a la realidad y solución a problemas en varias

disciplinas), abarca grandes campos de aplicabilidad, en el caso de la Maestría en Ingeniería Civil, la correcta ubicación espacial de una entidad de construcción cualquiera sea su característica en el mundo real con la aplicación de ciertas variables, herramientas y sentencias que se requieren para el diseño de estas bases, resultan ser necesarias en el análisis de lo que conlleva estar en sintonía con una adecuada planificación territorial; es por esto, que dentro de la investigación desarrollada por (T. Escalante, 2000), y que argumenta la necesidad de desarrollar bases de datos geográficas que explicitan la necesidad de su utilización para diferentes tipo de análisis en nuestro caso para aquellas zonas propensas a expansión urbana y de territorialidad de servicios de la población, comenta que *"los sistemas de bases de datos pueden clasificarse de acuerdo con las estructuras de datos y los operadores que se presentan a los usuarios. En primer término, los sistemas más antiguos entran en tres categorías amplias: de lista invertida, jerárquicos y de red. En fechas más recientes se reconocen los sistemas relacionales y otros tales como los sistemas orientados a objetos".*

Dentro del proceso que delimita esta investigación, es de interés indicar que para el estudio se tendrán en cuenta las imágenes satelitales de alta precisión escogidas y caracterizadas del sensor ***Landsat 4, 5 y 8***, de la ventana temporal anteriormente referenciada, y que para detallar el proceso de análisis es importante puntualizar que se emplea el enfoque denominado clasificación por pixeles de las imágenes, cada una tiene sus propias características para el levantamiento de los datos y en todo caso por ejemplo pueden tipificarse los tipos de suelo ya sean urbano o rural, por lo cual debemos emplear algunos conceptos como los siguientes:

- **Percepción remota**

Según lo manifestado por (Bense, 2007), *"es la ciencia y arte de obtener información de un objeto, área o fenómeno a través del análisis de los datos adquiridos mediante algún dispositivo que no está en contacto físico con el objeto, área o fenómeno investigados, involucrando dos procesos básicos: Adquisición de datos desde las plataformas con sensores adecuados y el análisis de los datos mediante dispositivos visuales o digitales"*.

- **Características de los sistemas de percepción remota**

Según (von Martini, N/A), *"La percepción remota se lleva a cabo sosteniendo de alguna manera un sensor sobre el o los objetos bajo estudio. Se utilizan diferentes plataformas para sostener los sensores, y estas plataformas varían con base a la altitud por sobre la zona de estudio. Actualmente se utilizan 2 plataformas con sistemas de percepción pasiva que son aviones a los cuales se les incorpora cámaras fotográficas o satélites con sensores remotos que usan sensores electro-ópticos".*

Pero para detallar porque a estos insumos son importantes, es porque se les denomina entre otras cosas imágenes de precisión, principalmente porque deben tener un proceso de ortorrectificación.

- **Clasificación de las imágenes**

Es necesario el por qué comprender la importancia del tipo de imágenes ya sean satelitales o fotografías aéreas, debido a que estas contemplan diferentes características según (Chuvieco, 2010), *"las imágenes pueden ser pancromáticas o multiespectrales, son registradas a través de un sensor digital que detecta la reflectancia de la energía emitida en diversas regiones del espectro electromagnético, abarcando generalmente las bandas correspondientes al rango visible y al infrarrojo cercano. Las imágenes pancromáticas normalmente se representan mediante la escala de grises, las imágenes multiespectrales miden la reflectancia en muchas bandas".*

- **Imágenes satelitales**

Según lo definido por (Bense, 2007), *"Corresponden a los datos generados por sensores ubicados en satélites artificiales, los cuales registran la radiación electromagnética emitida o reflejada por objetos en el espacio. Esta información es posteriormente enviada a estaciones terrestres, donde es visualizada, procesada y analizada".*

Según lo descrito por la (NASA, 2017). ***"Landsat:** La serie de satélites Landsat constituyó la primera iniciativa de los Estados Unidos destinada a la observación sistemática de los recursos terrestres. Esta constelación está compuesta por ocho satélites, cuya operación y*

mantenimiento son responsabilidad de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA), mientras que la generación y distribución de las imágenes obtenidas están a cargo del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS)".

Ahora bien, lo referenciado por (Apolo, 2017). ***"RapidEye:*** *Esta tecnología forma parte de una empresa alemana especializada en el suministro de información geoespacial. A partir del año 2008, se puso en funcionamiento la constelación RapidEye, compuesta por cinco satélites. Este sistema satelital proporciona datos orientados a soluciones geoespaciales, siendo especialmente útil para el monitoreo de actividades agrícolas y forestales, así como en ámbitos de seguridad, gestión de emergencias, medio ambiente, energía, infraestructura y planificación territorial"*.

Ahora está bien recalcar lo relacionado y definido por (von Martini, N/A), que describe las características del sensor *"**SPOT:** Este sistema proporciona imágenes satelitales con una resolución espacial que varía entre 10 y 20 metros, dependiendo del modo de adquisición. En modo multiespectral alcanza una resolución de 20 metros, mientras que en modo pancromático ofrece una resolución de 10 metros. Estos datos representan, actualmente, una de las opciones con mayor nivel de detalle espacial disponibles para el acceso público".*

Sensor	Resolución Espacial	Cobertura de imagen	Resolución Temporal	Resolución Radiométrica	Resolución espectral
Meteosat	2500 m	Toda la superficie terrestre	Cada 30 minutos	256 ND	1 visible, 1 IR cercano, 1 IR lejano
NOAA AVHRR	1100 m	2700 x 2700 Km	Cada 12 horas	1024 ND	2 bandas visibles, 1 IR cercano, 1 IR térmico
Landsat TM	30 m	185x185 Km	Cada 16 días	256 ND	3 visibles, 3 IR, 1 IR térmico
SPOT HRV	20 m	60x60 Km	Cada 20 días	256 ND	2 visibles, 1 IR cercano
SPOT Vegetation	1150 m	2200x200 Km	Diario	1024 ND	2 visibles, 2 IR
MODIS	250 - 100 m	2330x2330 Km	Diario	1024 ND	36 bandas
IKONOS	4 m	100x100 Km	Bajo demanda	2048 ND	3 visibles, 1 IR cercano

Tabla 3. Tipos y características de sensores remotos
Fuente: El autor

- **Fotografías aéreas**

Según la (NASA, 2008), *"consiste en el estudio de la superficie terrestre a través de imágenes captadas por cámaras instaladas en plataformas aéreas. Este recurso resulta fundamental para realizar análisis situacionales que contribuyen al cumplimiento de los objetivos específicos definidos en la investigación propuesta".*

- **Procesamiento digital de imágenes**

En lo explicado por (Jensen, 2015), *"es la extracción de información y cómo abordar el problema de la clasificación de las imágenes, a partir del procesamiento de imágenes, se toma como base la manera detallada en lo que hace".*

- **Clasificación por pixeles**

Para el desarrollo del estudio, es importante destacar el tener en cuenta para su realización la implementación de las técnicas basadas en la Clasificación por pixeles, que discrimina el valor de reflectancia dado por la captura de la imagen satelital a cierta porción de terreno requerido, por lo que se hace indispensable para poder determinar de acuerdo a la calidad de las imágenes y su respectiva resolución espacial poder analizar el crecimiento urbano y la identificación de aquellas zonas de expansión en la ciudad; siguiendo aquellos criterios y conceptos técnicos de esta práctica, es necesario poder indicar que según la investigación realizada por (Marinai, 2013), *"es una técnica informática que asigna etiquetas a píxeles individuales de una imagen según sus características. Este proceso implica el entrenamiento de algoritmos para clasificar cada píxel en diferentes clases o categorías; de allí la importancia de su implementación, práctica y disposición la determinación de diferentes patrones del espacio terrestre como lo son la identificación de huella urbana, vegetación, vías y orografía entre otras múltiples variables".*

Según esto, se deduce que la clasificación por píxeles es una técnica fundamental en el procesamiento digital de imágenes, utilizada para asignar cada unidad mínima de imagen (píxel) a una categoría temática específica en función de sus valores espectrales. Este enfoque se basa en que cada uno representa una sola clase de cobertura a tratar, puede presentar limitaciones áreas heterogéneas donde puede contener mezclas de clases. Por

ello, su eficacia depende en gran medida de la resolución de la imagen y de una adecuada calibración de los algoritmos de clasificación supervisada o no supervisada.

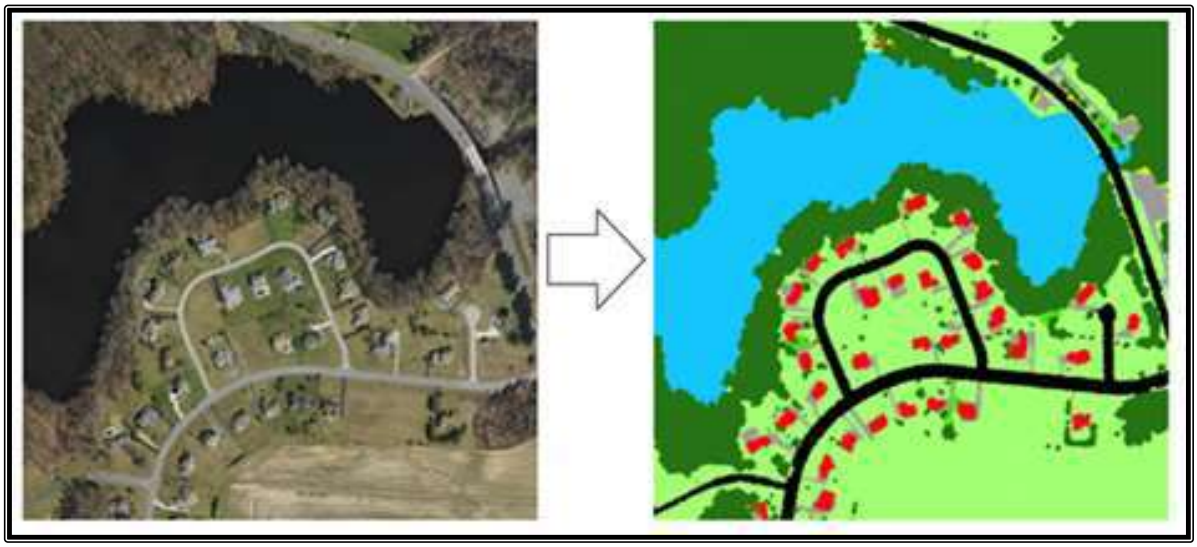


Figura 24. Clasificación por pixeles – Segmentación semántica
Fuente: Página Web – Empresa ESRI



Figura 25. Clasificación por pixeles – Representación del terreno
Fuente: Página Web – Empresa ESRI

Por lo que, teniendo en cuenta la tecnología dispuesta por el software a emplear y lo desarrollado por su casa matriz *(ESRI)*, es importante de igual manera, aportar los criterios dados para la construcción e implementación de diferentes herramientas, y que, a su vez, valoren la clasificación por pixeles y los resultados confiables que a partir de esta técnica se puedan obtener.

- **Herramienta espacial SIG**

Lo que se requiere con este diseño y construcción de una herramienta espacial SIG, es lo que se considera entre otras cosas con base en lo descrito por (C. Henriquez, 2006), *"el objetivo es analizar la variación en el valor de una variable o componente dentro del espacio geográfico. De manera más general, estas herramientas permiten a los usuarios formular consultas dinámicas, examinar información geoespacial, modificar datos y mapas, así como visualizar los resultados de dichos procesos. En el caso particular del estudio sobre el crecimiento de la huella urbana y la identificación de áreas de expansión en la cabecera municipal de Pereira, Risaralda, se pretende que los resultados obtenidos contribuyan a generar nuevas perspectivas para la aplicación de herramientas de análisis espacial desde un enfoque geográfico riguroso y detallado"*.

El objetivo del diseño de una ***herramienta SIG***, como la que se propone, es instaurar correspondencias eficaces entre una concurrencia de pixeles obtenidos de las imágenes *(entradas)*, que posteriormente se utilizarán para estimar y analizar cómo ha sido el cambio en el crecimiento urbano en la ventana temporal escogida, y en el alcance de nuestra propuesta que enfatiza en identificar aquellas zonas de expansión urbana y localización de asentamientos humanos *(salidas)* en la Cabecera Municipal de Pereira – Risaralda; la obtención de estos resultados, normalmente surge de la recopilación de datos históricos obtenidos desde las imágenes de precisión.

A su vez, el valor orientado a la innovación y el diseño de la herramienta que se propone desarrollar ofrecerá una contribución intrínseca de diferentes variables *(antrópicas y naturales)*, que para nuestro caso, permitirá dar las pautas necesarias para esclarecer qué zonas resultan ser adecuadas para el futuro desarrollo urbanístico en la ciudad; esto correspondido a las variables de entrada dadas como se mencionó anteriormente por la información arrojada por las imágenes de alta precisión y posteriormente por el

procesamiento e integración con los SIG que admite un análisis y manejo geográfico evidente de los datos.

En este sentido aquellas son de gran aporte a lo que sería el procesamiento a partir de una variedad de información dada desde la fuente original y la visualización de los resultados, para nuestro caso zonas de expansión urbana; pero además garantizar que la población que se asentará allí obtenga condiciones de calidad como la proximidad a vías de acceso, la adquisición de bienes y servicios, entre otros que garanticen calidad de vida.

El deseo de diseñar una ***herramienta SIG***, radica principalmente en representar eficazmente la dimensión de los cambios, la instalación de los futuros cambios, y los comportamientos espaciales de estos cambios utilizando un software especializado en el desarrollo de herramientas SIG; se busca en determinar las zonas de expansión urbana y su actuación, teniendo en cuenta los usos del suelo de la zona escogida, y considerar factores de urbanismo como los mapas de vecindad a variables de proximidad y de interés necesario para las personas que puedan llegar a habitar estas áreas.

A través de la aplicación de esta herramienta, como la que se quiere implementar en el presente trabajo se pretende dar cuenta también de la pertinencia e importancia del perfil de formación de la Maestría y registrar una proximidad metodológica que resalte el papel de la implementación de modernas herramientas en la evaluación del entorno ambiental, económico y social aplicadas a los procesos urbanos y rurales.

- **Expansión urbana**

Es necesario recalcar que el estudio se enfoca directamente en la detección de zonas potenciales de expansión urbana, por lo que se requiere conocer este concepto a que hace referencia, según (Cerda, 2007), *"el proceso de crecimiento urbano es descrito como una expansión orientada hacia el núcleo central. Esta dinámica adopta múltiples formas, dando lugar a diversos conceptos asociados, tales como áreas suburbanas, ciudades periféricas (edge cities), procesos de contraurbanización y fenómenos de dispersión urbana, comúnmente referidos como sprawl o expansión extensiva".*

En cuanto a los ***impactos ambientales*** generados es importante tener en cuenta que lo que se busca siempre es poder mitigarlos y contrarrestarlos, por lo que, según (Lahoz,

2010), *"la transformación de un territorio rural o agrícola en zona urbana genera alteraciones cuyos efectos pueden perdurar por siglos, e incluso, en algunos casos, resultar irreversibles"*.

- **Planificación**

Según lo que indica (Peralta, Carolina , 2015), *"se trata de un proceso orientado a la identificación y clarificación de los objetivos de una organización, los cuales se traducen posteriormente en programas y estrategias concretas de intervención. En este marco, la planificación busca optimizar la utilización y articulación de los recursos disponibles con el propósito de generar beneficios colectivos, siendo la sociedad en su totalidad el principal referente o destinatario de dicha acción planificada".*

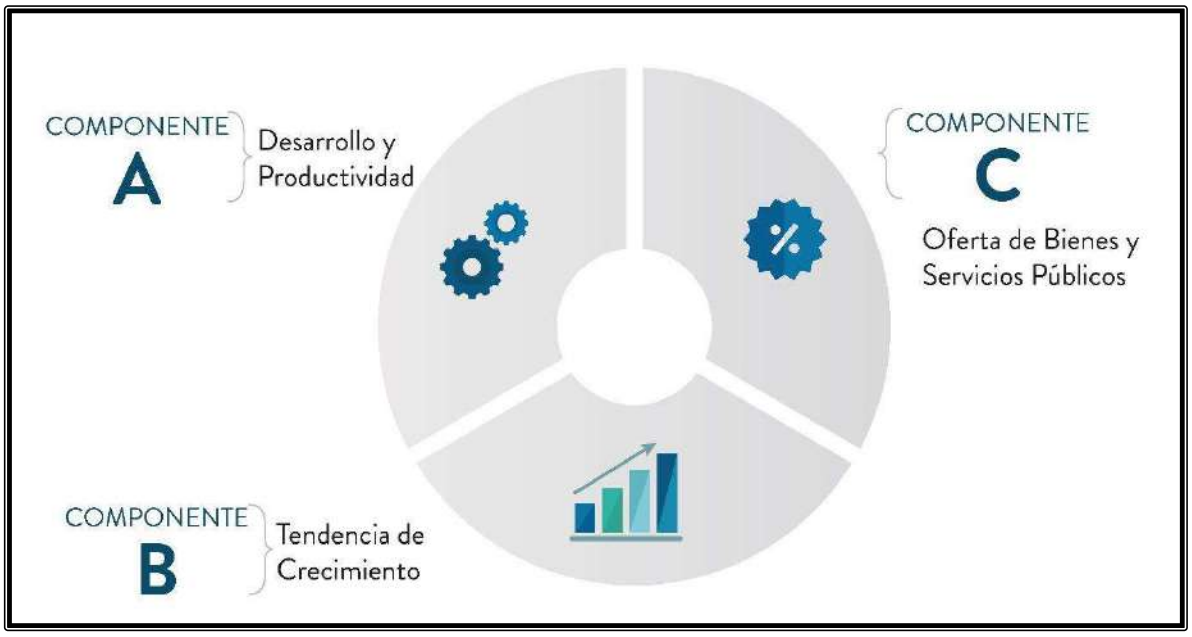


Figura 26. Componentes Planificación simple basada en datos
Fuente: Manual de la Innovación Expansión Urbana Ordenada

- **Planificación urbana**

Dado el concepto dado por (Pontificia universidad de chile, 2013), *"la planificación urbana es una disciplina que busca mejorar el bienestar de las personas y sus comunidades mediante el desarrollo de ciudades más equitativas, saludables, eficientes y atractivas para*

las generaciones presentes y futuras". El desarrollo de nuestra investigación procura inicialmente responder a necesidades propias de la población, pero salvaguardando el desarrollo sostenible y evitando los impactos ambientales que esta pudiese generar, innovando por apropiación de herramientas que contribuyan a un adecuado manejo del territorio y del suelo y generando aporte de conocimiento, de allí se desprende lo que tiene que ver con POT, el cual según él (DNP, 2018), lo define *"con lo establecido en la Ley 388 de 1997, el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) se constituye como la herramienta fundamental mediante la cual los municipios y distritos del país organizan y estructuran el uso del territorio. Este plan reúne una serie de objetivos, lineamientos, estrategias, metas, programas y disposiciones normativas que guían tanto el desarrollo físico del espacio como la asignación y aprovechamiento de los usos del suelo.".*

- **Accesibilidad Territorial**

Es necesario efectuar un paréntesis y determinar el porqué de todo el trabajo que se realizará, es claro que lo que se busca es detectar y buscar la manera de desarrollar una propuesta que establezca la correcto constitución de zonas de expansión urbana, pero con el objetivo claro de beneficiar la población en cuanto a accesibilidad territorial y la comida adquisición de bienes y servicios, preservando sobretodo el medio ambiente y el recurso natural que es el suelo, por lo que, según (Serrano, 2001), *"la accesibilidad territorial influye significativamente en los procesos de desarrollo y crecimiento a nivel regional. Desde una perspectiva orientada a la sostenibilidad, resulta esencial identificar aquellas áreas urbanas con alta concentración de funciones y actividades, configurando nodos estratégicos que garanticen el acceso a servicios fundamentales como salud, educación, recreación y seguridad. Estos espacios forman parte esencial de la vida cotidiana de la población, y su relevancia radica en la necesidad colectiva de contar con una disponibilidad equitativa y eficiente de dichos servicios".*

- **Calidad de vida**

Es claro que con base en lo anteriormente expuesto y argumentado, no debemos dejar de lado el concepto de lo que se busca que es sobretodo mejorar las garantías vitales de calidad de supervivencia en las personas, por lo que según (Palomba, 2002), *"el concepto de calidad de vida representa un término multidimensional de las políticas sociales que*

significa tener buenas condiciones de vida y un alto grado de bienestar, y también incluye la satisfacción colectiva de necesidades a través de políticas sociales en adición a la satisfacción individual de necesidades".

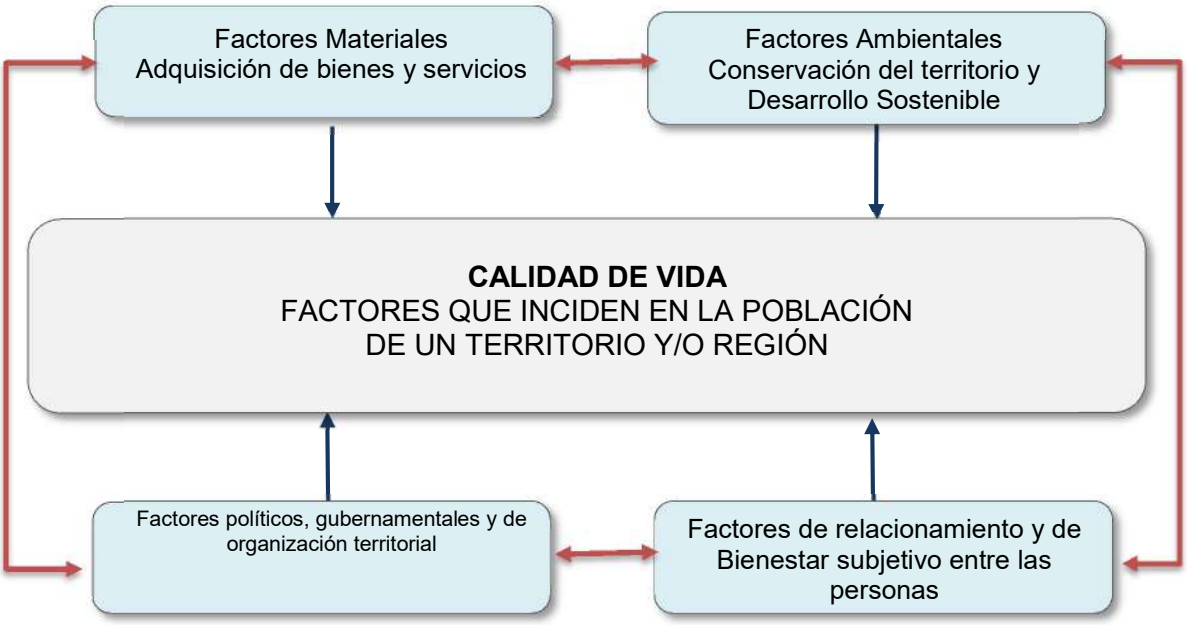


Figura 27. Sinopsis concepto calidad de vida
Fuente: El autor

- **Bienes y servicios**

Al llegar a este punto, es conveniente también manifestar la importancia de que la detección de aquellas zonas que probablemente van a ser habitadas por la población en crecimiento, deban contemplar variables entre otras cosas en cuanto a la facilidad de adquirir bienes y servicios factor que enmarca desarrollo en zonas de crecimiento, por lo que, según (Quiroa, Bienes y servicios, N/A), *"los bienes y servicios representan todos aquellos elementos creados para satisfacer las necesidades humanas"*.

Dado lo anterior, coincido en que alrededor de todos los análisis e ideas que surgen a partir del entorno del bienestar de las personas, se debe propender por garantizar los derechos, por lo que, otro valor agregado del estudio es ofrecer alternativas que van ligadas a dirigir acciones que satisfagan las necesidades de la población y del territorio como recurso.

4.3. MARCO CONCEPTUAL

Se presenta la sinopsis de la estructura teórico - conceptual del trabajo resaltando las principales relaciones entre los términos y conceptos referenciados en el numeral 4.2.

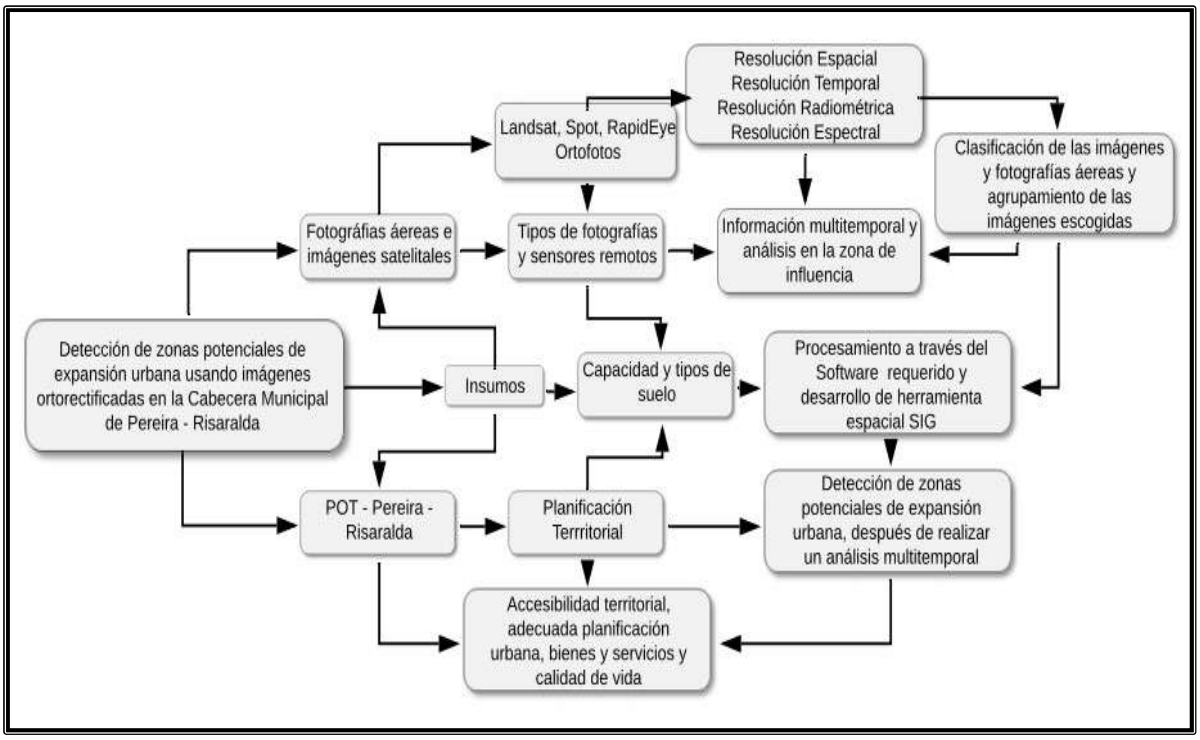


Figura 28. Sinopsis y estructura conceptual
Fuente: El autor

4.4. MARCO ESPACIAL

En el desarrollo de esta investigación, resulta necesario indicar factores relevantes del área y el territorio escogido.

- **Territorio de análisis.**

El estudio de caso está relacionado directamente con el exploración del comportamiento del crecimiento urbano y la detección de zonas de expansión urbana, se ha escogido como área de análisis la ciudad de Pereira – Risaralda, debido principalmente a ser una región de extenso potencial de desarrollo y afianzamiento de estructuras de conectividad con otras regiones del país, de igual manera, por ser un municipio catalogado como intermedio por

su número de habitantes y diversidad de características de afianzamiento y potencial urbanístico por su crecimiento constante.

- **Localización Geográfica**

Según (Pereira, Informe Anual , 2019), Pereira, ubicada en la zona centro-occidental de Colombia, es la capital del departamento de Risaralda y representa el núcleo urbano con mayor densidad poblacional dentro del eje cafetero, con una población aproximada de 482.483 habitantes. Junto a los municipios de Dosquebradas y La Virginia, integra el área metropolitana del Centro Oriente, desempeñando un papel central en la dinámica regional, se localiza en las siguientes coordenadas geográficas 4°48′51″N 75°41′40″O, en ella se asientan numerosas actividades residenciales, comerciales e industriales, ya que por su gran desarrollo y crecimiento turístico y urbanístico por estar ubicada en el denominado triángulo de oro (Bogotá, Medellín y Cali).

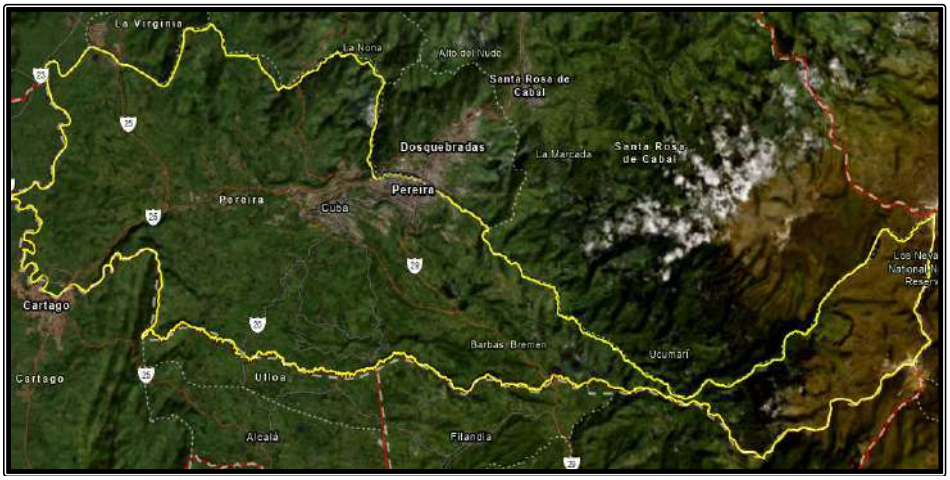


Figura 29. Localización detallada Cabecera Municipal Pereira - Risaralda
Fuente: El autor

MpCodigo	66001
MpNombre	Pereira
MpArea	608,23914
MpNorma	
MpCategor	1
SHAPE_Leng	223229,586085
SHAPE_Area	608239139,615
MpAltitud	1415

Tabla 4. Información catastral del municipio de Pereira
Fuente: El autor



Figura 30. Localización espacial Cabecera Municipal Pereira - Risaralda
Fuente: El autor



Figura 31. Localización Departamento Risaralda - Colombia
Fuente: (Pereira, Informe Anual , 2019)

- **Geografía y Topografía**

De igual forma según, (Pereira, Informe Anual , 2019). El municipio de Pereira abarca una superficie de 702 km² y limita al norte con los municipios de Balboa, La Virginia, Marsella y Dosquebradas; al noreste con Santa Rosa de Cabal; al este con el departamento del Tolima; al sur con los departamentos de Quindío y Valle del Cauca; y al oeste nuevamente con Balboa y el Valle del Cauca.

Geográficamente, la ciudad se sitúa en la Cordillera Central de los Andes, extendiéndose sobre el valle del río Otún y parte del valle del río Cauca. Como es común en muchas ciudades colombianas, presenta una combinación de terrenos abruptos y zonas más planas, lo cual influye en el diseño vial, adaptado al relieve, como en el caso de la Avenida del Río que atraviesa el valle del río Otún, caracterizándose por una topografía suave con ondulaciones laterales.

- **Clima**

Siguiendo la misma línea de los datos proporcionados por (Pereira, Informe Anual , 2019). El municipio de Pereira presenta una diversidad climática que se distribuye de la siguiente manera: clima cálido en el 9,9 % del territorio, clima templado en un 60,7 %, clima frío en un 11,5 % y áreas de páramo que abarcan el 17,7 %. La precipitación media anual alcanza los 2.750 mm y la temperatura promedio se sitúa alrededor de los 22 °C. La configuración topográfica del municipio, con una orientación predominante de oriente a occidente, favorece la existencia de distintos microclimas dentro de su jurisdicción.

- **Suelos y Vegetación**

En su parte, (Pereira, Informe Anual , 2019), la diversidad en la composición del suelo en el municipio de Pereira contribuye significativamente a la heterogeneidad de su cobertura vegetal y a la riqueza de sus paisajes, lo que posiciona a este territorio como uno de los más biodiversos del país. Sin embargo, dicha condición geológica también implica un alto grado de vulnerabilidad sísmica, debido tanto a la naturaleza de sus suelos como a la presencia de fallas tectónicas activas que lo atraviesa.

4.5. MARCO LEGAL

Dentro de la normatividad establecida para Colombia, con base en los principios y objetivos del Ordenamiento Territorial, se debe tener en cuenta lo descrito y argumentado por la *Ley 388 de 1997*[14] *– "Ley de Desarrollo Territorial en Colombia",* la cual rige y da las pautas para que los territorios empleen dentro de su estructura para el diseño de los POT normas y regulaciones para la correcta disposición y adecuado uso del suelo sea urbano y rural garantizando el equilibrio entre lo social, económico y ambiental; de igual manera, se tiene en cuenta el apartado del *artículo 32* de esta misma Ley que rige, regula y da pautas para el tratamiento y disposición legal de los suelos de expansión urbana en Colombia.

Po su parte, la *Ley 1454 de junio 17 de 2011*[15]*, "Por la cual se dictan normas orgánicas sobre Ordenamiento Territorial",* aclara y ofrece las pautas pertinentes en relación a dilucidar el concepto de Ordenamiento Territorial en Colombia, por lo que describe los principios rectores del mismo y se da una estructura a la organización institucional a través de la conformación de comisiones reguladoras, esquemas asociativos territoriales, se brinda argumentación de la política legislativa en materia del Ordenamiento territorial en nuestro país.

A sí mismo, el *Decreto 1077 de 2015*[16]*, "Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio",* que emplea los mecanismos necesarios para orientar la planeación adecuada de un territorio a través de lo circunscrito en el correcto uso y ocupación que se da al suelo, y se dictan las pautas para el entorno de dentro de lo establecido por el concepto de hábitat.

Para su implementación, los territorios deben garantizar el cumplimiento de esta norma y organizar su estructura bajo la metodología allí descrita, realizando las entregas documentales y cartográficas requeridas oportunamente.

[14] Normatividad tomada de la página Web:
https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=339

[15] Normatividad tomada de la página Web:
https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=339

[16] Normatividad tomada de la página Web:
https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=77216

5. METODOLOGÍA

La relación entre la metodología expuesta y los objetivos formulados se presenta en el siguiente esquema:

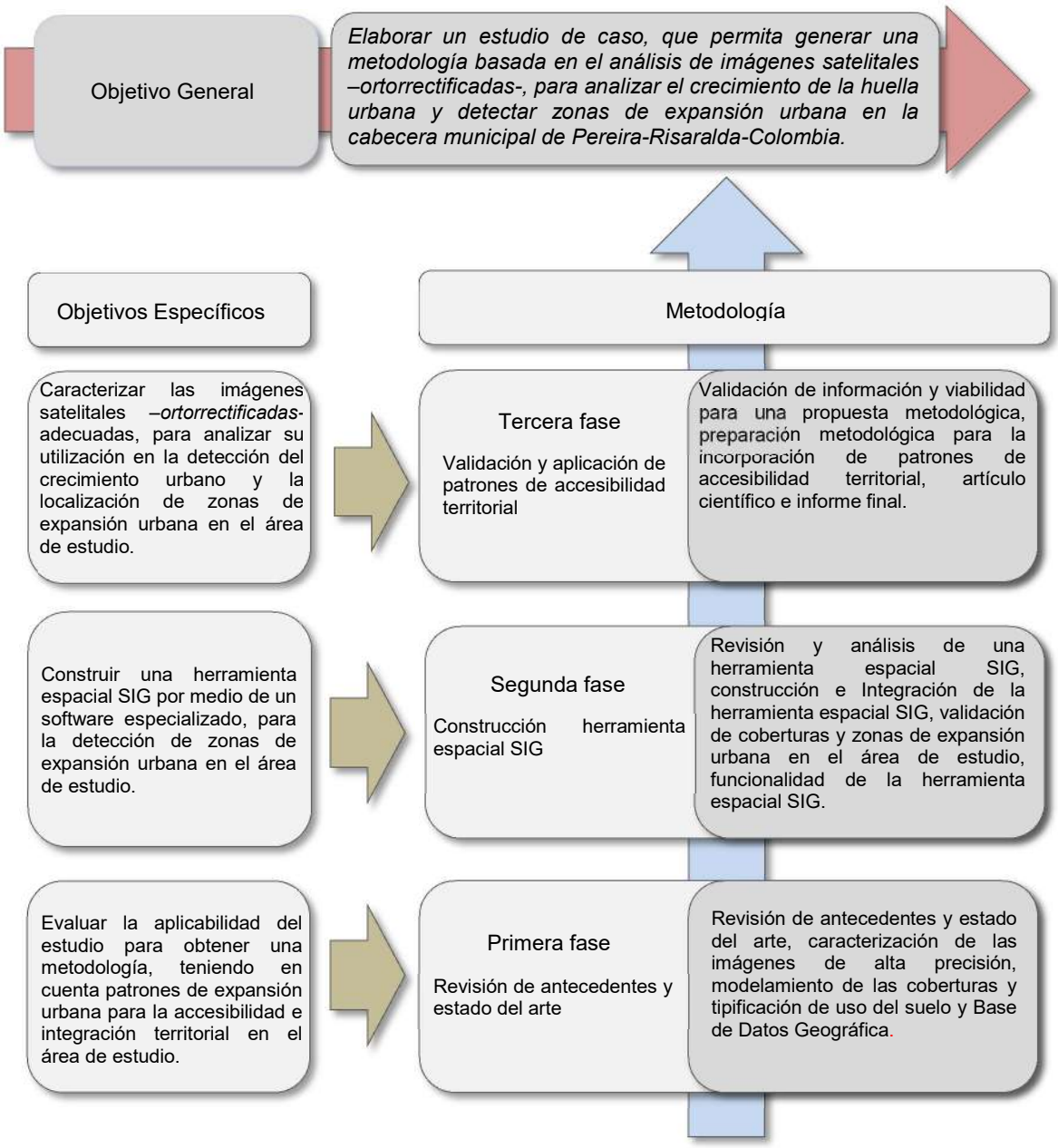


Figura 32. Descripción de las fases metodológicas
Fuente: El autor

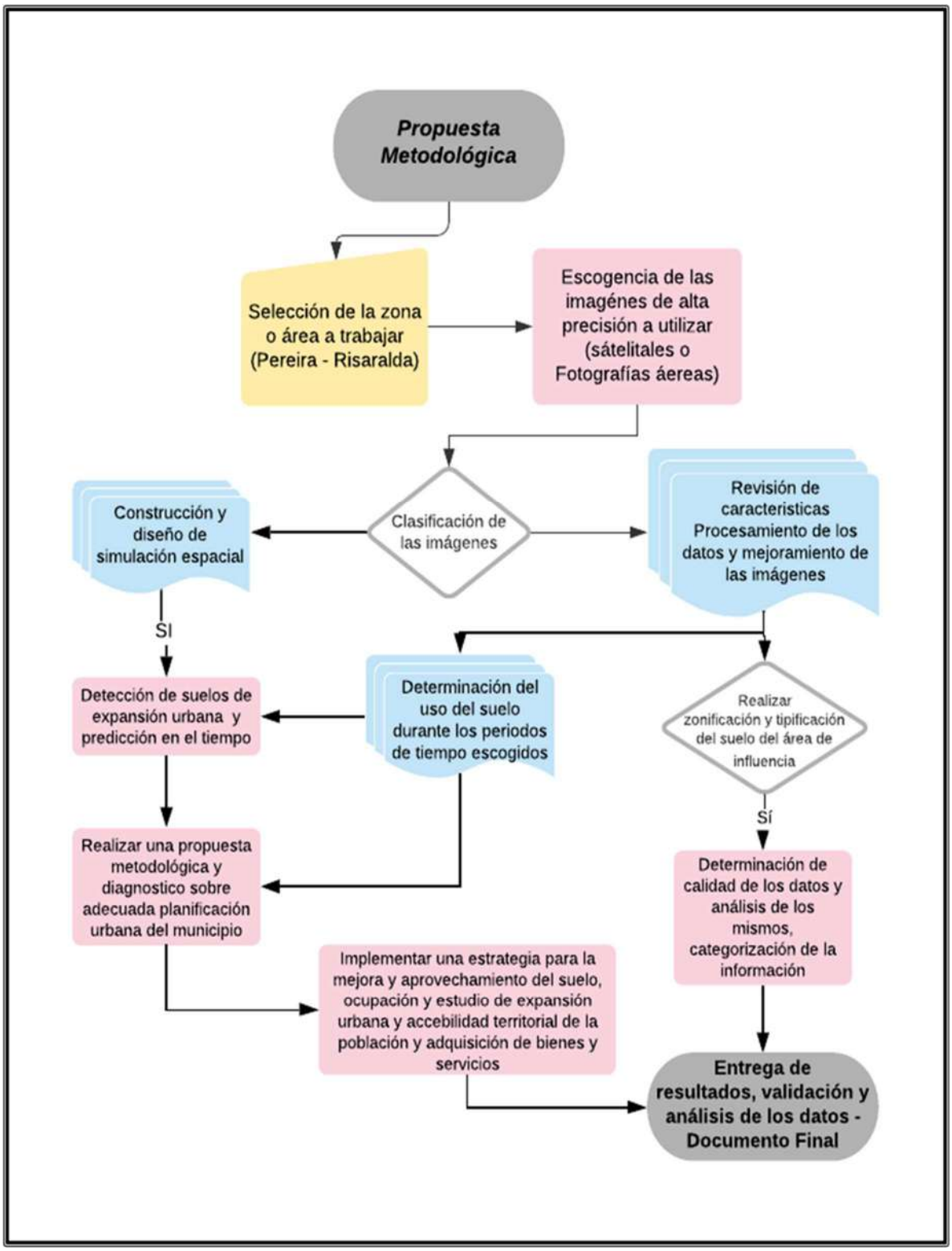


Figura 33. Desarrollo metodológico del estudio de caso
Fuente: El autor

5.1. COMPONENTE GENERAL

Esta investigación académica al utilizar imágenes satelitales –ortorrectificadas- Landsat, para detectar la expansión urbana en Pereira integró causas ambientales, económicas y legislativas mediante un enfoque interdisciplinario. Desde lo ambiental, el análisis tuvo un enfoque que permitió identificar la ocupación de zonas de riesgo o pérdida de cobertura vegetal, que permite hacer un análisis evaluando impactos sobre ecosistemas estratégicos. En lo económico, se realizó una correlación que va ligada a la ampliación de estas zonas con respecto a áreas de inversión en infraestructura, valorización del suelo y crecimiento de otros tipos de actividades establecidos y visualizados en la cartografía fuente de la ciudad como la clasificación del suelo definida en la regulación normativa dispuesta por la Secretaria de Planeación del municipio. Desde el plano legislativo, permitió contrastar la expansión real en el periodo determinado con los límites establecidos en el POT, revelando posibles desbordamientos normativos o vacíos en la gestión del suelo. Así, la investigación no solo describe el crecimiento urbano, sino que explica sus causas estructurales.

El estudio de caso, comprende el desarrollo en progresión de cada una de las actividades que se encuentran orientadas al cumplimiento de los objetivos formulados para esta investigación; se enmarca dentro de la modalidad de Profundización y tiene un enfoque Práctico - Experimental que busca promover la adquisición de conocimientos y la articulación y aplicación de información técnica, políticas gubernamentales y experiencias profesionales en la identificación de zonas de crecimiento urbano y la localización de las zonas de expansión urbana en la cabecera municipal de Pereira – Risaralda.

En este sentido, la metodología de este trabajo se desarrolló en cinco fases discriminadas de la siguiente manera:

5.2. COMPONENTE ESPECÍFICO

5.2.1. Caracterización de imágenes y preprocesamiento

La recolección de las imágenes -*ortorrectificadas*-, se produjo bajo la elección del satélite ***Landsat*** de los sensores 4, 5 y 8, teniendo en cuenta que este tipo de satélite contempla

imágenes más antiguas a comparación de otros, su primera versión fue lanzada en el año 1972, son de acceso gratuito lo que condujo a poder adquirirlas sin ningún tipo de valor monetario, de igual manera ofrecen características que permiten un adecuado manejo y tratamiento de la manifestación territorial.

Las imágenes satelitales ***Landsat*** manejan una resolución espacial de píxel de 30 metros por 30 metros representados en el terreno, lo que conlleva a concluir que son una ventaja teniendo en cuenta que todos sus satélites manejan la misma resolución, y son excelentes para la detección de cambios del campo reflectivo y espectral de representación del suelo.

Otra razón motivo de su selección, es que sus versiones cumpliesen con las bandas para realizar un **índice de *Diferencia Normalizada de Edificación (NBDI)*** que se calcula con la siguiente formula:

$$NDBI = (SWIR - NIR) / (SWIR + NIR)$$

Lo que indica que para el tratamiento de la información espectral necesitamos contemplar los datos de las siguientes bandas de sensor:

SWIR: Banda del infrarrojo de onda corta (Short-Wave Infrared)

NIR: Banda del infrarrojo cercano (Near Infrared).

Es necesario contemplar el ***NDBI,*** para que de las imágenes extraídas se pudiese resaltar las áreas urbanizadas, ya que a través del nivel de reflectancia entre las bandas de infrarrojo de onda corta ***SWIR*** y el infrarrojo cercano ***NIR***, se identificara las áreas con mayor reflectancia, de la misma forma, al calcular este índice se logra hacer seguimiento al crecimiento urbano (expansión urbana), para determinar y poder analizar cómo se da el incremento de la huella urbana en la ciudad a través de los años escogidos para el estudio.

Es importante resaltar, que esta herramienta permite a través del análisis de las imágenes satelitales *-ortorrectificadas-,* hacer un mapeo de seguimiento para analizar las áreas de crecimiento urbano, y permitir cumplir con uno de los objetivos de este estudio.

Posteriormente, al realizar la comparación con las imágenes ofrecidas por el sensor ***SPOT***, que es otro satélite que posee imágenes antiguas y que fue lanzado en el año 1986, en

estas la particularidad es que las imágenes tienen diferentes resoluciones espaciales y sus últimas versiones tienen un valor monetario.

SPOT 1–5	Resolución: 10–20 m	Acceso gratuito
SPOT 5-6	Resolución: 2.5 m (RGB)	Acceso parcial
SPOT 6-7	Resolución: 1.5 m	Acceso bajo solicitud/pagas

Tabla 5. Caracterización imágenes satelitales SPOT
Fuente: El autor

Ahora bien, al realizar la caracterización de los parámetros establecidos por las tomas realizadas por el sensor ***Sentinel,*** que es otro satélite de imágenes abiertas y con la misma resolución espacial en todas sus versiones (10 metros). Su primera adaptación es del año 2015, razón por la cual a la fecha no permiten realizar un análisis multitemporal para un intervalo bastante amplio, y al no ser muy antiguas, conlleva a no poder cumplir con el objetivo de esta investigación.

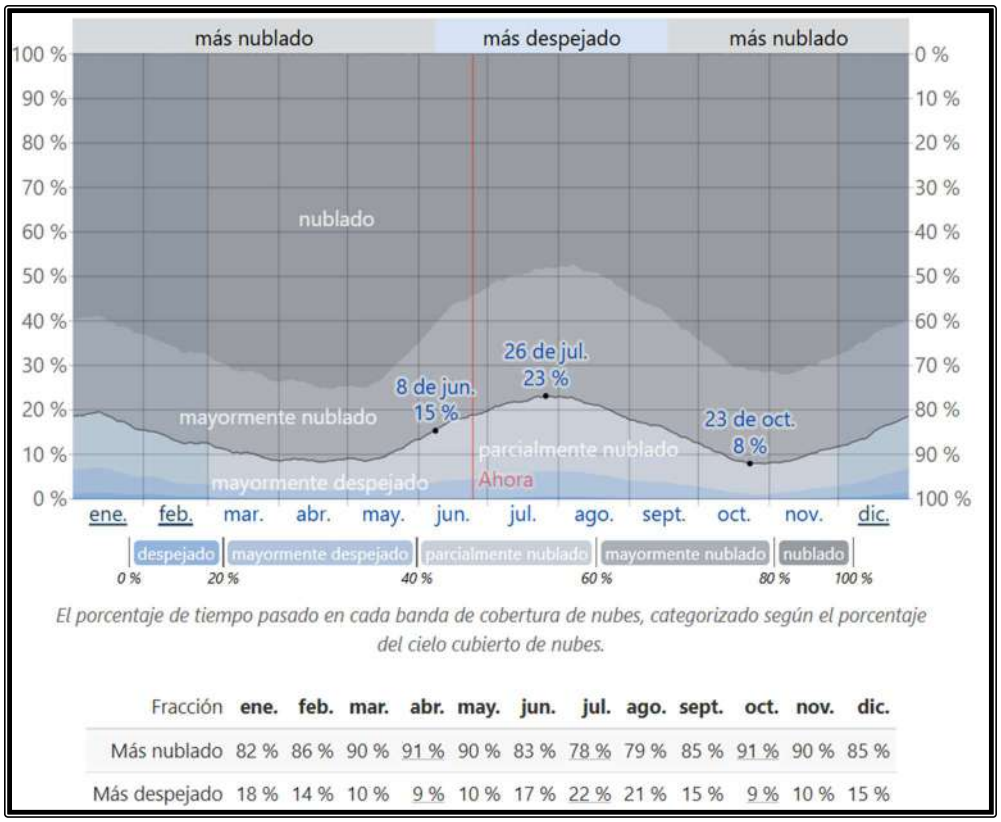
Para la búsqueda de imágenes satelitales *-ortorrectificadas-*, se utilizó el explorador de Imágenes de ***Landsat Explore*** desarrollado por la empresa *Esri,* manejando un criterio de escogencia de estas con un rango de menos del 25% de nubosidad.



Figura 34. Plataforma para la escogencia de imágenes satelitales
Fuente: Esri- Landsat Explorer

Se tiene en cuenta la consideración del 25% de nubosidad, de acuerdo con lo indicado en la plataforma (*Weather Spark)*, que muestra que "*el tiempo en la ciudad de Pereira, mantiene cortos tiempos de verano, y de igual manera, los tiempos de invierno son cómodos, se encuentra mojado y nublado todo el año, de igual manera, la proporción de cobertura nubosa en Pereira muestra escasa variación a lo largo del año. El periodo con menor presencia de nubes se inicia alrededor del 8 de junio y se extiende por aproximadamente 3,3 meses, concluyendo hacia el 17 de septiembre. Dentro de este intervalo, el mes con mayor claridad atmosférica es julio, cuando en promedio el cielo permanece despejado, mayormente despejado o con nubosidad parcial durante un 22 % del tiempo.*

Por otro lado, la etapa de mayor nubosidad comienza cerca del 17 de septiembre y se prolonga por cerca de 8,7 meses, finalizando casi al 8 de junio. Abril es el mes más cubierto del año, con promedio del 91 % del tiempo bajo condiciones de cielo nublado o mayormente nublado".



El porcentaje de tiempo pasado en cada banda de cobertura de nubes, categorizado según el porcentaje del cielo cubierto de nubes.

Fracción	ene.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sept.	oct.	nov.	dic.
Más nublado	82 %	86 %	90 %	91 %	90 %	83 %	78 %	79 %	85 %	91 %	90 %	85 %
Más despejado	18 %	14 %	10 %	9 %	10 %	17 %	22 %	21 %	15 %	9 %	10 %	15 %

Figura 35. Categorías de Nubosidad en Pereira
Fuente: Plataforma Web Weather Spark

A partir de los anteriores análisis, y la estructura metodológica para la escogencia de las imágenes satelitales *-ortorrectificadas-,* acordes para dar cumplimiento a los parámetros mínimos requeridos para trabajar en el estudio del desarrollo del aumento de la huella urbana en la ciudad y la detección de zonas de expansión urbana, las imágenes escogidas guardan relación con las variables requeridas para la obtención de los resultados deseados.



Figura 36. Imagen Landsat 1986
Fuente: El autor

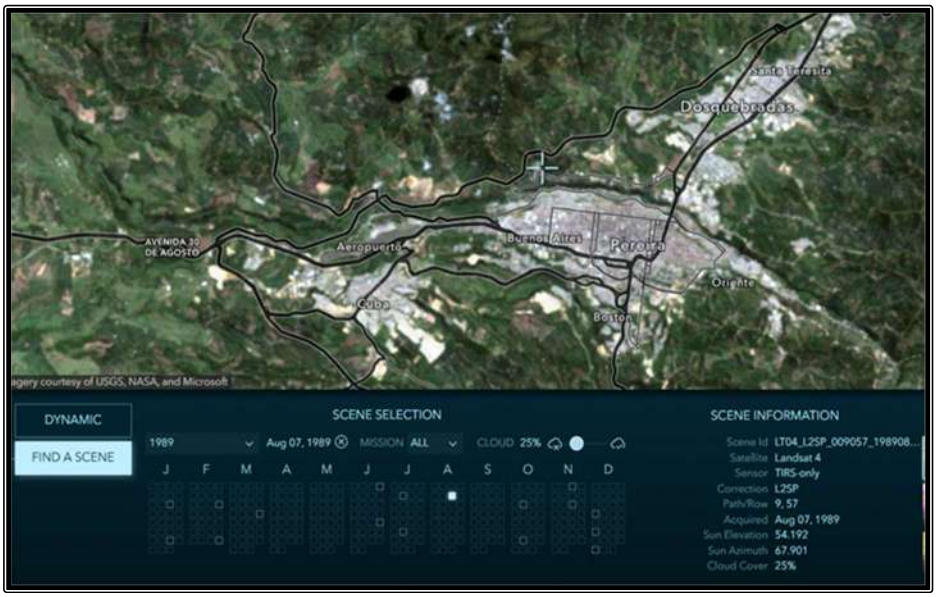


Figura 37. Imagen Landsat 1989
Fuente: El autor

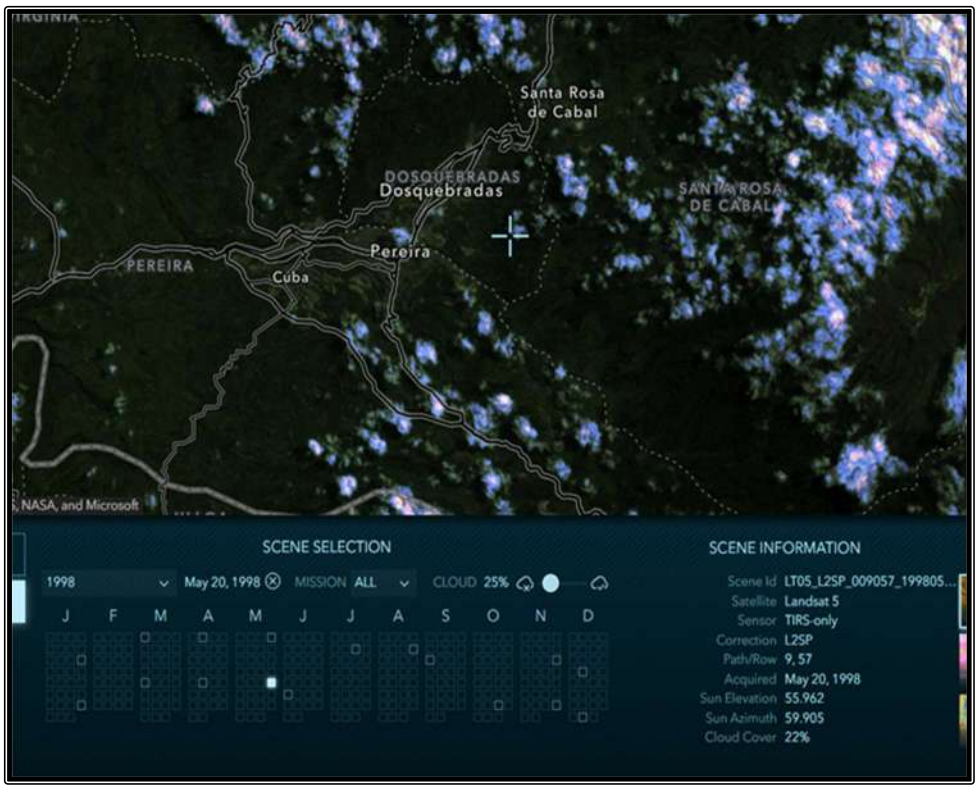


Figura 38. Imagen Landsat 1998
Fuente: El autor

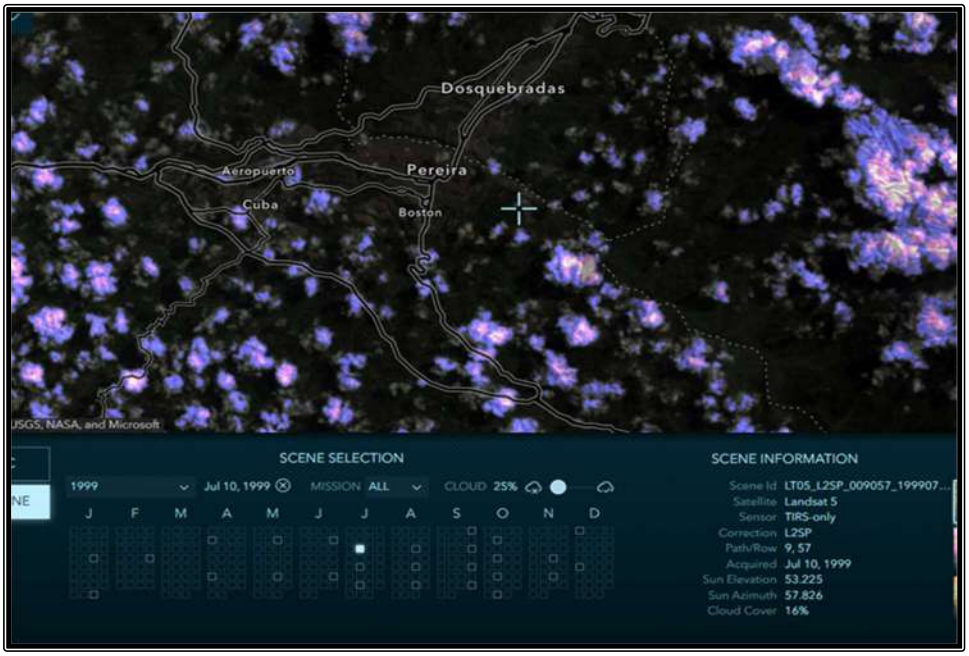


Figura 39. Imagen Landsat 1999
Fuente: El autor



Figura 40. Imagen Landsat 2004
Fuente: El autor

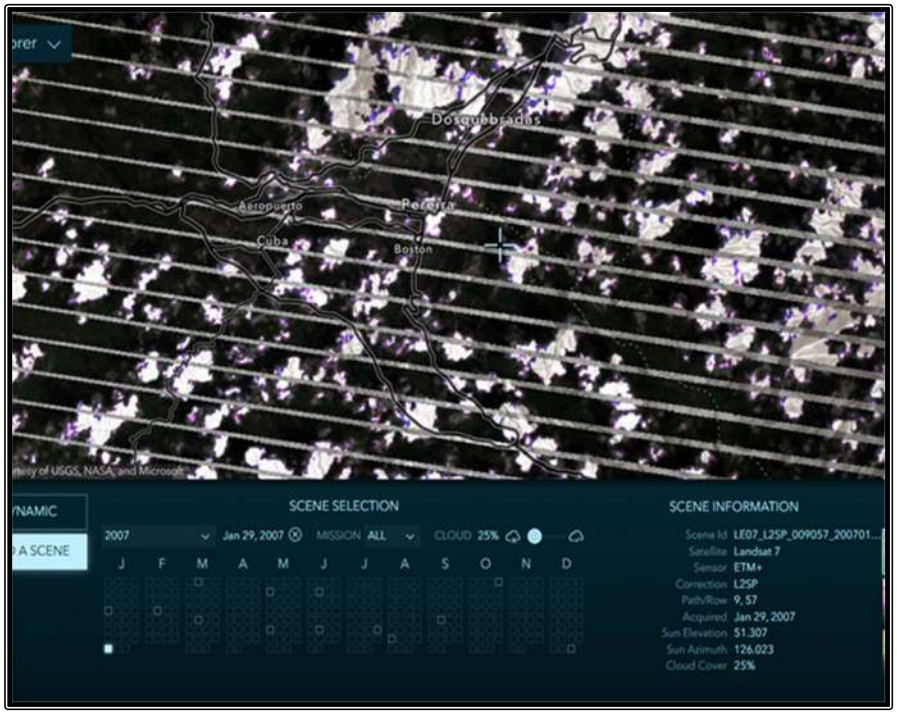


Figura 41. Imagen Landsat 2007
Fuente: El autor

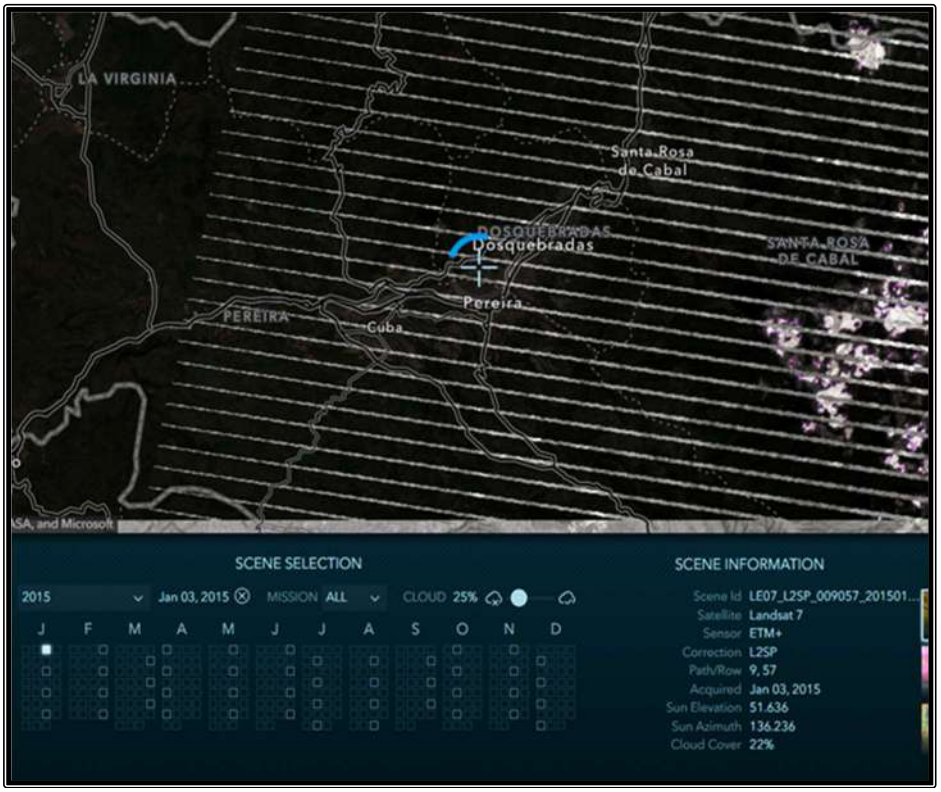


Figura 42. Imagen Landsat 2012
Fuente: El autor

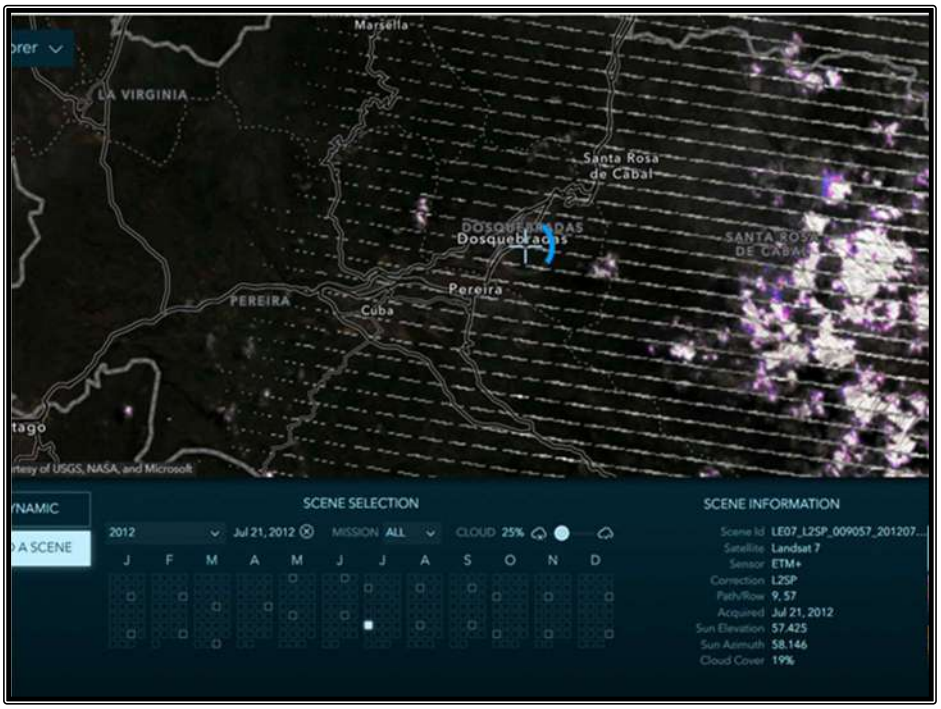


Figura 43. Imagen Landsat 2015
Fuente: El autor

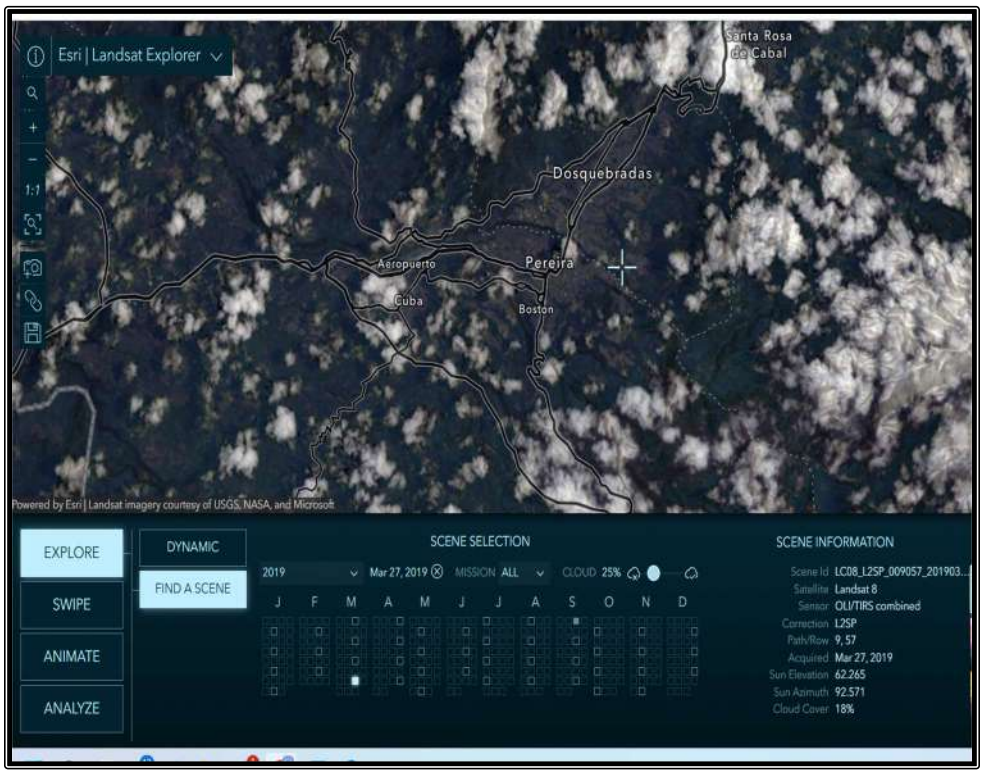


Figura 44. Imagen Landsat 2019
Fuente: El autor

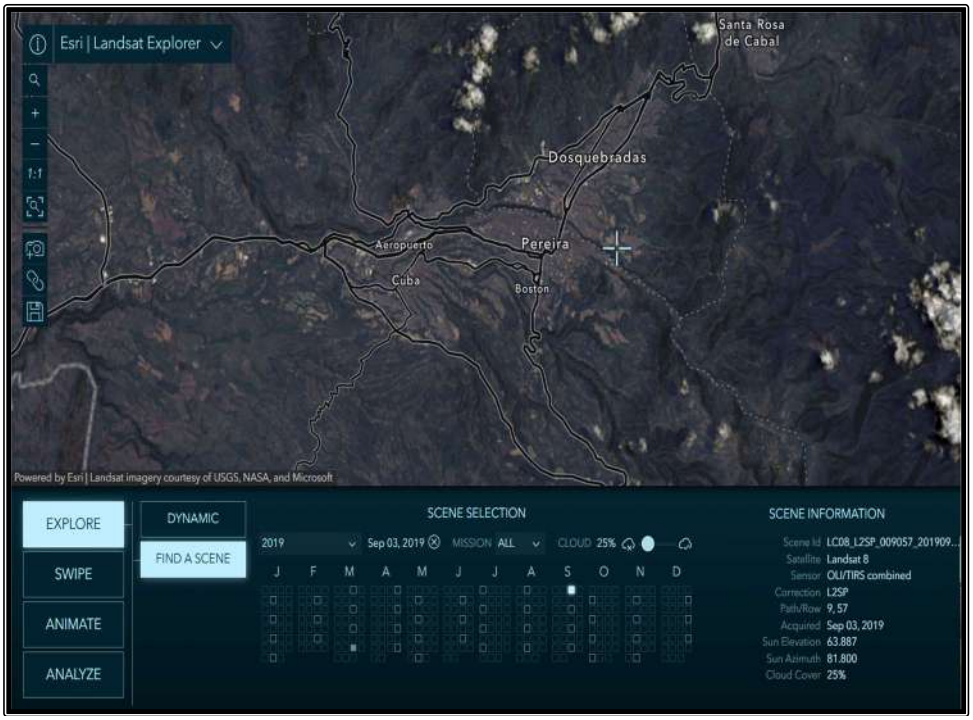


Figura 45. Imagen Landsat 2019
Fuente: El autor

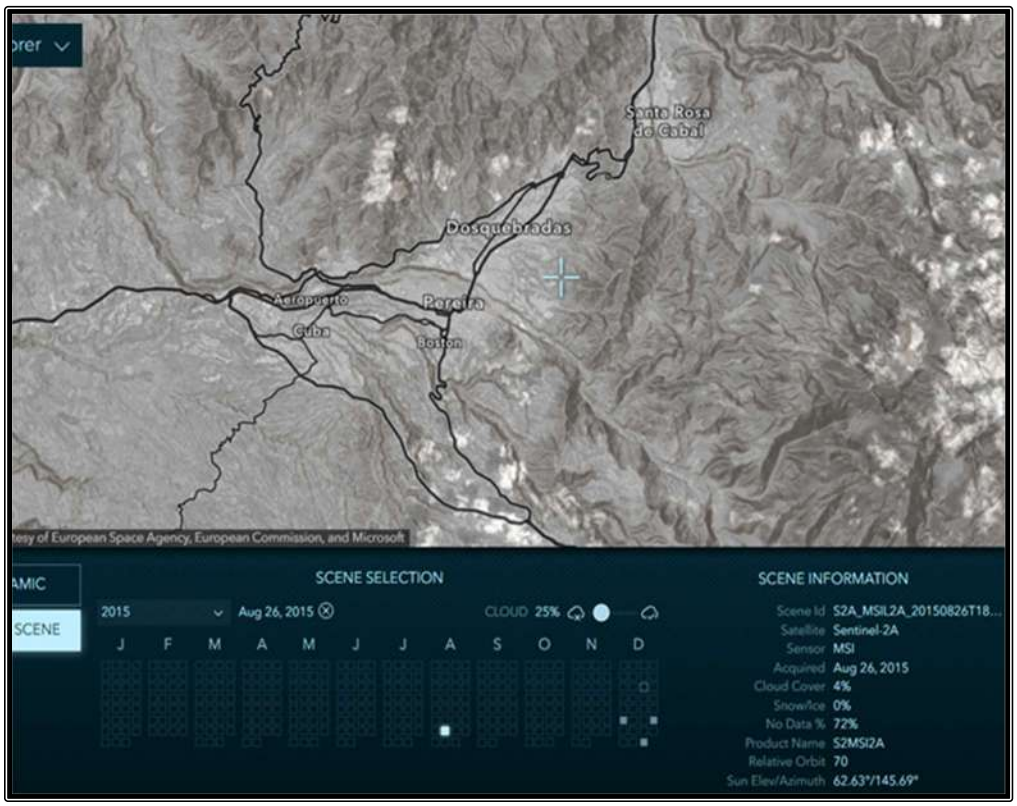


Figura 46. Imagen Sentinel 2012
Fuente: El autor



Figura 47. Imagen Sentinel 2017
Fuente: El autor

Al final la selección de imágenes satelitales *-ortorrectificadas-* dependió de:

1. Las que tienen menor cantidad de nubes.

2. Las que no tuvieron ningún error en el vuelo.

3. Las que coinciden con la teoría de años de crecimiento significativo de la mancha urbana.

De este modo se encontraron tres (3) imágenes cada una correspondiente a los años ***1989, 1998 y 2019*** *(de acuerdo con la teoría y antecedentes mostrados)*. No se manejó la misma temporada del año por la misma razón relacionada con la nubosidad, entonces las imágenes corresponden a la escogencia de tres meses diferentes. A continuación, se exponen las particularidades de estas mediante la siguiente imagen:



Figura 48. imágenes escogidas sensor Landsat
Fuente: El autor

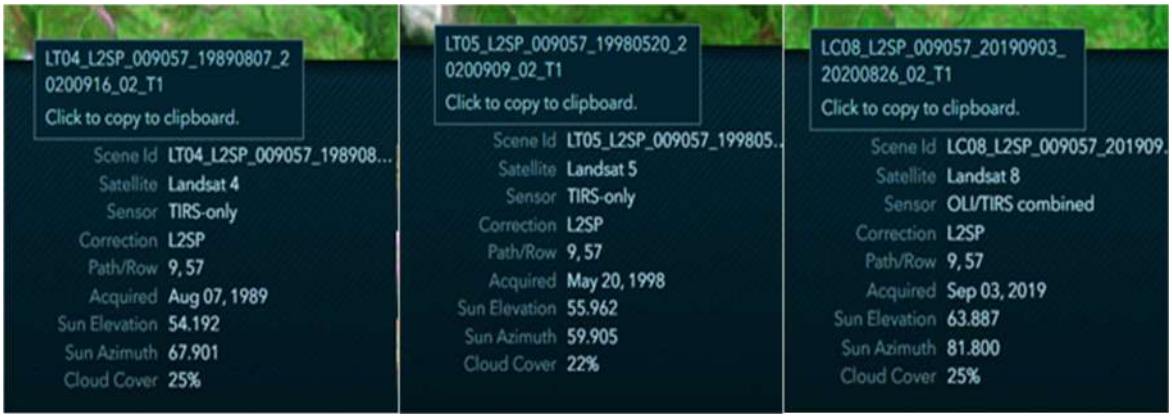


Figura 49. Caracterización imágenes escogidas sensor Landsat
Fuente: El autor

Otro factor adicional, tiene que ver con que estas tres (3) imágenes son ***L2SP***, es decir que tienen corrección de reflectancia de superficie y temperatura superficial terrestre, lo que significa que estas imágenes ya han sido procesadas para eliminar los efectos de la atmósfera y representar con mayor precisión lo que realmente ocurre en la superficie terrestre. Esto permite que ya se puedan comparar las tres imágenes entre sí y aplicar índices como *NVDI, NDBI o NDWI*. Puede llamarse de igual forma como en el que ya viene la imagen preprocesada.

Tras la realización de pruebas que se pueden verificar en el *documento bitácora del desarrollo del proyecto e incluida en los anexos*, se concluye que la mejor opción es descargar las imágenes satelitales con extracción de nubes, para evitar al máximo que queden clasificadas como área urbana. Se intentó crear un mosaico dataset que completara las nubes con imágenes del mismo año, pero al ser más nubosas que la imagen final escogida no se lograba reemplazar los espacios de las nubes y el resultado era que lugares donde no había nubes terminaba con estas, este procedimiento se realizó con *Google Earth Engine (GEE)*, a través de código integrado de lenguaje de programación *Phyton,* creando una cuenta en la plataforma abierta.

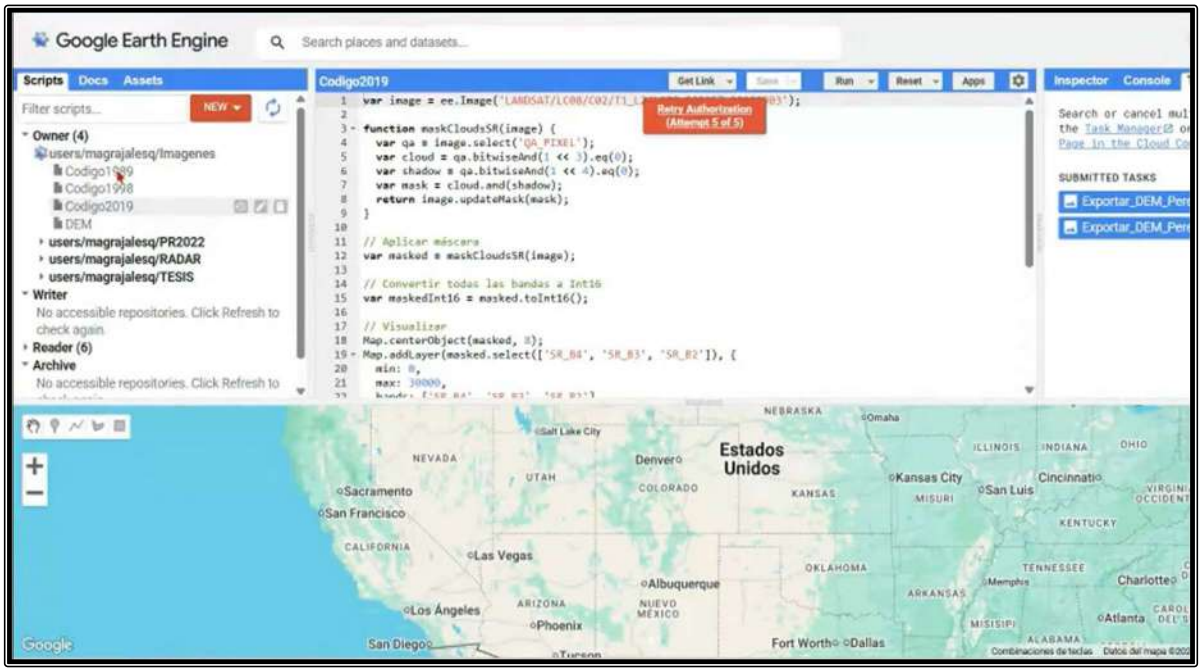


Figura 50. Creación de usuario plataforma Google Earth Engine
Fuente: El autor

Pero que es Google Earth Engine (GEE), de acuerdo con la búsqueda de información y a través de lo expuesto en la página Web de *(Google Earth, Web)*, *Se trata de una herramienta de geomática alojada en la nube, diseñada para facilitar la visualización y el análisis de imágenes satelitales de la superficie terrestre. Google Earth Engine es ampliamente utilizada por la comunidad científica y por organizaciones sin fines de lucro para desarrollar investigaciones en el campo de la teledetección, realizar estimaciones sobre posibles brotes epidemiológicos, y apoyar la gestión sostenible de los recursos naturales, entre otros usos.*

Teniendo en cuenta lo anterior, se diseñaron los siguientes códigos de programación *Phyton*, y se adoptó el procedimiento de suprimir las nubes, porque la clasificación realizada confundía aquellas con áreas urbanas.

Este proceso se realiza por medio de GEE, por lo tanto, se crea un código para la extracción de nubes de estas tres imágenes. (GEE_1989.py, GEE_1998.py, GEE_2019.py), códigos que se muestran a continuación a través de las siguientes imágenes:

```
var image = ee.Image('LANDSAT/LT04/C02/T1_L2/LT04_009057_19890807');

function maskCloudsSR(image) {
  var qa = image.select('QA_PIXEL');
  var cloud = qa.bitwiseAnd(1 << 3).eq(0);
  var shadow = qa.bitwiseAnd(1 << 4).eq(0);
  var mask = cloud.and(shadow);
  return image.updateMask(mask);
}

// Aplicar máscara
var masked = maskCloudsSR(image);

// Convertir todas las bandas a Int16
var maskedInt16 = masked.toInt16();

// Visualizar
Map.centerObject(masked, 8);
Map.addLayer(masked.select(['SR_B3', 'SR_B2', 'SR_B1']), {
  min: 0,
  max: 30000,
  bands: ['SR_B3', 'SR_B2', 'SR_B1']
}, 'Imagen sin nubes');

// Exportar
Export.image.toDrive({
  image: maskedInt16,
  description: 'Landsat4_SR_completo_sin_nubes',
  folder: 'GEE_Export',
  fileNamePrefix: 'LT04_19890807_ALLBANDS_masked',
  region: masked.geometry(),
  scale: 30,
  crs: 'EPSG:32618',
  maxPixels: 1e13,
  fileFormat: 'GeoTIFF'
});
```

Figura 51. Código GEE_1989.py
Fuente: El autor

```
var image = ee.Image('LANDSAT/LT05/C02/T1_L2/LT05_009057_19980520');

function maskCloudsSR(image) {
  var qa = image.select('QA_PIXEL');
  var cloud = qa.bitwiseAnd(1 << 3).eq(0);
  var shadow = qa.bitwiseAnd(1 << 4).eq(0);
  var mask = cloud.and(shadow);
  return image.updateMask(mask);
}

// Aplicar máscara
var masked = maskCloudsSR(image);

// Convertir todas las bandas a Int16
var maskedInt16 = masked.toInt16();

// Visualizar en GEE
Map.centerObject(masked, 8);
Map.addLayer(masked.select(['SR_B3', 'SR_B2', 'SR_B1']), {
  min: 0,
  max: 30000,
  bands: ['SR_B3', 'SR_B2', 'SR_B1']
}, 'Landsat 5 SR sin nubes');

// Exportar
Export.image.toDrive({
  image: maskedInt16,
  description: 'Landsat5_SR_completa_19980520_sin_nubes',
  folder: 'GEE_Export',
  fileNamePrefix: 'LT05_19980520_ALLBANDS_masked',
  region: masked.geometry(),
  scale: 30,
  crs: 'EPSG:32618',
  maxPixels: 1e13,
  fileFormat: 'GeoTIFF'
});
```

Figura 52. Código GEE_1998.py
Fuente: El autor

```
var image = ee.Image('LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_009057_20190903');

function maskCloudsSR(image) {
  var qa = image.select('QA_PIXEL');
  var cloud = qa.bitwiseAnd(1 << 3).eq(0);
  var shadow = qa.bitwiseAnd(1 << 4).eq(0);
  var mask = cloud.and(shadow);
  return image.updateMask(mask);
}

// Aplicar máscara
var masked = maskCloudsSR(image);

// Convertir todas las bandas a Int16
var maskedInt16 = masked.toInt16();

// Visualizar
Map.centerObject(masked, 8);
Map.addLayer(masked.select(['SR_B4', 'SR_B3', 'SR_B2']), {
  min: 0,
  max: 30000,
  bands: ['SR_B4', 'SR_B3', 'SR_B2']
}, 'Landsat 8 SR sin nubes');

// Exportar
Export.image.toDrive({
  image: maskedInt16,
  description: 'Landsat8_SR_completa_20190903_sin_nubes',
  folder: 'GEE_Export',
  fileNamePrefix: 'LC08_20190903_ALLBANDS_masked',
  region: masked.geometry(),
  scale: 30,
  crs: 'EPSG:32618',
  maxPixels: 1e13,
  fileFormat: 'GeoTIFF'
});
```

Figura 53. Código GEE_2019.py
Fuente: El autor

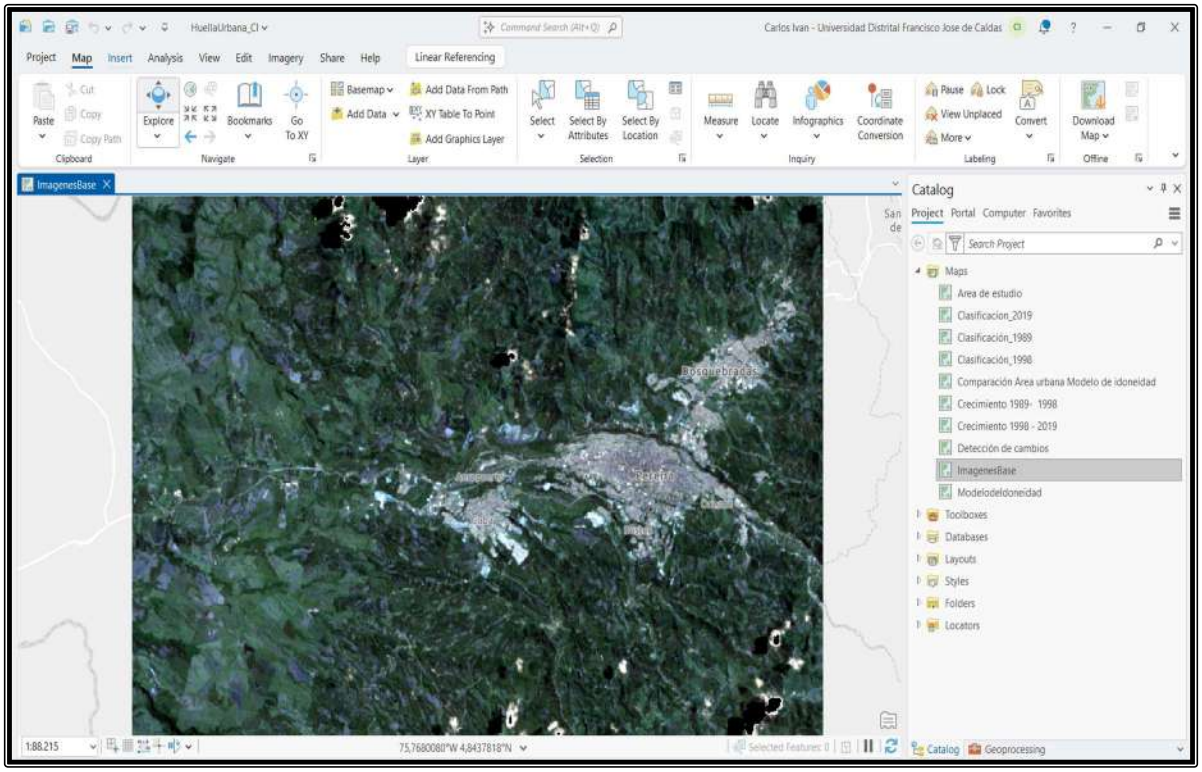


Figura 54. Generación de imágenes Base
Fuente: El autor

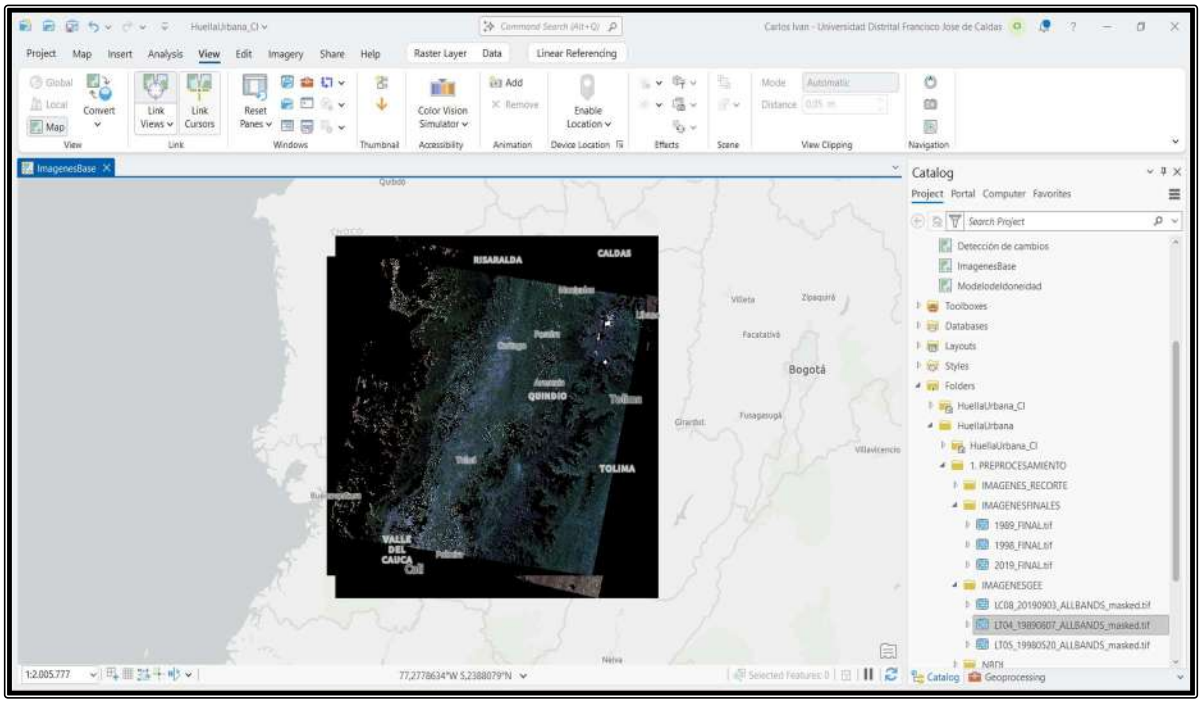


Figura 55. Imágenes descargadas de GEE - 1989
Fuente: El autor

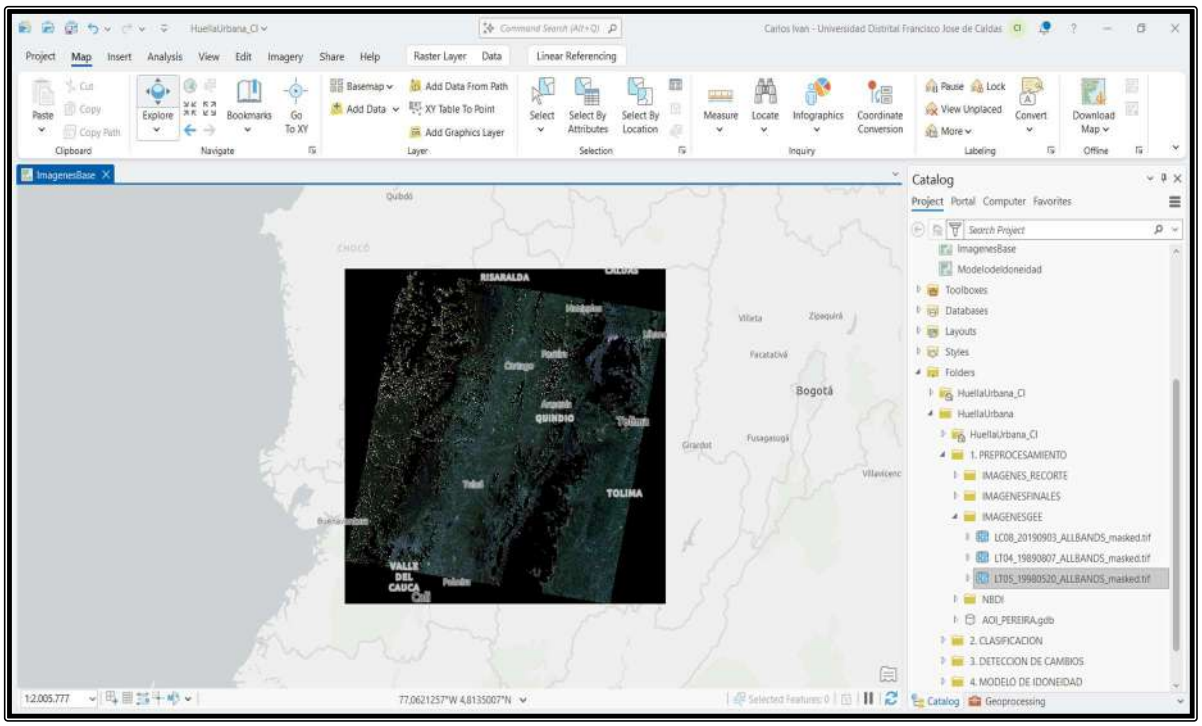


Figura 56. Imágenes descargadas de GEE - 1998
Fuente: El autor

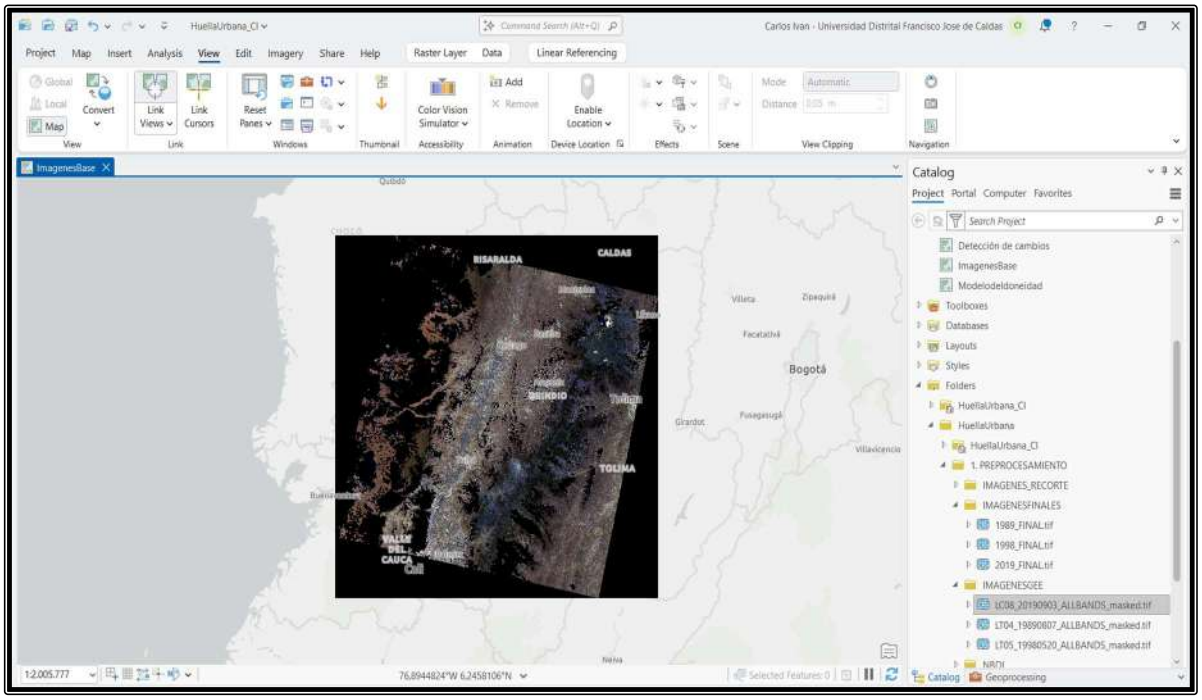


Figura 57. Imágenes descargadas de GEE - 2019
Fuente: El autor

Luego de tener las imágenes descargadas, se comienza a realizar el proceso en el software *ArcGIS Pro 3.4 de la casa matriz Esri, facilitado a través de licenciamiento por parte del área de laboratorios tecnológicos de la Universidad, donde me otorgan un usuario y contraseña por ser estudiante activo*; en este procedimiento, principalmente se recorta con la herramienta ***Extract by Mask*** la imagen con respecto al área de estudio **(AOI)** definido manualmente y bajo el análisis de incremento de la huella urbana en la cabecera municipal de Pereira – Risaralda, de acuerdo a la extensión en proyecto que se definió trabajar y que permitiera recoger diferentes aspectos de crecimiento para los años escogidos para trabajar, de igual manera, se tuvo en cuenta el incremento de mancha urbana que por conurbación pudiese tener con otros municipios, y así poder desarrollar una argumentación un poco más específica para la definición de las variables de accesibilidad territorial.

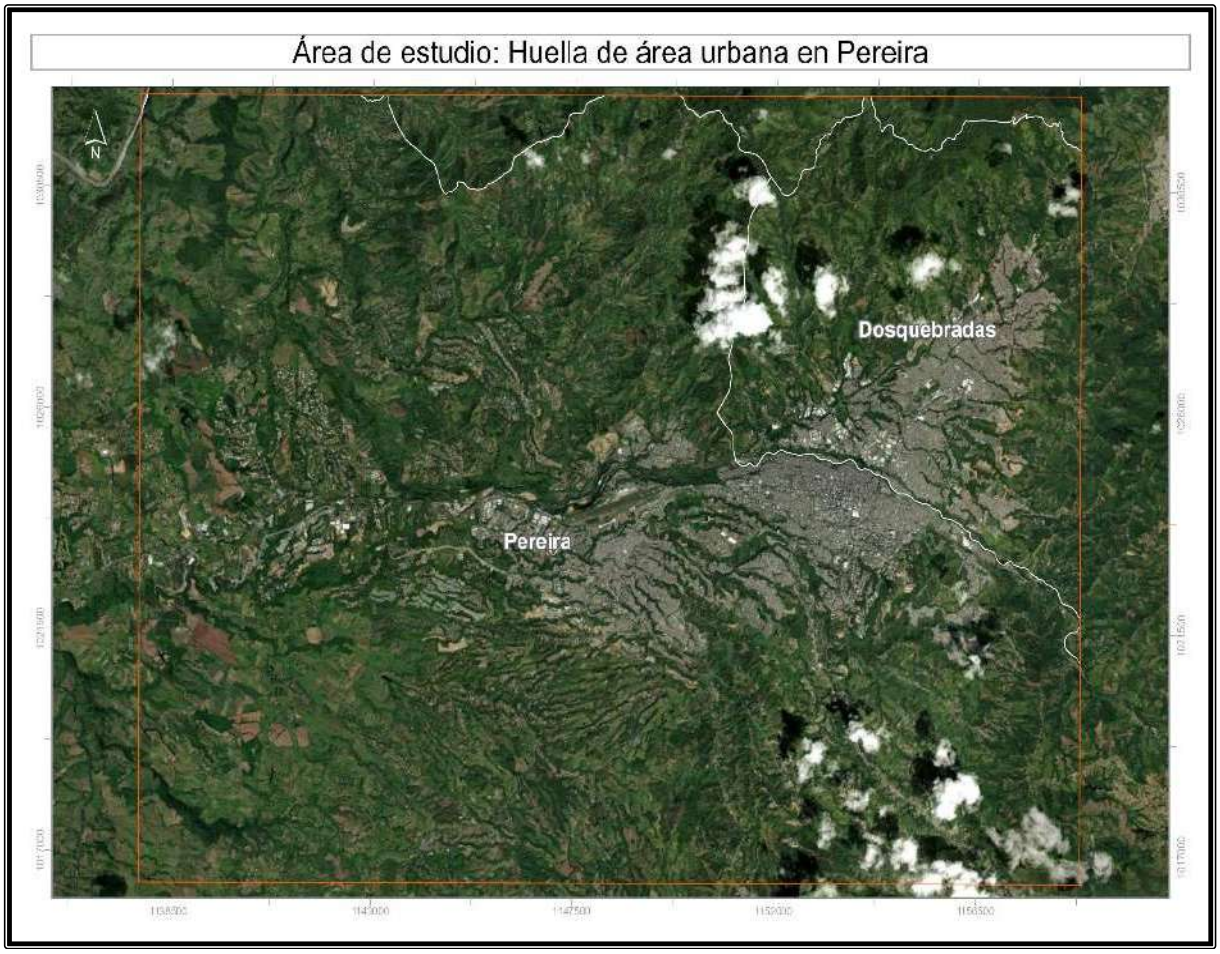


Figura 58. Área de estudio – Huella Urbana de Pereira
Fuente: El autor

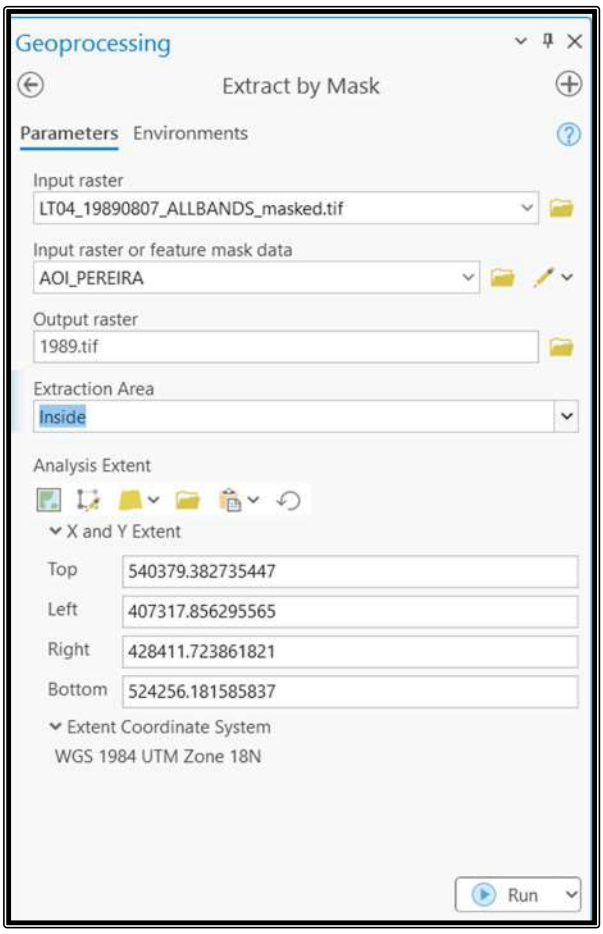


Figura 59. Selección del área de Interés (AOI)
Fuente: El autor



Figura 60. Imagen de recorte - 1989 (AOI)
Fuente: El autor

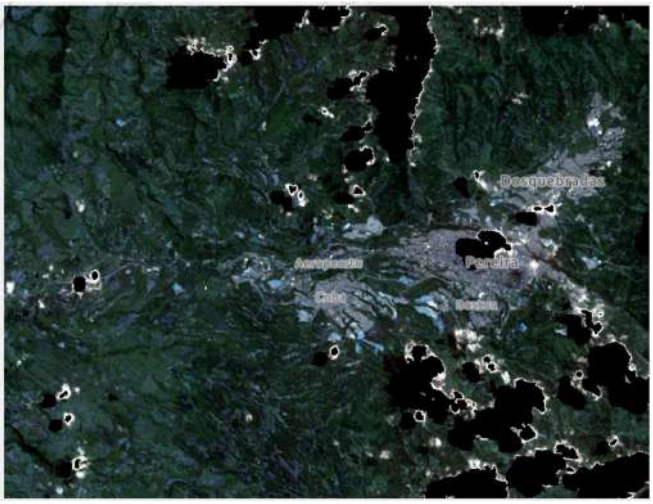


Figura 61. Imagen de recorte - 1998 (AOI)
Fuente: El autor

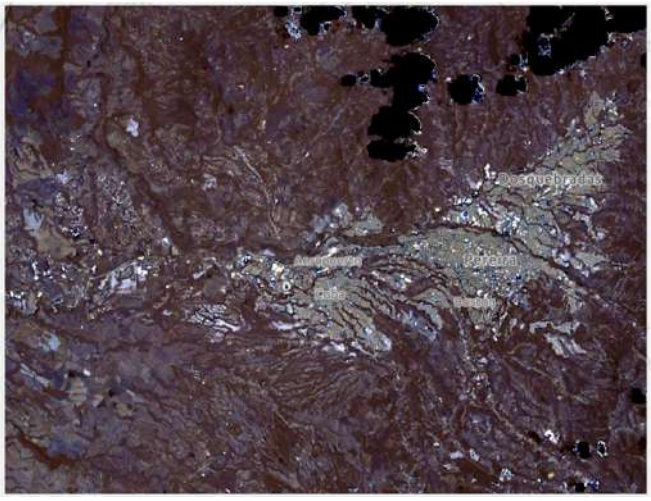


Figura 62. Imagen de recorte - 2019 (AOI)
Fuente: El autor

Posteriormente, se calculó el índice NDBI para cada una de las imágenes por intermedio de la herramienta denominada ***Raster Calculator*** con la fórmula:

```
NDBI = (SWIR - NIR) / (SWIR + NIR)
```

Aquí es importante entender que la fórmula depende del satélite y las bandas que corresponden a ***SWIR***: banda del infrarrojo de onda corta *(Short-Wave Infrared)* y **NIR**: banda del infrarrojo cercano *(Near Infrared*).

Para el siguiente caso se trabaja con la imagen del año 1989 a través de un proceso interno de álgebra de mapas, y el resultado de la fórmula es Banda 5: SWIR y Banda 4: NIR.

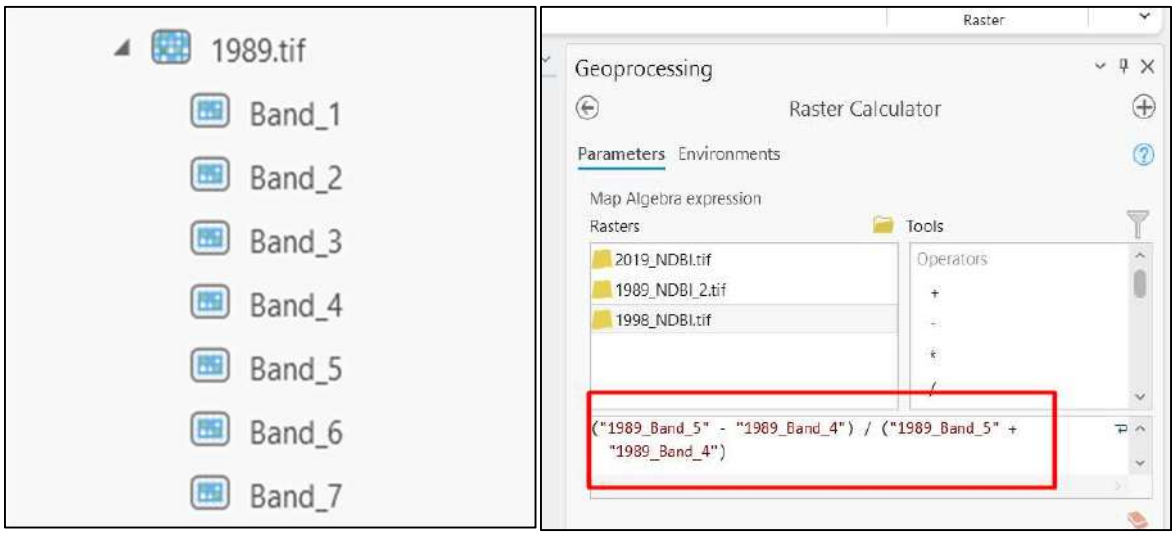


Figura 63. Geoprocesamiento cálculo de índice NDBI - 1989
Fuente: El autor

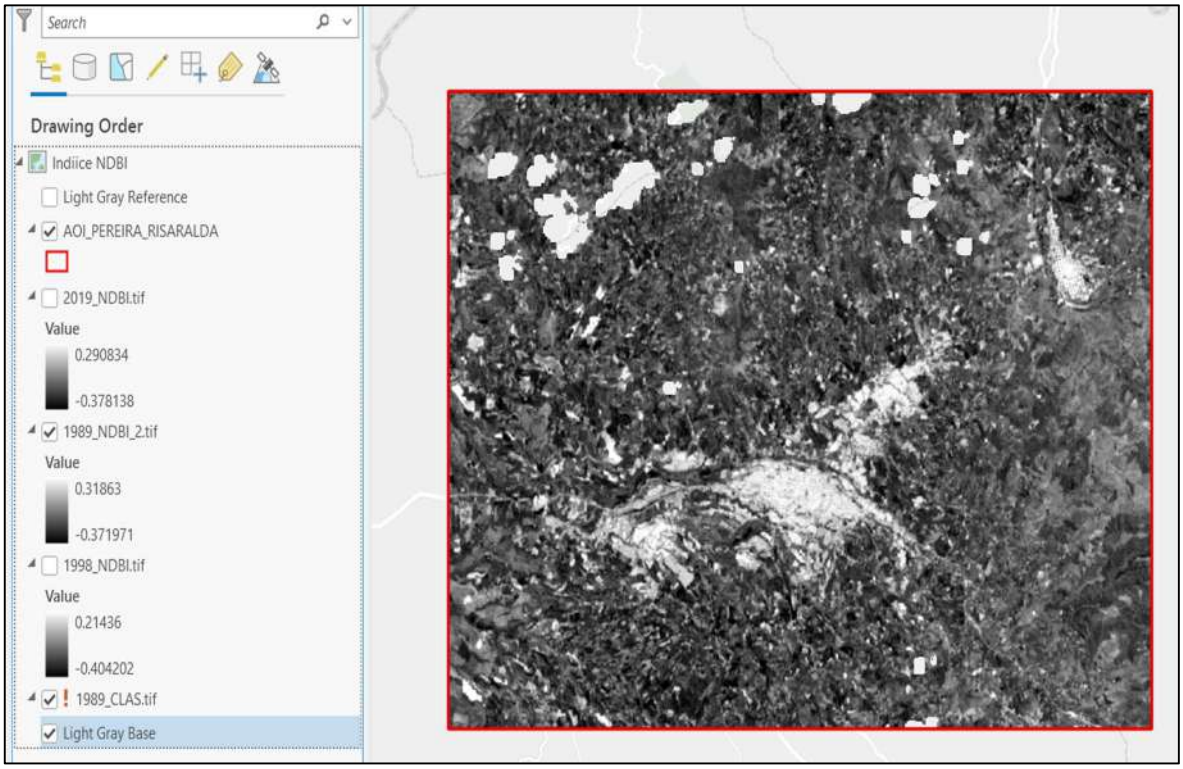


Figura 64. Resultado cálculo de índice NDBI - 1989
Fuente: El autor

Interpretación de NDBI:

-. Valores positivos 0.1 a 1: Posible presencia de áreas urbanas / construidas. (Blancos)
-. Valores negativos -0.1 a 0: vegetación, agua u otras coberturas naturales. (Oscuros)

Por último, se realiza la combinación *(proceso álgebra de mapas)* de este índice resultado *NDBI* con la imagen original recortada y todas sus bandas, esto con el objetivo de que sea un insumo para la selección de zonas de áreas urbanas según la respuesta espectral del satélite. Para este procedimiento se usa la herramienta ***Composite Bandas*** y este será el resultado para empezar la clasificación de imágenes.

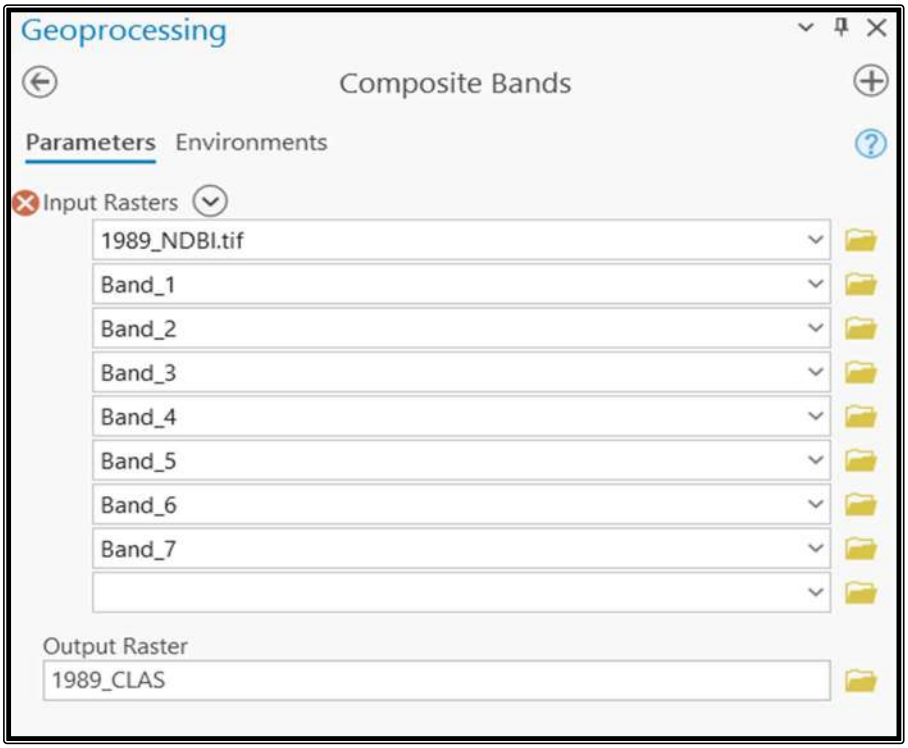


Figura 65. Método de combinación de bandas
Fuente: El autor

Para facilitar este proceso con las siguientes imágenes, se crea un código de lenguaje de programación, que permite ingresar las bandas de las imágenes en una sola herramienta, donde se crea el índice *NDBI* y la combinación de bandas en un solo ejercicio. Se crea el código, se hace clic derecho en el toolbox del proyecto, se agrega un script *(se denomina ImagenFinal.py)*, se configuran los parámetros y se abre la herramienta.

```
import arcpy
from arcpy.sa import *
# Habilitar Spatial Analyst
arcpy.CheckOutExtension("Spatial")
# Parámetros
band_paths = [arcpy.GetParameterAsText(i) for i in range(7)]  # Bandas 1 a 7
nir_band = arcpy.Raster(arcpy.GetParameterAsText(7))  # Band 4 (NIR)
swir_band = arcpy.Raster(arcpy.GetParameterAsText(8))  # Band 5 (SWIR)
output_ndbi = arcpy.GetParameterAsText(9)  # Ruta salida NDBI
output_composite = arcpy.GetParameterAsText(10)  # Ruta salida composite .tif
# Calcular NDBI
ndbi = (swir_band - nir_band) / (swir_band + nir_band)
ndbi.save(output_ndbi)
arcpy.AddMessage("✅ NDBI calculado: " + output_ndbi)
# Crear la lista de bandas + NDBI
all_bands = [arcpy.Raster(p) for p in band_paths] + [ndbi]
# Composición de bandas
arcpy.management.CompositeBands(all_bands, output_composite)
arcpy.AddMessage("✅ Composición creada: " + output_composite)
```

Figura 66. ScriptTools NDBI Composicion Bands Imagen final
Fuente: El autor

En la construcción del correspondiente código de programación, se establecieron los parámetros y/o variables de entrada y salida que son formatos tipo ráster (*input- output*), las cuales se especifican a través de los datos arrojados por las bandas espectrales de cada una de las imágenes como variables de entrada y el resultado *NDBI* y la herramienta diseñada para la obtención de las imágenes gráficas finales compuestas en el ejercicio interno de álgebra de mapas como variables de salida.

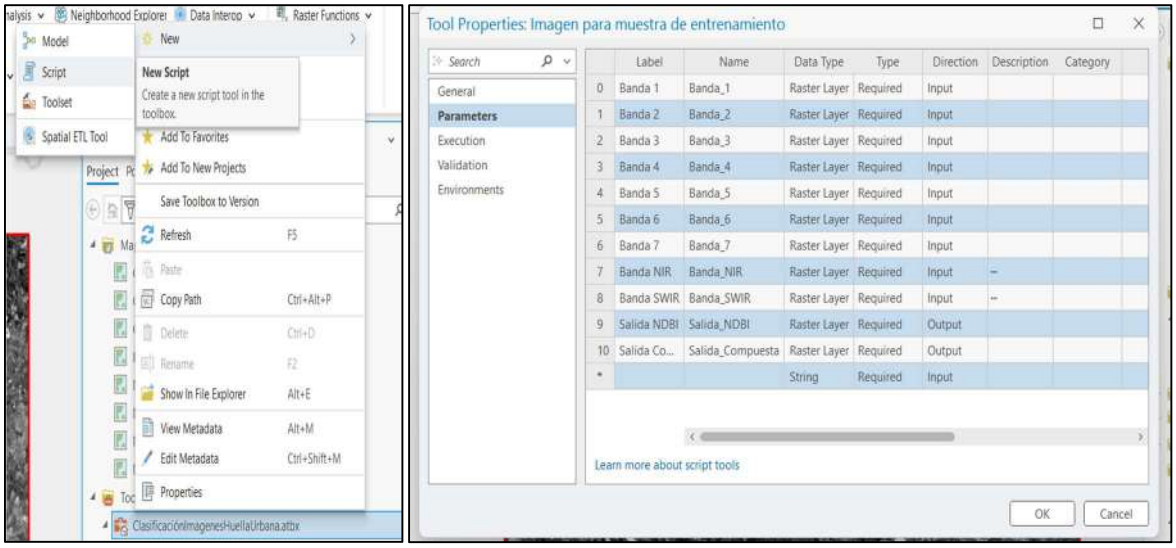


Figura 67. Variables definidas de entrada y salida (parámetros)
Fuente: El autor

En este caso, se dejó una descripción para que se distingan cuáles son las bandas que se usan dependiendo si es Landsat 4/5 o Landsat 8 para el cálculo del *NDBI.*

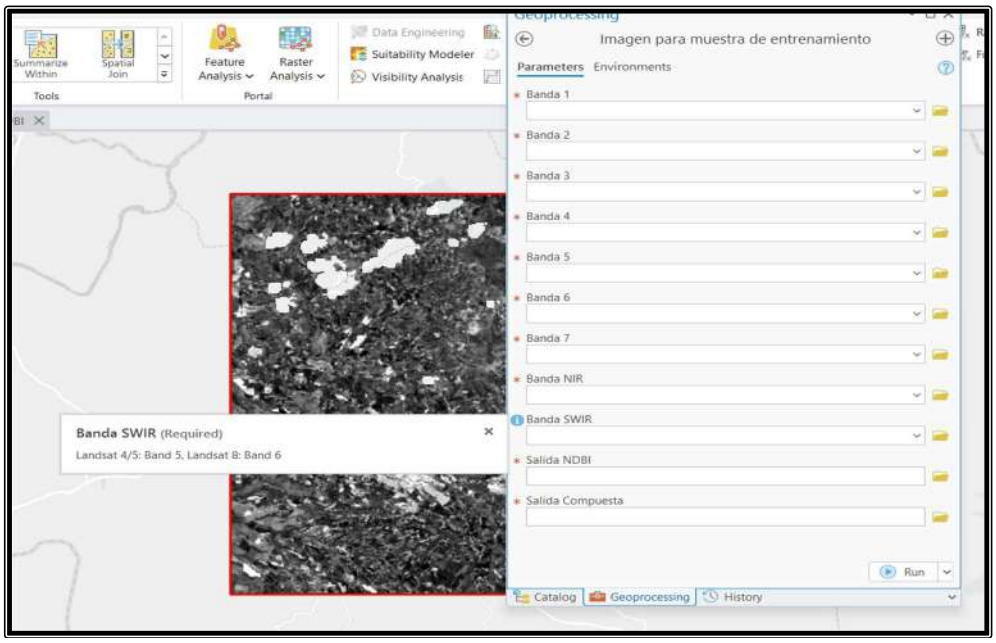


Figura 68. Descripción de la herramienta construida
Fuente: El autor

El resultado es la salida del *NDBI* para cada una de las imágenes, y el despliegue de la imagen final lista para su uso en el siguiente paso.

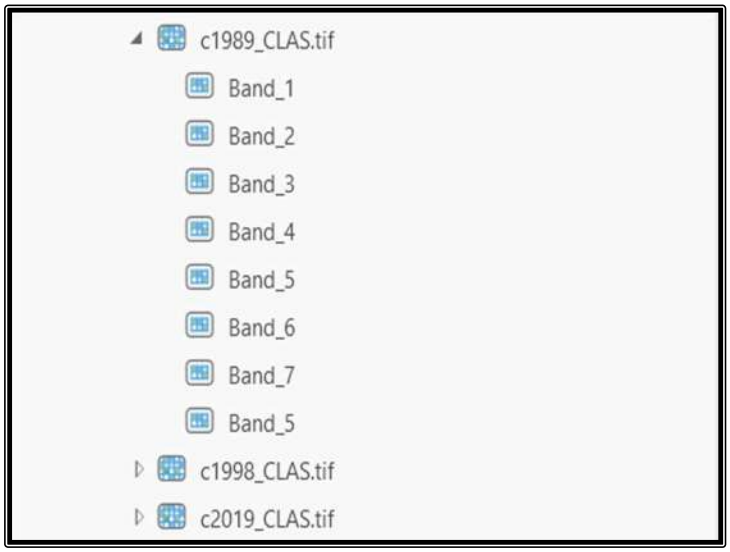


Figura 69. Datos salidas finales NDBI (1989,1998 y 2019)
Fuente: El autor

Después de todo el proceso realizado, se obtienen las siguientes imágenes finales para cada uno de los años (1989, 1998 y 2019), y se da cumplimiento al primer objetivo.



Figura 70. Imagen Final año 1989
Fuente: El autor

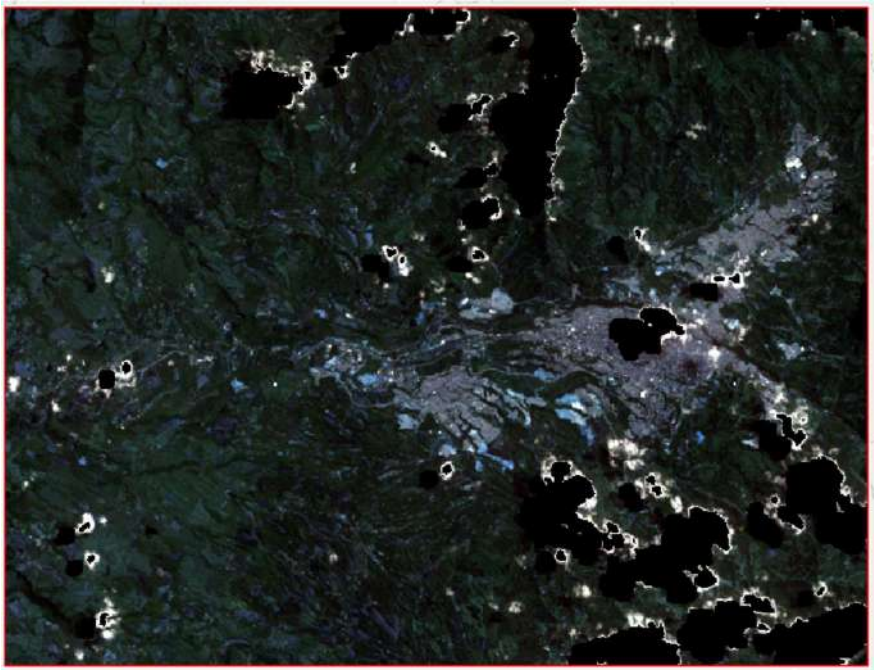


Figura 71. Imagen Final año 1998
Fuente: El autor

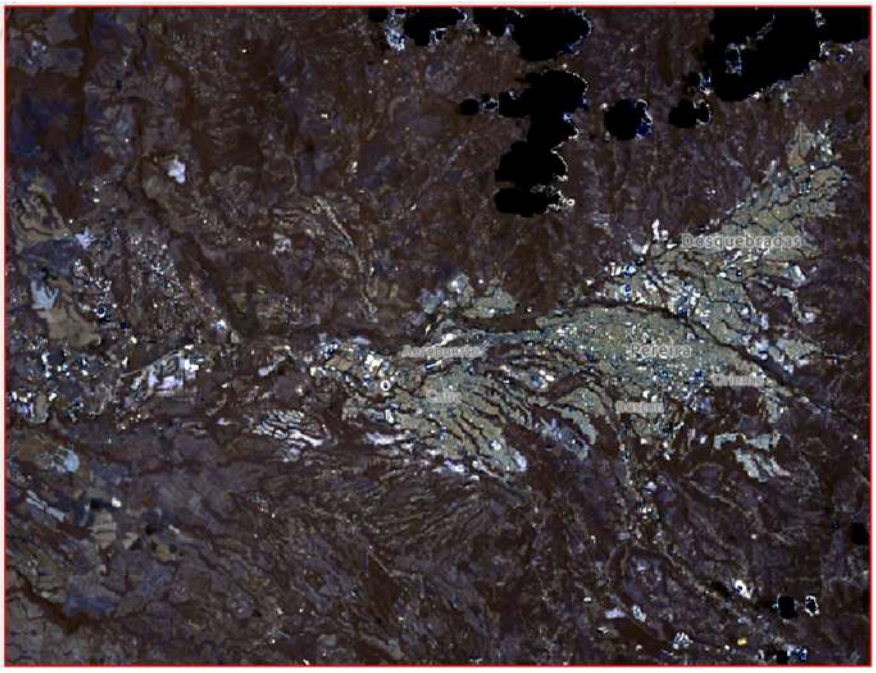


Figura 72. Imagen Final año 2019
Fuente: El autor

5.2.2. Clasificación de imágenes por área urbana

La clasificación de imágenes de acuerdo al comportamiento y el incremento de la huella urbana en la cabecera municipal de Pereira - Risaralda, tiene tres características principales desarrolladas en este estudio:

1. Se realiza un proceso de clasificación por píxeles *(concepto teórico explicado en el documento)*, debido a que se usaron imágenes Landsat 8, las cuales presentan características de resolución baja o gruesa.

2. Por consiguiente se realiza un procedimiento denominado clasificación supervisada, este concepto y procedimiento según *(plataforma Web – Esri ArcGis Pro), se utiliza para permitir decidir sobre las categorías de clase a las que se les desea asignar píxeles, esto se conoce como el esquema de clasificación, una vez se completa la clasificación supervisada, se atiende lo dispuesto en el dataset de datos arrojado y se reasignan las clases o polígonos de acuerdos a lo que se quiera estudiar*, en este estudio se asignó una clase determinada a diferentes tipificación de suelo que puedan existir en la zona geográfica.

3. Se realiza una clasificación a través de la utilización de la herramienta ***Machine Learning*** a través de lo que se denomina Máquinas de Vectores de Soporte o por *Random Trees (árboles aleatorios)*, estos según *(plataforma Web – Esri ArcGis Pro), se trata de un método de clasificación de imágenes que muestra una alta resistencia al sobreajuste y es compatible tanto con imágenes segmentadas como con conjuntos de datos ráster históricos. Esta herramienta admite imágenes multibanda con diferentes profundidades de bits como datos de entrada estándar, y aplica el algoritmo de clasificación basado en Bosques Aleatorios (Random Forest), ya sea a nivel de píxel o de segmento, dependiendo del archivo de entrenamiento vectorial que se utilice como referencia.*

El procedimiento es principalmente crear muestras de entrenamiento, por eso necesariamente se identifica como un modelo de clasificación supervisado, donde permite visualizar un área para cada una de clases.

Para esto se utilizan las imágenes de base que se denominaron imágenes finales, y obtenidas del proceso anterior en el numeral 5.2.1, y lo que se realiza es una muestra que son casi del mismo tamaño que los pixeles.

Se especifican las muestras para las variables del suelo, que guardan relación a coberturas de aguas superficiales, área urbana, bosque, bosque de sombra y nubes.

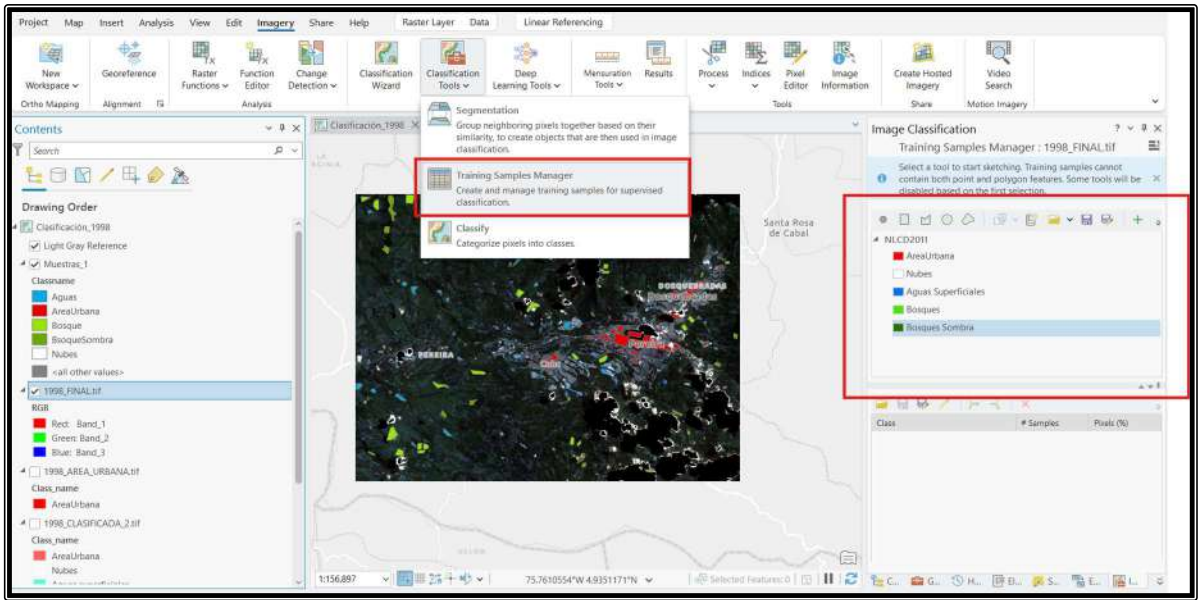


Figura 73. Imagen muestras de clasificación supervisada
Fuente: El autor

Luego se crea un archivo en formato ECD *(Esri Classifier Definition)*, es un registro que describe un sistema de aprendizaje profundo previamente ajustado mediante un proceso de entrenamiento supervisado, utilizado en el contexto de ArcGIS de Esri. Este archivo, en formato JSON, contiene los parámetros necesarios para ejecutar herramientas de inferencia, permitiendo a los usuarios aplicar modelos de aprendizaje profundo a sus datos geoespaciales. En este caso se entrenó la muestra obtenida basándose en el algoritmo de *Random Trees.*

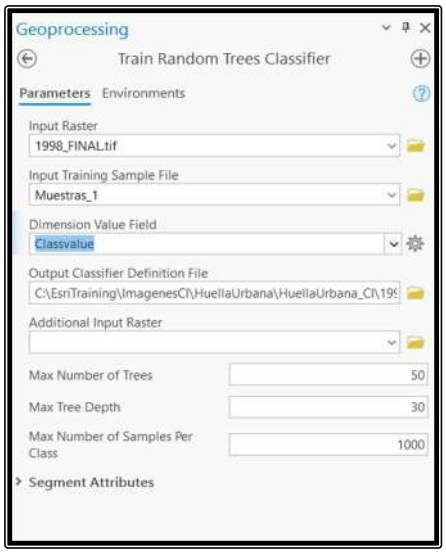


Figura 74. Creación archivo en formato ECD (árboles aleatorios)
Fuente: El autor

Luego, se clasifica el correspondiente formato ráster con la muestra entrenada del formato ECD de *Random Trees (árboles aleatorios).*



Figura 75. Clasificación Ráster para cada una de las imágenes
Fuente: El autor

Posteriormente, se realizó un proceso manual de clasificación y corrección por región y de clasificación y corrección de pixel por pixel con la herramienta de ***Pixel Editor.*** Y de allí obtener como resultado las imágenes finales corregidas, acordes con la representación de la realidad de las capas de coberturas del suelo visualizadas.

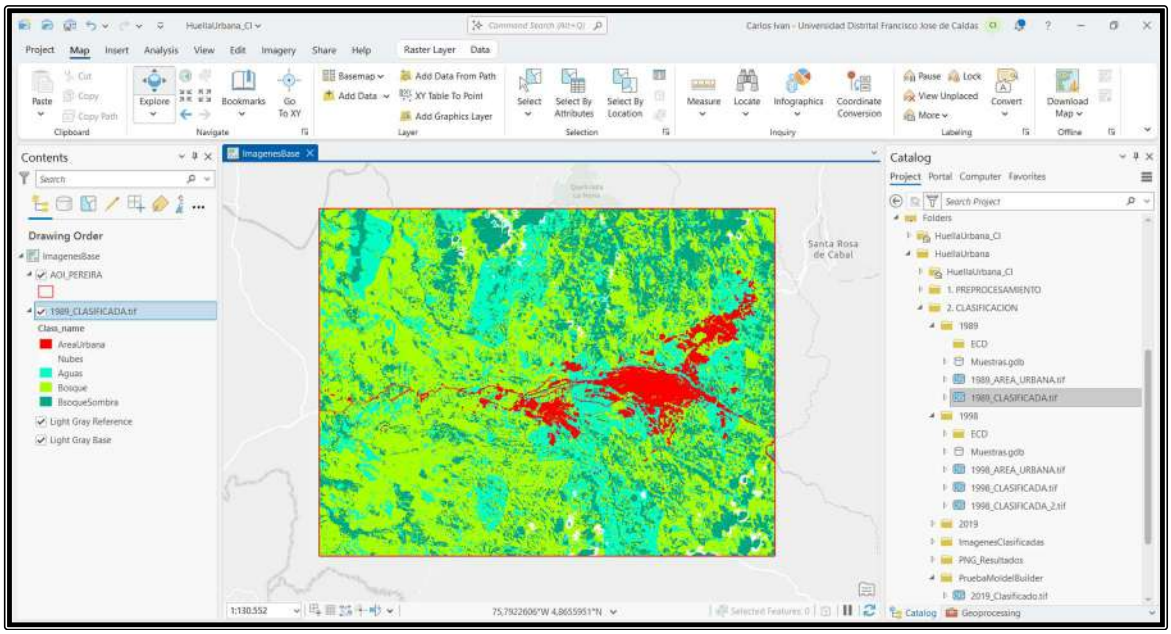


Figura 76. Corrección y clasificación pixel por pixel-1989
Fuente: El autor

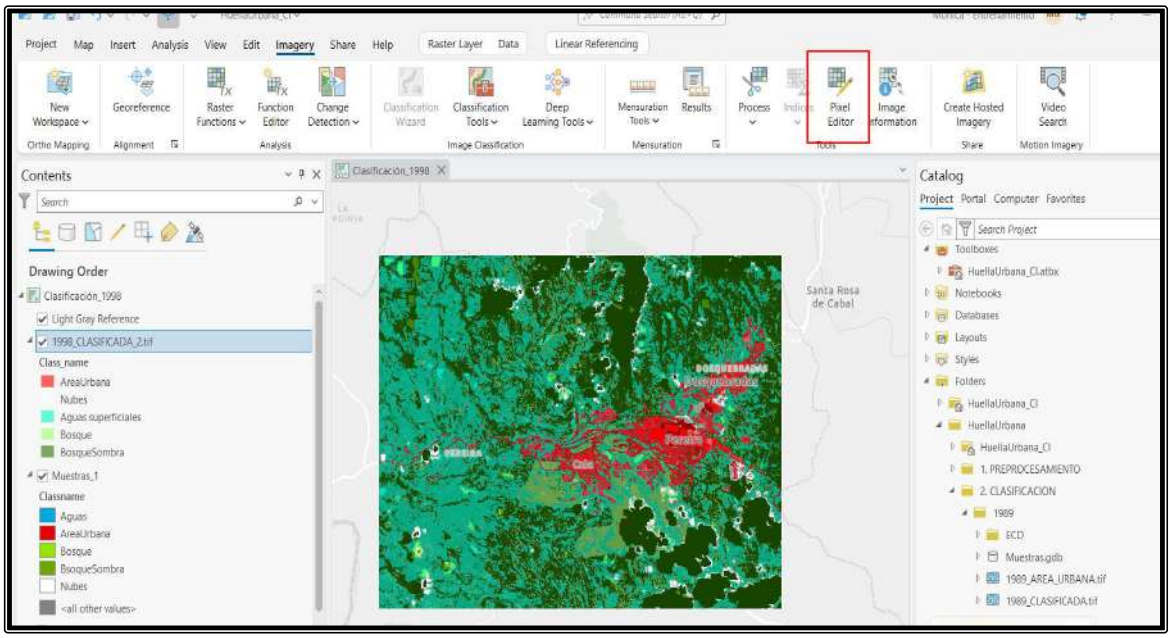


Figura 77. Corrección y clasificación pixel por pixel-1998
Fuente: El autor

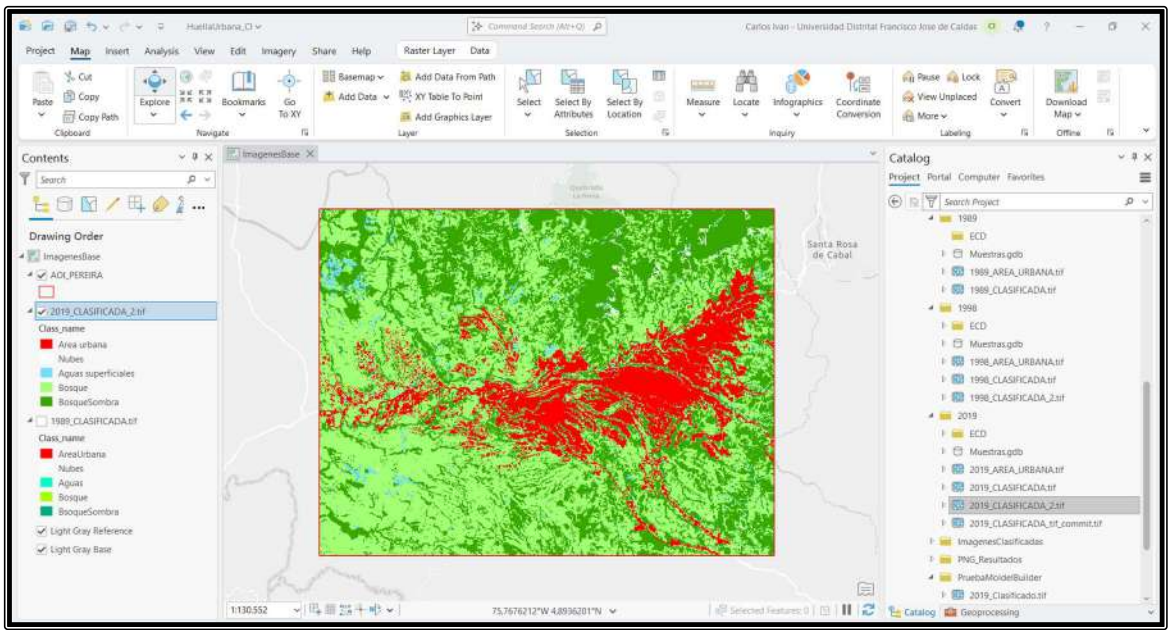


Figura 78. Corrección y clasificación pixel por pixel-2019
Fuente: El autor

Por último, se utiliza la herramienta ***Extract by Attributes,*** para únicamente extraer el valor real de área urbana de cada una de las imágenes, el cual se le asignó con valor de cero (0), para la obtención de las salidas gráficas finales con la mancha de huella urbana.

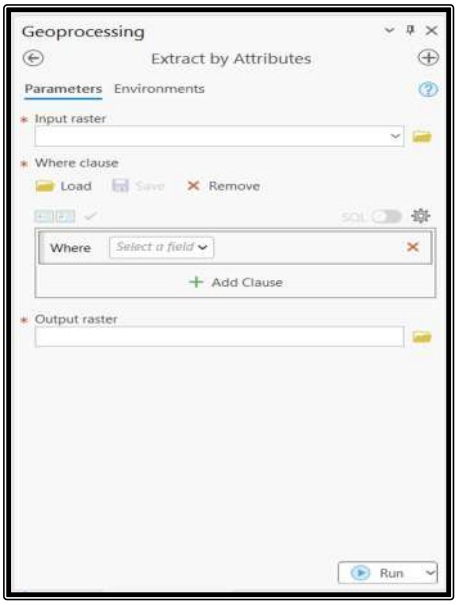


Figura 79. Herramienta para extracción de área urbana de cada imagen
Fuente: El autor

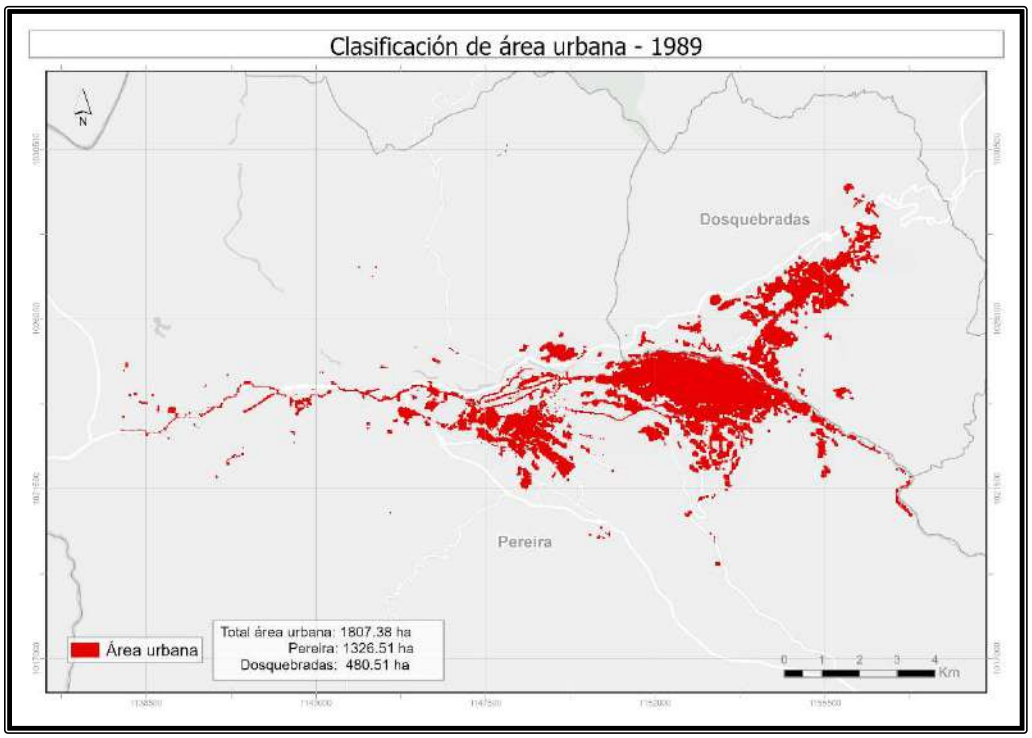


Figura 80. Clasificación de área urbana (1989)
Fuente: El autor

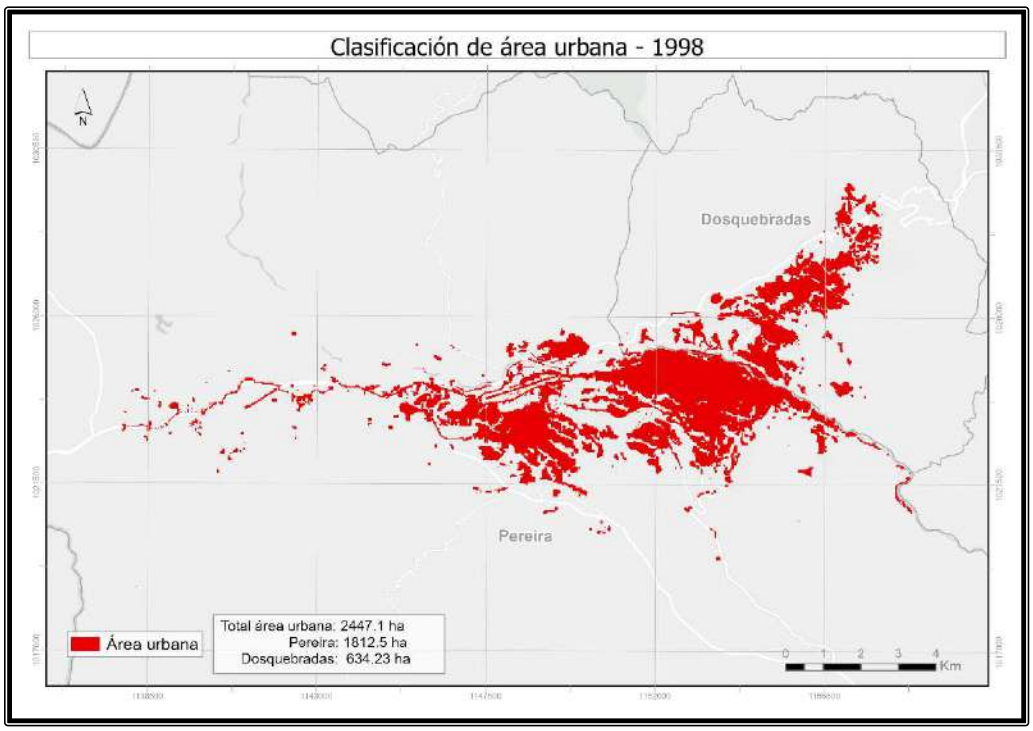


Figura 81. Clasificación de área urbana (1998)
Fuente: El autor

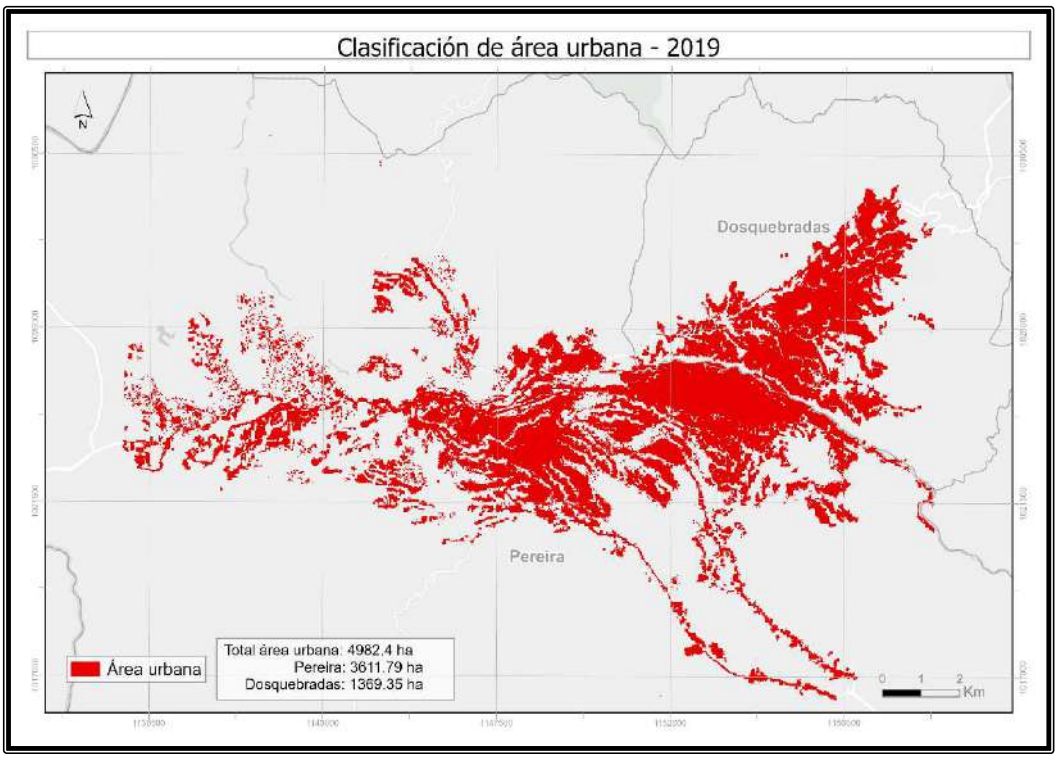


Figura 82. Clasificación de área urbana (2019)
Fuente: El autor

AÑO	Área Urbana (Ha)	Área Urbana (M2)	Crecimiento desde antes (Ha)	Crecimiento desde antes (M2)	Crecimiento Pereira (Ha)	Crecimiento Pereira (M2)	Crecimiento Dosquebradas (Ha)	Crecimiento Dosquebradas (M2)
1989	1807,38	18073800	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1998	2447,10	24471000	662,04	6620400	499,41	4994100	162,63	1626300
2019	4982,40	49824000	2632,23	26322300	1883,43	18834300	747,90	7479000

Tabla 6. Resumen cambio urbano Pereira - Risaralda
Fuente: El autor

Para la realización de cada una de estas fases, y la descripción del procedimiento descrito en este apartado, se diseñó y se automatizó cada una de las muestras, pasando por el entrenador de *Random Trees (árboles aleatorios)* y de *Clasificación Ráster*, esta actividad se realizó a partir de la generación de un modelo con la herramienta *Model Builder*, la cual permite generar alternativas tecnológicas para que el proceso se realice de manera más automático y así dar cumplimento al segundo objetivo, después de garantizar la calidad de los datos en cada una de la etapas correspondientes para la clasificación de las imágenes satelitales -*ortorrectificadas*- Landsat

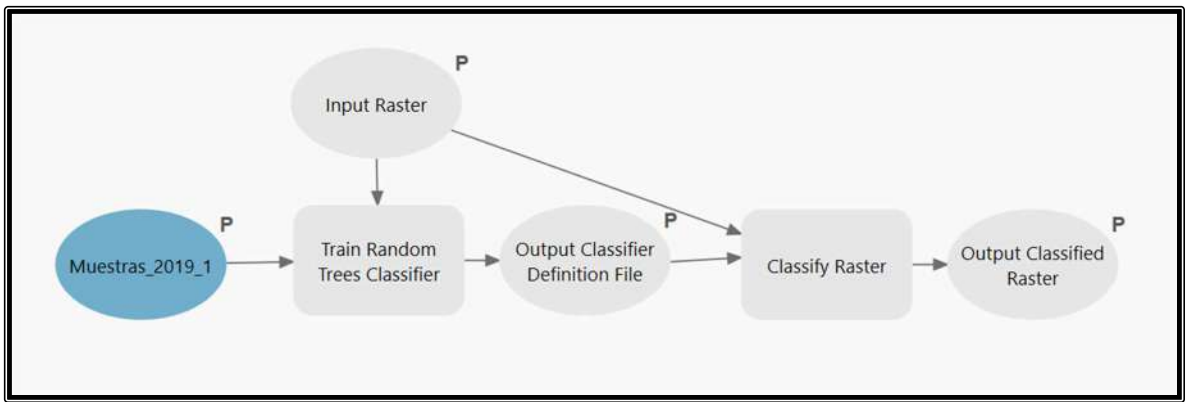


Figura 83. Diseño de herramienta Model Builder – Clasificación de imágenes
Fuente: El autor

5.2.3. Detección de cambios de crecimiento urbano

El ejercicio se desarrolla paulatinamente, teniendo en cuenta la respuesta secuencial de cada uno de los pasos realizados anteriormente, para este apartado, la detección de cambios a partir del análisis del crecimiento urbano en la ciudad de Pereira-Risaralda, se realiza con base en la utilización de las imágenes satelitales clasificadas anteriormente y logradas para los años ***1989, 1998 y 2019***, para posteriormente realizar las siguientes actividades:

1. ***Creación del código de programación o script tools.***

A partir de la creación de un código de programación o *Script Tool* elaborado bajo el ambiente del lenguaje de programación de *Phyton*, este proceso se automatiza teniendo en cuenta la utilización e incorporación de las imágenes satelitales *-ortorrectificadas-* y clasificadas, a su vez, mediante un proceso interno de álgebra de mapas, se identifican aquellas áreas de crecimiento de la huella urbana en la ciudad de Pereira, así como, la detección de la ampliación de las regiones localizadas como zonas de expansión urbana en la Cabecera Municipal, se establecen los parámetros o variables de entrada y salida, y se utiliza la cobertura o el shapefile del límite de municipios para su correcta delimitación y establecer el alcance del análisis, de igual forma, se instaura el repositorio de información donde se alojaron todos los resultados. *(Mapas salidas gráficas finales comparación del crecimiento de la mancha urbana en la ciudad).*

```
class ToolValidator:
  # Class to add custom behavior and properties to the tool and tool parameters.

    def __init__(self):
        # Set self.params for use in other validation methods.
        self.params = arcpy.GetParameterInfo()

    def initializeParameters(self):
        # Customize parameter properties. This method gets called when the
        # tool is opened.
        return

    def updateParameters(self):
        # Modify the values and properties of parameters before internal
        # validation is performed.
        return

    def updateMessages(self):
        # Modify the messages created by internal validation for each tool
        # parameter. This method is called after internal validation.
        return

    # def isLicensed(self):
    #     # Set whether the tool is licensed to execute.
    #     return True

    # def postExecute(self):
    #     # This method takes place after outputs are processed and
    #     # added to the display.
    #     return
```

Figura 84. Código Script – Detección de cambios.py
Fuente: El autor



Figura 85. Parámetros establecidos para la Detección de cambios
Fuente: El autor



Figura 86. Geoprocesamiento Detección de cambios crecimiento urbano
Fuente: El autor

2. Creación del ráster de crecimiento urbano.

Se creó la información rasterizada, y se obtuvieron los resultados *(mapas finales)* que tienen que ver con el área urbana y el suelo urbano de las imágenes clasificadas para los años anteriormente descritos, asignándose un valor de uno (1) para estas áreas y de cero (0) para el resto de las clases, también se realiza un proceso de comparación entre años para poder deducir y analizar cómo se ha venido incrementando el crecimiento de la huella urbana a través de tiempo, y como esto ha conllevado a la localización de zonas de expansión urbana.

Es necesario poder indicar la importancia y el alcance en que radica la determinación del incremento de huella urbana utilizando las herramientas geoespaciales, y cuáles han sido las zonas que han presentado mayor incremento, insumos significativos para poder analizar en qué medida ha venido creciendo la ciudad.

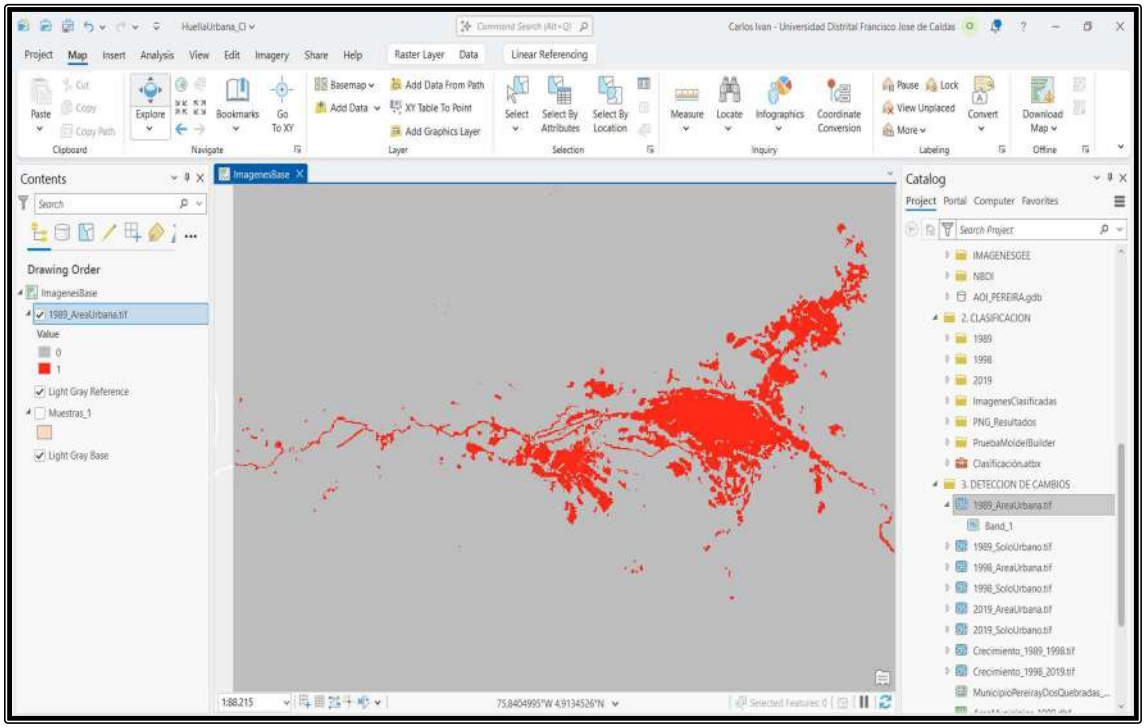


Figura 87. Mapa área Urbana - 1989
Fuente: El autor

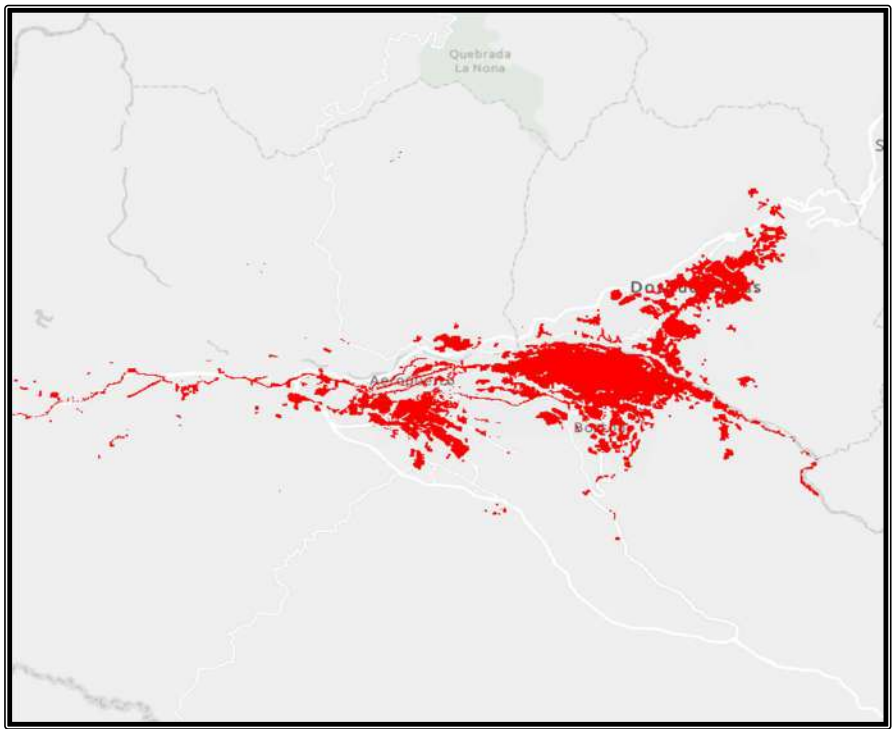


Figura 88. Mapa solo Suelo Urbano - 1989
Fuente: El autor

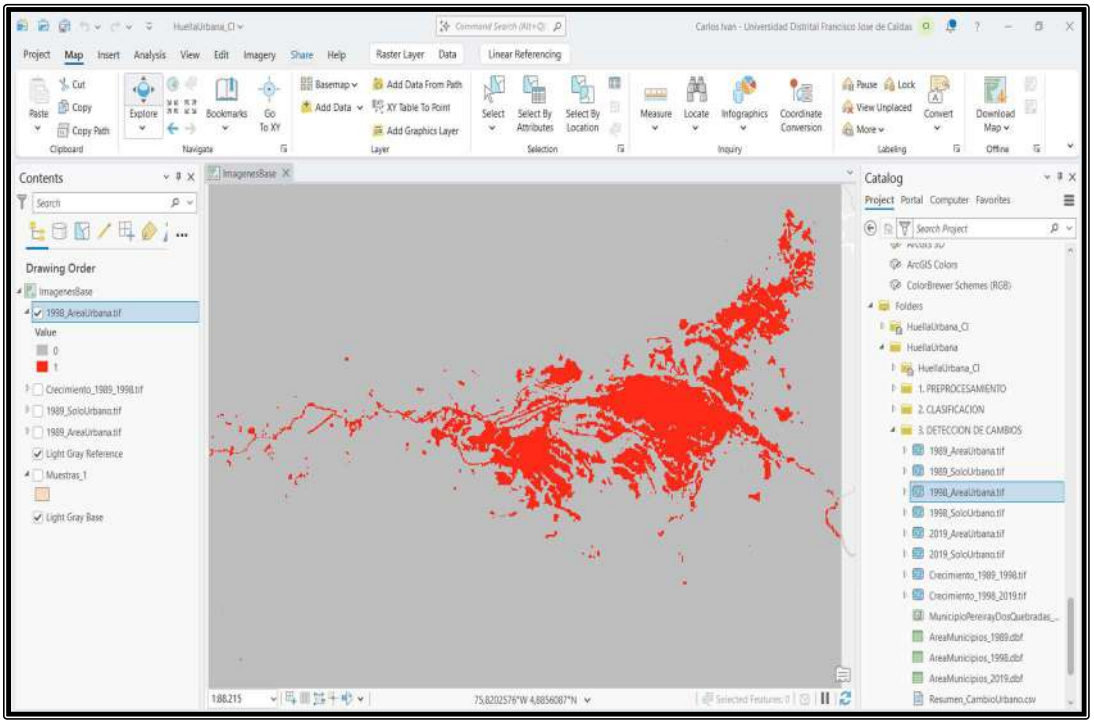


Figura 89. Mapa área Urbana - 1998
Fuente: El autor

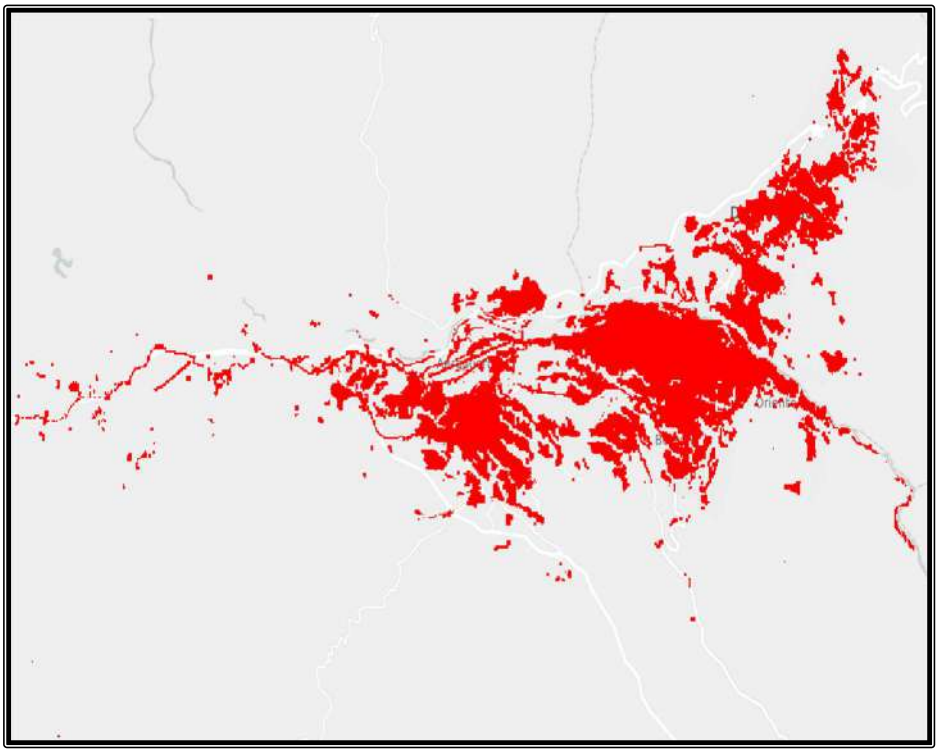


Figura 90. Mapa solo Suelo Urbano - 1998
Fuente: El autor

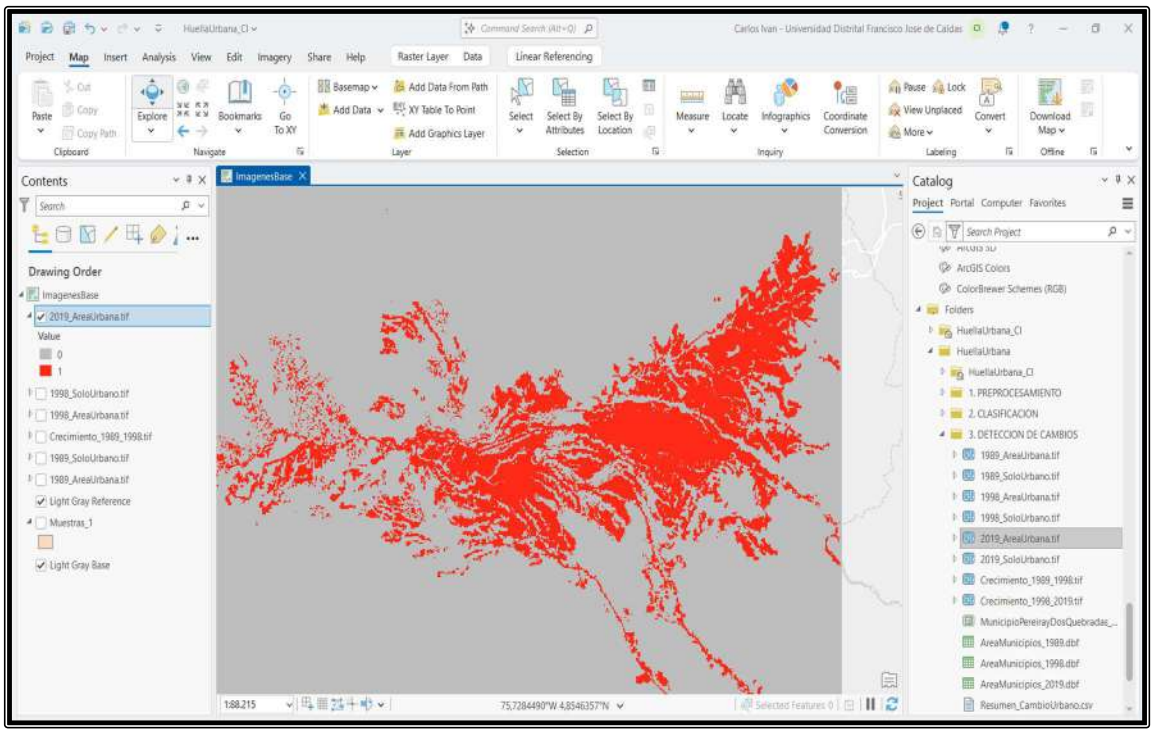


Figura 91. Mapa área Urbana - 2019
Fuente: El autor

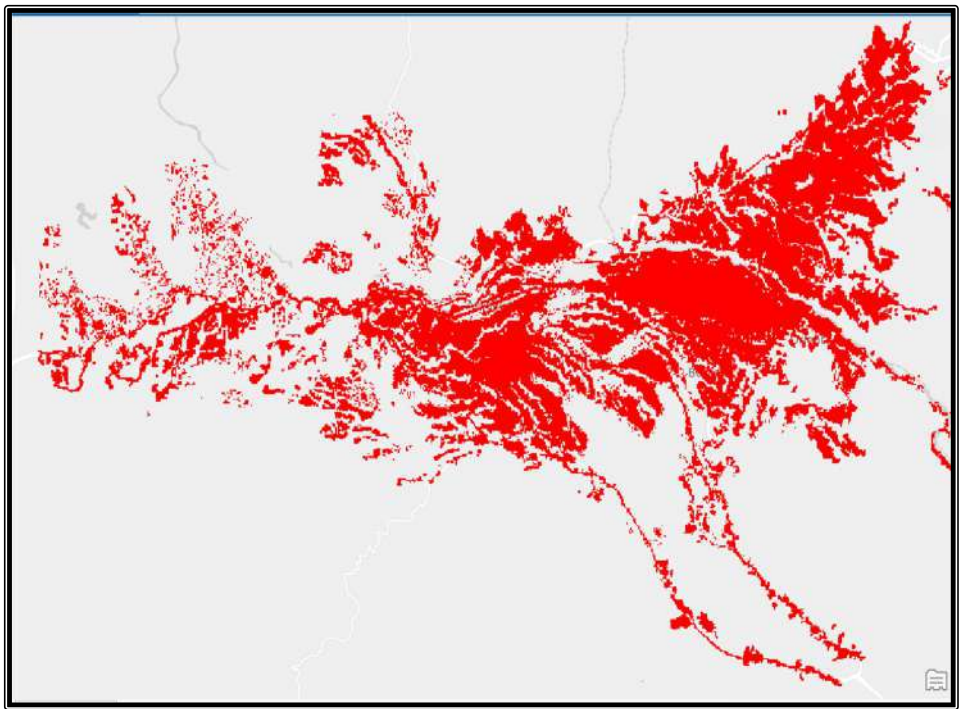


Figura 92. Mapa solo Suelo Urbano - 1998
Fuente: El autor

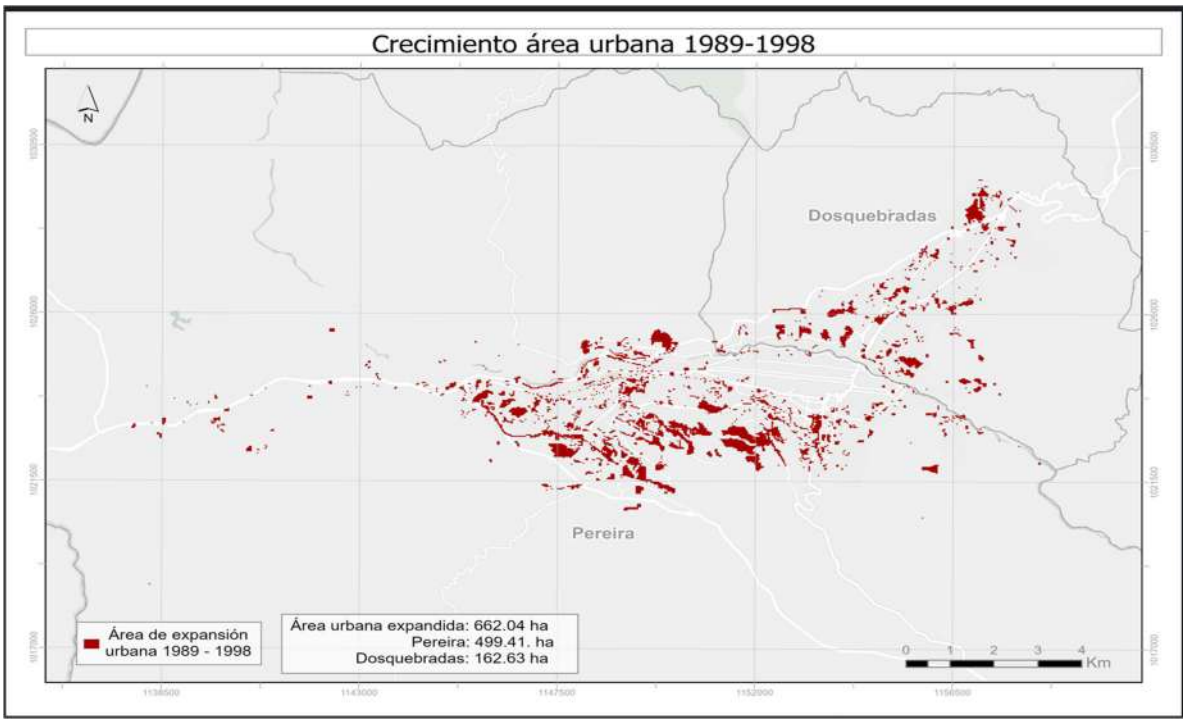


Figura 93. Mapa crecimiento 1989 - 1998
Fuente: El autor

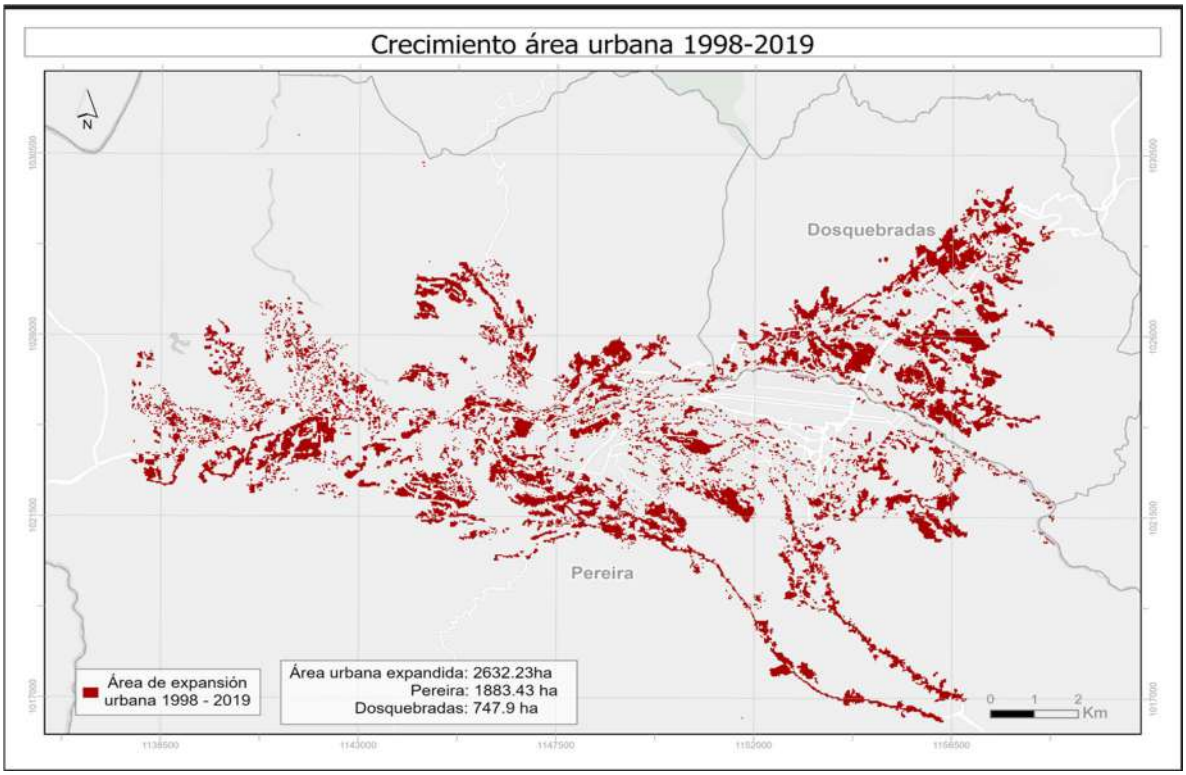


Figura 94. Mapa crecimiento 1998 - 2019
Fuente: El autor

3. Creación de tablas de las áreas de crecimiento urbano de los municipios.

Se establecen las áreas de crecimiento de los municipios de Pereira y Dosquebradas medidas en metros cuadrados (m²) y en hectáreas (Ha), se tiene en cuenta este análisis para determinar factores de conurbación y creación de redes entre jurisdicciones municipales, y estudiar el incremento de la disposición de huella urbana en los años investigados.

ZONE CODE	NOMBRE	COUNT	AREA (M2)
1	DOSQUEBRADAS	5339	4805100
2	PEREIRA	14739	13265100

Tabla 7. Cuadro área de municipios – año 1989
Fuente: El autor

ZONE CODE	NOMBRE	COUNT	AREA (M2)
1	DOSQUEBRADAS	7047	6342300
2	PEREIRA	20139	18125100

Tabla 8. Cuadro área de municipios – año 1998
Fuente: El autor

ZONE CODE	NOMBRE	COUNT	AREA (M2)
1	DOSQUEBRADAS	15215	13693500
2	PEREIRA	40131	36117900

Tabla 9. Cuadro área de municipios – año 2019
Fuente: El autor

AÑO	ÁREA URBANA (Ha)	ÁREA URBANA (m2)	CREC ANTERIOR (Ha)	CREC ANTERIOR (m2)	CREC PEREIRA (Ha)	CREC PEREIRA (m2)	CREC DOSQUEBRADAS (Ha)	CREC DOSQUEBRADAS (m2)
1989	1807,38	18073800	*	*	*	*	*	*
1998	2447,1	24471000	662,04	6620400	499,41	4994100	162,63	1626300
2019	4982,4	49824000	2632,23	26322300	1883,43	18834300	747,9	7479000

Tabla 10. Cuadro Resumen por año - cambio urbano en los municipios
Fuente: El autor

Para la realización de los anteriores análisis y las tablas mostradas del crecimiento urbano en área, se desarrolló el siguiente *script tool* como herramienta, con el ambiente inmerso de lenguaje de programación de *phyton*, el archivo se llama **detecciónde cambio.py,** el cual se encuentra en el correspondiente anexo y diseñado de la siguiente manera:

```
import arcpy
from arcpy.sa import *
import os
import pandas as pd

# Habilitar Spatial Analyst
arcpy.CheckOutExtension("Spatial")

# ENTRADAS DEL USUARIO (PARAMETROS)
raster_1989 = arcpy.GetParameterAsText(0)
raster_1998 = arcpy.GetParameterAsText(1)
raster_2019 = arcpy.GetParameterAsText(2)
carpeta_salida = arcpy.GetParameterAsText(4)
limite_municipios = arcpy.GetParameterAsText(3)

# Validar carpeta
os.makedirs(carpeta_salida, exist_ok=True)

# Diccionario de años e imágenes
imagenes = {
    "1989": raster_1989,
    "1998": raster_1998,
    "2019": raster_2019
}

# FUNCIONES
```

```
def extraer_area_urbana(ruta_raster, nombre_salida):
    salida = os.path.join(carpeta_salida, nombre_salida)
    urbano_binario = Con(Raster(ruta_raster) == 0, 1, 0)
    urbano_binario.save(salida)
    return salida

def generar_capa_urbana_pura(ruta_binaria, nombre_salida):
    salida = os.path.join(carpeta_salida, nombre_salida)
    solo_urbano = Con(Raster(ruta_binaria) == 1, 1)  # Solo deja valor
1, todo lo demás será NoData
    solo_urbano.save(salida)
    return salida

def calcular_area(ruta_raster, campo="Area_ha"):
    arcpy.AddField_management(ruta_raster, campo, "DOUBLE")
    arcpy.CalculateField_management(ruta_raster, campo, "!Count! * 900
/ 10000", "PYTHON3")
    with arcpy.da.SearchCursor(ruta_raster, [campo]) as cursor:
        return sum([row[0] for row in cursor])

def detectar_crecimiento(ruta_ini, ruta_fin, nombre_salida):
    salida = os.path.join(carpeta_salida, nombre_salida)
    bin_ini = Raster(ruta_ini)
    bin_fin = Raster(ruta_fin)
    crecimiento = Con((bin_ini == 0) & (bin_fin == 1), 1, 0)
    crecimiento.save(salida)
    arcpy.BuildRasterAttributeTable_management(salida, "OVERWRITE")
    arcpy.CalculateStatistics_management(salida)
    return salida

def calcular_crecimiento(ruta_raster):
    arcpy.AddField_management(ruta_raster, "Crecim_ha", "DOUBLE")
    arcpy.CalculateField_management(ruta_raster, "Crecim_ha", "!Count!
* 900 / 10000", "PYTHON3")

    suma = 0
    with arcpy.da.SearchCursor(ruta_raster, ["Value", "Crecim_ha"]) as
cursor:
        for value, area in cursor:
            if value == 1:
                suma += area
    return suma

def calcular_area_por_municipio(raster_binario, shapefile,
campo_municipio, nombre_salida_tabla):
    if not arcpy.Exists(raster_binario):
        raise RuntimeError(f"Raster binario no existe:
{raster_binario}")
    if not arcpy.Exists(shapefile):
        raise RuntimeError(f"Shapefile de municipios no existe:
{shapefile}")
```

```
    campos = [f.name for f in arcpy.ListFields(shapefile)]
    if campo_municipio not in campos:
        raise RuntimeError(f"El campo '{campo_municipio}' no se
encuentra en el shapefile. Campos disponibles: {campos}")

    tabla_salida = os.path.join(carpeta_salida, nombre_salida_tabla)
    arcpy.sa.ZonalStatisticsAsTable(
        in_zone_data=shapefile,
        zone_field=campo_municipio,
        in_value_raster=raster_binario,
        out_table=tabla_salida,
        statistics_type="SUM",
        ignore_nodata="DATA"
    )
    return tabla_salida

def crecimiento_municipios_individual(ruta_cambio, shapefile,
campo_municipio):
    salida_tabla = os.path.join(carpeta_salida,
f"Temp_Crecimiento_{os.path.basename(ruta_cambio).replace('.tif','.dbf
')}")

    arcpy.sa.ZonalStatisticsAsTable(
        in_zone_data=shapefile,
        zone_field=campo_municipio,
        in_value_raster=ruta_cambio,
        out_table=salida_tabla,
        statistics_type="SUM",
        ignore_nodata="DATA"
    )

    data = []
    campos = [f.name for f in arcpy.ListFields(salida_tabla) if f.type
not in ['OID']]
    with arcpy.da.SearchCursor(salida_tabla, campos) as cursor:
        for row in cursor:
            data.append(dict(zip(campos, row)))

    df = pd.DataFrame(data)
    df["Crecimiento_ha"] = df["SUM"] * 900 / 10000

    return {
        "Pereira": round(df[df[campo_municipio] ==
"Pereira"]["Crecimiento_ha"].sum(), 2),
        "Dosquebradas": round(df[df[campo_municipio] ==
"Dosquebradas"]["Crecimiento_ha"].sum(), 2)
    }


# EJECUCIÓN PRINCIPAL
resumen = []
raster_urbano_paths = {}
```

```
for año, raster in imagenes.items():
    urbano_ruta = extraer_area_urbana(raster, f"{año}_AreaUrbana.tif")
    solo_urbano_ruta = generar_capa_urbana_pura(urbano_ruta,
f"{año}_SoloUrbano.tif")

    if not arcpy.Exists(solo_urbano_ruta):
        arcpy.AddError(f"No se generó correctamente el raster binario
de solo urbano para {año}")
        continue

    arcpy.AddMessage(f"Raster binario generado para {año}:
{solo_urbano_ruta}")

    area = calcular_area(solo_urbano_ruta)

    tabla_municipio = calcular_area_por_municipio(
        solo_urbano_ruta,
        limite_municipios,
        "NOMBRE",  # <-- asegúrate de que este campo exista en tu
shapefile
        f"AreaMunicipios_{año}.dbf"
    )
    arcpy.AddMessage(f"Tabla por municipio generada:
{tabla_municipio}")

    raster_urbano_paths[año] = urbano_ruta

    resumen.append({
        "Año": int(año),
        "Área Urbana (ha)": round(area, 2),
        "Crecimiento desde anterior (ha)": None
    })
    arcpy.AddMessage(f" {año}: {area:.2f} ha")


# Detectar cambio entre pares de años
años = list(imagenes.keys())
for i in range(1, len(años)):
    anterior = años[i - 1]
    actual = años[i]

    cambio_raster = detectar_crecimiento(
        raster_urbano_paths[anterior],
        raster_urbano_paths[actual],
        f"Crecimiento_{anterior}_{actual}.tif"
    )

    crec_ha = calcular_crecimiento(cambio_raster)
    crec_mpios = crecimiento_municipios_individual(cambio_raster,
limite_municipios, "NOMBRE")
```

```
    # Buscar el resumen correspondiente al año "actual"
    for fila in resumen:
        if fila["Año"] == int(actual):
            fila["Crecimiento desde anterior (ha)"] = round(crec_ha,
2)
            fila["Crec_Pereira (ha)"] =
round(crec_mpios.get("Pereira", 0), 2)
            fila["Crec_Dosquebradas (ha)"] =
round(crec_mpios.get("Dosquebradas", 0), 2)
            break

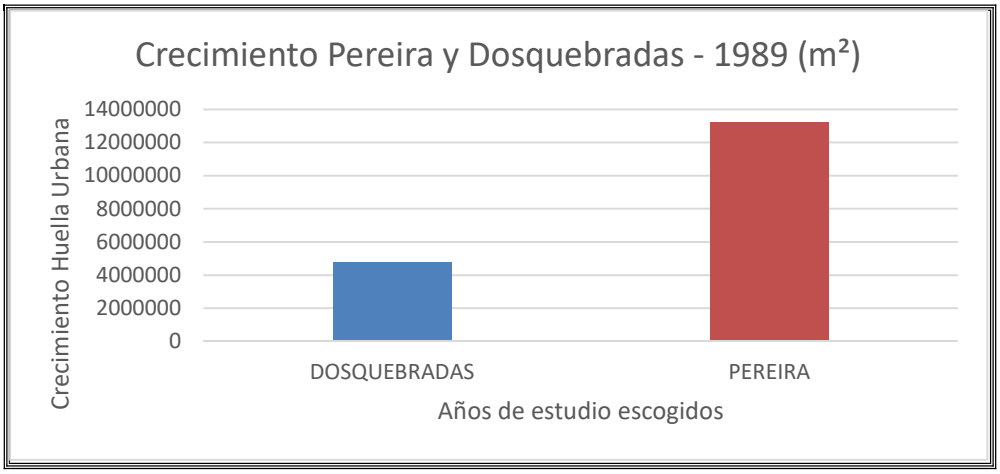
    arcpy.AddMessage(f"Cambio {anterior} → {actual}: Total:
{crec_ha:.2f} ha | Pereira: {crec_mpios.get('Pereira', 0)} ha |
Dosquebradas: {crec_mpios.get('Dosquebradas', 0)} ha")

# --- Exportar tabla CSV con áreas en m² y ha ---
for fila in resumen:
    area_ha = fila.get("Área Urbana (ha)")
    crec_ha = fila.get("Crecimiento desde anterior (ha)")
    crec_per = fila.get("Crec_Pereira (ha)")
    crec_dosq = fila.get("Crec_Dosquebradas (ha)")

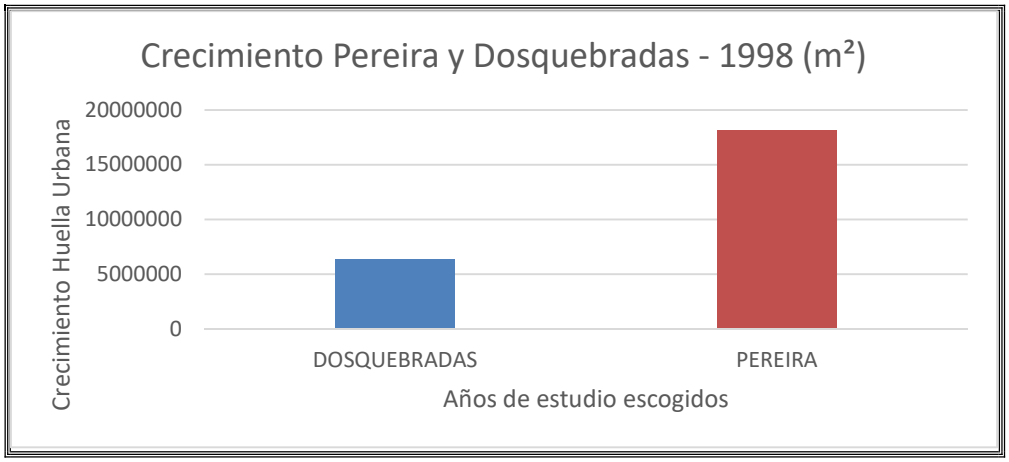
    fila["Área Urbana (m2)"] = round(area_ha * 10000, 2) if area_ha is
not None else None
    fila["Crecimiento desde anterior (m2)"] = round(crec_ha * 10000,
2) if crec_ha is not None else None
    fila["Crec_Pereira (m2)"] = round(crec_per * 10000, 2) if crec_per
is not None else None
    fila["Crec_Dosquebradas (m2)"] = round(crec_dosq * 10000, 2) if
crec_dosq is not None else None

# Crear DataFrame organizado
df = pd.DataFrame(resumen)[[
    "Año",
    "Área Urbana (ha)",
    "Área Urbana (m2)",
    "Crecimiento desde anterior (ha)",
    "Crecimiento desde anterior (m2)",
    "Crec_Pereira (ha)",
    "Crec_Pereira (m2)",
    "Crec_Dosquebradas (ha)",
    "Crec_Dosquebradas (m2)"
]]

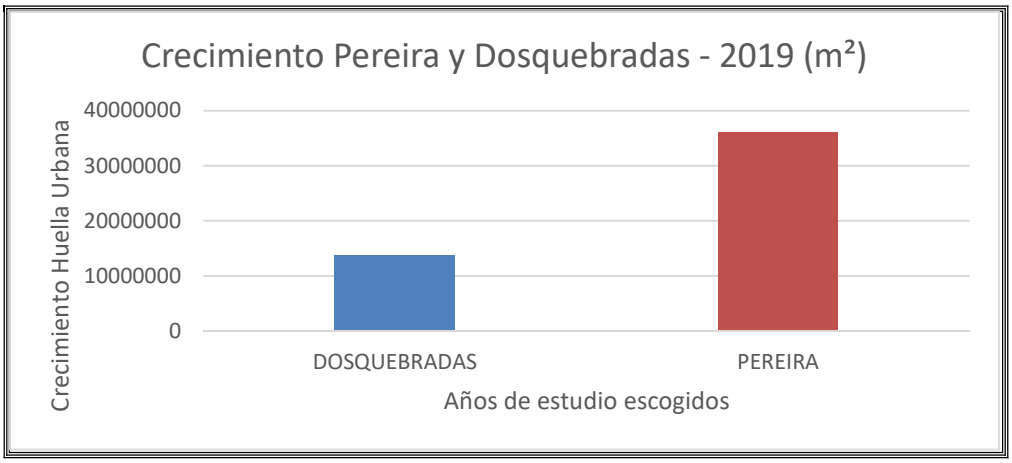
# Exportar CSV
csv_salida = os.path.join(carpeta_salida, "Resumen_CambioUrbano.csv")
df.to_csv(csv_salida, index=False, encoding="utf-8-sig")
print(f"✅ Resumen exportado: {csv_salida}")
```



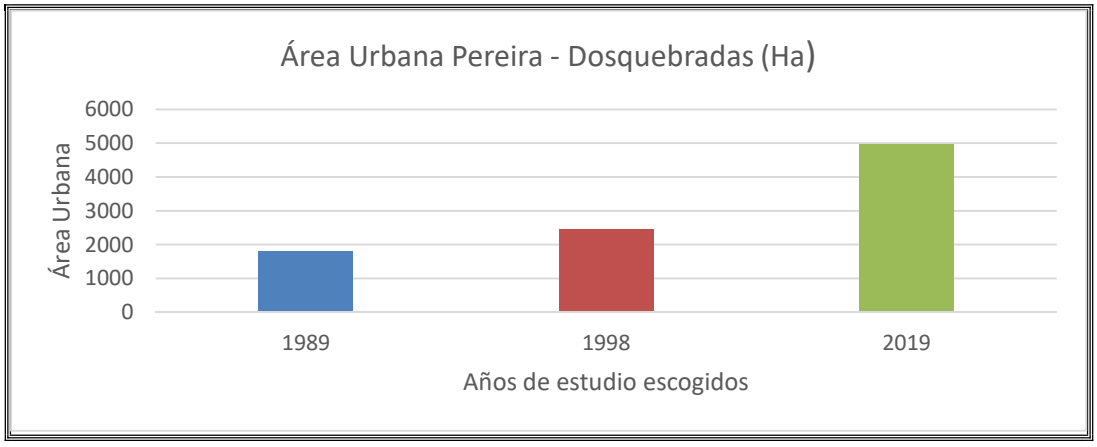
Gráfica *3.* Crecimiento Pereira y Dosquebradas - 1989 (m2)
Fuente: El autor



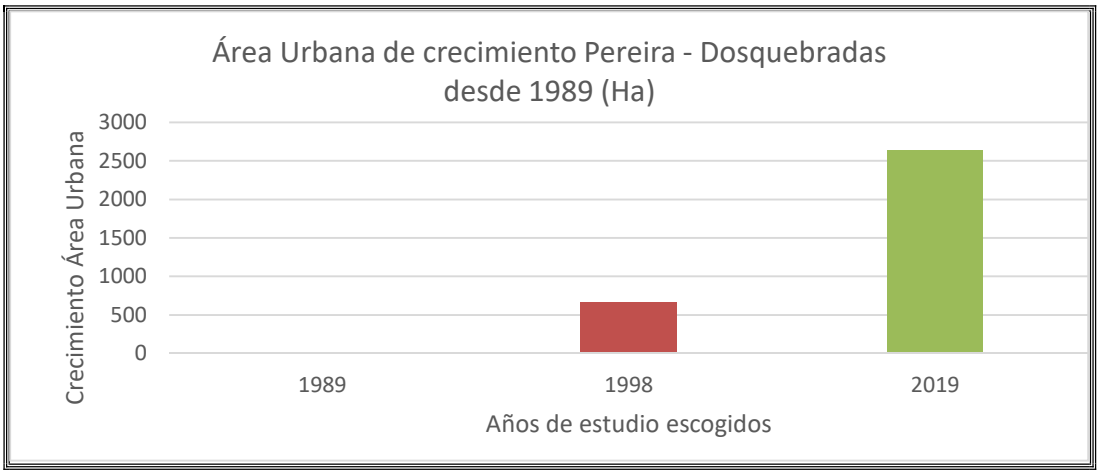
Gráfica 4. Crecimiento Pereira y Dosquebradas - 1998 (m2)
Fuente: El autor



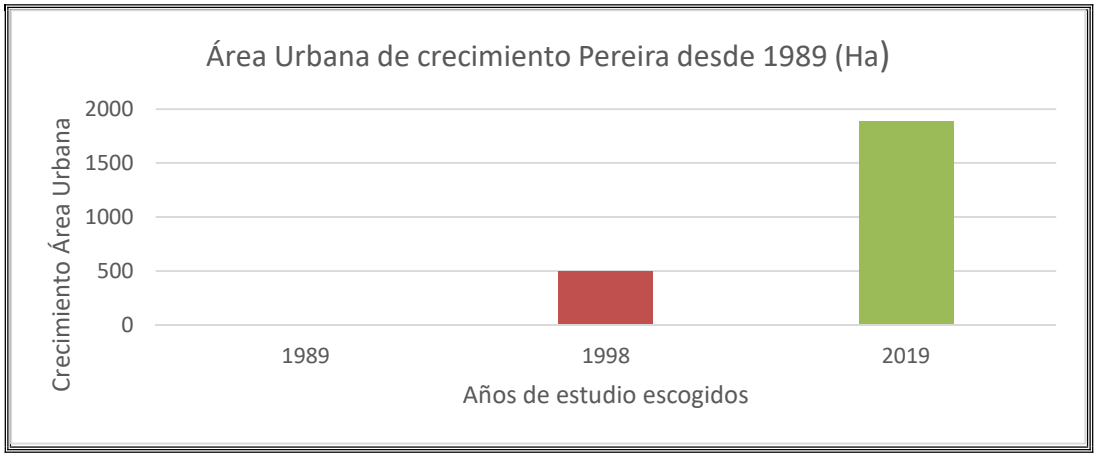
Gráfica 5. Crecimiento Pereira y Dosquebradas - 2019 (m2)
Fuente: El autor



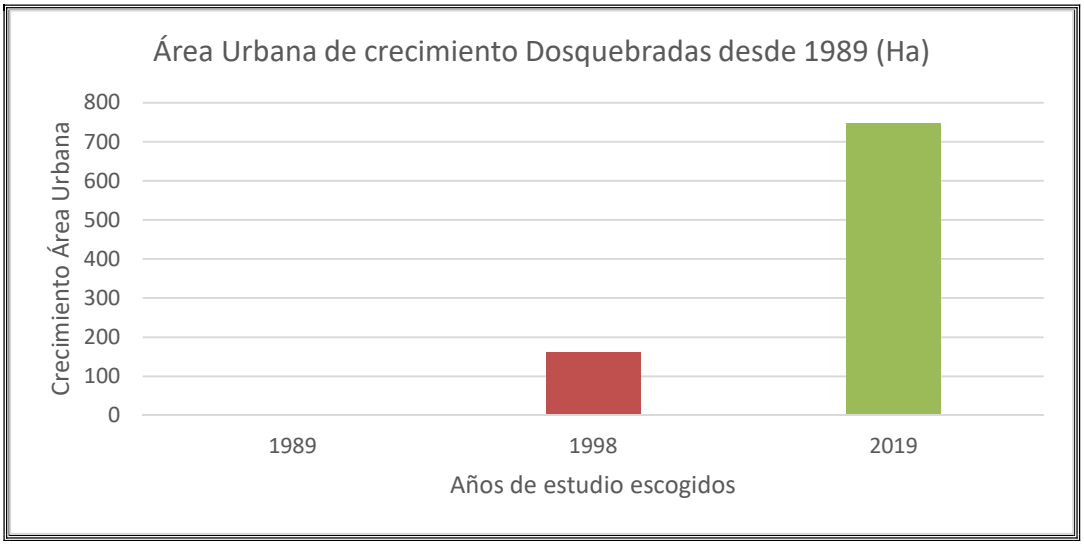
Gráfica 6. Área Urbana Pereira – Dosquebradas (Ha)
Fuente: El autor



Gráfica 7. Área Urbana de crecimiento Pereira – Dosquebradas desde 1989 (Ha)
Fuente: El autor



Gráfica 8. Área Urbana de crecimiento Pereira desde 1989 (Ha)
Fuente: El autor



Gráfica 9. Área Urbana de crecimiento Dosquebradas desde 1989 (Ha)
Fuente: El autor

5.2.4. Modelo de Idoneidad – Accesibilidad Territorial

El modelo de idoneidad, se desarrolló con el fin de poder dar cumplimiento al tercer objetivo que guarda directamente relación con establecer aquellas variables que se consideran *"idóneas",* y que son claves para garantizar el acceso vital a las condiciones mínimas y de calidad de vida de una comunidad o población, de allí, que contribuye para que los tomadores de decisiones bajo la normatividad establecida en las formulaciones para la planificación del territorio, puedan establecer parámetros apropiados que establezcan argumentaciones para determinar si una zona urbana o de expansión ofrece estas condiciones ideales, y que de igual manera certifique salvaguardar el concepto del Desarrollo Sostenible.

Para este trabajo primero se tomó como base la imagen clasificada más reciente utilizada en este estudio, es decir, la del año 2019, a que se refiere que se tomó como referencia, a que se tuvieron en cuenta las propiedades del ráster (tamaño del pixel), y lo límites del proyecto delimitado con el AOI.

De igual manera, se tomó información vectorial base proporcionada como insumo por parte de los datos abiertos de la Alcaldía de la ciudad de Pereira-Risaralda, a través, de su banco de datos cartográficos establecidos en su POT (2016-2027).

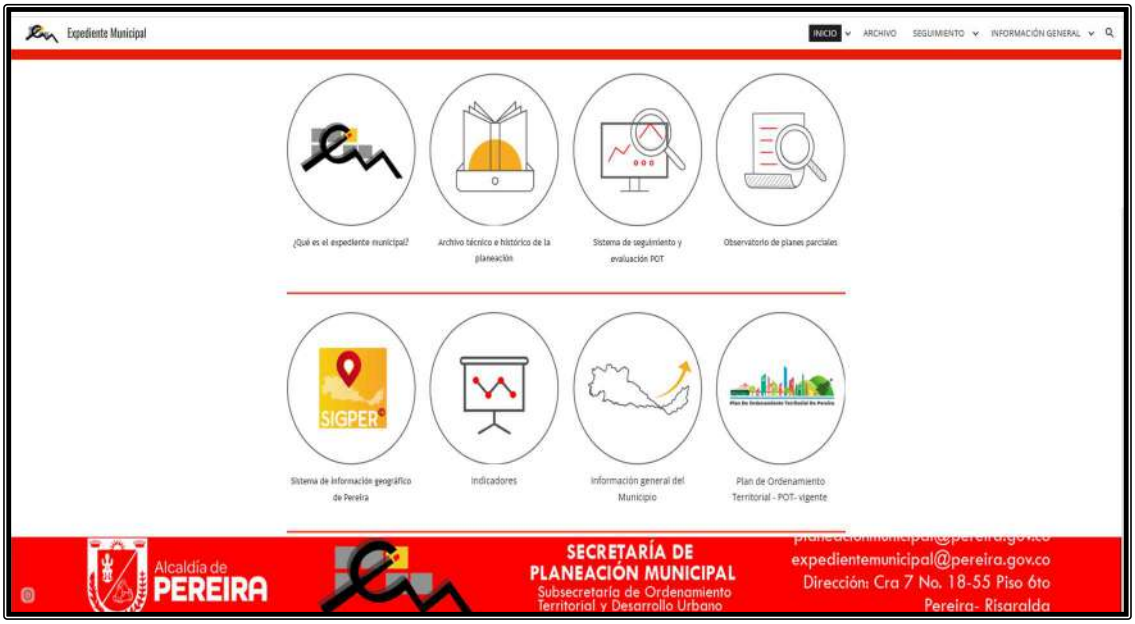


Figura 95. Plataforma de datos abiertos – POT Pereira - Risaralda
Fuente: POT Pereira (2016-2027)

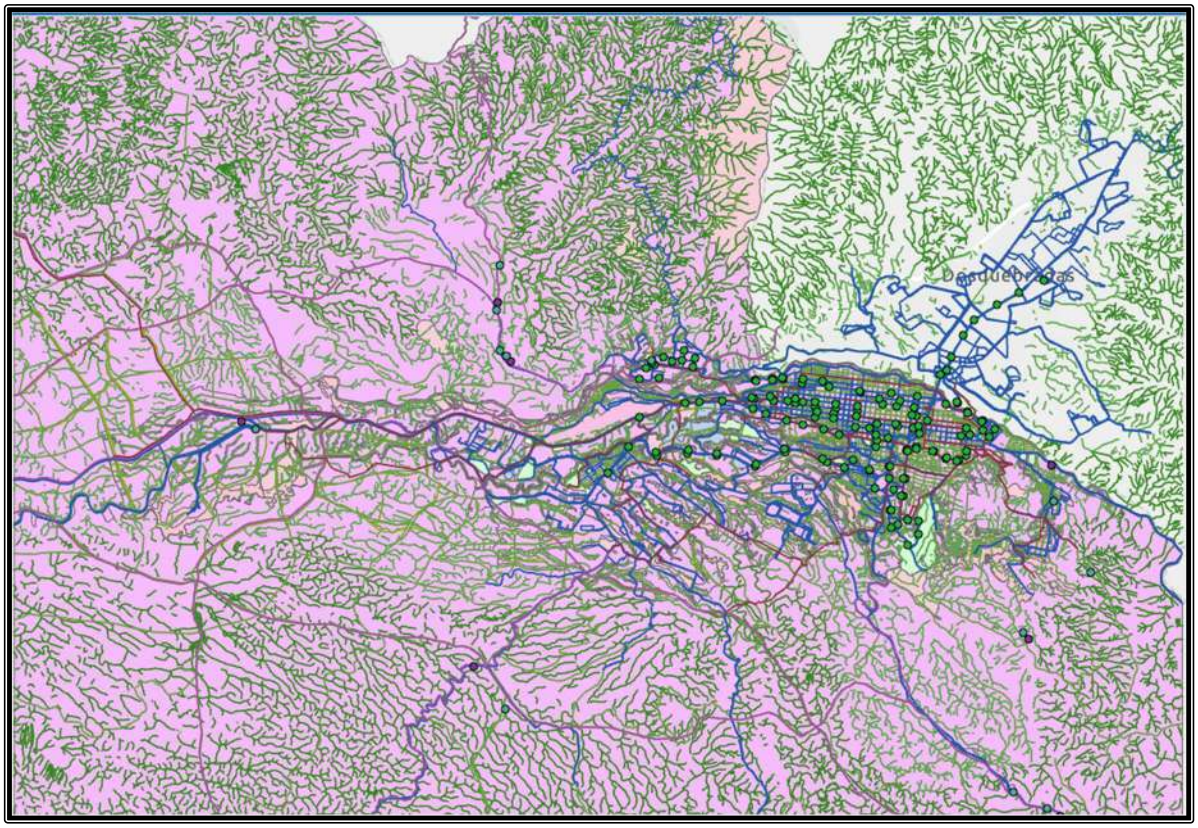


Figura 96. Información vectorial Datos Modelo de Idoneidad
Fuente: POT Pereira (2016-2027)

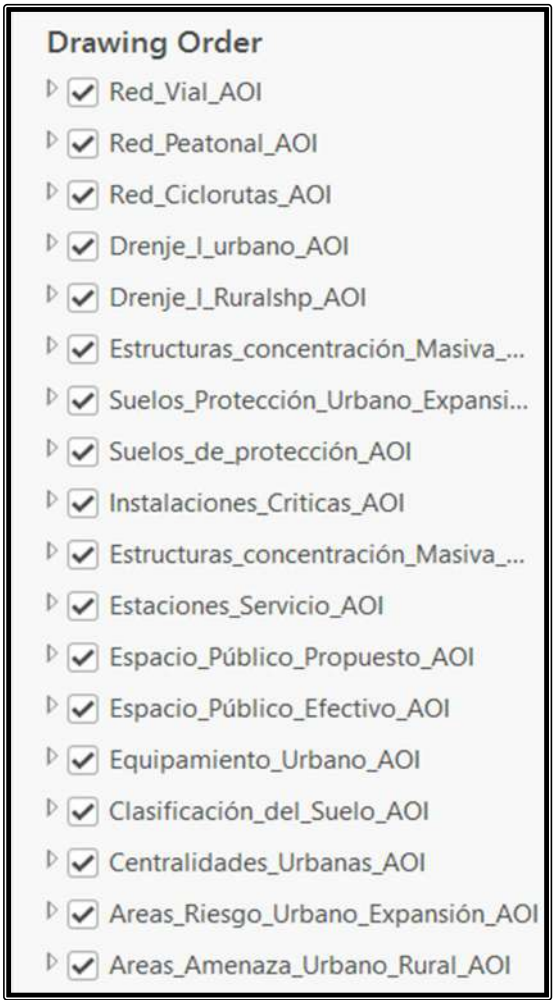


Figura 97. Variables feature class – Modelo Idoneidad
Fuente: El autor

Todo se trabajó en el sistema de coordenadas Magna Colombia Oeste, debido a que la información vectorial fuente mantenía el mismo sistema de referencia, y por su vigencia aún no disponía de la adecuada reproyección al sistema de coordenadas con Origen Nacional.

Para la recolección de datos de información secundaria, se extrajo el Modelo Digital de Elevación (DEM), a través de la plataforma de Google Earth Engine: 'USGS/SRTMGL1_003': https://earthexplorer.usgs.gov/

Y luego se le hizo un tratamiento de copiado con la herramienta *Copy Ráster,* posteriormente cortarlo al área de estudio AOI, con la herramienta *Extract by mask,* y posteriormente reproyectarlo al mismo sistema de coordenadas de los demás elementos Magna Colombia Oeste con la herramienta *Project Ráster*

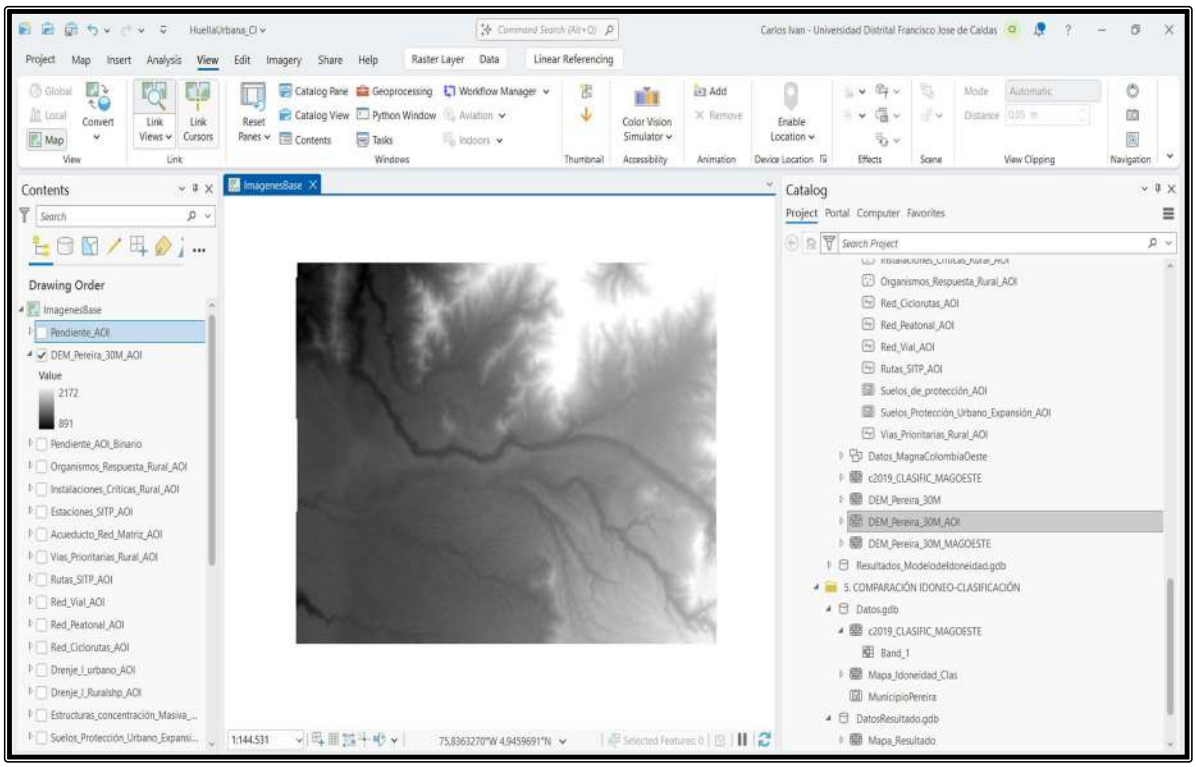


Figura 98. DEM generado corte AOI
Fuente: El autor

Seguidamente, se crea una matriz de variables con sus respectivos criterios, para establecer estos parámetros, se tuvo en cuenta información relacionada a la cercanía en distancia que eventualmente podría tener un área de conformación urbanística a ciertas condiciones de accesibilidad territorial por parte de la población.

En el estudio tomamos como referencia documentación fuente detallada de la memoria justificativa del año 2016, formulada por la Secretaría de Planeación de la ciudad de Pereira – Risaralda, en la formulación de su POT.

De la misma forma a la consulta de eventuales investigaciones y consideraciones científicas que establecían ciertas características de accesibilidad de ciudades intermedias a condiciones de bienes y servicios vitales en las personas, y definir bajo un criterio de idoneidad si las zonas determinadas por el modelo cumplían con las especificaciones planteadas.

DETECCIÓN DE ZONAS DE EXPANSIÓN URBANA USANDO IMÁGENES ORTORRECTIFICADAS. CASO DE ESTUDIO: CIUDAD PEREIRA – RISARALDA							
PARÁMETROS DE ACCESIBILIDAD TERRITORIAL Y ADQUISICIÓN A BIENES Y SERVICIOS							
ESCOGENCIA DE LAS VARIABLES ANTRÓPICAS Y NATURALES							
MODELO DE IDONEIDAD							
Causas	**Variables**		**Parámetros**	**Nombre Dato**	**Descripción de la variable**	**Idóneo**	**Observaciones**
Variables antrópicas	Equipamientos	Movilidad	≤ 1000 metros de distancia	Estaciones SITP	Esto permite que los residentes puedan caminar hasta la estación de forma razonable y facilita el uso del transporte público.	SI	
		Movilidad	≤ 1000 metros de distancia	Rutas SITP	En general, el objetivo es que la ruta SITP esté lo suficientemente cerca para que sea una opción de transporte viable y accesible para la mayoría de la gente, pero no tan cerca que se convierta en una carga para el sistema.	SI	
		Movilidad	≤ 5000 metros de distancia	Vías Prioritarias Rural	La ubicación exacta dependerá de diversos factores, como el tipo de asentamiento (formal o informal) y la necesidad de acceso a servicios básicos y transporte.	SI	
		Movilidad	≤ 10000 metros (10 Km)	Red Vial	Esto facilita la accesibilidad a servicios, empleos y otros beneficios urbanos.	SI	
		Movilidad	≤ 500 metros de distancia	Red Ciclorutas	La red de ciclorutas idealmente debería estar a una distancia que permita un acceso conveniente y seguro para los habitantes, esto significa estar cerca de los centros de vivienda, servicios y trabajo.	SI	
		Movilidad	≤ 500 metros de distancia	Red Peatonal	Esto facilita la accesibilidad a servicios locales, parques y otros destinos cercanos.	SI	
		Salud	≤ 1000 metros de distancia	Instalaciones Criticas Rural	Esta distancia se establece para asegurar la protección de la zona de expansión y permitir un crecimiento ordenado.	SI	
		Seguridad	≤ 60 metros de distancia	Organismos de Respuesta Rural	Los organismos de respuesta, como bomberos, estaciones de policía, centros de salud, etc. Esto se asegura que la distancia de respuesta en caso de emergencia sea adecuada y se eviten posibles interferencias con la infraestructura de servicios.	SI	
		Servicio	≤ 1000 metros de distancia	Estaciones de Servicio	Distancia criterio ya que no se tiene una longitud exacta en temas de planificación	SI	
		Servicio	≤ 20000 metros de distancia	Centralidades Urbanas	Aunque no exista una distancia establecida se pretende esta distancia teniendo en cuenta factores de planificación territorial adecuada	SI	SE RETIRO ESTA VARIABLE.
		Servicio	≤ 200 metros de distancia	Equipamiento Urbano	La distancia ideal entre un asentamiento humano y un equipamiento urbano es de 150 metros a 200 metros. Este rango permite un acceso peatonal seguro y fácil.	SI	
		Estructuras de concentración Masiva	≤ 200 metros de distancia	Centros de Formación	La distancia ideal entre un asentamiento humano y un equipamiento educativo (como escuelas o universidades) es de 150 metros a 200 metros. Este rango permite un acceso peatonal seguro y fácil,	SI	

					promoviendo la movilidad sostenible y la interacción social.		
		Estructuras de concentración Masiva	≤ 1000 metros de distancia	Centros Religiosos	No existe una distancia específica y única definida, la distancia ideal dependerá de las políticas específicas del municipio en su Plan de Ordenamiento Territorial (POT).	SI	
		Estructuras de concentración Masiva	≤ 1000 metros de distancia	Centros Culturales	No existe una distancia específica y única definida, la distancia ideal dependerá de las políticas específicas del municipio en su Plan de Ordenamiento Territorial (POT).	SI	
	Espacio Púbico	Espacio Público Propuesto	≤ 150 metros de distancia	Espacio Público Propuesto	Las construcciones deben estar a una distancia razonable de los espacios públicos para facilitar el acceso peatonal y vehicular.	si	
		Espacio Público Efectivo	≤ 150 metros de distancia	Espacio Público Efectivo	Las construcciones deben estar a una distancia razonable de los espacios públicos para facilitar el acceso peatonal y vehicular.	SI	
	Servicios Públicos	Acueducto	≤ 200 metros de distancia	Red Matriz Acueducto	La distancia mínima recomendada de redes de matriz de agua prefiere que se mantenga esa distancia para evitar problemas como la contaminación y la afectación de las redes hídricas.	NO	
Variables naturales	Superficie Terrestre	Pendiente	≤15 grados	Pendiente	Busca un terreno con una pendiente suave a moderada para facilitar la construcción, el acceso y la eficiencia de los servicios.	Si	
	Riesgo y Amenazas	Amenaza y riesgo por fenómeno de remoción en masa	≤ 50 metros de distancia	Áreas de Riesgo Urbano, Expansión y Rural	Se recomienda evitar la ubicación de asentamientos en áreas de alta amenaza o, si no es posible, establecer una distancia mínima de seguridad que se determine a través de estudios técnicos y análisis de riesgo.	NO	
	Cuerpos Hídricos	Drenajes	≤ 30 metros de distancia	Drenajes Urbanos y Rurales	Se recomienda según la norma nacional, áreas de retiro de 30 metros a lado y lado de la ronda de quebrada donde no se pueden ubicar asentamientos humanos	NO	
	Suelos de Protección Ambiental	Áreas forestales protectoras no asociadas a corrientes hidricas	≤ 100 metros de distancia	Suelos de Protección Urbano, Expansión y Rural	Preservación de las áreas y suelos de protección ambiental	NO	

Tabla 11. Cuadro escogencia variables modelo de idoneidad
Fuente: El autor

De acuerdo con las variables escogidas y establecidas en la tabla anterior, se diseñó una herramienta no parametrizada de *model builder*, y de allí se definió la idoneidad para los datos vector a través de criterios buffer o zona de influencia con los parámetros de distancia ya definidos, como el objetivo es comparar formatos ráster, se usó la herramienta denominada *distance acculumulation,* que según la *(plataforma Web – Esri ArcGis Pro),*

Calcula la distancia acumulada de cada celda a los orígenes, teniendo en cuenta la distancia en línea recta, la distancia de coste y la distancia de superficie real, así como los factores de coste vertical y horizontal.

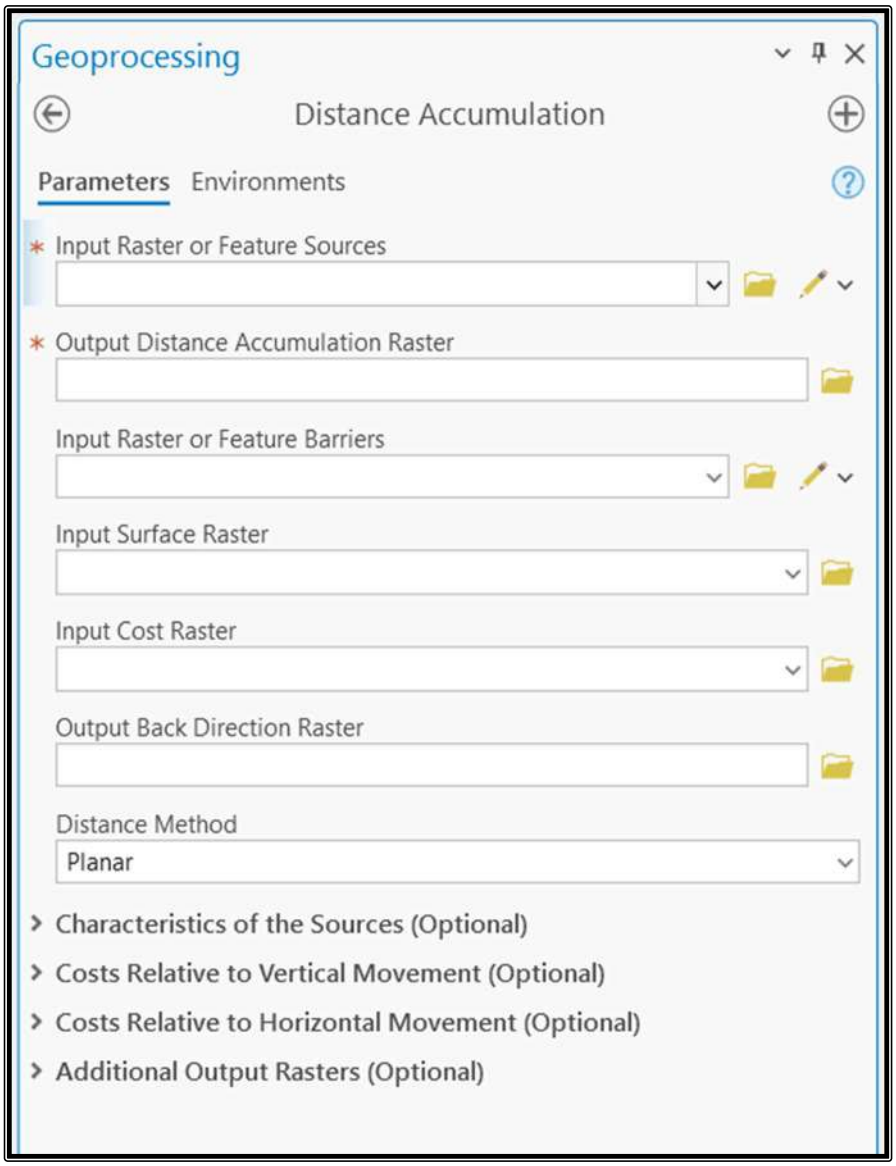


Figura 99. Implementación de la herramienta Distance Accumulation
Fuente: El autor

Lo que arroja como resultado una superficie ráster continua, luego se reclasificó para convertirlo en un formato de ráster binario (0 y 1) donde el valor de cero (0) es no idóneo y

uno (1) es idóneo, por lo que lo denominamos método de modelo de idoneidad binario. Como se muestra a continuación.

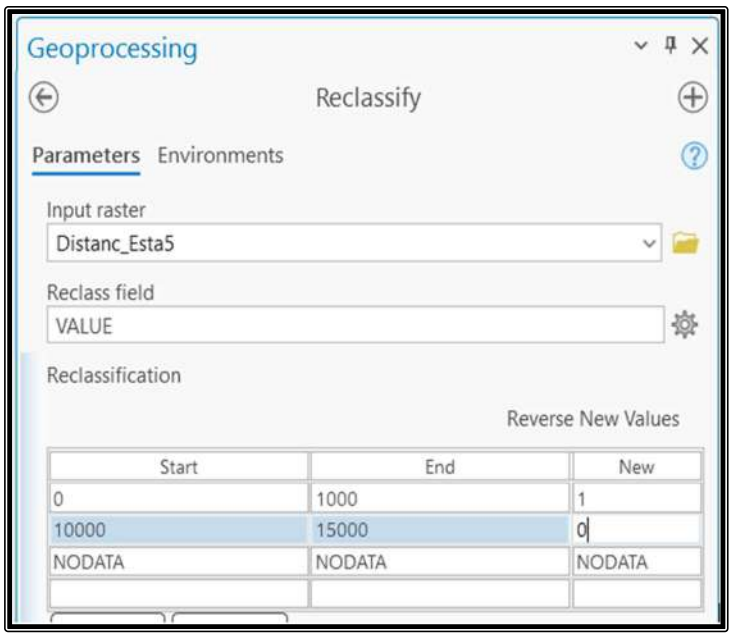


Figura 100. Reclasificación conversión formato ráster modelo de idoneidad
Fuente: El autor

Ahora bien, una vez se parametrizaron todas las variables, con la herramienta de *distance acculumulation* a todo el entorno, se utiliza la extensión de *ráster clasificado*, se configura el tamaño de la celda *Cell Size* y se configura el *snap ráster* para que tome todos los parámetros de las propiedades de la información ráster, lo que al convertirlo y al sumarlo otorga claridad para desarrollar la actividad de comparación.

Pero como se realiza la comparación de los datos vector con los datos ráster, y como se afirma que la información sea segura y confiable, y que nos garantiza que la calidad de los datos sea completamente igual, la respuesta se encuentra con la utilización de la herramienta *snap ráster según la (plataforma Web – Esri ArcGis Pro), cuando se cumple con los criterios de tener alineación de celdas distintas, tener sistemas de coordenadas distintos y que sean entidades,* por lo que en este estudio se cumple con estas condiciones y todo está alineado con el ráster resultante.Luego de esto, se reclasificó y se asignaron los rangos para el cumplimiento del modelo de idoneidad binario tal como se muestra en la

anterior figura, este mismo proceso se hizo para cada una de las capas en la parametrización del diseño de la herramienta *model builder* mencionada anteriormente.

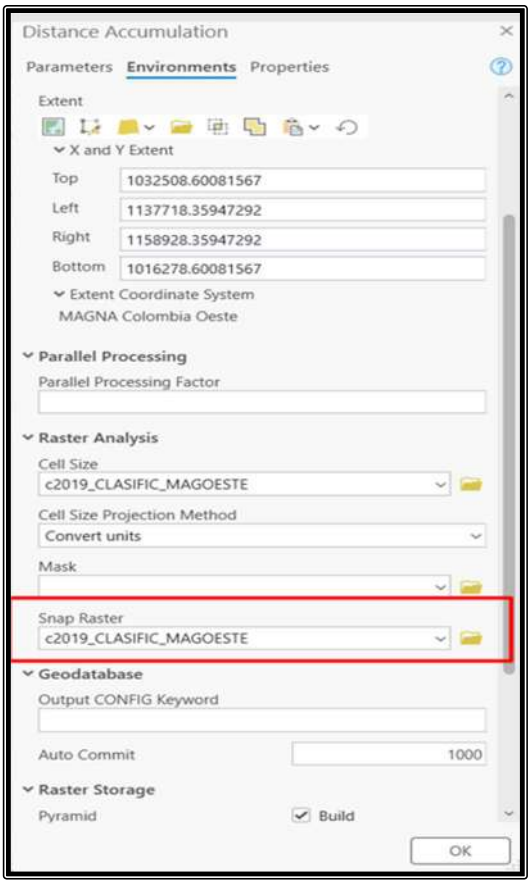


Figura 101. Parametrización Distance Acculumulation
Fuente: El autor

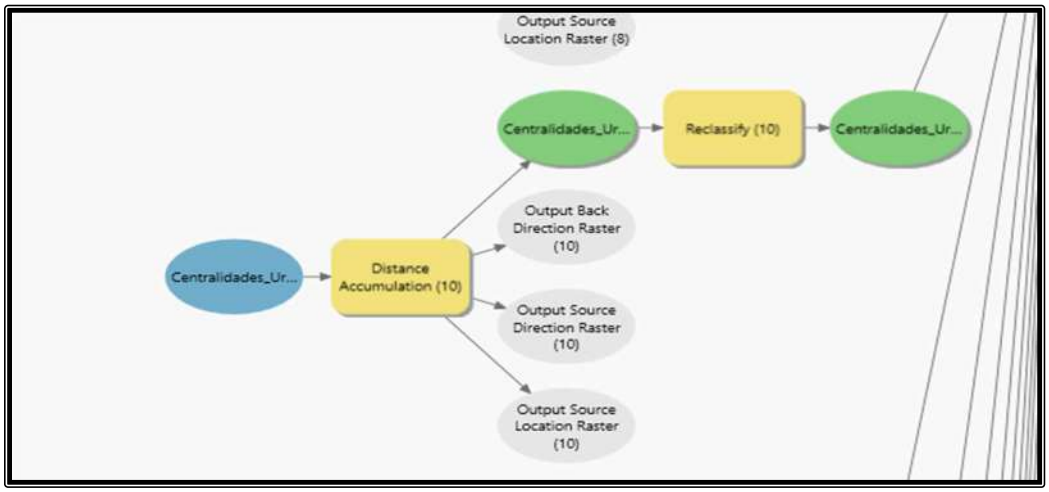


Figura 102. Diseño Model Builder para variables del modelo de idoneidad
Fuente: El autor

5.2.5. Comparación de clasificación 2019 y lugares idóneos

De acuerdo con el resultado del algoritmo realizado con la herramienta *Model Builder,* posteriormente para la validación de los datos se obtuvo un mapa de idoneidad reclasificado en tres (3) categorías de criterios de rangos de distancia establecidas para cada una de las variables, color verde (idóneo) color amarillo (medianamente idóneo) y color rojo (no idóneo), y realizar la comparación (álgebra de mapas) con la clasificación final del año 2019 que es la más reciente.

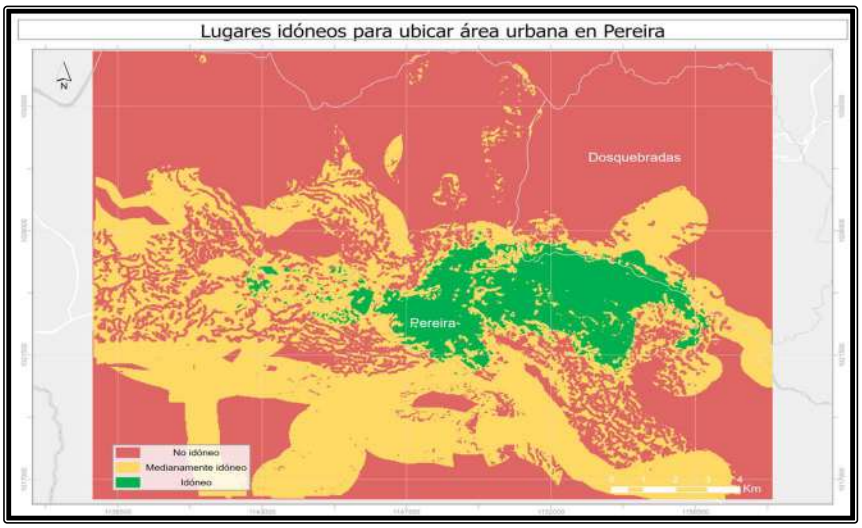


Figura 103. Mapa lugares idóneos ubicación área urbana en Pereira-Risaralda
Fuente: El autor

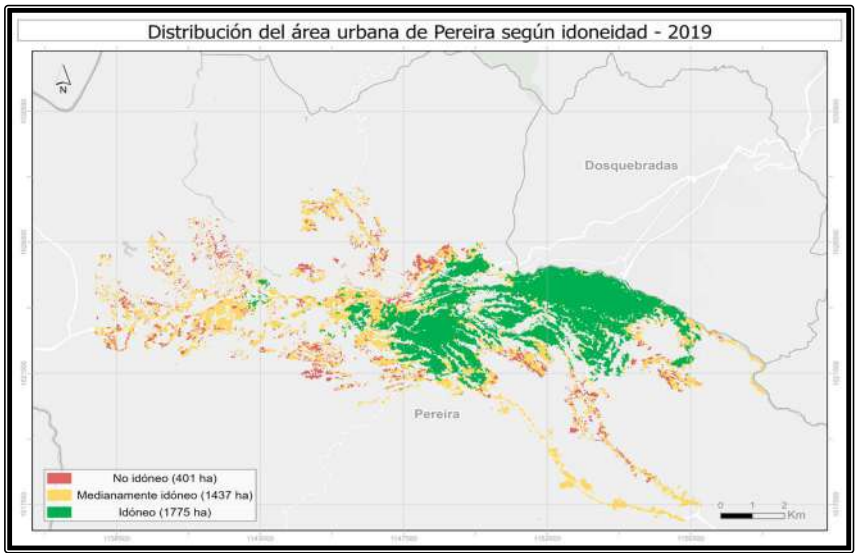


Figura 104. Distribución del área urbana de Pereira según idoneidad – año 2019
Fuente: El autor

5.2.6. Sinopsis del desarrollo conceptual y metodológico

Finalmente, se muestra el esquema del desarrollo metodológico empleado, representado mediante diagrama de flujo, y que describe cada una de las fases en secuencia para la realización del correspondiente estudio.

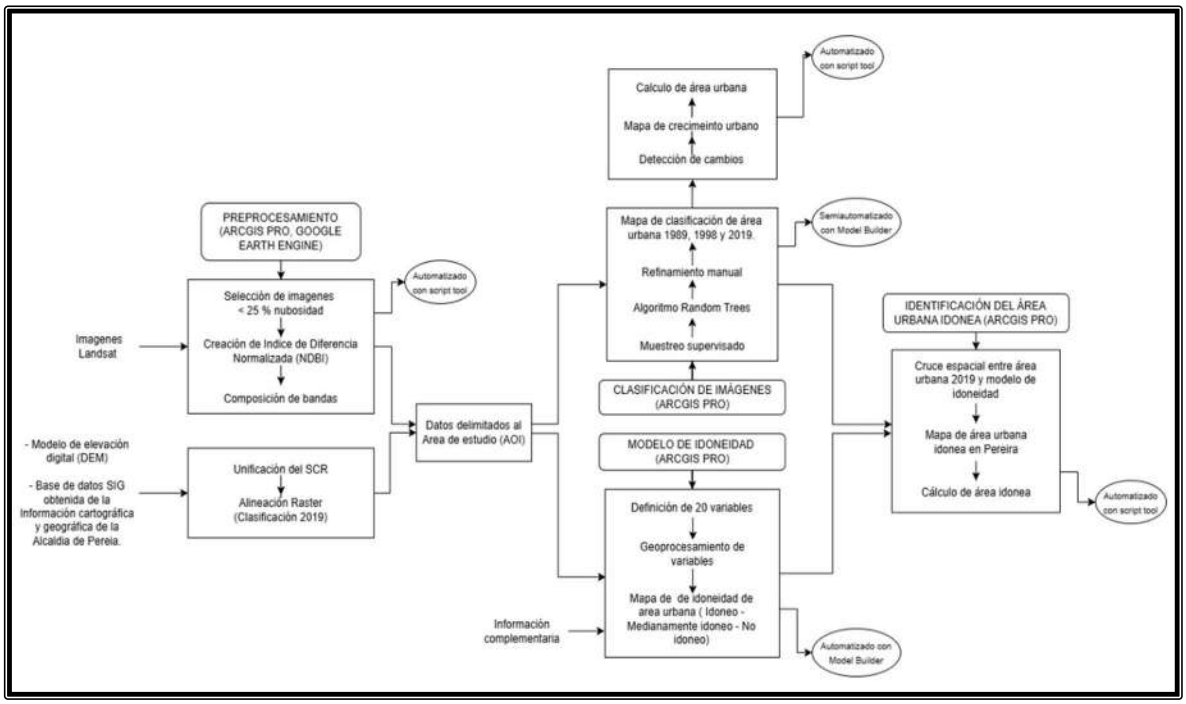


Figura 105. Diagrama de flujo sinopsis del desarrollo conceptual y metodológico
Fuente: El autor

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

6.1. CLASIFICACIÓN DE LAS IMÁGENES

El proceso de clasificación de imágenes satelitales implementado en este estudio combinó técnicas automatizadas y edición requerida dentro de un entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG), con el objetivo de generar productos temáticos precisos y espacialmente consistentes. Las imágenes satelitales multiespectrales empleadas fueron procesadas en ArcGIS Pro, donde se integró el cálculo del índice NDBI *(Normalized Difference Built-up Index)*, con el fin de mejorar la diferenciación entre zonas construidas y coberturas naturales. Este índice resultó especialmente útil para identificar con mayor claridad las áreas urbanas, reduciendo la confusión espectral con suelos desnudos o vegetación degradada.

La generación de las muestras de entrenamiento se llevó a cabo de forma supervisada, utilizando el módulo *Training Samples Manager*. Este proceso consistió en la digitalización manual de polígonos representativos de diferentes clases temáticas, basados en el conocimiento visual y espectral del área de estudio. Las muestras fueron derivadas inicialmente a partir de una imagen base previamente clasificada y posteriormente ajustadas para cubrir adecuadamente la variabilidad espectral de todas las coberturas relevantes, principalmente área urbana, vegetación, cuerpos de agua y suelos expuestos.

El modelo de clasificación fue construido mediante el algoritmo *Random Trees*, que permitió entrenar un archivo. ECD (*Esri Classifier Definition File)*. Este archivo encapsula las firmas espectrales aprendidas y las reglas del clasificador, y fue aplicado de forma uniforme al resto de las imágenes para asegurar la coherencia metodológica. Los resultados generados fueron refinados utilizando la herramienta *Pixel Editor*, mediante la cual se corrigieron manualmente errores de clasificación en zonas ambiguas como sombras, márgenes urbanos y áreas con alta mezcla espectral.

Para mejorar la eficiencia del flujo de trabajo, se diseñó un modelo en *Model Builder* que permitió automatizar parcialmente la ejecución del clasificador, la gestión de capas y la preparación del entorno de edición. Si bien la selección de muestras y la corrección final

con *Pixel Editor* continuaron siendo procesos manuales, esta automatización contribuyó a agilizar el tratamiento de múltiples escenas temporales.

Finalmente, se extrajo la clase correspondiente a área urbana mediante la herramienta *Extract by Attributes*, generando un ráster binario por año. Estos resultados fueron empleados para cálculos de superficie urbana, comparación multitemporal y análisis de expansión del tejido construido. En conjunto, la integración de técnicas de procesamiento espectral, clasificación supervisada, herramientas SIG especializadas y edición manual permitió obtener resultados sólidos, con alta fidelidad temática y utilidad para aplicaciones urbanas y territoriales.

6.2. DETECCIÓN DE ÁREAS URBANAS

Ahora bien, para el proceso de detección de áreas urbanas y zonas de expansión, se cuantificó y caracterizó el crecimiento urbano en el área metropolitana de Pereira y Dosquebradas por temas de conurbación, por lo que se desarrolló un procedimiento automatizado en el ambiente del lenguaje de programación *Python* utilizando *ArcPy* y la extensión *Spatial Analyst* de ArcGIS Pro. Se analizaron imágenes clasificadas de cobertura del suelo del satélite **Landsat** con los sensores 4, 5 y 8 correspondientes a los años **1989, 1998 y 2019**, con una resolución espacial de 30 metros, permitiendo identificar y comparar áreas urbanas en distintos momentos del tiempo.

6.3. PROCESAMIENTO Y EXTRACCIÓN DE ÁREAS URBANAS

Inicialmente, se generaron mapas binarios de urbanización mediante la reclasificación de los valores de los ráster clasificados, en los que el valor 0 se interpretó como urbano. Posteriormente, se extrajo únicamente el área urbana por año, eliminando valores no urbanos *(NoData)*, para permitir un análisis comparativo válido. El área urbana total fue calculada en hectáreas (Ha) y metros cuadrados (m²) mediante la multiplicación del número de celdas urbanas por el área de pixel (900 m²).

6.4. DETECCIÓN DEL CRECIMIENTO URBANO

El crecimiento entre pares de años fue determinado mediante una operación de superposición ráster o álgebra de mapas, identificando como crecimiento aquellas celdas que eran no urbanas en el año anterior y urbanas en el año posterior. Se generaron mapas de crecimiento urbano para los periodos **1989–1998 y 1998–2019.**

6.5. ANÁLISIS POR MUNICIPIO

Con el fin de desagregar el crecimiento por jurisdicción administrativa, se utilizó un shapefile de límites municipales que incluye los municipios de Pereira y Dosquebradas. Mediante la herramienta Zonal *Statistics as Table*, se calculó el área urbana total y el crecimiento urbano por municipio en cada año. Estos resultados fueron integrados a una tabla resumen unificada.

6.6. RESULTADOS EXPORTADOS

El proceso final generó una tabla en formato CSV con las siguientes variables:

- Área urbana total por año (en Ha y m²).
- Crecimiento urbano total desde el año anterior (en Ha y m²).
- Crecimiento urbano específico para los municipios de Pereira y Dosquebradas (en Ha y m²).

Estos datos permiten observar tanto la expansión global del tejido urbano como su distribución diferenciada por municipio, lo que resulta clave para evaluar procesos de metropolización y conurbación, cambio de uso del suelo y presión urbana sobre áreas periurbanas.

6.7. RESULTADOS Y COMPARACIÓN DEL MODELO DE IDONEIDAD

Se desarrolló un modelo espacial de idoneidad para la expansión urbana en el municipio de Pereira y su área de influencia, integrando criterios físico-ambientales, de accesibilidad

y servicios básicos. El modelo fue implementado en ArcGIS Pro mediante herramientas de geoprocesamiento y *Model Builder*, utilizando como insumo una combinación de datos vectoriales recopilados de la plataforma de datos abiertos de la Secretaría de Planeación de la Alcaldía de Pereira, a través de su Plan de Ordenamiento Territorial (POT) y de los modelos digitales de terreno (DEM), extraído de *Google Earth Engine (GEE).*

El proceso incluyó:

- La recolección y procesamiento de 20 variables espaciales, tales como distancia a vías, estaciones de transporte, centros culturales, pendientes y redes de acueducto, de acuerdo con parámetros técnicos establecidos por normativa urbana local.

- La transformación de cada variable se desarrolló a través del procedimiento de ráster binarios según umbrales de distancia o pendiente basándose en la alineación del ráster clasificado del 2019.

- La posterior sumatoria de estos ráster, permitió generar un mapa de idoneidad acumulado donde cada píxel representa la cantidad de condiciones favorables que cumple (desde 0 hasta un máximo teórico de 20).

Posteriormente, se descargó un Modelo Digital de Terreno (SRTM 30 m) desde *GEE*, el cual fue proyectado a MAGNA-SIRGAS / Colombia Oeste (EPSG:3116), y del que se derivó la capa de pendiente. Esta variable fue reclasificada para excluir áreas con inclinaciones superiores a 15 grados, en línea con criterios de aptitud constructiva.

Se utilizó la herramienta *Tabulate Area*, para comparar el mapa de idoneidad generado con una imagen clasificada del año 2019, la cual representa el patrón actual de urbanización.

Esta comparación cuantitativa se complementa con un ráster lógico de evaluación, categorizando los resultados en tres clases:

1. Áreas urbanizadas en zonas idóneas.

2. Áreas urbanizadas en zonas medianamente idónea.

3. Áreas urbanizadas en zonas no idóneas

El análisis espacial mostró que:

- El 48,57% de las áreas urbanas actuales se localizan dentro de zonas clasificadas como altamente idóneas, validando en parte la estructura del modelo.
- Aproximadamente un 39,10% de la expansión urbana se ha dado en zonas con moderada idoneidad, especialmente alejadas de vías de accesibilidad y redes de servicio.
- Aproximadamente un 12,33% de la expansión urbana se ha dado en zonas con baja o nula idoneidad, especialmente en pendientes elevadas o fuera del alcance de redes de servicio o variables de comunicación y medios de transporte.
- Se identificaron más de 18.000 celdas (equivalentes a 1620 ha) como zonas altamente idóneas aún no urbanizadas, las cuales podrían priorizarse en futuros procesos de planificación territorial.

6.8. SINTESIS DE LOS RESULTADOS ALCANZADOS

Estos resultados permiten validar la utilidad del modelo como herramienta de apoyo a la toma de decisiones urbanas y como base para el diseño de políticas de expansión más sostenibles y coherentes con la capacidad del territorio y a los manejos de ordenamiento derivados por la conurbación desarrollada con otros municipios aledaños y muy cercanos como es el caso del municipio de Dosquebradas.

Es así como, realizando un compilado del proceso realizado y para el análisis de los resultados, se obtiene que se realizó la clasificación de uso del suelo a partir de imágenes satelitales **Landsat** correspondientes a los años 1989, 1998 y 2019.

A través de un enfoque de clasificación supervisada semiautomatizada, utilizando el algoritmo *Random Trees* en ArcGIS Pro, se generaron mapas binarios que distinguen el área urbana respecto al entorno no urbano. El índice NDBI y la composición de bandas fueron fundamentales para mejorar la discriminación de la huella urbana. Los resultados fueron validados visualmente y refinados mediante edición manual.

La superficie clasificada como área urbana para cada año fue la siguiente:

- 1989: 1326,5 ha
- 1998: 1812,5 ha
- 2019: 3611,7 ha

Se evidenció un notable crecimiento urbano entre los años 1989 y 2019, especialmente hacia las periferias de Pereira y Dosquebradas.

A partir de las clasificaciones multitemporales, se desarrolló una comparación entre imágenes para detectar el crecimiento urbano neto. El resultado fue un ráster de crecimiento urbano que identifica las áreas que pasaron de no urbano a urbano en cada periodo. Este producto fue automatizado mediante *script tool* para asegurar replicabilidad y eficiencia, por ejemplo, para el periodo 1989–1998, el crecimiento urbano se localizó principalmente hacia el norte del municipio de Dosquebradas y el occidente de Pereira.

Se construyó un modelo multicriterio de idoneidad para el crecimiento urbano, considerando 20 variables ambientales y territoriales (distancia a vías, servicios, pendientes, etc.). Cada variable fue procesada y normalizada en formato ráster. Posteriormente, se clasificó el mapa resultante en tres categorías:

- Idóneo *(valor 3)*
- Medianamente idóneo *(valor 2)*
- No idóneo *(valor 1)*

Los resultados muestran que las áreas idóneas para la expansión urbana se concentran en zonas relativamente planas y cercanas a la infraestructura vial principal.

Finalmente, se realizó un cruce espacial entre el mapa de clasificación urbana de 2019 y el modelo de idoneidad. El resultado permitió identificar qué proporción del crecimiento urbano se ha dado en áreas idóneas, medianamente idóneas o no idóneas.

Se encontró que una parte considerable de la expansión urbana reciente se ha dado en zonas medianamente idóneas, lo que evidencia presiones urbanísticas sobre áreas con restricciones o menor aptitud territorial.

6.9. EVALUACIÓN DE LOS DIFERENTES RESULTADOS

El análisis multitemporal realizado mediante imágenes satelitales permitió identificar una expansión urbana sostenida en Pereira desde el año 1989 hasta antes del año 2019. Esta transformación ha implicado alteraciones significativas en el uso del suelo, patrones de ocupación territorial y procesos de planificación urbana. El crecimiento no ha sido uniforme, sino condicionado por factores políticos, económicos y ambientales que han reconfigurado la estructura urbana del municipio.

Desde una perspectiva normativa, y según lo consultado y analizado, el primer gran intento de organizar el crecimiento de Pereira se consolidó con la implementación del POT en el año 2000. Sin embargo, las herramientas contempladas en este instrumento (como los planes parciales y la zonificación del suelo) tuvieron una ejecución limitada, muchos proyectos se quedaron en el papel, mientras que la expansión física de la ciudad avanzó, en gran parte, de manera desarticulada.

Posteriormente, con la revisión del POT en 2006 y corroborado por los datos generados en el proceso metodológico y visualizado en los productos entregados, se introdujeron ajustes que permitieron la consolidación de usos suburbanos en sectores como Cerritos, promoviendo el desarrollo de proyectos residenciales para estratos altos según los mapas fuentes consultados, esta expansión ocurrió en áreas rurales y de borde urbano, sin una integración efectiva con la infraestructura existente ni con una visión sostenible del territorio. En la práctica, se consolidó una urbanización periférica que comenzó a generar presiones sobre los recursos naturales y los servicios públicos.

En 2016, se adoptó una nueva versión del POT con un enfoque más restrictivo y sostenible. Se planteó la necesidad de limitar la expansión urbana, recuperar suelos de protección, conservar zonas de importancia hídrica y orientar el crecimiento hacia la densificación de áreas consolidadas. Esta vez, el modelo de ciudad compacta y resiliente buscaba responder tanto a la necesidad de controlar el crecimiento desordenado como a los desafíos derivados del cambio climático y la presión sobre el territorio.

En el ámbito económico, el desarrollo urbano de Pereira ha estado íntimamente ligado a procesos económicos que han moldeado la configuración de su territorio. Según lo

analizado desde el año 1989 y hasta la actualidad, el auge del sector inmobiliario especialmente en los sectores de Cerritos, Combia y Galicia ha impulsado una dinámica de urbanización basada en la valorización del suelo y la demanda por vivienda en zonas de alta calidad ambiental.

La expansión de estos proyectos se ha dado por fuera del marco previsto en los POT, debido a la especulación del suelo, la falta de regulación efectiva y la débil implementación de instrumentos de gestión del desarrollo urbano. A esto se suma la presión de la población migrante y el crecimiento demográfico que han intensificado la necesidad de suelo urbanizable, muchas veces por fuera de los perímetros establecidos.

En contraste según lo visualizado y consultado, sectores como el centro histórico y barrios consolidados han enfrentado fenómenos de deterioro o subutilización, a pesar de contar con servicios e infraestructura adecuados. Esto ha generado una expansión extensiva antes que intensiva, lo cual va en contravía del modelo planteado por el POT de 2016.

Desde la dimensión ambiental, el entorno físico de Pereira presenta una alta vulnerabilidad ambiental debido a su localización geográfica, sus pendientes pronunciadas y la presencia de importantes cuencas hídricas como la del río Otún. El crecimiento urbano ha ejercido presión sobre estos ecosistemas, aumentando el riesgo por deslizamientos, erosión y contaminación de fuentes hídricas. En respuesta, los instrumentos de planificación han ido incorporando medidas de gestión del riesgo y conservación ambiental. Sin embargo, no todos los procesos de ocupación han tenido en cuenta estas restricciones, y en algunos casos la urbanización ha avanzado en zonas no aptas para asentamientos humanos, lo cual representa una amenaza a largo plazo para la sostenibilidad urbana.

En resumen, los sectores de mayor crecimiento urbano y su correspondencia con la planeación, según los resultados arrojados en esta investigación y el análisis de las zonas ya consolidadas y que se encuentran implantadas, se puede dilucidar y corroborar que a pesar de que se desarrolla un modelo de idoneidad teniendo en cuenta ciertas variables de primera necesidad para la población, se indica que, durante el periodo de estudio, los sectores de mayor expansión y la respectiva valoración han sido:

Cerritos: Este corregimiento se ha convertido en un polo de desarrollo residencial de alta gama. Su crecimiento responde tanto a factores de mercado como a políticas permisivas incluidas en las versiones anteriores del POT. Sin embargo, esta expansión ha generado fragmentación territorial y ha superado en muchos casos la capacidad de respuesta institucional.

Tribunas Córcega y Combia: Aunque estas zonas fueron consideradas como potenciales áreas de expansión en versiones anteriores del POT, el POT de 2016 revirtió gran parte de su clasificación, devolviéndolas a suelo rural o de conservación ambiental. No obstante, aún existe presión para urbanizar estas áreas debido a su cercanía con zonas desarrolladas.

Zona Centro y barrios intermedios: Aunque el POT promueve la densificación de estos sectores, el crecimiento allí ha sido más lento, principalmente por la falta de incentivos y por el rezago en renovación urbana. A pesar de su infraestructura existente, siguen siendo subutilizados.

En términos generales, puede decirse que parte del crecimiento urbano de Pereira ha estado alineado con lo planeado por la administración, especialmente desde la implementación del POT de 2016. No obstante, de acuerdo con lo desarrollado e implementado a través del análisis con lo visualizado por las imágenes –*ortorrectificadas*-, aún persisten rezagos en la ejecución de instrumentos de planificación y en la articulación interinstitucional, lo que permite que continúe la expansión en zonas no priorizadas o incluso restringidas.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente estudio ha demostrado la invaluable utilidad de la teledetección y las imágenes satelitales como herramientas indispensables para la comprensión y gestión del crecimiento urbano, así como para la identificación precisa de las zonas potenciales de expansión territorial. A través del análisis multitemporal de las imágenes, se ha logrado reconstruir la dinámica de transformación del uso del suelo en el área de estudio durante los años 1989, 1998 y 2019, evidenciando la magnitud y dirección predominante del desarrollo urbano.

Los resultados obtenidos revelan un patrón de crecimiento desbordado de la huella urbana casi que duplicándose desde la fecha inicial escogida, hasta la fecha final y al tiempo actual (2025), lo que ha conllevado a visualizar la instalación de áreas urbanas en zonas propensas a vulnerabilidad, tal y como lo muestran las estadísticas de los resultados, este crecimiento se ha concentrado en ejes de viales principales, y en el sistema periférico con formación de nuevos núcleos como el municipio de Dosquebradas, que ha impactado significativamente la utilización de la capacidad del suelo, acogiendo asentamientos humanos en zonas de bastante vegetación y áreas de bosque seco como las urbanizaciones de *Boquía y Cerritos* como ejemplo, alterando el concepto del Desarrollo sostenible.

La clasificación supervisada de las imágenes ha permitido cuantificar con precisión la tasa de urbanización, identificando las áreas de mayor presión de crecimiento y la consiguiente pérdida de cobertura vegetal y suelo productivo, lo que hace necesario incorporar políticas de conservación y sostenibilidad a aquellas zonas propensas a ser urbanizadas. De igual forma, los resultados de la clasificación multitemporal de imágenes ***Landsat***, revelan un crecimiento urbano sostenido y significativo en el área metropolitana de Pereira y Dosquebradas. Las superficies urbanas calculadas en *(1326,5 ha en 1989; 1812,5 ha en 1998; y 3611,7 ha en 2019)*, evidencian una expansión notable hacia las periferias, lo que se identificó y cuantificó de manera precisa mediante operaciones de álgebra de mapas y la automatización realizada.

El análisis desagregado por municipio (Pereira y Dosquebradas), permitió comprender la distribución diferenciada de este crecimiento, un aspecto clave para evaluar los procesos

de metropolización y conurbación. Además, se validó la utilidad de un modelo espacial multicriterio de idoneidad para la expansión urbana, desarrollado con 20 variables físico-ambientales, de accesibilidad y servicios. La comparación entre el mapa de idoneidad y la urbanización actual de 2019 mostró que, si bien un 48,57% del crecimiento se ha dado en zonas altamente idóneas, aproximadamente un 39,10% ha ocurrido en áreas de moderada idoneidad y un preocupante 12,33% en zonas de baja o nula idoneidad. Esto indica presiones urbanísticas en áreas con restricciones territoriales (como pendientes elevadas o falta de servicios), lo que subraya la necesidad de una planificación más rigurosa.

En síntesis, la integración de técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes satelitales, SIG y análisis espacial ha permitido no solo cuantificar la expansión urbana, sino también identificar patrones de crecimiento y áreas prioritarias para una planificación territorial más sostenible. La detección de más de 1620 hectáreas de zonas altamente idóneas aún no urbanizadas representa una oportunidad valiosa para guiar el futuro desarrollo, apoyando la toma de decisiones urbanas y el diseño de políticas que armonicen el crecimiento con la capacidad del territorio y las dinámicas de conurbación en la región.

En particular, la aplicación de algoritmos de detección de cambios y el análisis de la variabilidad espectral han posibilitado la delimitación de zonas de expansión urbana. Estas áreas, caracterizadas por cambios en la reflectancia, representan focos de futuro desarrollo que deben ser objeto de una atención prioritaria en los instrumentos de planificación. La capacidad de las imágenes satelitales para proporcionar una visión adecuada y actualizada del territorio se erige como un pilar para la toma de decisiones informadas, permitiendo anticipar escenarios y mitigar los impactos negativos de un crecimiento no planificado.

Este trabajo subraya que la integración de la información derivada de las imágenes satelitales en los procesos de planificación territorial no solo optimiza la asignación de recursos y la definición de usos del suelo, sino que también fomenta un desarrollo urbano más sostenible y equitativo. La adopción de estas metodologías geotecnológicas es esencial para garantizar que la expansión de nuestras ciudades se realice de manera ordenada, respetuosa con el medio ambiente y en beneficio de la calidad de vida de sus habitantes.

Y va en sintonía con detallar que el crecimiento urbano en Pereira, responde a dinámicas complejas que requieren respuestas integrales desde la política pública. Si bien existen marcos normativos para guiar este proceso, su efectividad depende de la capacidad institucional, la voluntad política y la participación activa de la ciudadanía. Solo a través de una planificación urbana con enfoque territorial, inclusivo y sostenible será posible garantizar un desarrollo urbano que responda a las necesidades del presente sin comprometer las generaciones futuras.

Igualmente, este crecimiento responde a un entramado de causas ambientales, económicas y legislativas. La degradación del entorno rural, la atracción de oportunidades económicas en los centros urbanos y las limitaciones en la implementación del marco normativo han configurado un proceso de expansión urbana acelerada, muchas veces desordenada y socialmente desigual. Superar estos desafíos exige una visión integral de desarrollo urbano que articule la planificación territorial con políticas ambientales y de inclusión social, fortaleciendo la gobernanza local y regional para garantizar ciudades sostenibles y resilientes.

Finalmente, se puntualiza que de acuerdo a los resultados obtenidos y al análisis realizado, desde el año 1989 hasta cerca del año 2006, Pereira vivió una ocupación urbana con límites normativos pero baja ejecución real, fragmentada y sin control integral. A partir de la revisión de 2016 con el POT moderno, se impuso un modelo que restringe la expansión, preserva recursos ambientales, densifica dentro del perímetro habilitado y recupera vacíos urbanos, promoviendo una huella urbana más planificada y sostenible. Aunque persisten desafíos tales como la especulación de suelo y la ejecución parcial de algunos proyectos en lo fundamental el crecimiento urbano reciente tiende a alinearse con lo planteado por las administraciones y sus políticas territoriales.

De la misma forma según el periodo estudiado, se concluye que entre 1989 y 2019, muestra una transición desde una urbanización poco controlada hacia un modelo de planificación más consciente del entorno ambiental y los desafíos del desarrollo sostenible. Si bien las políticas administrativas recientes han intentado redirigir la expansión hacia formas más compactas, la realidad del mercado, las presiones demográficas y la especulación inmobiliaria siguen desafiando la capacidad de control de la administración.

En términos normativos, el cambio de enfoque entre las versiones del POT evidencia un aprendizaje institucional, pero su implementación efectiva sigue siendo una deuda pendiente. Para que Pereira logre consolidar un crecimiento urbano equilibrado, será necesario reforzar los mecanismos de gobernanza territorial, mejorar la ejecución de proyectos estratégicos y garantizar la sostenibilidad ambiental a largo plazo.

8. RECURSOS Y PRESUPUESTO

Dentro de lo estipulado para la ejecución de la presente investigación aplicada, en la tabla 9, se presentan los recursos y el presupuesto de cada una de las etapas previstas en la fase metodológica a fin de concretar los propósitos establecidos y cumplir con lo proyectado en términos de impacto y resultados. La estimación aproximada del costo total de esta investigación es de $131,000,000

Rubro	Ítem	Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Otras entidades interesadas		Maestría	Total
		Especie	Efectivo		
Recurso Humano	Director tesis		$ 25,000,000		$ 25,000,000
Infraestructura Física	Equipos y materiales	$ 7,000,000			$ 7,000,000
	Mobiliario	$ 3,000,000			$ 3,000,000
Software	Licencias	$10,000,000			$ 10,000,000
Insumos	Imágenes y Ortofotos	$8,000,000			$ 8,000,000
Herramienta SIG	Herramienta espacial		$20,000,000		$20,000,000
Bases de datos	Consulta académica	$ 15,000,000			$ 15,000,000
Bibliografía	Libros y publicaciones	$ 10,000,000			$ 10,000,000
Socialización	Resultados y ponencias		$ 8,000,000		$ 8,000,000
Publicación de Articulo	Publicación de resultados		$ 5,000,000		$ 5,000,000
Matriculas	Costo Maestría			$ 20,000,000	$ 20,000,000
TOTAL		$ 53,000,000	$ 58,000,000	$ 20,000,000	**$ 131,000,000**

Tabla 12. Presupuesto proyectado
Fuente: El autor

.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. Bautista, J. E. (2004). *La Calidad del suelo y sus indicadores.* Oaxaca - México.

A. Cuartero, M. F. (2003). Rectificación y Ortorrectificación de imágenes de satélite: análisis comparativo y discusión. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*.

A. Merlotto, M. P. (2012). Crecimiento urbano y cambios del Uso/Cobertura de Suelo en las ciudades de Necochea y Quequén - Buenos Aires - Argentina . *Geografía Norte Grande*.

A. Velásquez, G. B. (2014). Cambio de Uso del Suelo. *Red temática de CONACYT*.

Bazant, J. (2010). Expansión urbana incontrolada y paradigmas de la planeación urbana. 475 - 503.

Bense, I. T. (NOVIEMBRE de 2007). *TELEDET*. Obtenido de TELEDET: http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/imagenes-satelitales-tutorial.htm

BMS. (2007). *Informe.*

Buzai, G., & Montes Galbán, E. (2020). Megaciudad Buenos Aires: Cartografía de su última expansión y conurbación mediante el procesamiento digital de imágenes satelitales nocturnas. *Revista Cartográfica 100*, 215-238.

C. Henriquez, G. A. (2006). Cambio de uso del suelo aplicación de un modelo de simulación espacial. *Geografía Norte Grande*.

C. Peralta. (2015). *Urbanismo.* Obtenido de http://urbanismounlar.blogspot.com/2010/07/la-planificacion-urbana.html

C. Rojas, W. P. (2010). Área Metropolitana de Concepción: Factores espaciales explicativos de su crecimiento urbano reciente (2001 - 2009) por medio de un modelo de regresión logistica espacial. *Revista Postgrados UNAH*.

CAF. (2019). *Informe de estudio.*

Carter, S. (1997). Conceptos de calidad del suelo y su importancia. *Desarrollos en la ciencia del suelo*, 1-19.

Cerda, J. (2007). La expansión urbana discontinua analizada desde el enfoque de accesibilidad territorial aplicación a santiago de Chile.

Chen, J., Sun, G., Yongze, S., Yinxia, C., Cheolhee, Y., Ya, G., . . . Qihao, W. (2025). Global variations of urban form: Characterization and quantification through intelligent remote sensing image analysis. *Sustainable Cities and Society*.

Chuvieco, E. (1985). *Aportaciones de la Teledetección espacial a la cartografía de ocupación del suelo.* España.

Chuvieco, E. (2010).

D. Escobar, C. C. (2015). Cobertura Geoespacial de Nodos de Actividad Primaria. *EIA*.

D. Escobar, C. U. (2014). Accesibilidad Territorial: Instrumento de Planificación urbana y regional. *Tecnura*.

D. Lu, M. B. (2012). Land Use/Cover classification in the brazilian amazon using satellite images. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 1185 - 1208.

DANE - Business, D. (2024). *Generalidades de la Región.* Pereira: Agencia de promoción de inversión de Risaralda.

DANE. (2019). *Informe de gestión.* Bogotá.

DNP. (2018). *Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 Pacto por Colombia, pacto por la equidad .* Bogotá D. C.: Departamento Nacional de Planeación.

Dominguez, J. (2000). *Breve introducción a la Cartografía y a los Sistemas de Información Geográfica - SIG.* Madrid.

E. Buendía, S. T. (2002). Aplicación de imagénes de satélite en la Cartografía de Uso de Suelo y Vegetación en una región del Oriente del Valle de México. *Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*.

E. López, C. P. (2006). Los Sistemas de Información Geográfica . *Andalucía en el umbral del siglo XXI*.

FAO. (2018). *Documento y articulo informativo.*

FONADE. (2017). *Rendición de cuentas .*

IGAC. (2002). *Informe de Gestión.* Bogotá.

J. Achicanoy, R. R. (2018). Análisis y proyección de las coberturas vegetales mediante el uso de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica en la Localidad de Suba, Bogotá - Colombia. *Gestión y Ambiente*, 41 - 58.

J. Borras, J. D. (2017). Clasificación de Usos del suelo a partir de imágenes sentinel 2. *Revista de Teledetección*, 55-66.

J. Recio, J. P. (2019). Detección y Cartografiado de los procesos de expansión urbana mediante técnicas combinadas de teledetección y SIG. *Extracción automática de las caracteristicas geomorfológicas* .

Jensen, J. (2015). Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. *Prentice Hall Press, Upper Saddle River.*

Jiménez, E. (2019). Cadenas de Markov espaciales para simular el crecimiento del área metropolitana de Toluca 2017 - 2031. *Economía, Sociedad y Territorio*, 109 - 140.

L. Cano Salinas, R. R. (2017). Detección del crecimiento urbano en el estado de Hidalgo mediante lmagenes Landsat . *Investigaciones Geográficas*, 92.

L. Fernández, M. L. (2015). Expansión urbana del Área Metropolitana de Valencia en el periodo de 1984 - 2011 a partir de imagénes Landsat. *Revista de Teledetección*.

Lahoz, E. (2010). *Reflexiones medioambientales de la expansión urbana .* Granada - España.

Lambin, E. F. (2001). Las causas del cambio de uso y cobertura del suelo: más allá de los mitos. *Cambio ambiental global*, 261-269.

León, F. (2016). Aplicación de Imágenes satelitales en procesos físico - urbanos. Caso de estudio: Crecimiento Urbanístico de Quito - Ecuador año 1981 - 2000. *Revista Geociencias y Geodatos*.

M. Aguayo, A. P. (2009). Cambio del Uso del Suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX. Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje. *Revista Chilena de Historia Natural*.

M. Gutierrez, E. J. (2010). Variations of natural soil salinity in an arid environment using satellite images . *Journal of South American Earth Sciences*, 46 - 57.

M. Gutiérrez, G. R.-T. (2016). Análisis Jerárquico de la intensidad de cambio de cobertura/uso de suelo y deforestación (2000-2008) en la reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán - México. *Investigaciones Geográficas*, 89 - 104.

M. Morales, F. M. (2019). Análisis de Patrones espaciales en la expansión urbana de ciudades intermedias. El caso de San Fernando, Chile .

M. Sandler, B. R. (2018). Misclassification error in satellite imagery data: Implications for empirical land-use models. *Land use policy Florida USA* , 530-537.

Marinai, S. (2013). *Learning Algorithms for Document Layout Analysis* (Vol. 31). Firenze, Italia: Elsevier B.V. doi:http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-53859-8.00016-3

Mohamadiazar, N., Ebrahimian, A., & Hosseiny, H. (2024). Integrating deep learning, satellite image processing, and spatial-temporal. *Journal of Hydrology* .

N. Picone, S. L. (2014). Propuesta metodológica para la extracción y análisis de densidades urbanas mediante teledetección y SIG. Caso de estudio: ciudad de Tandil, Argentina. *Revista Universitaria de Geografía*, 77 - 96.

OECD. (2015). *Informe.*

ONU. (2007). *Informe.*

Palomba, R. (2002). *Calidad de vida: Conceptos y medidas.* Roma - Italia.

Peralta, Carolina . (2015). *Urbanismo .* Obtenido de http://urbanismounlar.blogspot.com/2010/07/la-planificacion-urbana.html

Pereira, A. d. (2016). *Plan de Ordenamiento Territorial - Memoría Justificativa.* Pereira - Colombia.

Pereira, A. d. (2019). *Informe Anual .* Pereira, Colombia.

Planeación, D. N. (01 de 01 de 2017). *Manual de la Innovación - Expansión Urbana Ordenada.* New York: Marron Institute of Urban Management.

Planeación, D. N. (2024). *Formulación revisión e implementación de los instrumentos de planificación del OT de Pereira.* Pereira.

Pontificia universidad de chile. (2013). *Instituto de Estudios Urbanos y Territoriales*. Obtenido de Instituto de Estudios Urbanos y Territoriales: http://estudiosurbanos.uc.cl/programas/planificador-urbana

Quiroa, M. (2022). *Bienes y servicios.* Guatemala.

Quiroa, M. (N/A). *Bienes y servicios.* Guatemala.

R. Lunetta, J. K. (2006). Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. *Remote Sensing of Environment*, 142-154.

Rojas Gamba, N., Fonseca Salamanca, L., Pérez Rueda, S., & Blanco Suárez, M. (2020). Modelación de Crecimiento Urbano: 2017-2035. *Bitácora 32*, 177-190.

S. Navarro, L. P. (2009). Análisis del crecimiento urbano en el área metropolitana de Santo Domingo a través de imagenes multiespectrales del satelite Landsat TM. *Energy and Technology for the americas* .

Serrano, J. (2001). Accesibilidad territorial en España.

SIAC. (2017). *Informe técnico.*

T. Escalante, J. L. (2000). Base de datos y sistemas de información. *Biogeografía*.

Torres, R. (2015). Pautas de localización residencial en el País Vasco 1991 - 2010, algunas caracteristicas socio - demográficas de las poblaciones suburbanas. *Estudios Geográficos*, 671 - 702.

Ulloa Espíndola, R., & Pérez Albert, Y. (2020). Validación de un modelo de predicción del crecimiento urbano en Quito-Ecuador construido mediante pesos de evidencia y autómatas celulares. *EURE*, 1-27.

V. López, W. P. (2008). Análisis de los cambios de cobertura de suelo derivados de la expansión urbana de la Zona metropolitana de la ciudad de México 1990 - 2000. *Investigaciones Geográficas - Boletín del Instituto de Geografía UNAM*, 85 - 101.

V. Ruiz, R. H. (2013). Análisis multitemporal del cambio de uso del suelo, en el paisaje terrestre protegido Miraflor Moropotente Nicaragua 1993 - 2011. *Ecosistemas*, 117 - 123.

von Martini, A. B. (N/A). *INTA.* Obtenido de INTA: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-percepcion-remota.pdf

ANEXOS

El repositorio de investigación que aloja la información del trabajo realizado y resultante en el desarrollo del proceso requerido, se organiza de la siguiente manera para su correspondiente visualización:

Esta información se encuentra en la carpeta comprimida denominada CarpetaFinal-HuellaUrbana.

Anexo 1. Etapa de Pre-procesamiento.
Anexo 2. Etapa de Clasificación.
Anexo 3. Etapa de Detección de Cambios.
Anexo 4. Etapa de Construcción de Modelo de Idoneidad.
Anexo 5. Etapa de Comparación de Idóneo – Clasificación.
Anexo 6. Bases de Datos de proyecto realizado en ArcGis Pro. (HuellaUrbana_CI)
Anexo 7. Mapas Salidas Gráficas Finales.
Anexo 8. Shapefiles Modelo de Idoneidad
Anexo 9. Carpeta de Bitácora – pruebas realizadas