

Artículo de investigación

Modelización espacial prospectiva en la cuenca del río Luján, Argentina. Expansión urbana, conectividad, cambios en la cobertura de la tierra y riesgos ambientales hacia el 2030

Gustavo D. Buzai, Noelia Principi, Eloy Montes Galbán, Luis Humacata

Universidad Nacional de Luján, Instituto de Investigaciones Geográficas / CONICET

E-mail: gdbuzai@conicet.gov.ar - noeliaprincipi@gmail.com - emontesgalban@conicet.gov.ar - luishumacata@hotmail.com

Recibido: 06/09/2024; Aceptado: 11/11/2024; Publicado: 23/12/2024

Resumen

La Geografía como ciencia aplicada se apoya en la utilización de métodos cuantitativos que permiten lograr modelos para comprender las configuraciones espaciales presentes y sus tendencias futuras. Apoyado en esta perspectiva el presente trabajo focaliza su estudio en la cuenca del río Luján y sus áreas urbanas con la finalidad de obtener resultados prospectivos de su configuración espacial hacia el 2030. Estos resultados que muestran la potencialidad del crecimiento urbano, análisis de conectividad, cambios en la cobertura de la tierra y riesgos ambientales se presentan como herramienta de planificación regional y urbana del área de estudio.

Palabras clave: Cuenca del río Luján, Análisis espacial, Análisis regional, Geografía Aplicada, Modelos espaciales

Prospective spatial modeling of the Lujan river basin, Argentina. Urban sprawl, connectivity, land cover changes and environmental risks towards 2030

Abstract

Geography as an applied science is based on the use of quantitative methods that allow models to be developed to understand present spatial configurations and their future trends. Based on this perspective, this work focuses its study on the Lujan River basin and its urban areas with the aim of obtaining prospective results of its spatial configuration towards 2030. These results, which show the potential for urban growth, connectivity analysis, changes in land cover and environmental risks, are presented as a tool for regional and urban planning in the study area.

Keywords: Lujan river basin, Spatial analysis, Regional analysis, Applied Geography, Spatial Models

1. Introducción

El presente trabajo desarrolla aspectos teóricos y metodológicos que permiten la construcción de configuraciones espaciales prospectivas en una escala de análisis regional. El sustento teórico se encuentra apoyado en una Geografía Aplicada que tiene como objetivo el logro soluciones espaciales a problemáticas en la cual se relaciona la sociedad y su medio (Pacione, 1999; Phlipponneau, 2001).

Para ello se avanza con el apoyo de la teoría de los sistemas complejos (García, 2006) y en un nivel de focalización espacial que se hace operativo en el materialismo sistémico (Bunge, 2012, 2014). La construcción de una totalidad organizada resulta posible al modelar la realidad considerando a la superficie terrestre como materialidad concreta de la dimensión espacial.

Los procedimientos metodológicos se basan en la cuantificación, tanto en la aplicación del modelado cartográfico en estructuras *raster* como en la aplicación del análisis estadístico multivariado en estructuras vectoriales, para conformar un panorama síntesis de las tendencias de organización espacial que influirán en el desarrollo futuro.

Los objetivos de la investigación surgen ante la propuesta de realizar una modelización espacial prospectiva en la cuenca del río Luján hacia 2030 en concordancia con las metas de la Agenda 2030 del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), al cual suscribe la República Argentina.

El proyecto contempla el análisis espacial de aspectos correspondientes a la urbanización, la conectividad poblacional, los riesgos ambientales y el patrimonio cultural y natural, todos ellos incorporados en Objetivo 11 de dicha Agenda (Naciones Unidas, 2016). En este artículo se presentan resultados obtenidos a nivel cuenca correspondientes a la modelización del crecimiento urbano, conectividad y accesibilidad, cambios en la cobertura de la tierra y, a nivel urbano para Luján, potenciales conflictos entre usos del suelo y riesgos de inundaciones.

En todos los casos se obtendrán resultados como escenarios prospectivos hacia el año 2030, analizando su génesis y generando una herramienta para la planificación regional y urbana del área de estudio. En este contexto se incluyen resultados dentro del objetivo general que consiste en modelar la potencial configuración espacial de la estructura regional de la cuenca del río Luján y analizar la influencia de la urbanización, en la conectividad general y los riesgos ambientales.

Asimismo, se consideran tres objetivos específicos. El primero correspondiente al *análisis urbano* al determinar y analizar la expansión urbana hacia 2030, el segundo a la *conectividad* al caracterizar el espacio relativo a partir de los potenciales flujos que genera la localización poblacional en la infraestructura gris y el tercero a las zonas de riesgo al modelar las inundaciones como problemática ambiental central del área de estudio.

Los resultados obtenidos permitirán una aproximación hacia una *síntesis geográfica* base de diagnósticos y de propuestas para el ordenamiento territorial del área de estudio.

3. Área de estudio

3.1. Cuenca del río Luján

El área de estudio corresponde a la cuenca del río Lujan, una subcuenca que pertenece a la Gran Cuenca del Plata. Tiene una superficie de 3.761 km² y se encuentra contenida en varios partidos (en la Provincia de Buenos Aires coincidente espacialmente con municipios) del sector noroeste del Gran Buenos Aires. Al norte limita con las cuencas del arroyo de la Cruz y del río Areco; al oeste y al sur con la cuenca del río Salado y al sureste con la cuenca del río Reconquista.

La delimitación de la cuenca del río Luján fue realizada por Lanzelotti & Buzai (2015) a partir de ajustar los límites definidos en Buzai (2002) y Paso Viola (2013) mediante la utilización de imágenes satelitales SRTM y ASTERGDEM corregidas mediante interpretación visual.

Los partidos que integran la cuenca son: Campana, Escobar, Exaltación de la Cruz, General Rodríguez, José C. Paz, Luján, Malvinas Argentinas, Mercedes, Moreno, Pilar, San Andrés de Giles, Carmen de Areco, Chacabuco, San Fernando, Suipacha y Tigre.

La topografía general de la cuenca es suave, las máximas alturas se localizan en el oeste, llegando aproximadamente a los 60 msnm y descendiendo en sentido sureste hasta alcanzar el nivel del mar. De acuerdo al Instituto Nacional del Agua (2007) la cuenca puede dividirse en tres tramos (Figura 1): *la cuenca superior* que se extiende desde las nacientes hasta el municipio de Luján, específicamente en la localidad de Jáuregui, con una pendiente media del tramo de unos 0,45 m/km; *la cuenca media*, se extiende hasta el municipio de Pilar coincidiendo con el cruce del río con la Ruta Nacional N° 8, con una pendiente media del tramo de 0,36 m/km, y finalmente *la cuenca inferior*, se extiende hasta el municipio de Tigre, donde el río Luján desemboca en el Delta del Paraná, poco después del cruce de la Ruta Nacional N° 9, cuya pendiente media es de 0,04 m/km.

El curso fluvial principal de la cuenca es el río Luján, que realiza su recorrido por la planicie ondulada de la Pampa, nace en de la confluencia del arroyo de Los Leones y del Durazno y la Cañada de Castilla, en el municipio de Carmen de Areco, y una pequeña superficie del municipio de Chacabuco, con un recorrido en dirección sudoeste-noreste de 115 kilómetros hasta su desembocadura en el delta del Paraná, y luego gira en dirección sudeste y recorre 42 km hasta llegar al Río de la Plata.

El río Luján se presenta como hidrografía de llanura con escasa pendiente, siendo que de acuerdo a Paso Viola (2016) sus cotas fluctúan entre los 46 y 58 m con una media del tramo superior que ronda los 47 m. A través de su recorrido se pueden apreciar paisajes predominantemente urbanos, rurales y seminaturales como usos del suelo que presentan la base para la identificación de potenciales conflictos espaciales.

Figura 1. Área de estudio
Cuenca del río Luján, Buenos Aires, Argentina



Fuente: Realizado por Noelia Principi

3.2. Partido y áreas urbanas

El Partido de Luján (Municipio) es una unidad político-administrativa de tercer orden de la República Argentina siendo uno de los 135 municipios en que se divide la Provincia de Buenos Aires.

Tiene una superficie de 777,13 km² con 111.008 habitantes (48,42% varones y 51,58 mujeres) (INDEC, 2024) y su principal área urbana y cabecera es la ciudad de Luján, clasificada como aglomeración de tamaño intermedio (ATI) por Vapñarsky & Gorjovsky, 1990) y que actualmente alcanza los cien mil habitantes. Los grandes grupos de edad indican que su población está compuesta por un 21,77% entre 0 y 14 años, 66,31% de 15 a 64 años y 11,92% de 65 años y más.

El Municipio de Luján se encuentra a 60 km. al Oeste de Buenos Aires y su localización en el espacio absoluto se considera en 34°33'59''Sur y 59°06'53''Oeste, coordenada ubicada en el centro de la ciudad de Luján. El área urbana del municipio está compuesta por una ciudad de tamaño intermedio (Luján), una serie de aglomeraciones urbanas de menor tamaño (Carlos Keen, Cortines, Lezica y Torrezuri, Olivera, Open Door, Torres, Villa Flandria Sur o Jauregui, Villa Flandria Norte o Pueblo Nuevo) y las construcciones dispersas de las urbanizaciones cerradas.

La ciudad de Luján es el principal centro religioso nacional, siendo la Virgen de Luján (patrona de Argentina, Uruguay y Paraguay) una de las advocaciones con las que el catolicismo venera a la Virgen María, por lo tanto, es un importante centro cultural y turístico nacional e internacional. Asimismo, cuenta con una gran variedad de actividades económicas (Puente, 1999): es una zona con un alto potencial agropecuario que desarrolla con horticultura y fruticultura, ganadería general y una importante orientación deportiva (caballerizas, haras, studs), tambos y agricultura extensiva con trigo, maíz, girasol y soja. Cuenta con una importante tradición industrial inicialmente textil a las cuales se le sumaron alimenticias y manufactureras.

Figura 2. Áreas urbanas del municipio de Luján



Fuente: Realizado por Gustavo Buzai

4. Aplicación regional

4.1. Expansión urbana

La expansión urbana es un fenómeno urbano de gran significatividad y trascendencia (Mitchell, 2001). El análisis y la modelización espacial del crecimiento urbano y cambios de usos del suelo genera resultados de suma utilidad para la toma de decisiones en materia territorial (Gómez Delgado *et al.*, 2012; Buzai & Baxendale, 2013). En este sentido, resulta necesario comprender los cambios desde una perspectiva histórica, es decir, evaluar cómo fue la dinámica de la ocupación del suelo en periodos anteriores, detectando las categorías que presentaron los mayores incrementos y cómo fue su impacto en el ritmo de cambio de otros usos del suelo (Pontius *et al.*, 2004; Humacata, 2022). El análisis centrado en la expansión urbana, radica en que es un fenómeno que genera los mayores impactos en los espacios a hacia los cuales se dirige, teniendo consecuencias negativas sobre actividades agropecuarias y coberturas naturales (Matteucci *et al.*, 2006).

Las propuestas orientadas a la modelización espacial prospectiva tuvieron un gran desarrollo en los últimos años, principalmente a partir de su integración con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en un claro avance desde las técnicas temporales de *chess-map* (Baxendale & Buzai, 2011). A partir de aquí, surgen propuestas basadas en modelos matemáticos y estadísticos, u otros como los autómatas celulares, redes neuronales, cadenas de markov, modelado basado en agentes, entre otros, que pueden aplicarse individualmente o a partir de una combinación, lo cual resulta, en este caso, un enfoque basado en modelos híbridos.

A partir de estas consideraciones, la aplicación se enfocará en desarrollar un modelo híbrido para la predicción del crecimiento urbano basado en Cadenas de Markov, Evaluación Multicriterio y Autómatas Celulares. De esta manera, se complementa el análisis multitemporal con el análisis multivariable para la generación de una modelización espacial que tenga en cuenta la dinámica real de la ocupación del suelo (Paegelow *et al.*, 2003).

Desde un punto de vista metodológico, el modelada utilizando autómatas celulares y cadenas de Markov permite evaluar el estado actual de las categorías de usos de cada celda o pixel y los estados de las celdas vecinas de manera tal que pueda generar una predicción del estado futuro más probable. Se utilizó este modelo para la modelización prospectiva del crecimiento urbano y cambios de usos del suelo en el periodo comprendido entre los años 1990 y 2030, considerando la dinámica histórica de los patrones de ocupación del suelo. Para su aplicación, se utiliza el mapa de usos del suelo del año 2010, el archivo de áreas de transición entre 1990 y 2010, y las capas temáticas de idoneidad o aptitud al cambio obtenidos a partir de la metodología de evaluación multicriterio. Se especificó la cantidad de veinte iteraciones (correspondientes a los años de proyección desde 2010), y un filtro de contigüidad estándar de 5x5 como definición de vecindad. Los procedimientos de modelización espacial prospectiva permitieron generar como resultado final, la proyección de la expansión urbana y cambios de usos del suelo hacia el año 2030.

A partir de los procedimientos realizados, los resultados obtenidos nos indican que las áreas urbanas de la cuenca del río Luján ocupaban en el año 2010, un total de 52.884 ha., siendo esta cifra de un 14% con respecto a toda la superficie de la región. La proyección para el año 2030 es de 77.445 ha., con un aumento neto de 24.561 ha., ocupando un 20,58% del área de estudio. Esto significa un incremento del 46,44%, con respecto a la superficie urbana en 2010.

Las dos modalidades de áreas urbanas proyectan un aumento continuo de superficie. Las áreas urbanas compactas pasarán de una superficie de 34.984 ha. en 2010 a 43.339 ha. en 2030. Por su parte, las áreas dispersas, serán las que presentarán los mayores aumentos, con una superficie de 34.106 ha.

para 2030, por lo que se estima que dupliquen la cantidad de hectáreas con respecto al crecimiento compacto, ya que se registra un aumento absoluto de 16.206 ha., y de 8.551 ha., respectivamente. Si comparamos la superficie con respecto al año 2010, surge que se produce un incremento del 90% para las áreas dispersas y del 24% para las áreas compactas.

El crecimiento urbano que se proyecta para el año 2030, señala una clara diferenciación espacial según los sectores de la cuenca, cuya tendencia remarca una intensificación de la expansión urbana en el sector de la cuenca baja, para ambas modalidades, y un fuerte aumento de las áreas dispersas en el sector de la cuenca alta y cuenca media.

Figura 3. Evolución de la superficie urbana compacta (2010-2030) en Ha. según sectores

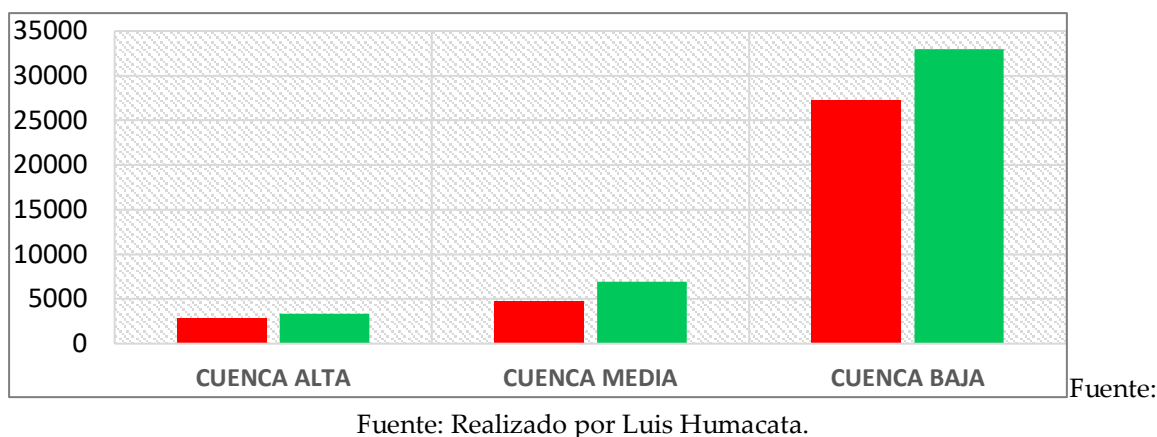
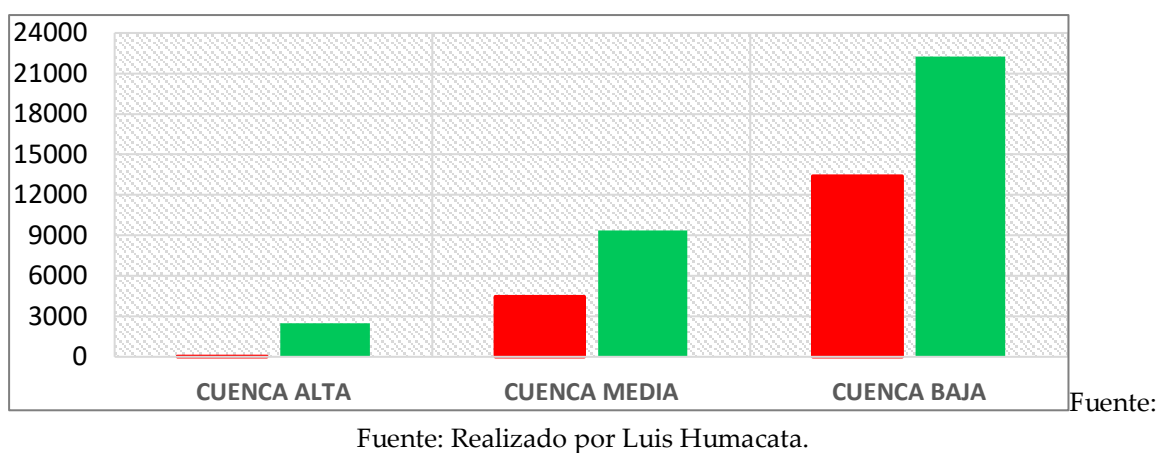


Figura 4. Evolución de la superficie urbana dispersa (2010-2030) en Ha según sectores



Si analizamos cómo será el crecimiento de las áreas compactas según sectores (Tabla 1), la tendencia indica que se mantiene un fuerte aumento de superficie en el sector de la cuenca baja, con un total de 5.721 ha. que se suman a este uso, alcanzando para el año 2030, una ocupación del 25% con respecto al área total del sector. Si comparamos las áreas de expansión dentro de cada sector, surge que el mayor aumento se dará en el sector de la cuenca media, alcanzando un incremento del 44%, con respecto a la superficie registrada en el mismo sector para el año 2010. Por su parte, el sector de la cuenca alta, presenta un leve incremento del 18%.

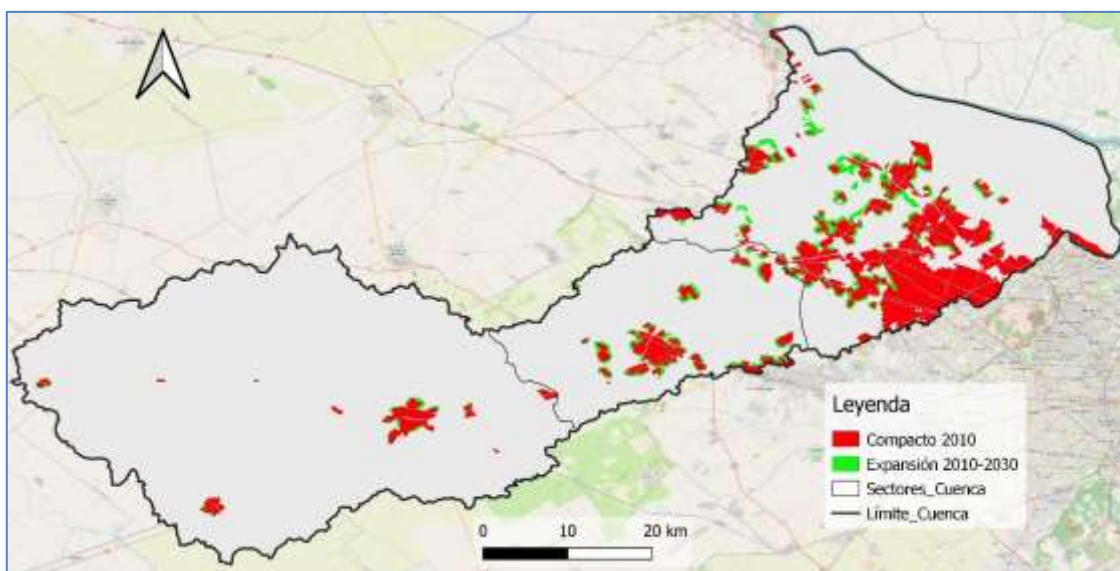
Tabla 1. Evolución de la superficie urbana compacta (2010-2030), según sectores (Ha).

Sector de la cuenca	Área del sector (Ha)	Compacto 2010 (Ha)	Compacto 2030 (Ha)	% sobre total sector 2010	% sobre total sector 2030	Incremento 2010-2030 (%)
Alta	184.168	2.828	3.348	1,54	1,82	18
Media	61.343	4.800	6.914	7,82	11,27	44
Baja	130.556	27.260	32.981	20,88	25,26	21
Total	376.067	34.888	43.242	30	38	83

Fuente: Realizado por Luis Humacata.

La distribución espacial de las áreas de expansión se presenta bajo un patrón de contigüidad a las áreas urbanas preexistentes (Figura 5). En este sentido, el modelo proyecta adecuadamente la tendencia a la ocupación de las áreas próximas, siguiendo el esquema de crecimiento compacto. En la cuenca baja, las áreas de expansión se dan en el sector centro y oeste, siendo los partidos de Escobar y Pilar aquellos que registran las mayores superficies, donde el proceso de conurbación conecta las ciudades cabeceras de ambos municipios. En la cuenca media, el crecimiento se producirá principalmente en la periferia de la ciudad de Luján, aunque se presentan áreas de expansión en las localidades menores. Este comportamiento también se produce en el sector de la cuenca alta, donde la ciudad de Mercedes presenta la mayor expansión.

Figura 5. Expansión urbana compacta (2010 y 2030).



Fuente: Realizado por Luis Humacata.

El crecimiento de las áreas urbanas dispersas se producirá en los tres sectores de la cuenca (Tabla 2). En términos de crecimiento absoluto, el sector de la cuenca baja registrará los mayores aumentos, alcanzando un total de 8.849 ha., cifra que duplica el valor alcanzado para el sector de la cuenca media, aunque si consideramos dicha expansión dentro de cada sector, la ocupación de las áreas urbanas dispersas será del 17% y 15%, respectivamente, siendo de un 1,35% para la cuenca alta. No obstante, cuando analizamos la proporción de expansión con respecto a la superficie de esta categoría para el año 2010, surge que es este sector, el que presenta los mayores incrementos, pasando de 47

ha., en el año 2010, a registrar un valor de 2.484 ha. para 2030. Los otros sectores también registran un fuerte incremento, siendo del 111% y del 66%, para la cuenca baja y media, respectivamente.

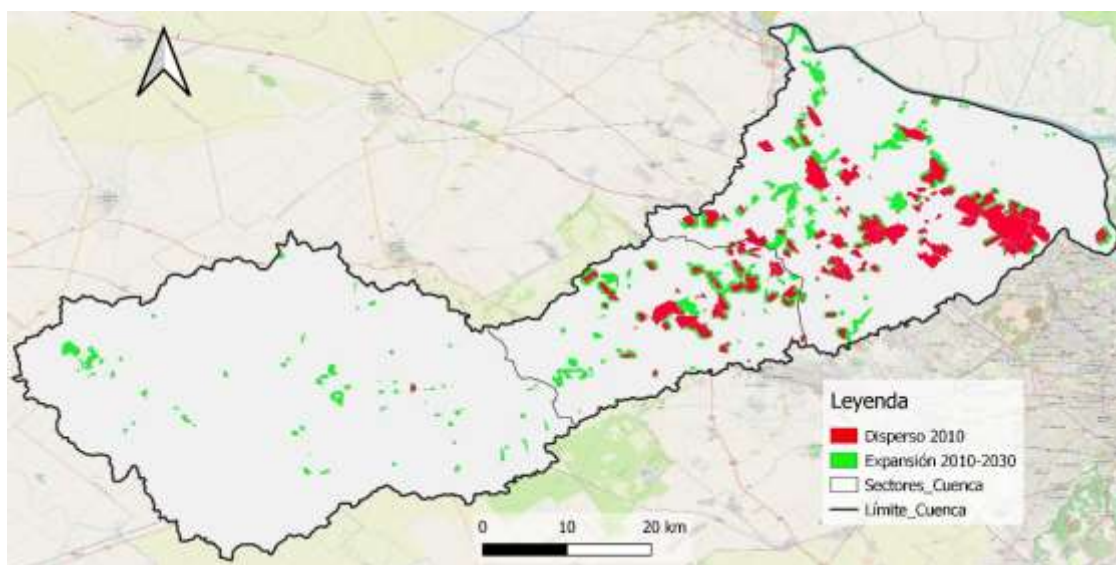
Tabla 2. Evolución de la superficie urbana dispersa (2010-2030), según sectores (Ha).

Sector de la cuenca	Área del sector (Ha)	Disperso 2010 (Ha)	Disperso 2030 (Ha)	% sobre total sector 2010	% sobre total sector 2030	Incremento 2010-2030 (%)
C. ALTA	184.168	47	2.484	0,03	1,35	5.157
C. MEDIA	61.343	4.448	9.367	7,25	15,27	111
C. BAJA	130.556	13.403	22.252	10,27	17,04	66
TOTAL	376.067	17.900	34.104	18	34	5334

Fuente: Realizado por Luis Humacata.

El patrón de distribución espacial de las áreas de expansión de esta categoría presenta una tendencia a una mayor dispersión, profundizando el modelo de crecimiento disperso. En este sentido, los partidos de Campana, Escobar y Pilar, serán aquellos que registren las mayores superficies de expansión dentro del sector de la cuenca baja, con un crecimiento en sentido este-oeste. Asimismo, en el partido de Tigre se registran áreas de expansión contiguas a las urbanizaciones cerradas preexistentes, cuya tendencia también se registra en el sector noreste de la cuenca media. Por último, la cuenca alta es el sector más dinámico y el que presenta la mayor dispersión de este tipo de urbanizaciones.

Figura 6. Expansión urbana dispersa (2010 y 2030).



Fuente: Realizado por Luis Humacata.

4.1. Accesibilidad y conectividad

En este apartado se aborda el análisis de conectividad y accesibilidad de los partidos que conforman la cuenca del río Luján lo cual materializa el principio de la interacción espacial, el cual indica que lo que ocurre o se encuentra en un lugar no es ajeno a lo que ocurre o se encuentra en otro (Pumain & Saint-Julien (2014).

Existen diferentes métodos de análisis espacial cuantitativo regional que permiten caracterizar y analizar el espacio relativo o funcional que se produce a partir de los vínculos en red, tanto en situaciones reales e ideales (Principi, 2018). La metodología utilizada combina herramientas de análisis espacial cuantitativo a través de la Teoría de Grafos y Sistemas de Información Geográfica (SIG). El objetivo es evaluar cómo la red de transporte actual afecta la accesibilidad entre los partidos, y la cohesión en el espacio geográfico (Buzai *et al.*, 2003). Se tomó como base el trazado de las rutas nacionales y provinciales que atraviesan esta área para construir un grafo representativo de la red.

El cálculo de la accesibilidad llevó a definir inicialmente las rutas en la cuenca y se construyó un grafo donde los nodos representan los partidos y los arcos las rutas que los conectan. Las distancias entre partidos se midieron en kilómetros y también se calculó el tiempo de viaje considerando velocidades promedio de 100 km/h en rutas y 50 km/h en avenidas. A partir de la fórmula: t (tiempo) = d (distancia) / v (velocidad), se obtuvieron los cálculos de tiempo considerando las distancias reales de todos los partidos.

A partir de estos datos, se generaron matrices de distancias ideales (medidas en línea recta) y distancias reales (considerando la distancia real por rutas).

Fue aplicado el índice beta (β), para medir la conectividad entre nodos en una red, con el objetivo de evaluar la cohesión del grafo en términos de accesibilidad (Cardozo *et al.*, 2009). El cálculo de β en la cuenca se aplicó al grafo de rutas nacionales y provinciales y luego se agregaron los partidos limítrofes que se encuentran fuera de la cuenca, a fin de conocer la realidad de la conexión entre los partidos. El índice β señala que un aumento en el número de arcos en la red, representa una mayor conectividad entre los nodos, y surge de dividir el número de arcos (a) con el número de nodos (n): $\beta = a/n$

Este índice puede ser comparado con el valor máximo posible, que indica la máxima conexión que podría tener la red; y se realiza a partir de la siguiente fórmula: Máximo de $\beta = n.(n-1)/2$

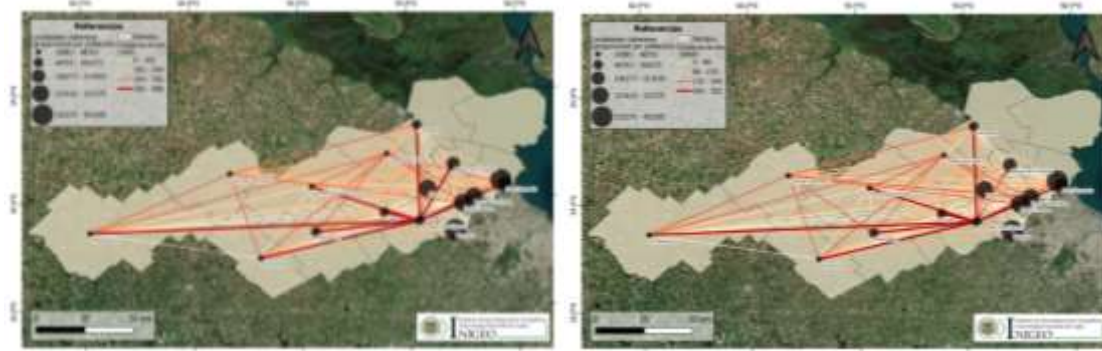
El análisis de accesibilidad en la cuenca del río Luján reveló resultados importantes sobre la conectividad y la accesibilidad entre los partidos. En primer lugar, el grafo construido a partir de las rutas nacionales y provinciales mostró que los partidos con mayor accesibilidad son General Rodríguez, Luján y Pilar, debido a su ubicación estratégica en el área central del área de estudio y a la presencia de rutas importantes que conectan con otros partidos dentro y fuera de la cuenca.

Las matrices de distancias ideales y reales mostraron diferencias significativas. En la mayoría de los casos, la distancia real (Figura 7a) entre los partidos es considerablemente mayor que la distancia ideal, en línea recta (Figura 7b), lo que refleja la falta de rutas directas o eficientes en algunos sectores de la cuenca. Estas diferencias se reflejan tanto en términos de kilómetros como de tiempo de viaje, lo que afecta la accesibilidad general de algunos partidos.

Figura 7. Flujos entre partidos de la cuenca

b) cálculo con distancias reales en km.

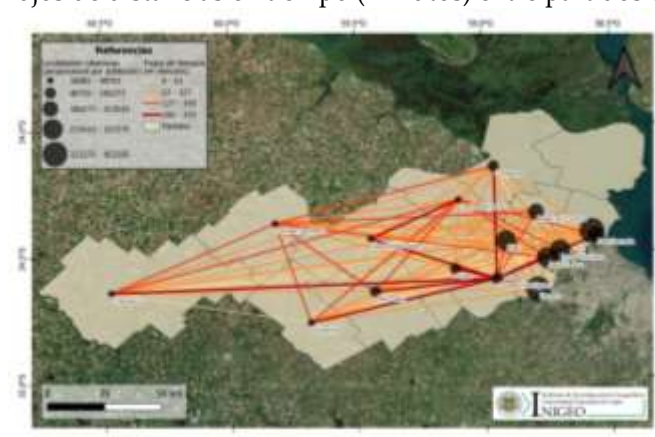
c) cálculo con distancias ideales en km.



Fuente: Realizado por Noelia Principi

El análisis del tiempo de viaje entre los partidos es crucial para entender el espacio relativo y cómo las fricciones espaciales (como la calidad de las rutas y la velocidad de viaje) influyen en la distribución espacial. Se observó que algunos partidos, como Chacabuco, presentan tiempos de viaje mucho más largos en comparación con partidos como Luján y Pilar, que tienen mejores conexiones y menor tiempo de viaje hacia otros partidos (Figura 8).

Figura 8. Flujos de distancias en tiempo (minutos) entre partidos de la cuenca



Fuente: Realizado por Noelia Principi

El índice beta aplicado a la red interna de la cuenca mostró un valor moderado. El grafo de la cuenca presenta 22 arcos y 16 nodos o partidos:

$$[1] \quad \beta = 22/16 = 1,37$$

Luego se calculó el valor máximo posible de β :

$$[2] \quad \beta(\max) = 16*(16-1)/ 2 = 120$$

El siguiente cálculo representa el grafo con partidos externos a la cuenca. A los 16 partidos de la cuenca se le suman 9 que están fuera de la misma, y 19 arcos más: $\beta = 41/25 = 1,64$

Si consideramos una conexión ideal, deberían agregar 16 arcos más, y su índice beta sería el siguiente:

$$[3] \quad \beta = 57/25 = 2,28$$

Para determinar el porcentaje de conexión existente, se aplicó una regla de tres simple:

$$[4] \quad X = (100 * 1,64) / 2,28 = 71,93\%$$

Este resultado, permite concluir que la conectividad dentro del territorio es medianamente alta, aunque no es óptima. Al ampliar el análisis incluyendo partidos fuera de la cuenca, el índice *beta* aumentó, lo que demuestra que la red de rutas en la cuenca se beneficia de la conectividad con partidos vecinos, especialmente aquellos ubicados en el norte del Gran Buenos Aires, como San Fernando y Tigre.

Los resultados del análisis de accesibilidad y conectividad en la cuenca del río Luján proporcionan información importante sobre la estructura espacial y las oportunidades de mejora en la infraestructura de transporte. Los partidos con mejor accesibilidad, como General Rodríguez, Luján y Pilar, tienen mejor conexión a través de rutas nacionales y provinciales, lo que les otorga una ventaja significativa en términos de movilidad y acceso a servicios.

Luján, por ejemplo, debido a su ubicación central en el área de estudio y su conexión a importantes rutas como la Ruta Nacional N° 7, se destaca por su gran accesibilidad. Esta situación favorece su rol como un centro regional, lo que le permite tener una mayor interacción espacial con otros partidos de la cuenca y facilita el movimiento de bienes y servicios.

Por otro lado, partidos como Chacabuco y Carmen de Areco, en el extremo oeste de la cuenca, presentan una accesibilidad más baja, lo que los coloca en desventaja respecto a su integración en la red de transporte de la cuenca. Esto se debe a la mayor distancia que los separa de los centros más importantes, y a la falta de rutas directas que conecten estos partidos con el resto de la cuenca. Esta situación podría limitar su desarrollo económico y su capacidad para atraer inversiones o mejorar la calidad de vida de sus habitantes.

El índice beta mostró que la red de rutas en la cuenca no es completamente eficiente, ya que existen partidos que están desconectados o que tienen conexiones limitadas con otros nodos importantes de la cuenca. Esto sugiere la necesidad de mejorar la infraestructura vial en algunas áreas para optimizar la conectividad y reducir los tiempos de viaje entre partidos. La ampliación de rutas o la mejora de las existentes podrían aumentar significativamente la cohesión en la red de transporte de la cuenca.

Una de las principales conclusiones que se puede extraer de este análisis es la importancia de la infraestructura vial en el desarrollo regional. Partidos con mejor accesibilidad tienen más oportunidades de desarrollo económico, ya que pueden atraer inversiones, mejorar la movilidad de su población y facilitar el acceso a bienes y servicios. Por el contrario, aquellos con menor accesibilidad enfrentan mayores dificultades para integrarse en el sistema regional, lo que puede llevar a un aislamiento económico y social.

Este análisis también resalta la importancia de considerar la accesibilidad en la planificación territorial y en la toma de decisiones sobre inversiones en infraestructura. Mejorar la conectividad entre partidos es esencial para asegurar un desarrollo equilibrado en la cuenca, ya que puede reducir las disparidades entre los partidos más desarrollados y los que enfrentan mayores dificultades en términos de accesibilidad.

El estudio de la accesibilidad en la cuenca del río Luján reveló desigualdades en términos de conectividad entre los partidos que la componen y evidencia que existe un potencial significativo para mejorar la infraestructura de transporte en la cuenca. La ampliación de rutas y la mejora de la infraestructura existente podrían aumentar la cohesión en la red de transporte y reducir las disparidades entre los diferentes partidos. El uso de herramientas de análisis espacial como la Teoría de Grafos y SIG permite obtener una visión más precisa de la estructura de accesibilidad en la cuenca y proporciona una base sólida para la toma de decisiones en materia de planificación territorial. A través de la optimización de la red de transporte, se puede mejorar la movilidad, reducir los tiempos de viaje y facilitar el acceso a servicios para todos los habitantes de la cuenca.

5. Cambios de cobertura y uso de la tierra

El monitoreo y análisis de los cambios en las Coberturas y Uso de la Tierra (CUT) facilita la evaluación oportuna y cuantificable de los patrones de cambios espaciales, proporcionando un conocimiento sobre el impacto que tienen las actividades económicas y de desarrollo sobre el territorio y sus recursos naturales (Berberoglu & Akin, 2009; Rojas Briceño *et al.*, 2019). En los estudios geográficos existe una larga tradición a partir de la cual se utiliza la información espacial histórica con el propósito de desarrollar estudios prospectivos (estimación de escenarios futuros) que generen propuestas de intervención para ser incorporadas en los planes de ordenamiento territorial (Montes Galbán, 2024). Los trabajos comprenden temas como la determinación de conflictos ante la expansión de usos del suelo (Principi, 2016; Buzai & Principi, 2017), el análisis de la pérdida de cobertura forestal (Montes Galbán *et al.*, 2017), la expansión de las zonas urbanas y rurales (Aguilera Benavente, 2014; Humacata, 2020; Arias Muñoz *et al.*, 2024), los efectos del cambio de uso del suelo en la erosión hídrica y su proyección futura (Pineda Jiménez, 2019).

En este caso, para realizar el análisis y la predicción de los cambios en las CUT de la cuenca del río Luján se aplicó el procedimiento que consistió en desarrollar una predicción de cambios en las CUT con base en la transición entre un tiempo 1 (t_1) y un tiempo 2 (t_2), siendo $t_1=2000$ y $t_2=2020$, para proyectarlo hacia $t_3=2030$. Para esto se contó con los mapas de CUT provistos por el Proyecto MapBiomias Argentina- Colección 1 (MapBiomias, 2024). Asimismo, se dispuso de capas de información geográfica como datos de entrada (Earth Observation Center, 2018; IGN, 2019; ComiLu, 2023) para la definición del área de estudio y la incorporación de variables explicativas en el proceso de modelización.

En primer lugar, se realizó el análisis de cambios partiendo de la superposición cartográfica de las clasificaciones de CUT (2000 – 2020) para luego construir una matriz de tabulación cruzada, esto permitió distinguir las transiciones de las diferentes clases evaluadas, identificar los cambios y hacer un análisis de los patrones reales que conllevan estos cambios (Pontius, 2004; Rojas Briceño, 2019).

Siguiendo la metodología de Pontius *et al.* (2004) el modelo permite estimar ganancias, pérdidas, cambios totales, cambios netos, persistencia e intercambios de cada categoría (Pineda Jaimes *et al.*, 2009). En base a la información provista en esta etapa se establecieron los submodelos que fueron considerados para la modelización del escenario futuro.

Con la finalidad de conocer las tasas anuales de cambio en las CUT, se realizaron los cálculos a través de la fórmula propuesta por Puyravaud (2003):

$$[5] \quad r = \frac{\ln \frac{A_2}{A_1}}{t_2 - t_1} * 100$$

donde r es la tasa porcentual de cambio; A_1 y A_2 son los valores inicial y final, respectivamente, y $(t_2 - t_1)$ es el intervalo de tiempo. Los valores de r pueden ser positivos o negativos indicando expansión o decrecimiento según sea el caso.

Avanzando en la metodología aplicada la simulación de escenarios futuros podemos destacar que se desarrolla en tres etapas. La primera, es la generación de *potenciales de transición*, que consiste en determinar la capacidad que tiene el área de estudio para atravesar cada una de las transiciones consideradas. La segunda, el *modelado de la demanda de cambios*, en la magnitud del cambio; y la tercera, la *predicción de cambios* a través de la asignación espacial del cambio estimado en función de los potenciales de transición (Eastman & Toledano, 2018).

Una vez estudiado los cambios entre los mapas de CUT 2000 y 2020, se seleccionaron y agruparon en un submodelo aquellas transiciones que sumadas representan más del 70% de los cambios en el área de estudio (Pastizal a Pastura, Pastizal a Agricultura, Pastizal a Área sin vegetación, Agricultura a Pastura y Pastura a Agricultura).

Posteriormente, se especificaron las variables impulsoras del cambio, también conocidas como variables explicativas (*drivers*). Cada una de estas variables puede ser de naturaleza estática o dinámica. En este caso, las variables estáticas utilizadas corresponden al modelo digital de elevación y las distancias a la red vial. Las variables dinámicas empleadas fueron: distancia a las áreas agrícolas, distancia a las áreas sin vegetación y distancia a las áreas de pastura.

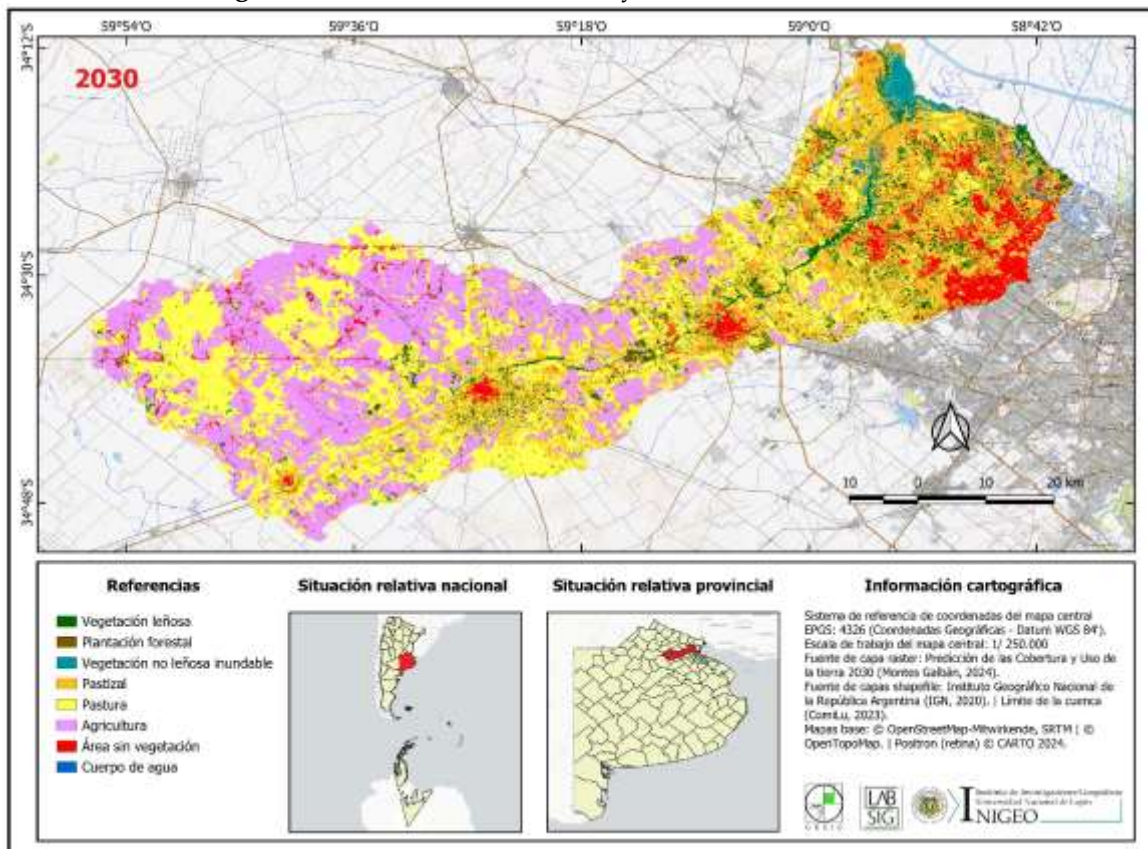
Finalmente, el procedimiento para la generación del potencial de transición, se realizó a través de una red neuronal de Perceptrones Multicapas (*Multi-Layer Perceptron – MLP*), técnica validada a través de diversos casos de aplicación (Eastman *et al.*, 2005). El modelado con MLP es un algoritmo de entrenamiento supervisado que contiene tres tipos de capas: capa de entrada, capa oculta y capa de salida. Díaz Pacheco & Hewitt (2013) describen el proceso como datos de entrada que pasan a través de la red mediante un tratamiento denominado *feed forward* (alimentación hacia adelante), donde los nodos de salida son calculados en función de los valores de entrada y posteriormente transmitidos hacia adelante a través de la red. Los mismos autores, explican que la búsqueda de los valores correctos se realiza a través de un proceso conocido como regla de aprendizaje (*learning rule*), donde la respuesta de activación (si un nodo es estimulado o no) está determinada por los valores de entrada o los pesos aplicados. La búsqueda y determinación de los valores adecuados para las ponderaciones se realiza mediante un enfoque conocido como aprendizaje supervisado (*supervised learning*) (Noriega, 2005).

El algoritmo MLP presenta un modo de entrenamiento automático que monitorea y modifica las tasas de aprendizaje inicial y final como parte de un procedimiento dinámico que parte de seleccionar muestras aleatorias de los píxeles que pasaron por cada transición que se está modelando para establecer dónde no se producirá el cambio (persistencias) y dónde se producirá (transiciones). Este procedimiento comienza con tasas de aprendizaje iniciales (inicio y final) y reduce estas tasas a la mitad si se detectan oscilaciones significativas en el RMS dentro de las primeras 100 iteraciones, con cada reducción, se reinicia el proceso (Eastman, 2016).

Modelar la demanda de cambios hacia futuro se realizó mediante el proceso de predicción con cadenas de Markov (*Markov Chain*). El procedimiento determina exactamente cuánta superficie terrestre se espera que cambie desde la última fecha (t_2) a la fecha de predicción (t_3) en función de una proyección de los potenciales de transición hacia el futuro, obteniendo como resultado una matriz que registra las probabilidades de transición de que cada categoría de cobertura terrestre cambie a una predicción de cambios duros (*Hard Prediction*). El procedimiento de *predicción dura* se basa en un algoritmo de asignación de tierras competitivo, similar a un proceso de decisión MOLA (*Multi-*

objective Land Allocation) que analiza todas las transiciones y crea una lista de clases anfitrionas (clases que perderán cierta cantidad de tierra) y una lista de clases demandantes (clases que adquirirán tierra) para cada anfitrión (Eastman *et al.*, 2005). Las cantidades se determinan a partir del procedimiento de cadena de Markov. Luego se ejecuta un procedimiento multiobjetivo con la finalidad de asignar tierras a todos los solicitantes de una clase anfitriona. Por último, los resultados de la reasignación de cada clase anfitriona se superponen para producir el resultado final (Eastman, 2016).

Figura 9. Predicción de coberturas y uso de la tierra al año 2030



Fuente: Realizado por Eloy Montes Galbán

Tabla 3. Superficie y tasa anual de cambio para el periodo 2020 – 2030

Categorías	2020 (ha)	(%) ²	2030 (ha)	(%) ²	Tasa anual de cambio ³
Vegetación leñosa	18.994,96	5,72	-	-	-
Plantación forestal	2.171,16	0,65	-	-	-
Vegetación no leñosa inundable	7.065,24	2,13	-	-	-
Pastizal ¹	102.291,53	30,79	78058,64	23,50	-0,73
Pastura ¹	101.367,83	30,51	111357,23	33,52	0,25
Agricultura ¹	82.809,24	24,93	93128,11	28,03	0,32
Área sin vegetación ¹	16.557,60	4,98	20482,20	6,17	0,57
Cuerpo de agua	949,65	0,29	-	-	-

¹ CUT considerados en la predicción al 2030.

² Valores porcentuales calculados en base a la superficie total del área de estudio (332.207,19 ha).

³ Tasa anual calculada en base a la fórmula [5].

6. Aplicación a escala de áreas urbanas

6.1. Modelado de conflictos entre usos del suelo

El modelado de crecimiento urbano considera las etapas desarrolladas por Pontius *et al.* (2001), Pontius & Chen (2006) y Aguilera Benavente *et al.*, (2012), a partir de considerarse los factores de direccionamiento (*Drivers*) para la evolución espacial del uso del suelo utilizados para generar el mapa de aptitud para el crecimiento urbano.

El potencial de cambio de usos del suelo es un modelo que calcula probabilidades de cambio hacia uso urbano en cada celda del mapa resultado.

$$[6] PC_{r-u} = f(d_1, d_2, d_3, \dots, d_n, i)$$

donde PC_{r-u} que es el potencial de cambio de rural a urbano es una función (f) de los direccionadores o *drivers* (d) considerados y un parámetro i de incertidumbre del estudio exploratorio. El resultado es la realización de un mapa de probabilidad de direccionamiento del crecimiento urbano.

Cada factor presenta categorías escalonadas de 1 a N, en ellas se obtiene el porcentaje de área urbana que contiene y esa clasificación en cada celda constituye un valor de probabilidad para la elección de la celda para su cambio de rural a urbana. Además, los factores se ponderan de acuerdo a su importancia teórica para la resolución calculando sus pesos relativos de ponderación por ranking recíproco (Malczewski, 1999). De esta manera se produce una resolución a partir del cálculo de una sumatoria ponderada en la cual cada celda con valor porcentual se multiplica por su valor de ponderación y se suma la totalidad de valores para cada factor de direccionamiento.

$$[7] I_{(i)} = \sum_{a=1}^n Pa_i W_a$$

donde, $I_{(i)}$ es el valor de idoneidad en la celda (i), a es un mapa de direccionamiento específico, a es la totalidad de mapas de direccionamiento, W_a es el valor de ponderación del mapa de direccionamiento a y Pa_i es el porcentaje establecido en la categoría ak del mapa de atributos a , donde la celda (i) es un miembro de la categoría ak .

La elección de las localizaciones que cambiarán de uso del suelo rural a urbano será realizada a partir del modelo que establece que el área urbana tendrá permanencia y no experimentará cambios durante el período, sin posibilidad de disminuir el uso del suelo urbano.

Para ello se restringe el crecimiento a una matriz, que actúa como ventana móvil de diverso tamaño. Hemos utilizado una matriz de 3x3 (*ventana móvil*) con lo cual el crecimiento se produce en las zonas contiguas al área urbana establecida. Finalmente se seleccionan las celdas ubicadas en las localizaciones de mayor idoneidad para el crecimiento dentro de la matriz siempre y cuando exista categoría urbano precedente en su interior hasta llegar al número de celdas establecido.

Las definiciones para la realización de los mapas de aptitud

Aptitud urbana: La aptitud para la expansión urbana fue calculada con tres capas temáticas a partir de las siguientes definiciones:

Urbano 2016 (Categorías: rural, urbano). Consideración de la aglomeración. Cálculo de distancias y estandarización *fuzzy* lineal decreciente (255-0 de 600 a 10.000 metros).

Criterio (F1): *Aptitud de distancia a la aglomeración.*

Población (Categorías: <4000 hab., 4000 a 8000 hab., 8000 a 12000 hab., 12000 a 16000 hab. Y > 16000 hab.). Reclasificación de cada categoría a 1, 4, 6, 10, 10 respectivamente y estandarización *fuzzy* lineal creciente (0-255 de 1 a 10).

Criterio (F2): *Aptitud del total de población.*

Rutas (Categorías: con rutas y sin rutas). Cálculo de distancias y de estandarización *fuzzy* lineal decreciente (255 a 0 de 600 a 10000 metros)

Criterio (F3): *Aptitud de distancia a las rutas.*

El método de ponderación consideró el siguiente ordenamiento en la importancia de los factores: Aptitud de distancia las rutas (1), Aptitud distancia a la aglomeración (1) y Aptitud de total de población (2) dando como resultado los valores de 0,40; 0,40 y 0,20 respectivamente y se utiliza como restricción (R1) la capa temática Rural2016 (0 Urbano, 1 Rural) aplicando la fórmula de la CLP [11]. El mapa de aptitud urbana (AU) surge a partir de: $AU [(F1 \times 0,40) + (F2 \times 0,20) + (F3 \times 0,40)] \times R1$ y su reclasificación en tres intervalos por cortes naturales.

Aptitud agrícola: La aptitud para la producción agrícola fue calculada con tres capas temáticas a partir de las siguientes definiciones:

Paisaje (Categorías: LOct, CCEc, COat, PDpc, LCcl,, POcp). Reclasificación de cada categoría a 10, 3, 10, 4, 6, 6 y 1 respectivamente. Aplicación de estandarización *fuzzy* lineal creciente (0- 255 de 1 a 10).

Criterio (F1): *Aptitud del paisaje*

Relieve (Categorías: 0-10 m., 10-20 m., 20-30 m., 30-40 m., >40 m.). Reclasificación de cada categoría a 1, 4, 6, 10 y 10 respectivamente. Aplicación de estandarización *fuzzy* lineal creciente (0-255 de 1 a 10).

Criterio (F2): *Aptitud del relieve.*

Suelos (Categorías: Suelo 1-sin limitaciones, Suelo 2-limitación drenaje, Suelo-3 limitación drenaje-salinidad-alcalinidad, suelo 4- limitación drenaje-alcalinidad, Suelo 5-limitación drenaje alcalinidad, Suelo 6-limitación drenaje). Reclasificación de cada categoría a 10, 6, 1, 3, 4 y 6 respectivamente. Aplicación de estandarización *fuzzy* lineal creciente (0-255 de 1 a 10).

Criterio (F3): *Aptitud de los suelos.*

Aptitud para la conservación ambiental: Fue calculada con 3 capas temáticas a partir de las siguientes definiciones:

Ríos (Categorías: sin ríos, río principal y afluentes-arroyos). Cálculo de distancias y de estandarización *fuzzy* lineal decreciente (255 a 0 de 600 a 2200 metros)

Criterio (F1): *Aptitud de distancia a los rios.*

Bañados (Categorías: con bañados y sin bañados). Cálculo de distancias y de estandarización *fuzzy* lineal decreciente (255 a 0 de 0 a 5000 metros)

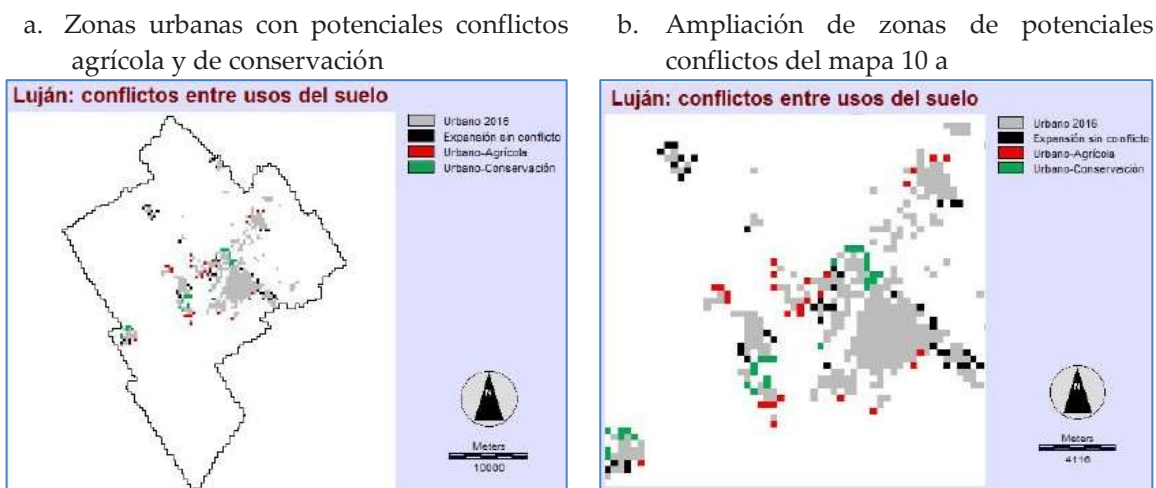
Criterio (F2): *Aptitud de distancia a bañados.*

Paisaje (Categorías: LOct, CCEc, COat, PDpc, LAcl, Pcp). Reclasificación de cada categoría a 3, 10, 7, 10, 6, 3 y 1 respectivamente. Aplicación de estandarización *fuzzy* lineal creciente (0- 255 de 1 a 10).

Criterio (F3): *Aptitud del paisaje*

El método de ponderación consideró el siguiente ordenamiento en la importancia de los factores: Paisajes (1), Ríos (2) y Bañados (3) dando como resultado los valores de 0,55; 0,27 y 0,18 respectivamente y se utiliza como restricción (R1) la capa temática Rural2016 invertida (0 Urbano, 1 Rural) aplicando la fórmula de la CLP [11]. El mapa de aptitud para la conservación (AC) surge de: $AC [(F1 \times 0,27) + (F2 \times 0,18) + (F3 \times 0,55)] \times R1$ y su reclasificación por cortes naturales.

Figura 10. Potenciales conflictos entre usos del suelo en Luján



Fuente: Realizado por Gustavo D. Buzai

Tabla 4. Superficie del área de expansión y potenciales conflictos

Categoría	Superficie (Ha.)	% Expansión	% Expansión con conflicto
Urbano 2016	4.481	---	---
Expansión s/conflicto	559	44,72	44,72
Conflicto urbano-agrícola	340	27,20	55,28
Conflicto urbano-conservación	351	28,08	
Total	5.731 (*)	100	100

(*) Superficie de las áreas urbanas en 2030

6.3. Modelado de inundaciones

La ciudad de Luján, cabecera del partido homónimo, se ubica a 68 kilómetros de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. De acuerdo al Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas del año 2010 (INDEC, 2013) el partido contaba con 106.273 habitantes, de los cuales 78.346 residían en la ciudad de Luján, es decir, un 73,7% de la población total. Los datos del censo 2022 (INDEC, 2024) indican que el partido tuvo una variación intercensal relativa del 4,8%, aumentando su población a 111.365 habitantes. Siguiendo la tendencia de radicación mayoritaria de la población en la localidad cabecera, se puede estimar que la ciudad de Luján cuenta actualmente con aproximadamente 82.076 habitantes.

Es una ciudad de tamaño intermedio que creció históricamente en torno al río Luján, un típico río de llanura con un extenso valle de inundación, que recorre 115 kilómetros desde su origen en la confluencia de varios arroyos hasta su desembocadura en el delta del Paraná y luego en el río de la Plata (Buzai, Lanzelotti, Paso Viola & Principi, 2018). A lo largo de su historia, la ciudad tuvo

múltiples episodios de inundación, afectando tanto barrios céntricos como periféricos. La dinámica del río fue alterada por factores naturales y antrópicos, especialmente por el crecimiento urbano no planificado y las modificaciones realizadas en el cauce y las áreas adyacentes. En este contexto, las inundaciones urbanas pasaron a ser en un problema recurrente, acompañado por la crecida natural del río y también por lluvias intensas que saturan los sistemas de drenaje y aumentan rápidamente el nivel de agua (Principi, 2022).

La simulación de nivel de agua permite evaluar la expansión superficial del agua en la ciudad, teniendo en cuenta las características del terreno urbano, como calles, edificaciones y otros elementos que pueden afectar el flujo del agua. De esta forma, se simulann dos escenarios, que representan diferentes grados de severidad de las inundaciones.

Desde un punto de vista metodológico y para realizar el análisis de los escenarios de inundación en la ciudad de Luján, se utilizó una metodología basada en la simulación de niveles de agua, empleando un Modelo de Elevación Digital (MDE) aerofotogramétrico de alta precisión, con una resolución de 5x5 metros. Este modelo fue proporcionado por el Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina (IGN, 2017) y corresponde a un relevamiento realizado en 2013 sobre toda el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA). Del MDE se extrajo específicamente el área urbana de Luján y sus alrededores, lo que permitió un análisis detallado del área.

El procedimiento de simulación de nivel de agua modeló el incremento del nivel del agua sobre la base de datos espaciales, identificando las celdas del terreno que se encuentran por debajo de la elevación especificada y que están conectadas con los cursos de agua. Para el estudio, se digitalizaron los polígonos correspondientes al río Luján y sus afluentes, lo que permitió aplicar diferentes niveles de altura para simular crecidas del agua en los distintos cursos.

Se utilizaron datos históricos de inundaciones en Luján, registrados por la Asociación de Bomberos Voluntarios de Luján. Se modelizó una inundación de características similares a la última gran inundación de agosto del 2015, que alcanzó los 17,03 metros de elevación según la cota del IGN. Se aumentó el nivel de agua en 2 metros sobre la elevación base del MDE, que en el sector donde se encuentra el hidrómetro de los Bomberos Voluntarios de Luján era de 15 metros y para los afluentes se simuló un aumento de 0,5 metros. También se simuló un escenario 2, tomando como referencia la mayor inundación histórica de la que se tienen datos en Luján, acontecida en noviembre de 1985. Se aumentó el nivel de agua del río en 2,50 metros y en los afluentes de 1 metro.

De esta forma, se genera un escenario 1 que corresponde a la dimensión de las últimas grandes inundaciones ocurridas en Luján (2012, 2014 y 2015) y un escenario 2 más desfavorable, que podría considerarse como un evento extremo, asociado a los registros históricos de inundaciones de mayor gravedad en la ciudad (1967, 1984 y 1988).

Una vez obtenidos los resultados de las simulaciones, se realizó una asociación espacial con un mapa de vulnerabilidad socioeconómica de la ciudad de Luján, elaborado a partir de datos del censo 2010 (Principi, 2020; Principi & Buzai, 2020). Este mapa fue generado mediante la metodología del Valor de Índice Medio (VIM) propuesta por García de León (1989), que incluye indicadores sobre educación, vivienda y empleo. Esta asociación permitió identificar las áreas con mayor riesgo de inundación, teniendo en cuenta tanto la amenaza física como la vulnerabilidad de la población expuesta.

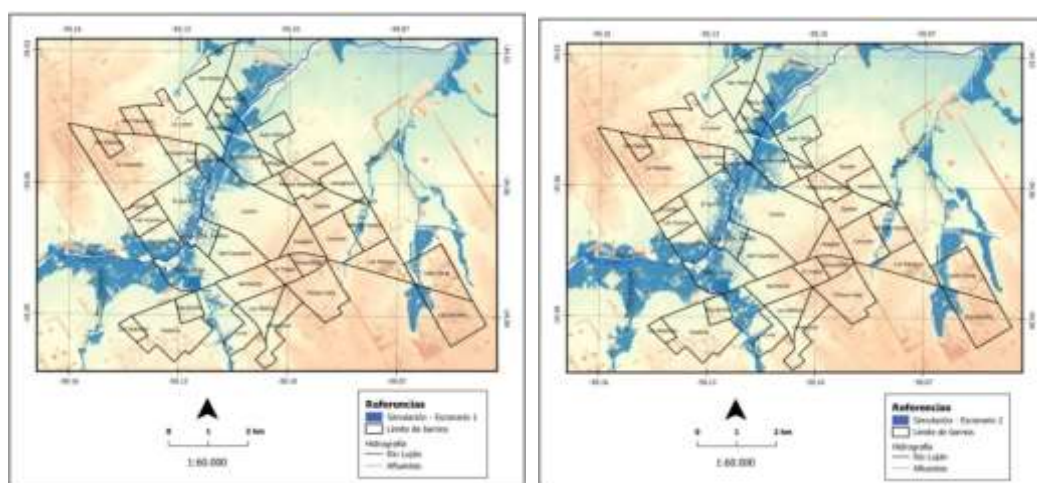
En el escenario 1 (Figura 7a) presenta un alto grado de correspondencia con los mapas de inundación levantados *in situ* por el municipio tras el evento de 2015, con una coincidencia del 72%. La simulación muestra que, en este escenario, las zonas afectadas incluyen tanto áreas céntricas como periféricas.

Los barrios más afectados incluyen el Centro, El Quinto, La Loma, San Fermín, San Jorge, Santa Marta y San Pedro. El barrio Centro, situado en las inmediaciones del río Luján, resultó históricamente propenso a las inundaciones debido a su ubicación. Estos barrios céntricos tienen una vulnerabilidad socioeconómica baja, aunque siguen siendo susceptibles a las crecidas debido a su proximidad al río. Sin embargo, los barrios periféricos, como San Jorge y Santa Marta, presentan niveles altos de vulnerabilidad y son de ocupación recientemente, con escasa planificación territorial.

Además de las áreas cercanas al cauce principal, la simulación también identificó zonas críticas cerca de los afluentes del río Luján, como los arroyos Gutiérrez y Lanusse. Estos arroyos suelen desbordarse durante las lluvias intensas, afectando principalmente a los barrios periféricos como Villa del Parque y Lanusse. Estos barrios, además de estar en zonas propensas a inundaciones, presentan condiciones socioeconómicas desfavorables, lo que agrava su situación de vulnerabilidad.

En el escenario 2 (Figura 7b), correspondiente a la mayor inundación histórica registrada en 1985, el área de inundación se amplía significativamente, afectando a una mayor proporción de la población. Se estima que más de 14.000 personas estarían expuestas a la amenaza de inundación en este escenario extremo, en comparación con las 13.500 personas afectadas en el escenario 1. Este aumento en el número de personas expuestas se debe al mayor nivel de agua simulado, que incrementa la extensión de la mancha de inundación, especialmente en las zonas periféricas.

Figura 11. Simulación de nivel de agua: escenarios 1 y 2

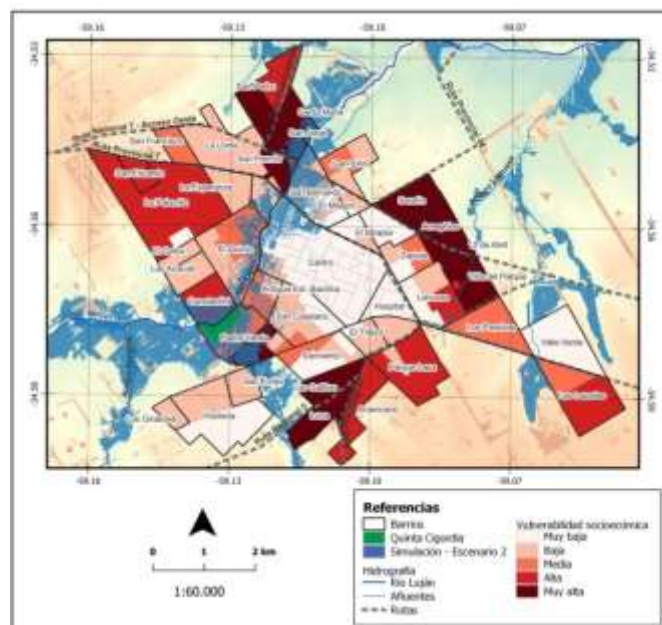


a) Escenario de inundación 1

b) Escenario de inundación 2

Fuente: Realizado por Noelia Principi

Una vez obtenidos los dos escenarios, y con el objetivo de ampliar el análisis de los resultados, se asoció espacialmente el escenario más desfavorable con el mapa de vulnerabilidad socioeconómica de la ciudad de Luján (Figura 12).

Figura 12. Escenario de inundación 2 y vulnerabilidad socioeconómica

Fuente: Realizado por Noelia Principi

Las simulaciones realizadas evidencian que existen varios sectores de la ciudad de Luján expuestos a la amenaza de inundaciones. Si consideramos el límite de los barrios urbanos, la superficie de inundación se mantiene en torno a los 6 km² que ya había determinado Haas (1995) pero la población afectada se duplica, ascendiendo a 13500 habitantes, según datos oficiales del Censo 2010, o 14148 habitantes si consideramos la tendencia de crecimiento del partido según los datos provisorios Censo 2022.

Las áreas de mayor riesgo se encuentran tanto en los barrios céntricos como en los periféricos. En particular, los barrios de reciente expansión urbana, como Luna y Villa del Parque, presentan un alto riesgo de inundación debido a su ubicación en zonas bajas cercanas a los afluentes del río Luján. Estas áreas fueron urbanizadas sin una planificación adecuada, lo que aumenta su vulnerabilidad frente a los eventos de crecida.

Los resultados también evidencian que las áreas más vulnerables, desde el punto de vista socioeconómico, tienden a coincidir con las zonas de mayor riesgo de inundación. La falta de planificación territorial y la escasez de obras de infraestructura en estos sectores agravan su situación, ya que no cuentan con sistemas de drenaje eficientes ni con medidas preventivas adecuadas para hacer frente a las crecidas (Principi, 2023).

El escenario 2 representa una inundación extrema y destaca la importancia de considerar eventos de mayor gravedad en la planificación territorial de la ciudad. Si bien los escenarios más comunes de inundación afectan principalmente a los barrios céntricos, los eventos extremos tienen el potencial de impactar de manera significativa en las áreas periféricas, donde la vulnerabilidad es mayor.

La simulación del nivel de agua permite dimensionar cómo pequeños aumentos en el nivel del río pueden generar grandes expansiones en la mancha de inundación en una ciudad en plena llanura, como Luján. Esto resalta la importancia de realizar este tipo de estudios para anticipar los impactos de las crecidas y diseñar estrategias de mitigación efectivas, considerando que la gestión del riesgo

debe incluir un enfoque integral que aborde tanto la amenaza físico-natural como la vulnerabilidad socioeconómica.

7. Consideraciones finales

Sustentado en una perspectiva sistémica y en el paradigma de la Geografía Cuantitativa, el trabajo realizado permite la construcción de modelos prospectivos del área de estudio con la finalidad de aportar herramientas para el ordenamiento territorial.

Fueron presentadas diferentes estructuras espaciales proyectadas hacia el 2030 correspondientes al crecimiento urbano, análisis de accesibilidad y cambios en la cobertura de la tierra para el espacio regional de la cuenca y los conflictos entre usos del suelo e inundaciones para las áreas urbanas de Luján.

La modelización espacial prospectiva del crecimiento urbano proyecta un aumento de superficie urbana de 24.561 hectáreas, registrando un incremento del 46% con respecto al año 2010. Las áreas urbanas, en su modalidad dispersa, serán las de mayor expansión con una distribución espacial se produciría fuertemente en el sector de la cuenca baja.

La accesibilidad y conectividad en los partidos de la cuenca evidencia situaciones de desigualdad regional. Los partidos mejor conectados, como General Rodríguez, Luján y Pilar, se benefician de su ubicación central en el área de estudio y de la presencia de rutas nacionales y provinciales, lo que facilita la movilidad y el acceso a bienes y servicios. En contraste, partidos como Chacabuco y Carmen de Areco, enfrentan mayores desafíos para su integración regional. Los cálculos realizados muestran claramente que la red vial no presenta la mayor eficiencia, destacando la necesidad de aumentar la conectividad para optimizar los tiempos de viaje y reducir las desigualdades territoriales.

Al analizar los cambios en las coberturas y uso de la tierra que fueron consideradas en la predicción, se observa que la tasa anual de cambio muestra una relación inversa entre la categoría de pastizal (-0,73 %) en contraste con el crecimiento de las áreas sin vegetación (0,57 %), agricultura (0,32 %) y pastura (0,25 %). Este comportamiento proyecta una pérdida de superficie en la cobertura pastizal de 24.232,89 ha para el 2030.

La síntesis regional surgida de los tres estudios realizados indica que la zona de mayor dinamismo se encuentra en la cuenca baja, donde se proyecta la mayor expansión urbana, la mayor pérdida de ambientes naturales y que cuenta con la mayor accesibilidad espacial. Otros sectores de la cuenca minimizan estos inconvenientes al mismo momento en que tienen los mayores niveles de aislamiento. Una política de ordenamiento territorial para la región debe contemplar el logro de un equilibrio entre la accesibilidad y los cambios de usos del suelo.

Pasando a los casos de estudios específicos para Luján podemos decir que en cuanto a la determinación de conflictos entre usos del suelo por el crecimiento urbano en el partido de Luján se estima se sumen 1.250 hectáreas las cuales generarán conflictos con espacios agrícolas un 27,20% y con espacios de conservación un 28,08%. La distribución espacial del conflicto urbano-agrícola se producirá en expansiones al norte y sur de las áreas urbanas compactas de Luján, Jauregui y Torres, y el conflicto urbano-conservación se producirá principalmente sobre el valle de inundación del río Luján. El 44,72 % del crecimiento no generará conflictos y con autocorrelación a estas áreas en las que se deberán orientar las acciones de planificación para concentrar la futura expansión urbana.

Al mismo tiempo, en relación a la generación de escenarios de inundación, a partir del análisis de simulación del nivel de agua fue posible reconocer diferentes áreas de la ciudad donde la amenaza

de inundaciones está permanentemente latente. Incluye barrios céntricos, debido al emplazamiento histórico de la ciudad, y barrios periféricos de incorporación reciente al ejido urbano con alta vulnerabilidad socio-económica, muchos de ellos asentados sobre el valle de inundación del río. Si bien la superficie de inundación se mantiene estable a lo largo de los últimos años, en torno a los 6 km², la población afectada se duplica ante el aumento de densidad. Asimismo, la asociación espacial de la cartografía de inundaciones con el mapa de vulnerabilidad socioeconómica permitió tener una aproximación a las áreas que presentan mayor riesgo de inundación y que necesitarían un tratamiento prioritario para enfrentar la problemática en el futuro.

Para finalizar podemos concluir en que los modelos espaciales de configuraciones futuras son centrales como herramienta de gran capacidad para el apoyo a la toma de decisiones en materia territorial ya que permiten generar propuestas en base a la proyección de situaciones futuras, con los que el planificador se enfrentará a las problemáticas con significativos conocimientos previos. En este caso el 2030 nos mostrará el crecimiento urbano como avance de conflicto hacia las actividades productivas y espacios de conservación, también la necesidad de actuar en la conexión de los partidos extremos al sistema regional y en el caso urbano nos muestra que resulta necesario adelantarse a futuros eventos hídricos ya que en mismos espacios se compromete a mayor número de población. La tarea prospectiva es central en el aporte social de la Geografía como ciencia que pone su foco de atención en la dimensión espacial de procesos sociales.

8. Softwares utilizados

QGIS, Global Mapper (*Silulate Water Level Rise/Flooding*), Google Earth, IDRISI (*Cellular Automata-Markov Chain, Multicriterial Evaluation*) y TerrSet-Geospatial Monitoring and Modeling System (*Land Chage Modeler*).

9. Bibliografía

Aguilera Benavente, F. (2014). Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares. *GeoFocus*, 6, 81-112.

Aguilera Benavente, F.; Gómez Delgado, M. & Plata Rocha, W. (2012). Escenarios y modelos de simulación como instrumento de planificación de ámbitos metropolitanos. En: Gómez Delgado, M. & Rodríguez Espinosa, Víctor M. (Coords) *Análisis de la dinámica urbana y simulación de escenarios de desarrollo futuro con Tecnologías de la Información Geográfica*. Madrid: Ra-Ma, pp. 185-234.

Arias Muñoz, P., Saz, M. A., & Escolano, S. (2024). Tendencias de cambio de usos y coberturas de suelo en la cuenca hidrográfica media-alta del río Mira en Ecuador. *Investigaciones Geográficas*, (81), 155-179.

Baxendale, C.A. & Buzai, G.D. (2011). Dinámica de crecimiento urbano y pérdida de suelos productivos en el Gran Buenos Aires (Argentina), 1869-2011. Análisis espacial basado en Sistemas de Información Geográfica, *Serie Geográfica*, 17(77), 77-95.

Berberoglu, S., & Akin, A. (2009). Assessing different remote sensing techniques to detect land use/cover changes in the eastern Mediterranean. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 11(1), 46-53.

Bunge, M. (2012). *A la caza de la realidad*. Barcelona: Gedisa.

Bunge, M. (2014). *Memorias. Entre dos mundos*. Buenos Aires: Eudeba.

Buzai, G.D. (2002). *Atlas digital de la cuenca del río Luján, Socioeconómico y habitacional*. Versión CD. Luján: Universidad Nacional de Luján.

Buzai, G.D. & Baxendale, C.A. (2013). Aportes del análisis geográfico con Sistemas de Información Geográfica como herramienta teórica, metodológica y tecnológica para la práctica del ordenamiento territorial, *Persona y Sociedad*, 27(2), 113-141.

Buzai, G.D.; Baxendale, C.A. & Mierez, A. (2003). Accesibilidad e interacción espacial: aportes del análisis espacial cuantitativo para su modelización regional. *Gerencia ambiental*, 10 (95), 360-369.

Buzai, G.D.; Lanzelotti, S.L.; Paso Viola, F. & Principi, N. (2018). Cartografía analógica y digital para la delimitación regional y el análisis temático: aplicación a la cuenca del río Luján (Argentina), *Revista de Geografía Norte Grande*, 69, 99-119.

Buzai, G.D. & Principi, N. (2017). Identificación de áreas de potencial conflicto entre usos del suelo en la cuenca del río Luján, Argentina, *Revista Geográfica de América Central*, 59, 91-124.

Cardozo, O.; Gómez, E. & Parras, M. (2009). Teoría de grafos y sistemas de información geográfica aplicados al transporte público de pasajeros en Resistencia (Argentina), *Transporte y Territorio*. 1, 89-111.

ComiLu. (2023). *Relevamiento panorámico del río*. <https://www.gba.gob.ar/comilu>

Díaz Pacheco, J. & Hewitt, R. (2013). Modelado de cambio de usos del suelo a través de redes neuronales artificiales. Comparando dos aplicaciones de software, *GeoFocus*, 14, 1-22.

Earth Observation Center (2018). *TanDEM-X - Digital Elevation Model (DEM) - Global, 90m. Cuenca del río Luján (Mosaico de imágenes satelitales)*, Geoservicio EOC del Centro de Observación de la Tierra (EOC) del Centro Aeroespacial Alemán (DLR). <https://download.geoservice.dlr.de/TDM90/>

Eastman, J. R., Jin W., Kyem P. A. K. & Toledano J. (1995). Raster Procedures for Multi-Criteria/Multi-Objective Decisions, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61(5), 539-547.

Eastman J.R., Solorzano L.A. & Van Fossen M.E. (2005). Transition Potential Modeling for Land-Cover Change, In: Maguire, D.; Batty, M.; Goodchild, M. (Eds.), *GIS, Spatial Analysis, and Modeling*, ESRI Press, Redlands, pp. 357-385.

Eastman, J. & Toledano, J. (2018). A short presentation of the Land Change Modeler (LCM). En *Geomatic approaches for modeling land change scenarios* (pp. 499-505). Springer.

García, R. (2006). *Sistemas Complejos*. Barcelona: Gedisa.

García de León, A. (1989) La metodología del Valor Índice Medio, *Boletín del Instituto de Geografía de la UNAM*, 9, 69-87.

Gómez Delgado, M.; Rodríguez Espinosa, V.M. (Coords) (2012) *Análisis de la dinámica urbana y simulación de escenarios de desarrollo futuro con Tecnologías de la Información Geográfica*. Madrid: Ra-Ma.

Haas, C. (1995). Inundaciones en áreas urbanas e impacto social. El caso de la ciudad de Luján, Buenos Aires, *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 15, 393-399.

Humacata, L. (2020). *Sistemas de Información Geográfica. Aplicaciones para el análisis de clasificación espacial y cambios de usos del suelo*. Luján: Universidad Nacional de Luján, Instituto de Investigaciones Geográficas. Serie Espacialidades 5.

Humacata, L. (2022). Análisis espacio-temporal de cambios de coberturas y usos del suelo en la cuenca del río Luján (1990-2010), *Huellas*, 26(1), 145-160.

IGN (2017). *Modelo Digital de Elevaciones Aerofotogramétrico del sector AMBA 1.3. Especificaciones técnicas*. Buenos Aires: Instituto Geográfico Nacional.

Recuperado de <https://www.ign.gov.ar/AreaServicios/VuelosFotogrametricos>

IGN (2019). *Capas SIG*. Buenos Aires: Instituto Geográfico Nacional.

<https://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG>

INDEC (2013). *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010*. Buenos Aires: Instituto Nacional de Estadística y Censos.

INDEC (2024). *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022*. Buenos Aires: Instituto Nacional de Estadística y Censos.

Instituto Nacional del Agua (2007). Diagnóstico del funcionamiento hidrológico hidráulico de la cuenca del río Luján, Provincia de Buenos Aires. <http://www.delriolujan.com.ar/estudioina.html>

Lanzelotti, S.D. & Buzai, G.D. (2015). Delimitación de la cuenca del río Luján, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Informe técnico PICT 2014-1388. Luján: Universidad Nacional de Luján.

Malczewski, J. (1999). *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. New York: John Wiley & Sons.

MapBiomás. (2024). *Proyecto MapBiomás Argentina- Colección [Versión 1.0] de los Mapas Anuales de Cobertura y Uso del Suelo en Argentina*. <https://argentina.mapbiomas.org/mapas-de-la-coleccion/>

Matteucci, S.; Morello, J.; Buzai, G.; Baxendale, C. *et al.* (2006). *Crecimiento urbano y sus consecuencias sobre el entorno rural. El caso de la ecorregión pampeana*. Buenos Aires: Orientación Gráfica Editora.

Mitchell, J.G (2001) La expansión urbana, *National Geographic* (en español). Julio, 82-107.

Montes Galbán, E. (2024). Cartografía histórica y su valor científico en los estudios geográficos: Aportaciones teóricas y metodológicas. *Anales de la Sociedad Científica Argentina*, 275(2), 35-48.

Montes Galbán, E.; Insaurralde, J.A. & Cuadra, D.E. (2017) Evolución y escenarios futuros de la deforestación en el suroeste de la provincia del Chaco, Argentina, *Estudios Socioterritoriales*, 22, 221-131.

Noriega, L. (2005). *Multilayer perceptron tutorial*. School of Computing. Stoke-on-Trent: Staffordshire University

Paegelow, M.; Camacho Olmedo, M. & Menor Toribio, J. (2003). Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje. *GeoFocus*. 3, 22-44.

Paso Viola, L.F. (2013). Análisis cronológico documental de la evolución de la cartografía en la altra cuenca del río Luján bajo la óptica de los procesos histórico globales y locales. Diagnóstico cartográfico geonímico, toponímico y geoespacial del Partido de Supacha como modelo casuístico, *Anuario de la División Geografía*, versión CD, 1-25.

Paso Viola, L.F. (2016). Origen del río Luján en el área imbrífera localizada en los partidos de Chacabuco, Suipacha y Carmen de Areco y su representación cartográfica. Tesis d Licenciatura en Geografía. Luján: Universidad Nacional de Luján.

Pineda Jaimes, N.; Bosque Sendra, J.; Gómez Delgado, M.; Plata Rocha, W. (2009). Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes: Una aproximación a los procesos de deforestación, *Investigaciones geográficas*, 69, 33-52.

Pineda Jiménez, M. (2019). *Efectos del cambio de uso del suelo y su proyección futura en la erosión hídrica en Ecuador continental* [Tesis de pregrado]. Loja: Universidad Nacional de Loja.

Naciones Unidas (2016) Objetivos del desarrollo sostenible 17 objetivos para transformar el mundo. [consultado el 25 de abril de 2017]

Pacione, M. (1999). *Applied Geography: Principles and Practice*. London: Routledge.

Philipponneau, M. (2001). *Geografía Aplicada*. Barcelona: Ariel.

Pontius, R.G. & Chen, H. (2006). *Geomod Modeling*. Worcester: Clark University.

Pontius, R.; Cornell, J. & Hall, C. (2001). Modeling the spatial pattern of land-use change with Geomod2: application and validation for Costa Rica, *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 1775, 1-13.

Pontius, R.; Shusas, E. & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 101(2-3), 251-268.

Principi, N. (2016). *Evaluación multicriterio para la identificación de áreas con potenciales conflictos entre usos del suelo en la cuenca del río Luján*. Tesis de maestría. San José: UCR-UNA.

Principi, N. (2018). Análisis de interacción espacial a través de cartografía de flujos: partidos de la cuenca del río Luján, *Anuario de la División Geografía*, 12, 172 - 180.

Principi, N. (2020). Mapa de la vulnerabilidad socioeconómica en la ciudad de Luján (Buenos Aires, Argentina) a partir de la metodología del Valor de Índice Medio. *Posición*, 3, 1-14.

Principi, N. (2022). Cartografía de riesgo a inundaciones como herramienta de apoyo a la planificación territorial. Aplicación a la ciudad de Luján (Argentina). *Revista Geográfica Digital*. 19(37), 42-59.

Principi, N. (2023). Simulación del nivel de agua para escenarios de inundación. Aplicación a Luján (Buenos Aires, Argentina). *Boletín Geográfico*. 45, 1-23.

Principi, N. & Buzai, G.D. (2020). Análisis espacial de la vulnerabilidad socioeconómica de la ciudad de Luján (Argentina): interpretación modelística a partir del mapa social para la identificación de áreas prioritarias de planificación. *Estudios Socioterritoriales*, 28, 1-16.

Puente, H. (Dir) (1999). *Argentina paso a paso. Provincia de Buenos Aires*. Planeta. Buenos Aires.

Pumain, D. & Saint-Julien, T. (2014). *Análisis Espacial. Las interacciones*. Santiago de Chile: PUC-UdeC.

Puyravaud, J. (2003). Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation, *Forest Ecology and Management*, 177: 593-596.

Rojas Briceño, N.; Barboza Castillo, E.; Marcelo Quintana, J.; Oliva Cruz, S. & Salas López, R. (2019). Deforestación en la Amazonía peruana: Índices de cambios de cobertura y uso del suelo basado en SIG. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 81, 2538, 1-34.

Vapñarsky, C.A.; Gorojovsky, N. (1990) *El crecimiento urbano en la Argentina*. Buenos Aires: Grupo Editor Latinoamericano.



Esta obra se encuentra bajo Licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0. Internacional. Reconocimiento - Permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas siempre y cuando reconozca y cite al autor original. No Comercial – Esta obra no puede ser utilizada con fines comerciales, a menos que se obtenga el permiso.