

ANÁLISIS PROSPECTIVO DE LA INCIDENCIA DE LA EXPANSIÓN URBANA EN EL ÁMBITO DE LA PLANIFICACIÓN TERRITORIAL: CIUDAD DE CUENCA

PROSPECTIVE ANALYSIS OF THE INCIDENCE OF URBAN EXPANSION IN THE FIELD OF TERRITORIAL PLANNING: CITY OF CUENCA

Enrique Flores-Juca, Mario Balseca Carrera*

Universidad de Cuenca, Av. 12 de Abril y Av. Loja. Cuenca-Ecuador; email: enrique.flores@ucuenca.edu.ec; mariobalsecac@gmail.com

** Autor de correspondencia: Mario Balseca. Universidad de Cuenca*

Recibido: 27 de enero 2022

/

Aceptado: 14 de junio 2022

RESUMEN

Debido al acelerado crecimiento de la población urbana y la motorización privada; los patrones de expansión de ciudades en Latinoamérica se han configurado bajo modelos dispersos y fragmentados al igual su infraestructura física, la cual se emplaza de manera aleatoria y desordenada, mayoritariamente en sus zonas periféricas lo más próximas a la ciudad, con el propósito de conservar la cercanía a ella. En este sentido el presente estudio plantea definir escenarios del crecimiento de la mancha urbana de la ciudad de Cuenca Ecuador para el año 2030 a través de la construcción de modelos espacio – temporales, identificando zonas que presenten tendencias urbanizables de cambio de uso de suelo sobre espacios actualmente naturales y como está la asignación de usos en la propuesta de ordenación territorial actual. La metodología aplicada al ser híbrida plantea el uso de cadenas de Markov-automatas celulares como parte del complemento del software QGIS denominado MOLUSCE (Modules for Land Use Change Simulation). Los resultados revelaron cambios de clasificación del suelo urbano (comparación de superficies entre el año 2020 y 2030), repercutiendo en la reducción de suelos agrícolas (- 0.69%), cuerpos de agua (-0.01%) y de vegetación natural (-1.40%). Las zonas donde se generan los cambios de suelo se encuentran principalmente en las periferias de la ciudad, coincidiendo espacialmente con las áreas proyectadas dentro de la planificación territorial local como suelos de expansión urbana; sin embargo, aspectos sociales y económicos repercuten en la realidad tanto de lo proyectado como de lo estudiado, así también la falta de control del uso y gestión del suelo que vigilen una implementación adecuada de planes y proyectos sostenibles.

Palabras clave: Cambios de uso de suelo; crecimiento urbano, clasificación supervisada; automatas celulares; Modelo espacio – temporal.

ABSTRACT

Due to the rapid growth of the urban population and private motorization; expansion patterns in Latin America have begun to take shape under dispersed and fragmented models. The physical infrastructure of cities, which represent their urban space, grows in a random and disorderly manner, mostly in their peripheral areas, since they are directed to spaces that allow their occupation, in order to preserve a degree of proximity to the urban environment. In this sense, the present study proposes to define scenarios of the growth of the urban area of the city of Cuenca Ecuador for the year 2030 through the construction of space-time models, identifying areas that present undeveloped trends of change of land

use over spaces. currently natural, in addition to interrelating how these areas are articulated to local territorial planning. The methodology applied to being hybridized raises Markov chains-cellular automata as part of the QGIS software complement called MOLUSCE (Modules for Land Use Change Simulation). The results revealed changes in the classification of urban land (comparison of surfaces between 2020 and 2030), affecting the reduction of agricultural soils (-0.69%), bodies of water (-0.01%) and natural vegetation (-1.40%). The areas where land changes are generated are mainly located in the outskirts of the city, which spatially match the areas projected within the local territorial planning as urban expansion land; however, social and economic issues have an impact on the reality of both projected and studied areas, as well as the lack of control of land use and management to monitor the proper implementation of sustainable plans and projects.

Keywords: Land use change; urban growth, supervised classification; cellular automata; Space-time model.

INTRODUCCIÓN

Desde mediados del siglo XX, la población mundial que reside en áreas urbanas ha experimentado un crecimiento medio anual del 2,5 % aproximadamente, duplicando la población urbana en ese mismo período (United Nations, 2018), por consecuencia las zonas urbanizadas del planeta se encuentran en continua expansión a ritmos más acelerados en los países en vías de desarrollo (Wang, 2019). En lo que respecta a los países latinoamericanos, en mayor o menor medida, presentan en las últimas décadas transformaciones derivadas de los procesos de reestructuración socioeconómica vinculada a la propiedad de la tierra, los agentes intervinientes y la gestión del suelo; ocasionando de esta manera movimientos de la población hacia las periferias urbanas (Urriza y Garriz, 2014).

La expansión urbana, implica principalmente un elemento sistemático de crecimiento, que no cuenta, en la mayoría de casos, con un orden o patrones determinados de desarrollo (Criado Nicolás et al., 2020). Esquematizar a este fenómeno físico y social implica el análisis no solo del espacio, sino del movimiento de los habitantes de las ciudades que sufren este impacto, que se presenta en los órdenes más opuestos, desde los habitantes que se desplazan por necesidad de vivienda, sin que les importe la precariedad o insuficiencia de servicios, o a su vez, la implementación de urbanizaciones de altos estándares que “aspiran” un distanciamiento de las zonas centrales que se encuentran escandalosamente aglomeradas (Perez et al., 2020). Aunque enfrentar estas dos realidades, requiere un análisis completamente diferenciado, lo que los une es el elemento de expansión, donde esta se perpetúa y no permite definir un orden, ya sea por privilegio o por necesidad (Thuon, 2021).

A lo largo del tiempo varios investigadores han abordado el concepto de expansión urbana y su evolución desde diversos enfoques, por ejemplo, para Chen et al., (2000) en su análisis parte de la premisa que el crecimiento urbano descontrolado, conlleva a transformaciones en la estructura urbana y desequilibrios territoriales, con el consecuente deterioro de las condiciones medioambientales y alteraciones en la calidad de vida de los ciudadanos. Mientras que, Cossio y Tourn (2009) señalan que el concepto de expansión urbana se ata a los vínculos entre los patrones de uso de la tierra y sus comportamientos. En este sentido, desde un enfoque espacio-temporal Molinero-Parejo et al. (2021) concuerdan que la expansión urbana refleja patrones morfológicos contemporáneos configurados bajo modelos dispersos y fragmentados en los cuales se asienta la población y sus actividades, provocando impactos irreversibles sobre el territorio.

Aunque la expansión urbana es objeto de debate, el consenso general es que se caracteriza por ser un patrón irregular y no planificado de crecimiento, impulsado por múltiples procesos

que conducen a la utilización ineficiente de recursos. Es así que la consecuencia directa es el cambio en el uso del suelo y de la cubierta vegetal de la región induciendo al aumento de la uniformidad del paisaje a causa de la superficie construida y pavimentada, la pérdida de diversidad regional y la desaparición de zonas agrícolas productivas, entre otras (Pombo, 2017).

El proceso de expansión urbana que caracteriza a las ciudades de la región de América Latina, ha dado lugar a formas urbanas dispersas y a la proliferación de espacios fragmentados, derivando en la producción de pseudo formas urbanas que no alcanzarían la condición de ciudad. Si se considera que la ciudad es un espacio de contacto, de regulación e intercambio, las urbanizaciones cerradas y otros nuevos objetos urbanos (supermercados, centros comerciales, nuevos edificios de departamentos y oficinas, etc.), así como también los asentamientos informales que alteran la configuración urbana, representan formas de producción de espacios de no-ciudad (Frediani, 2010). Como consecuencia de la expansión de la mancha urbana, el espacio periurbano se caracteriza por la mezcla de usos del suelo, producto de la presencia simultánea de actividades urbanas y rurales (Hernández-Flores et al., 2009). Este espacio dinámico, complejo y de gran fragilidad, al estar sometido a fuertes perturbaciones antrópicas, se convierte en un punto de articulación espacial en el que se intersecan múltiples fuerzas de la naturaleza (Frediani, 2017). Esta suma de sucesos deteriora la calidad de los servicios ambientales, contamina el suelo, el agua y el aire, lo que hace que las áreas sean más vulnerables a los desastres naturales (Salazar et al., 2021). La sustitución de áreas naturales y vegetales por áreas urbanizadas provoca la pérdida de suelo fértil y con ello se da origen a los conflictos por el espacio agrícola, en este marco el área periurbana se vuelve una zona de competencia entre productores, los unos agricultores especializados los otros productores agrícolas ubicados en terrenos alejados de la ciudad donde pueden obtener mejores márgenes de producción (Pombo, 2017).

En este sentido, medir el crecimiento urbano y los cambios en el uso de suelo del territorio modificado contribuye a comprender las dinámicas que enfrentan las ciudades, principalmente los desafíos vinculados a su sustentabilidad y la aplicación de propuestas argumentadas en datos certeros que pongan freno a estos fenómenos de crecimiento. Para ello se han desarrollado herramientas basadas en la generación de modelos de simulación del crecimiento prospectivo, es decir, observar la forma en que las ciudades se expanden y construir los escenarios de evolución tomando en cuenta variables del contexto territorial (C. Wang et al., 2018). Es por ello que, los modelos de cambio de uso se han transformado en una poderosa herramienta de análisis espacial orientada a explorar los variados mecanismos que fuerzan los cambios de uso del suelo y las variables sociales, económicas y espaciales que conducen a esto; esto servirá para proyectar los potenciales impactos ambientales y socioeconómicos derivados de estos cambios.

De acuerdo con Salazar et al (2020) se puede definir a ciertas variables que se enmarcan dentro del modelo de cambio de uso de suelo como fuerzas impulsoras principales para el crecimiento urbano. Estas variables pueden afectar potencialmente el modelo o expansión de los usos del suelo. Por ejemplo, la red vial es un factor primordial para el crecimiento de la población debido a la accesibilidad al territorio. Además, la red hídrica natural permite el riego de áreas agrícolas, mientras que las pendientes afectan tanto la ubicación de la agricultura como los asentamientos humanos.

Mendoza et al., (2002), desarrolla un estudio sobre las implicaciones hidrológicas y de pendiente del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo a nivel regional para el lago de Cuitzeo en Michoacán-México, el estudio utilizó información de los años 1975 a 2000, donde los autores llegaron a la conclusión que las condiciones hidrológicas regionales sufrieron una reducción de escorrentía y recurso hídrico, causada por el incremento poblacional, que conlleva un incremento en el consumo de agua, así como un uso inadecuado del agua para riego agrícola

y a un incremento de la cobertura acuática y subacuática que cubría 59 km² en 1975 y aumentó a 96 km² en el 2000.

Por su parte, Morales y Maturana (2019) consideran que la especulación del costo del suelo en zonas periféricas influye de manera directa en una mayor demanda de suelo vinculada a la fragmentación del mismo. Por lo tanto, los lineamientos o variables principales de la modelación como ya se mencionó determinan o condicionan la presión sobre el cambio de uso del suelo en un territorio determinado.

Mientras que, Urriza y Garriz; (2014) determinan que la operatoria del mercado y los costos del suelo conllevan una diferenciación socioespacial en el proceso de ocupación del espacio, marcada por la capacidad económica de la población para acceder a la tierra, que en el caso de Bahía Blanca Argentina se ve favorecida por la normativa urbana. De este modo, el crecimiento de la ciudad en la periferia evidencia cierta tendencia a consolidar un patrón de segregación a gran escala. De forma paralela Flamenco (2007) analizó la dinámica y escenarios del proceso de cambio de cobertura y usos de suelo, en una región de alta diversidad biológica, en el Ocote, Chiapas - México, para ello se elaboró mapas de cambio y un modelo dinámico espacial para predecir futuros escenarios, observando la proporción de cambio que una clase de uso de una cobertura puede experimentar hacia otras clases en un periodo determinado.

Todos estos estudios se apoyan principalmente en modelos basados en regresión (relación entre variables), y modelos con base en transición espacial (Suárez & Olaya, 2018). Los primeros establecen relaciones entre un amplio rango de variables predictivas y las probabilidades de cambio de uso del suelo. Generalmente, en la modelación con base en la regresión estadística se han usado aproximaciones lineales (como la regresión logística), no lineales (vinculadas a redes neuronales), y modelos aditivos generalizados (Pijanowski, et al., 2005). Por otro lado, los modelos basados en transición espacial comprenden, principalmente, las técnicas estocásticas basadas en el método de Cadenas de Markov y Autómatas Celulares (AC) (Zhou y Liebhold, 1995; Pontius y Malanson, 2005). Estos modelos asumen explícitamente que las áreas vecinas influyen en la probabilidad de transición del área o celda central. Los modelos basados en AC han permitido representar procesos que han generado la evolución de los usos de suelo urbano y regional, donde se ha experimentado un rápido crecimiento urbano producto de la pérdida de suelo agrícola, lo que ha configurado áreas urbanas cada vez más dispersas (White et al., 2018).

Bajo este contexto, el objetivo de este estudio es definir escenarios de crecimiento de la mancha urbana de la ciudad de Cuenca a través de la construcción de modelos espacio – temporales, que permitan identificar zonas que presenten tendencias urbanizables de cambio de uso de suelo sobre espacios actualmente naturales, además de interrelacionar como estas áreas se articulan al planeamiento territorial local. En este sentido, se aplicó modelos de cambio de uso de suelo basados en autómatas celulares y cadenas de Markov de acuerdo a sus bondades y capacidades idóneas de simular el comportamiento no lineal e impredecible, que caracteriza a la evolución de las ciudades.

METODOLOGÍA

El esquema metodológico configura una serie de geoprocesos que tienen como propósito definir escenarios de crecimiento de la mancha urbana de la ciudad de Cuenca a través de la construcción de modelos espacio – temporales que permitan identificar las zonas que presenten tendencia de cambio de uso de suelo para su posterior análisis y comparación con la planificación territorial local (ver figura 1):

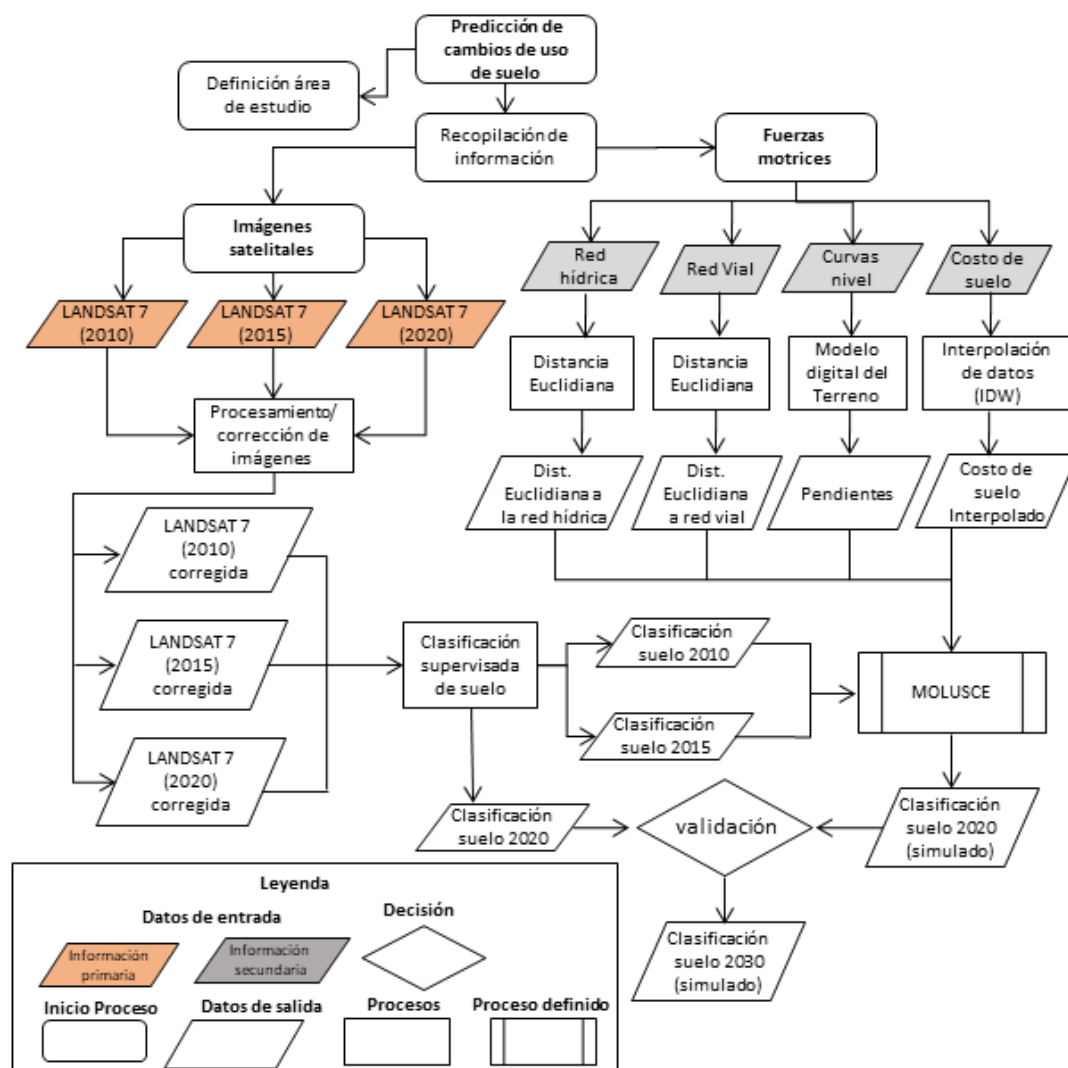


Figura 1. Diagrama de flujo de desarrollo metodológico

El cantón Cuenca es uno de los más importantes del Ecuador; se encuentra ubicado en la provincia del Azuay, entre las coordenadas 2°39' a 3°00' de latitud sur y 78°54' a 79°26' de longitud oeste, con una altitud promedio de 2550 metros sobre el nivel del mar y que en su territorio se ubican pisos climáticos que varían desde los 300 a 4560 m aproximadamente. Limita al norte con la provincia del Cañar, al sur con los cantones Camilo Ponce Enríquez, San Fernando, Santa Isabel y Girón, al oeste con las provincias del Guayas y hacia el este con los cantones Paute, Gualaceo y Sísig. Su extensión territorial es de 3665 km²; seccionada de manera política y administrativa en 15 parroquias urbanas (denominados ciudad de Cuenca) y 21 parroquias rurales (Gobierno Autónomo Descentralizado del cantón Cuenca, 2015).

De acuerdo con información del GAD de Cuenca (Gobierno Autónomo Descentralizado del cantón Cuenca, 2015), el cantón cuenta con una cobertura del 99 % en agua potable en la zona urbana y el 94 % en la rural; mientras que el alcantarillado alcanza el 94 % y 90 % respectivamente. La expansión urbana alcanzó áreas periféricas principalmente en las zonas planas de las parroquias rurales más próximas: Ricaurte, San Joaquín, Baños, Sayausí, Sinincay, Turi, El Valle, Paccha, Llacao, Nulti, Sidcay, Chiquintad y Checa. Para la delimitación del área de estudio se definieron varios criterios: la *implantación de asentamientos humanos* en las parroquias rurales colindantes, las *características topográficas* del territorio, las *zonas hidrológicas*, y la *conectividad* con la red viaria existente. (Figura 2).

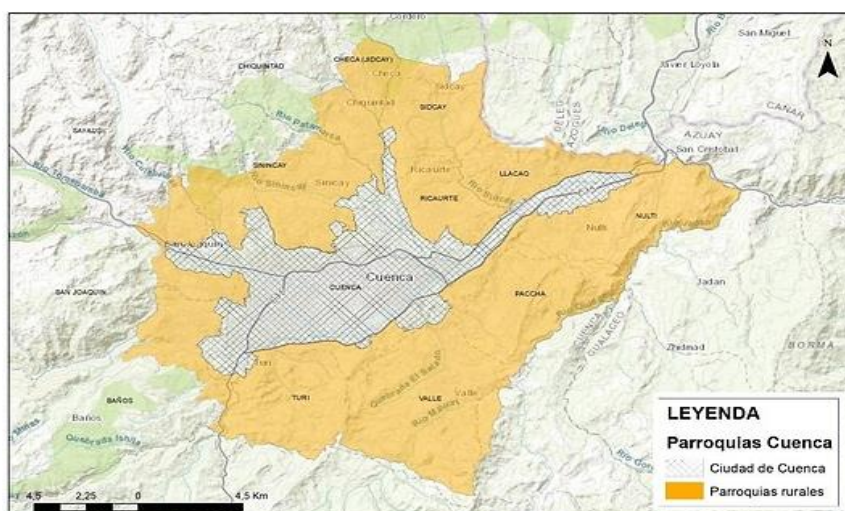


Figura 2. Parroquias del cantón Cuenca

En lo referente al clima este se define por zonas de páramo localizadas en las altas mesetas y por clima mesotérmico húmedo y semihúmedo en el resto del cantón. La temperatura promedio oscila entre los 12°C y 20°C. El fértil suelo es propicio para la agricultura. En sus valles centrales se cultiva maíz, cereales, hortalizas y una gran variedad de frutas; en el extremo occidental de la cordillera se obtienen productos tropicales como caña de azúcar, algodón, café, entre otros (Gobierno Autónomo Descentralizado del cantón Cuenca, 2015).

El crecimiento de la ciudad de Cuenca, hasta finales de la década de los 90, fue marcado por una expansión desordenada producto de la ausencia de planificación urbana y territorial y la deficiente gestión en el control municipal sobre la nueva edificación, esto permitió la construcción de la nueva vivienda y conjuntos habitacionales en sitios vulnerables a diferentes tipos de riesgo: cercanía a zonas inundables en las márgenes de ríos, zonas de altas pendientes, zonas de deslizamientos con fallas geológicas activas, zonas de condiciones especiales por su tipo de suelo, en territorios con rellenos, en zonas de drenajes naturales o quebradas, etc., esto sumado a que el cantón Cuenca se asienta sobre fallas de orden geológico y basamentos volcánicos y sedimentarios (Flores et al., 2016)

En Ecuador, a nivel local la planificación territorial se la determina de acuerdo a lo establecido por la Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión del Suelo (LOOTUGS) (Secretaría de Planificación, 2016) a través del instrumento denominado Plan de Uso y Gestión del Suelo, que entre sus lineamientos estipula que se deben establecer zonas con suelo para expansión urbana. Para el caso del cantón Cuenca en Ecuador, dentro de su propuesta de ordenanza, se ha definido la siguiente subclasificación del suelo rural (producción, protección y expansión urbana) como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Propuesta de subclasificación del suelo rural en el Cantón de Cuenca

Subclasificación del suelo	Área (ha)	Suelo rural (%)
Producción	85769,79	24,06
Protección	267205,88	75,01
Expansión urbana	3268,00	0,93
Total suelo rural	356265,31	100,00

Fuente: Gobierno Autónomo Descentralizado del cantón Cuenca, 2021

Para la definición del suelo rural de expansión urbana de Cuenca, la propuesta del Plan de Uso y Gestión calculó a través de información socio-espacial la superficie de suelo necesaria para soportar la población urbana que se incrementará en los próximos 12 años (Gobierno Autónomo Descentralizado del cantón Cuenca, 2021). Esta propuesta aplica tasas de crecimiento de población anual relacionados a censos anteriores, dando como resultado una población proyectada total de 540.855 habitantes para el año 2033 (Plan de Uso y Gestión Del Suelo Del Cantón Cuenca, 2021) (ver figura 3).

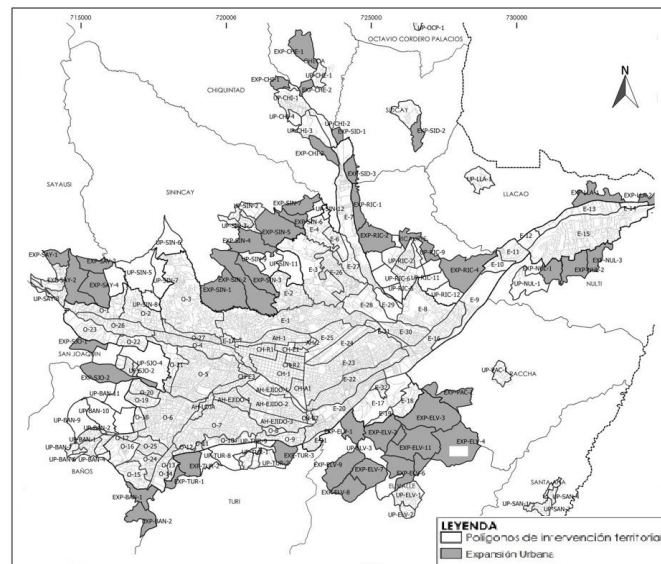


Figura 3. Propuesta de PIT urbanos y de expansión urbana
Fuente: Gobierno Autónomo Descentralizado del cantón Cuenca, 2021

Una vez analizados los lineamientos de planificación local, se determinó la fuente de los datos espaciales que describen los elementos naturales, artificiales, y las características socioeconómicas del área de estudio que se detalla en la tabla 2. La información geográfica se encuentra definida en el sistema de referencia WGS84, proyección UTM, zona 17 sur.

Tabla 2. Variables y fuentes de información

VARIABLES	FUENTE	ESCALA/RESOLUCIÓN ESPACIAL	
Imágenes satelitales	Landsat 7 2010	Colección de imágenes del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS)	30 metros
	Landsat 7 2015	Colección de imágenes del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS)	30 metros
	Landsat 7 2020	Colección de imágenes del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS)	30 metros
Fuerzas motrices	Costo del Suelo	Municipio de Cuenca	1:5000
	Pendiente	Instituto Geográfico Militar	1:50000
	Red Hídrica	Instituto Geográfico Militar	1:50000
	Red Vial	OpenStreetMap	-

Al existir una correlación directa entre el cambio de uso de suelo y la morfología urbana, el análisis de las imágenes satelitales cumplen un papel importante dentro del modelado espacial. Las imágenes satelitales están compuestas por diferentes bandas espectrales (ver tabla 3) que hacen posible localizar un suceso dentro de un territorio en una determinada temporalidad. Para el presente estudios se utilizó imágenes Landsat 7 obtenidas de la colección de imágenes del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2021), con una resolución espacial de 30 metros.

Tabla 3. Características satélite Landsat 7

Satélite	Lanzamiento	Altitud (km)	Periodicidad (días)	Sensor	Banda: Intervalo espectral (μm)	Resolución espacial (m)
Landsat 7	15/04/99	705	16	EMT+	(1) 0.45 – 0.52	30
					(2) 0.53 – 0.61	30
					(3) 0.63 – 0.69	30
					(4) 0.78 – 0.9	30
					(5) 1.55 – 1.75	30
					(6) 10.4 – 12.5	120
					(7) 2.09 – 2.35	30
					PAN 0.5 – 0.9	15

Fuente: USGS, 2021

Una vez obtenidas las imágenes satelitales se realizan las correcciones radiométricas, atmosféricas y de bandeamiento con la finalidad de restaurar líneas o píxeles con valores nulos, eliminar las distorsiones que la atmosfera introduce en los valores de radiancia que llegan al sensor desde la superficie terrestre y rectificar la ausencia de datos mostrados a través de un bandeo de franjas o líneas paralelas entre sí.

Para proporcionar un esquema de clasificación del uso de la tierra más preciso se utilizó el método establecido por Wang et al., (2021) acogiendo los enfoques tanto de la clasificación supervisada como no supervisada (clasificación híbrida) para derivar a cinco clases de uso de la tierra para la ciudad de Cuenca (ver tabla 4). Para la clasificación no supervisada, se utilizó el hiper-conglomerado (uso de un número mucho mayor de conglomerados que las clases deseadas) ya que no se conocía el número exacto de píxeles (Cihlar, 2000). Estos grupos se etiquetaron como cuerpo de agua, suelo desnudo, área construida, bosque y agricultura en los mapas de observación de Google Earth y otros mapas de uso de la tierra (MoWHS, 2008) del sitio de estudio. Se fusionaron clases espectralmente similares del mismo tipo de uso de la tierra. Para cada uno de los tipos de uso de la tierra, se generaron aleatoriamente muestras de capacitación a partir de las imágenes de satélite. Luego, se probaron los puntos de firma en busca de similitudes estadísticas (Rojas et al., 2013), que indicaron un buen grado de similitud basada en la distancia espectral. Esto indicó una mínima confusión entre los usos de la tierra y, como tal, se consideró satisfactorio para el estudio (Xue et al., 2017). La interpretación visual también se utilizó para resolver cualquier problema relacionado con píxeles mixtos y mejorar la precisión de la clasificación.

Tabla 4. Clase de uso de Suelo

Clases de uso	Descripción
Cuerpos de agua	Ríos, arroyos, estanques, lagos, reservorios, lagunas y humedales
Suelo desnudo	Suelos expuestos, rellenos sanitarios y áreas de excavación activa
Área urbana (construida)	Áreas comerciales, asentamientos urbanos, áreas industriales, edificios gubernamentales e institucionales, carreteras, superficies duras, áreas de estacionamiento, áreas recreativas, entre otros
Suelo agricultura	Tierras de cultivo de ciclos cortos y largos y huertos
Vegetación natural	Plantaciones, bosques latifoliados, bosques de coníferas.

Fuente: Wang et al., 2021

Para este caso de estudio, las fuerzas motrices se definieron a través del análisis de resultados de modelamientos vinculados al cambio de uso de suelo desarrollados a nivel local y regional expuestos por Salazar (2020), Urriza y Garriz; (2014) y Mendoza et al., (2002). La distancia a las vías y a la red hídrica se obtuvo de un análisis de proximidad utilizando herramientas de distancias euclidianas (IGAC, 2017). Para determinar los mapas de pendientes se genera un modelo digital del Terreno (MDT) mediante el uso de las curvas de nivel. Para analizar el costo de uso de suelo se genera una interpolación mediante distancia inversa ponderada la cual determina los valores de celda de cada pixel a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra. Estos puntos ponderados serán los centroides de los lotes con su correspondiente costo monetario por metro cuadrado (ver figura 4).

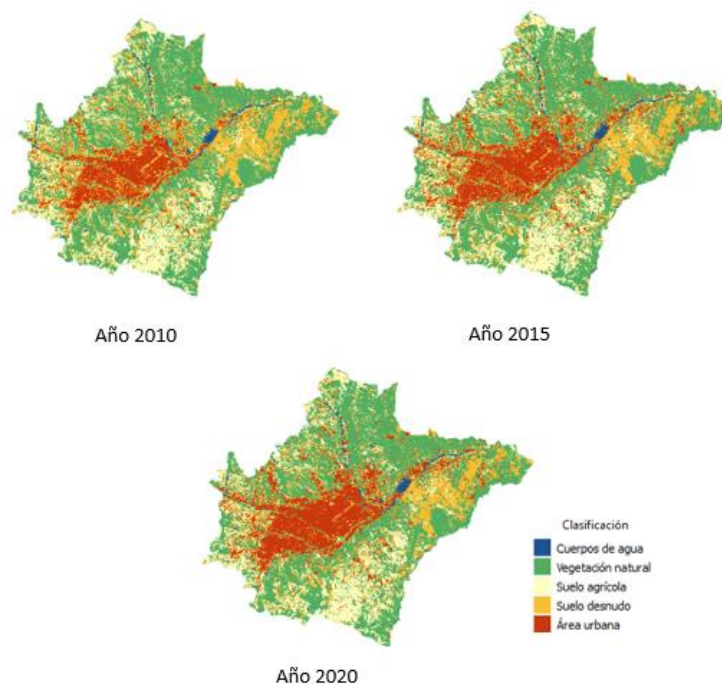


Figura 4. Clasificación del Suelo

Un punto importante previo a la modelación espacial es la generalización de información ráster homologada, es decir, cada variable deberá contar con el mismo número de filas, columnas, píxeles. Además, se normalizaron las variables con el fin de establecer valores que pueden ser comparados y operables entre sí (sin restricción alguna) para ser medidos dentro de una misma escala en tipo, rango de extensión, unidad de medidas, dispersión, etc. ya que dentro de una matriz es importante que los datos sean homogéneos (valores entre 0 y 1), por lo cual es necesario aplicar operadores o metodologías específicas recordando que los asentamientos humanos se desarrollan independientemente de la ubicación y condición geográfica (Gómez & Barredo, 2005). La siguiente ecuación establecida por (Barba & Romero, 1987) permite normalizar los valores obtenidos para cada variable:

$$X_n = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

Donde:

X_n = variable normalizada; X_i = variable analizada

X_{\min} = valores mínimos; X_{\max} = valores máximos

El proceso de modelación se lo realizó con el complemento MOLUSCE. En una primera instancia se calcula el área de cambio, es decir, los valores espaciales (superficie) que varían entre las clasificaciones de uso de suelo establecidas, teniendo en cuenta que ya se conocen las características de cada elemento clasificado. Posteriormente se realizó una prueba de correlación entre las fuerzas motrices mediante los métodos de correlación de Pearson. Esta correlación determina aspecto de similitud entre dos elementos (mejores enfoques en elementos espaciales), además de determinar el grado de cómo estas se relacionan (ver figura 5).

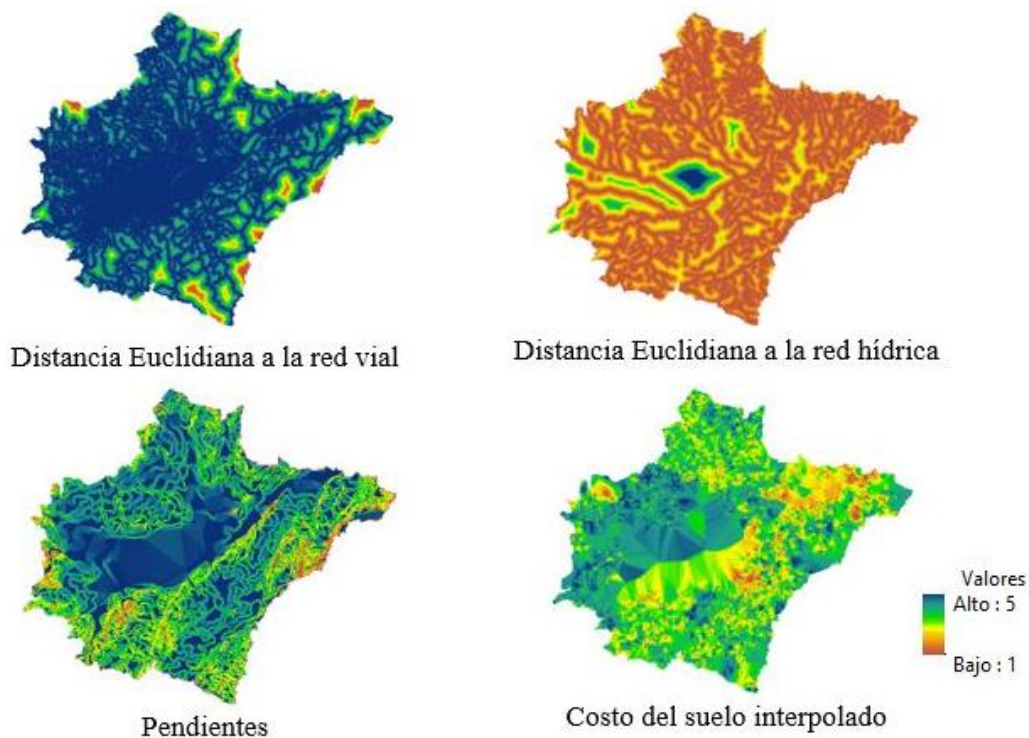


Figura 5. Fuerzas motrices normalizadas

MOLUSCE tiene la capacidad de ejecutar cuatro métodos para predecir el cambio de uso de suelo. Para este estudio se utilizó el método de Red Neural Artificial (Perceptrón Multicapa) que funciona como entrenamiento para la predicción del uso de suelo. Posterior al entrenamiento se obtuvo el valor de Kappa, como indicador del proceso; con esto y con ayuda del método de simulación de autómatas celulares se pudo ejecutar el proceso de predicción de los cambios del uso del suelo del tercer período en análisis (año 2020). Paso seguido se estableció una iteración dentro de este proceso. Para el proceso de validación se tomó el mapa de referencia (imagen tratada y clasificada del año 2020) y el mapa simulado en la etapa previa (predicción de uso de suelo para el año 2020) calculando un valor de kappa global. Posterior al análisis, y al obtener un valor de kappa adecuado, se regresa a la etapa de autómatas celulares para generar la predicción para el año 2030. Se debe resaltar que, para el año de predicción, se consideran la diferencia de temporalidad entre los años considerados para la simulación, es decir para el año 2030 se generaron 3 iteraciones: primera iteración al año 2020 (validación), segunda iteración al año 2025 y finalmente tercera iteración para el año 2030.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

La tabla 5 muestra la base del cambio correspondiente a la variación de uso de suelo entre la imagen del año 2010 y la del 2015, obteniendo un dato preliminar con respecto al aumento de suelo desnudo, uso de suelo urbano y agrícola, en comparación con la reducción de vegetación y cuerpos de agua.

Tabla 5. Análisis de variación de cambios de suelo entre los años 2010 – 2015 y 2015 - 2020

Valores estimados de cambio de uso de suelo (año 2010 - 2015)						
	2010	2015	Δ	2010%	2015%	Δ %
Cuerpos de agua	333.36 ha	325.89 ha	-7.47 ha	1,109	1,084	-0,025
Vegetación natural	13798.44 ha	13568.49 ha	-229.95 ha	45,904	45,139	-0,765
Suelo agrícola	5405.13 ha	5307.75 ha	-97.38 ha	17,981	17,657	-0,324
Suelo desnudo	6725.34 ha	5814.90 ha	-910.44 ha	22,373	19,345	-3,029
Área urbana	3797.37 ha	5042.61 ha	1245.24 ha	12,633	16,775	4,143
Valores estimados de cambio de uso de suelo (año 2015 - 2020)						
	2015	2020	Δ	2015%	2020%	Δ %
Cuerpos de agua	325.89 ha	323.73 ha	-2.16 ha	1,084	1,077	-0,007
Vegetación natural	13568.49 ha	13530.69 ha	-37.80 ha	45,139	45,013	-0,126
Suelo agrícola	5307.75 ha	5282.55 ha	-25.20 ha	17,657	17,574	-0,084
Suelo desnudo	5814.90 ha	5382.09 ha	-432.81 ha	19,345	17,905	-14,398
Área urbana	5042.61 ha	5540.58 ha	497.97 ha	16,775	18,432	16,566

Fuente: Elaboración propia extraída de la extensión Molusce (QGIS)

Como se observa en la tabla 5, existe una disminución espacial de cuerpos de agua, vegetación, suelo agrícola y suelo desnudo de 0,0025%, 0,765%, 0,324% y -3,029% respectivamente para el año 2015. Mientras que existe un considerable aumento de área urbana

de 3797,37 ha en el año 2010 a 5042,61 ha para el año 2015. En el análisis temporal comprendido entre el año 2015 – 2020 se mantienen similares las variaciones de los usos de cuerpos de agua, vegetación, suelo agrícola y suelo desnudo. Sin embargo, el cambio más drástico ocurre en el uso de suelo urbano pasando de 5042.61 ha en el año 2015 a 5540.58 ha para el año 2020.

A continuación, se modeló el potencial de transición. En este caso, se utilizó el modelo Regresión logística, estableciendo como 100 el número máximo de iteraciones y como 1 píxel el factor de vecindario (esto quiere decir que el modelo analizará una cuadrícula de 3 x 3 píxeles alrededor del píxel inicial). La muestra se define como Stratified y el número de muestras es de 1000. Posteriormente, se replica este mismo patrón para proyectar el suelo residencial para 2020, que se compara con el mapa real de ese mismo año para validar el ajuste del modelo. Una vez validado, se puede usar el modelo para proyectar y obtener, con una iteración, la simulación para 2020 o incluso con tres iteraciones, el mapa simulado para el año 2030.

De acuerdo al análisis de validación del modelo, los resultados arrojaron una correlación del 98,343% entre el modelo de crecimiento simulado año 2020 y la clasificación de uso de suelo del año 2020; además se mostró la exactitud y la relación que tienen los años comparados entre sí. Estos están representados en el porcentaje de exactitud. La exactitud del modelo de predicción está medido en el porcentaje del índice de kappa.

Una vez validado el modelo espacio temporal se identifica las predicciones de cambio de uso de suelo para el año 2030 como se muestra en la figura 6. En este sentido los resultados obtenidos fueron comparados con la propuesta local de ordenación territorial (propuesta de plan de uso y gestión de suelo) que tiene una vigencia de 12 años.

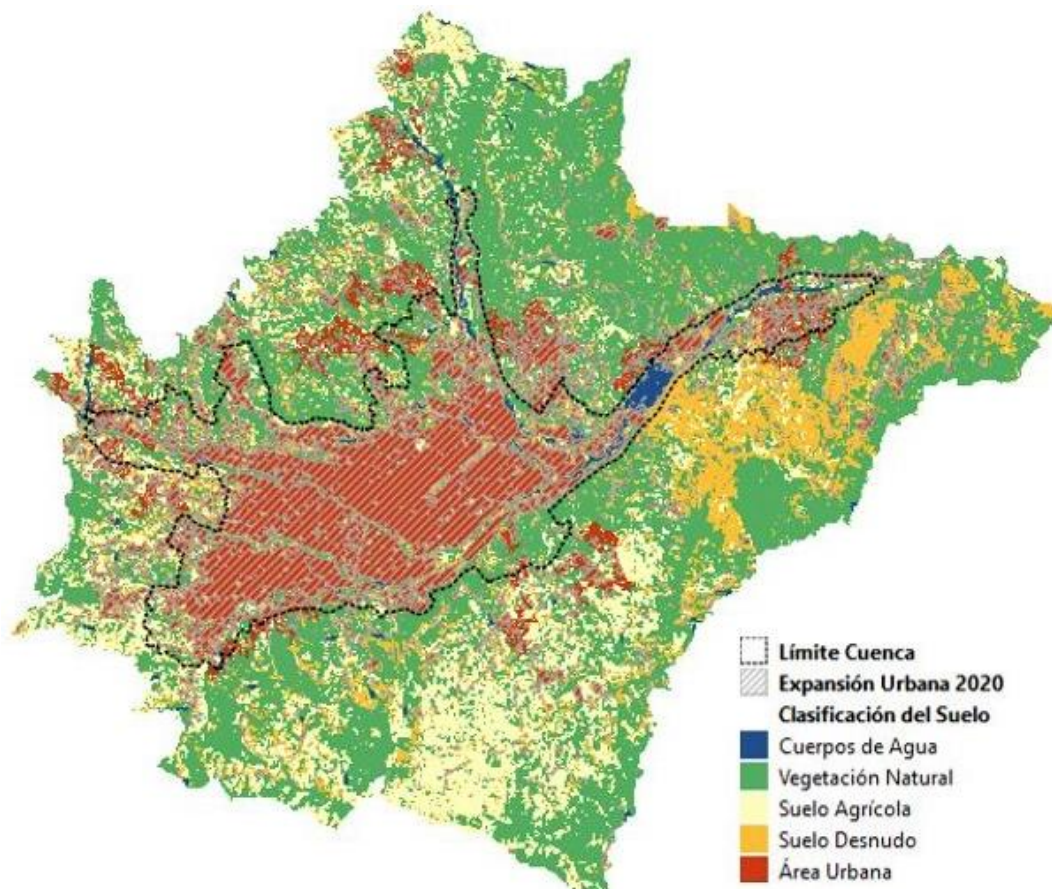


Figura 6. Predicción de cambio de uso de suelo año 2030
Fuente: Elaboración propia extraída de la extensión Molusce (QGIS)

En la tabla 6 se observan cambios importantes de uso de suelo. El área urbana aumenta en un 3,47% de superficie en comparación año 2020, estos cambios se ven reflejados indirectamente en los usos de suelo principalmente de suelo agrícola, vegetación y suelo desnudo con diferencias de superficie de -1,40%, -0,69% y -1,37% respectivamente.

Tabla 6. Análisis de variación de cambios de suelo entre los años 2020 -2030

Clasificación	2020	2030	Δ	2020%	2030%	Δ %
Cuerpos de agua	323.82 ha	319.95 ha	-3.87 ha	1,08	1,06	-0,01
Vegetación natural	13535.46 ha	13115.79 ha	-419.67 ha	45,01	43,61	-1,40
Suelo agrícola	5286.78 ha	5078.70 ha	-208.08 ha	17,58	16,89	-0,69
Suelo desnudo	5384.88 ha	4971.87 ha	-413.01 ha	17,91	16,53	-1,37
Área urbana	5543.64 ha	6588.27 ha	1044.63 ha	18,43	21,91	3,47

Fuente: Elaboración propia extraída de la extensión Molusce (QGIS)

Para establecer la jerarquía entre las fuerzas motrices analizadas, es decir cuáles de ellas se ajusta más a los valores arrojados de kappa, se procesaron nuevamente escenarios de predicción de cambio de uso de suelo utilizando únicamente cada uno de las fuerzas para generar nuevos modelos. Según lo indicado en la tabla 7, la pendiente presenta un valor de kappa más alto entre las otras fuerzas, de la misma manera el porcentaje de precisión, sin embargo, se debe tomar en cuenta que los valores no varían de manera considerable en relación al modelo de predicción general.

Tabla 7. Comparación de fuerzas motrices

Fuerzas motrices	kappa (overall)	kappa (histo)	kappa (loc)	% de precisión
Distancia E. red hídrica	0.96842	0.98448	0.98369	97.788
Costo de suelo	0.961	0.997	0.965	97.48
Pendientes	0.97141	0.98378	0.98743	97.99848
Distancia E. red vial	0.95767	0.99538	0.96211	97.03649

Fuente: Elaboración propia extraída de la extensión MOLUSCE (QGIS)

Finalmente, de acuerdo a los datos resultantes de la modelación y lo propuesto en el plan de uso y gestión de suelo (instrumento normativo de gestión territorial) se estableció una comparación de los usos potenciales del suelo que proponen estos dos instrumentos de análisis como se muestra en la siguiente tabla 8:

Tabla 8. Análisis de coincidencia espacial

Análisis de áreas	Área (ha)	Porcentaje (%)
Áreas coincidentes	832,66	25,34
Áreas no coincidentes	2453,18	74,66

Si bien es cierto, los asentamientos humanos crecen de manera desordenada, en el presente documento se develó que, de existir una o más condiciones espaciales favorables como zonas de baja pendientes, áreas accesibles a infraestructura vial, edificaciones alejadas de la red principal hídrica y un costo de suelo asequible, la predicción de que exista un asentamiento humano en años futuros es alto, independientemente del uso de suelo actual o planificado. Esta expansión continua ha excedido los límites administrativos de la ciudad de Cuenca. Los mayores frentes de crecimiento se dirigen hacia el noreste, principalmente a la parroquia rural de Ricaurte. Al oriente avanza hacia la parroquia de Nulti. Al noroeste se extiende sobre Sinincay, Sayausi y San Joaquín, formando una conurbación con las parroquias vecinas. Y hacia el sur el crecimiento se dirige hacia las parroquias El Valle, Turi y Baños.

Las fuerzas matrices que intervienen como elementos determinantes en el modelo de predicción de cambio de uso de suelo, predisponen además características que permiten un direccionamiento de acciones tanto desde la perspectiva de planificación, así como de gestión y prevención de riesgos y desastres, y el control de la especulación del costo del suelo en la zona central y las periferias, estos elementos generan una presión que se ha podido determinar con respecto al análisis de correlación. La fuerza motriz que mayor porcentaje de precisión presenta es la de pendientes con un 97,99 %, lo que implica que, esta fuerza no se considera como una limitante en lo que respecta al proceso de expansión, sino más bien este se ha adapta, lo que genera un aspecto de riesgo en lo que respecta a los asentamientos del espacio urbano. En lo concerniente a las fuerzas restantes (Distancias euclidianas de redes hídricas y viales y el costo del suelo), estas no varían de manera importante con respecto al promedio de precisión (entre 97,03 % y 97,78 %), lo que refleja que estas repercuten como elementos esenciales en el análisis de expansión del suelo urbano.

Una de las principales razones de la expansión urbana hacia la periferia es el costo del suelo. Los lugares con un costo más bajo cuentan con servicios básicos mínimos y se configuran como zonas populares (estrato socioeconómico más bajo). Paralelamente, dentro de estos espacios existen zonas que, por sus condiciones geográficas, paisajísticas, climáticas entre otras se convierten en una incipiente acumulación territorial de capital en la periferia que se traduce en la creación de nuevos polos de desarrollo que se benefician de los mercados inmobiliarios, en este sentido afectando el uso y ocupación del suelo o la conservación de espacios naturales.

En cuanto a la comparación del instrumento local de gestión territorial (propuesta del plan de uso y gestión del suelo de la ciudad de Cuenca 2019 -2031) y el modelo de predicción de cambio de uso de suelo (expansión urbana para el año 2030), existe una tendencia de crecimiento de la mancha urbana similar (coincidente) entre los dos instrumentos de análisis del 25,34% de la superficie. Es decir, existe una relación espacial de las zonas que crecerán en la próxima década, debiéndose este fenómeno a elementos que inciden tanto en la planificación y en la predicción, como lo son: el fraccionamiento de lotes, la dotación de servicios públicos de soporte (servicios básicos, líneas de transporte público, espacios públicos), además de la falta de políticas públicas de control que vigilen que un desarrollo urbano sostenible.

CONCLUSIONES

El crecimiento de la mancha urbana, en las ciudades, se presenta desde un aspecto no planificado y estratificado y provoca uno de los fenómenos más complejas para manejar a los tomadores de decisiones y a los gestores del desarrollo urbano a nivel mundial. La llamada expansión urbana repercute de mayor manera en las ciudades que se encuentran en procesos de desarrollo más acelerados en comparación con las ciudades que no presentan el mismo impulso de crecimiento, viéndose así absorbidos por este desarrollo. La ciudad de Cuenca presenta estas características al tratarse de una de las ciudades más grandes y de mayor desarrollo del Ecuador.

Esta eclipsa a las parroquias rurales que la rodean, donde incluso, la presión del avance del área urbana no ha encontrado un ritmo adecuado, considerando que su aptitud de ruralidad les otorga otras funciones que no se adaptan a lo urbano, por lo que se ven invadidas por la ciudad.

La generación de modelos predictivos de cambio de uso del suelo representa una herramienta fundamental en el apoyo de toma de decisiones, además de ser insumo esencial dentro de los instrumentos de planificación del territorio, vinculados principalmente en la mitigación y recuperación del suelo.

Elementos esenciales como el desarrollo de áreas rurales fuera de su condición de uso de suelo, el crecimiento desordenado del área urbana y aspectos de cambios de uso de suelo que no concuerdan con una planificación o usos adecuados (expansión sobre áreas naturales y zonas de riesgos de desastres) formaron parte de este estudio. En futuras línea de investigación el objetivo será desarrollar metodologías que articulen a la expansión urbana y las áreas con vocación ecológica, dentro de un entorno sostenible del suelo, que profundice el derecho a la ciudad, su consolidación y correcta gestión.

Dentro del estudio se ha identificado aspectos claros con respecto a la expansión del uso del suelo urbano. Los suelos que contienen espacios naturales son los más afectados pues han reducido su extensión y las predicciones no son muy alentadoras, estos cambios se producen por acciones de deforestación con propósitos además agrícolas y planeamiento de futuros proyectos urbanísticos, por la tendencia de crecimiento de viviendas en la zona y por las factibilidades que se presentan desde una perspectiva de accesibilidad espacial, clima y localización.

Como parte de los objetivos que propone la Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial Uso y Gestión del Suelo, entre ellos fijar los principios y reglas generales que rigen el ejercicio de las competencias de ordenamiento territorial, uso y gestión del suelo urbano y rural, y su relación con otras que incidan significativamente sobre el territorio o lo ocupen, para que se articulen eficazmente y promuevan el desarrollo equitativo y equilibrado del territorio, en este sentido en el caso de Cuenca y ante los resultados expuestos, se plantea la utilización de estas herramientas predictivas que permitan generar entendimientos y reflexiones sobre las pérdidas de espacios naturales ante el avance del suelo urbano, sobre todo en los sectores en donde se conoce que este proceso de ocupación constante y desordenado puede incluso poner en riesgo a la nueva población trasladada a estos sectores que no son aptos para recibir al suelo residencial.

REFERENCIAS

- Abad-Pérez, C., & Mosquera, G. Q. (2020). Análisis de la distribución espacial de la correlación entre el NDVI y las precipitaciones en zonas altoandinas del sur del Perú, en el periodo 2000 - 2020. *Revista Geoespacial*, 1–14.
- Cihlar, J. (2000). Document details - Land cover mapping of large areas from satellites: Status and research priorities. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 1093–1114.
- Cossio, B., & Tourn, M. (2009). Viviendas y territorio. El rol del estado en la organización territorial urbana. En *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales. Barcelona: Universidad de Barcelona*, IX, 194(82).
- Criado Nicolás, M., Santos-Francés, F., & Martínez-Graña, A. (2020). Evaluación de la sostenibilidad de la expansión urbana de Salamanca (1956-2018) a través del análisis multitemporal de cambios de uso del suelo y análisis multicriterio. *Cuaternario y Geomorfología*, 34(1–2), 23. <https://doi.org/10.17735/cyg.v34i1-2.78448>
- Flores, E, Mora, E, Salazar, J, C. J. (2016). La construcción irregular acercamiento a sus causas y efectos. *En X Congreso Online Sobre Turismo y Desarrollo / VI Simposio Virtual Internacional Valor y Sugestión Del Patrimonio Artístico y Cultural*.

- Frediani, J. (2010). La expansión residencial en áreas periurbanas del partido de La Plata. *Proyección*, 4(No. 9), 35.
- Frediani, J. (2017). Escenarios futuros de la expansión urbana en Argentina. Estudio de caso: El Partido de La Plata. *Espacios*, 2(4), 89. <https://doi.org/10.25074/07197209.4.343>
- Gobierno Autónomo Descentralizado del cantón Cuenca. (2015). Actualización Plan De Desarrollo Y Ordenamiento Territorial Del Cantón Cuenca. *GADM de CUENCA*, 981.
- Gobierno Autónomo Descentralizado del cantón Cuenca. (2021). Propuesta del Plan de Uso y Gestión de Suelo del Cantón Cuenca.
- Hernández-Flores, J. Á., Martínez-Corona, B., Méndez-Espinoza, J. A., Pérez-Avilés, R., Ramírez-Juárez, J., & Navarro-Garza, H. (2009). Rurales y periurbanos: Una aproximación al proceso de conformación de la periferia poblana. *Papeles de Poblacion*, 15(61), 275–295.
- Molinero-Parejo, R., Aguilera-Benavente, F., & Gómez-Delgado, M. (2021). Regresión Logística Geográficamente Ponderada para identificar los factores explicativos de la distribución de usos de suelo en escenarios futuros de crecimiento urbano. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 88. <https://doi.org/10.21138/bage.3052>
- Morales, M., & Maturana, F. (2019). Analysis of spatial patterns: In the urban expansion of middle-sized cities. The case of San Fernando, Chile. *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo*, 12(24). <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cvu12-24.apee>
- MoWHS. (2008). Thimphu City Development Strategy. Ministry of Works and Human Settlement. *Royal Government of Bhutan*.
- Perez, J., Ornon, A., & Usui, H. (2020). Classification of residential buildings into spatial patterns of urban growth: A morpho-structural approach. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 0(0), 1–16. <https://doi.org/10.1177/2399808320974377>
- Pombo, D. (2017). Expansión urbana acelerada en una ciudad intermedia: causas y consecuencia. Santa Rosa-La Pampa. *Universidad Nacional de Córdoba*, 114. <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/6469>
- Rojas, C., Pino, J., Basnou, C., & Vivanco, M. (2013). Assessing land-use and -cover changes in relation to geographic factors and urban planning in the metropolitan area of Concepción (Chile). Implications for biodiversity conservation. *Applied Geography*, 39(April 2018), 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.12.007>
- Salazar, E., Henríquez, C., Durán, G., Qüense, J., & Puente-Sotomayor, F. (2021). How to define a new metropolitan area? The case of Quito, Ecuador, and contributions for urban planning. *Land*, 10(4), 1–23. <https://doi.org/10.3390/land10040413>
- Salazar, E., Henríquez, C., Sliuzas, R., & Qüense, J. (2020). Evaluating spatial scenarios for sustainable development in Quito, Ecuador. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/ijgi9030141>
- Secretaría de Planificación. (2016). *LOOTUGS*.
- Suárez, G., & Olaya, L. (2018). *APLICACIÓN DE UN MODELO PREDICTIVO PARA EL ANÁLISIS DEL IMPACTO GENERADO POR EL CAMBIO DE COBERTURA URBANA EN EL MUNICIPIO DE MOSQUERA, CUNDINAMARCA*.
- Thuon, T. (2021). How formalization of urban spatial plan affects marginalized groups and resilience practices in Cambodia secondary town: A case study from Battambang. *Regional Science Policy and Practice*, February, 1–22. <https://doi.org/10.1111/rsp3.12403>
- United Nations. (2018). *Las ciudades seguirán creciendo, sobre todo en los países en desarrollo | ONU DAES | Naciones Unidas Departamento de Asuntos Económicos y Sociales*. <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/2018-world-urbanization-prospects.html>
- Urriza, G., & Garriz, E. (2014). ¿Expansión urbana o desarrollo compacto? Estado de situación en una ciudad intermedia: Bahía Blanca, Argentina. *Revista Universitaria de Geografía*, 23(2), 97–123. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-42652014000200003&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- USGS. (2021). *USGS Earth Explorer*.

- Wang, C., Wang, Y., Wang, R., & Zheng, P. (2018). Modeling and evaluating land-use/land-cover change for urban planning and sustainability: A case study of Dongying city, China. *Journal of Cleaner Production*, 172, 1529–1534. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.10.294>
- Wang, S. W., Munkhnasan, L., & Lee, W. K. (2021). Land use and land cover change detection and prediction in Bhutan's high altitude city of Thimphu, using cellular automata and Markov chain. *Environmental Challenges*, 2(December 2020). <https://doi.org/10.1016/j.envc.2020.100017>
- Wang, Y. (2019). Scenario-based modelling for urban sustainability focusing on changes in cropland under rapid urbanization: A case study of Hangzhou from 1990 to 2035. *The Science of the Total Environment*, 661, 422–431. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.01.208>
- White, R., Engelen, G., & Uljee, I. (2018). Modeling Cities and Regions As Complex Systems: From Theory to Planning Applications. *The Official Journal of the Southern Regional Science Association*, 48, 137–144. www.srsa.org/rrs
- Xue, W., Jungang, G., Yili, Z., Linshan, L., Zhilong, Z., & Paudel, B. (2017). Land Cover Status in the Koshi River Basin, Central Himalayas. *Journal of Resources and Ecology*, 8(1), 10–19. <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2017.01.003>
- Yang, X. (2003). Remote sensing and GIS for urban analysis: An introduction. In *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* (Vol. 69, Issue 9, pp. 593–598).