

## **GEPRONÓSTICOS DE ASENTAMIENTOS CON CONSTRUCCIONES CIVILES EN LAS PERIFERIAS DE LA CIUDAD BASADO EN AUTÓMATAS CELULARES: CASO ZONA NORTE-CALDERÓN.**

### *GEO FORECASTS OF SETTLEMENTS AND CIVIL CONSTRUCTIONS IN THE PERIPHERIES OF THE CITY BASED ON CELLULAR AUTOMATA: CASE NORTH-CALDERÓN*

**RENÉ ULLOA<sup>1</sup>, ELISA LALAMA<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI, Doctorando en Ciudad, Territorio y Planificación Sostenible, C/ Joanot Martorell 15 43480 Vila-seca, Tarragona - España.

<sup>1</sup>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, Doctorando en Planificación de Proyectos de Desarrollo Rural y Gestión Sostenible, Campus Ciudad Universitaria Avenida Puerta de Hierro, 2 - 4 28040, Madrid - España

<sup>2</sup>WORLDGEO, Estudios Geoespaciales, Quito - Ecuador

Recibido: 07 de septiembre 2017 / Aceptado: 25 de mayo 2018

#### **RESUMEN**

Dentro de las prácticas de las empresas que brindan servicios básicos a la ciudadanía, la elaboración del Plan Maestro contempla la estrategia de desarrollo de los servicios futura del abastecimiento de los probables demandantes de estos en un determinado tiempo, es de esperarse que una de las variables a considerar sea el crecimiento poblacional en términos de número de habitantes, que en algún momento podría encontrarse que, al proyectar el número de futuros beneficiarios, esta cantidad se vea comprometida debido a que las consideraciones fueron hechas con base en el histórico creciente de la población sin considerar el comportamiento espacial (distribución, mancha urbana) de los asentamientos (infraestructura civil que no son número de habitantes pero que demandaran los servicios básicos). Consecuentemente la contribución de este proyecto pretende brindar un análisis complementario al ya existente, modelando geo-pronósticos basados en el historial de la mancha de asentamientos con infraestructura civil por medio de las técnicas de Autómatas Celulares; con el objetivo de comparar las consideraciones que se podrían estar obviando, como por ejemplo en el siguiente caso: Una familia tipo de cuatro integrantes (dos adultos y dos infantes considerados en el censo 1) que reside en el centro de la ciudad de Quito adquiere terrenos en una zona de la parroquia de Calderón que para entonces posee escasa atención de servicios básicos y donde pretende realizar actividad comercial y no de residencia, razonablemente construye infraestructura civil en el lugar (asentamiento); después de 10 años en la siguiente evaluación censal (censo 2), para este caso de esta familia el número de habitantes no se ha incrementado pero la ocupación espacial dentro del **Distrito Metropolitano de Quito (DMQ)** si aumenta y necesariamente este nuevo espacio demanda servicios básicos. Como consecuencia de este y más tipos de actividades de los habitantes del DMQ, es necesario evaluar el comportamiento espacial de la macha de infraestructura civil (construcciones formales y/o informales) registradas en las zonas de expansión; como es el claro ejemplo de la parroquia de Calderón. Además se debe tomar en cuenta el alto grado de edificaciones informales que registra Calderón y en general las parroquias suburbanas del DMQ.

**Palabras Clave:** Autómatas Celulares, geo-pronósticos, mancha urbana, peri urbanización, crecimiento urbano.

#### **ABSTRACT**

Within the practices of companies that provide basic services to citizens, the preparation of the Master Plan contemplates the strategy of developing the future services of the supply of the likely applicants of these in a certain time, it is to be expected that one of the variables to consider the population growth in terms of number of inhabitants, that at some point it could be found that, when projecting the number of future beneficiaries, this amount is compromised because the considerations were made based on the growing historical population

without considering the spatial behavior (distribution, urban sprawl) of the settlements (civil infrastructure that are not number of inhabitants but that demand basic services). Consequently, the contribution of this project intends to provide a complementary analysis to the existing one, modeling geo-forecasts based on the history of the slick of settlements with civil infrastructure through the techniques of Cellular Automata; with the objective of comparing the considerations that could be being ignored, as for example in the following case: A typical family of four members (two adults and two infants considered in the census 1) that resides in the center of the city of Quito acquires land in an area of the parish of Calderón that by then has little attention to basic services and where it intends to carry out commercial activity and not residence, reasonably builds civil infrastructure in the place (settlement); after 10 years in the following census evaluation (census 2), for this case of this family the number of inhabitants has not increased but the spatial occupation within the DMQ increases and necessarily this new space demands basic services. As a consequence of this and more types of activities of the inhabitants of the MDQ, it is necessary to evaluate the spatial behavior of the civil infrastructure road (formal and / or informal constructions) registered in the expansion zones; as is the clear example of the parish of Calderón. In addition, the high degree of informal buildings registered by Calderón and, in general, the suburban parishes of the DMQ must be taken into account.

**Keywords:** Cellular automata, geo-forecasts, urban sprawl, peri-urbanization, urban growth.

## INTRODUCCIÓN

Dentro de los procesos de la **Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito - Ecuador (EPMAPS)**, los giros clave de la institución radican principalmente en mejorar el funcionamiento de los sistemas de agua potable y alcantarillado, tanto los existentes como los planificados, de hecho, radica en la misma planificación de la empresa, contar con los planes macro para atender a la futura población del DMQ. Para cualquier tipo de planificación es indispensable considerar la variable de crecimiento urbana en los diferentes sectores que todavía tienen la posibilidad de expansión; asiente de esta complicación que derivan en mayor demanda de los servicios básicos, la EPMAPS a lo largo de su accionar ha tomado operado en diferentes áreas como (EPMAPS, 2011):

- Soluciones a Sistemas de Drenaje y Alcantarillado.
- Diseños para el Control de la Escorrentía.
- Estudios de Factibilidad y Diseños Definitivos de diferente Colectores
- Túneles de Alivio a Colectores
- Modelación Hidráulica de los principales sistemas de Distribución de Agua Potable.
- Estudios de Actualización del Plan Maestro Integrado de Agua Potable y Alcantarillado.
- Estudios de Optimización Hidráulica de las Redes de Distribución de Agua Potable de La Ciudad De Quito

*“Las consecuencias de la urbanización intensiva sobre los procesos hidrológicos han demostrado la limitación de las soluciones tradicionales de drenaje urbano, para agravar o empeorar estos efectos. Los sistemas tradicionales de drenaje son poco flexibles y adaptables a los cambios de uso de la tierra y a los intensos procesos de urbanización y crecimiento de las ciudades”* (Martínez, 2013)

Por otro lado, Según el **Código Orgánico de Organización Territorial Autonomía Descentralización (COOTAD)** el ordenamiento territorial consiste en una “planificación con autonomía para la gestión territorial, que parte de lo local a lo regional en la interacción de planes que posibiliten la construcción de un proyecto nacional, desarrolla la “proyección espacial de las políticas sociales, económicas y ambientales para asegurar un “nivel adecuado de bienestar a la población, en donde prime la preservación del ambiente para las futuras generaciones” (COOTAD,2010). Según el Plan Metropolitano de Ordenamiento Territorial 2012 -2022, con un crecimiento demográfico importante, el desarrollo urbano de Quito a partir de los años setenta del siglo pasado ha observado una forma de crecimiento físico expansiva de baja densidad e inequitativa, que evidencia varias ineficiencias funcionales y ambientales caracterizadas por:

- El desequilibrio y asimetría en el desarrollo regional, producto de interdependencias funcionales y dependencias energéticas, alimentarias y productivas de otros territorios;
- La utilización urbanística de territorios rurales y recursos no renovables con potencialidad eco sistémica a través de procesos de subocupación del suelo urbano y conurbación con parroquias rurales y los cantones Rumiñahui y Mejía;
- Sobresaturación de equipamientos y servicios en el área central de la ciudad; Débil estructuración jerárquica y limitado desarrollo de los centros poblados rurales;
- Accesibilidad y conectividad reducidas y limitadas por la geografía y la falta de conexión especialmente entre el sur y norte de la ciudad y de esta con los valles circundantes;
- Alta vulnerabilidad de las edificaciones frente a amenazas socio-naturales;
- Proliferación de patrones urbanísticos conformados por urbanizaciones cerradas que generan la fragmentación del territorio urbano;
- Un marco legal e institucional que privilegia exclusivamente la normativa urbanística, ignorando la incorporación e instrumentalización de nuevas alternativas de gestión orientadas hacia la construcción de consensos sobre visiones de desarrollo y los repartos equitativos de cargas y beneficios correspondientes (Plan Metropolitano de Ordenamiento Territorial 2012 -2022, 2012).
- Cabe mencionar también que, dentro de las Ordenanzas Metropolitanas de Quito se establecen también normativas regulatorias para construcciones en zonas de quebradas y laderas de pendientes pronunciadas y/o erosivas (Quito, 2013).

Según el Instituto Ecuatoriano de Estadísticas y Censos (INEC) desde el año 1950, la población del DMQ se ha multiplicado siete veces hasta alcanzar 2.239.191 habitantes en el año 2010. Si bien la concentración poblacional en el DMQ es el producto de un rápido crecimiento demográfico observado especialmente entre 1950 y 1982 con tasas superiores al promedio nacional, en las últimas tres décadas y producto de la disminución de las tasas de crecimiento natural y migratorio se ha evidenciado una tendencia decreciente en las que la tasa de crecimiento se redujo desde el 4.19%y 4.34% correspondiente al DMQ y Quito en el periodo 1974-1982 al 2.17%y 1.5%observados entre el 2001 y 2010.

Desde 1990 predominan un proceso de peri-urbanización hacia los valles próximos a la ciudad correspondiente a un modelo expansivo y disperso de urbanización y la incorporación de actividades económicas intensivas vinculadas a la agro exportación en los valles orientales (zona del nuevo aeropuerto) lo que ha propiciado un mayor crecimiento del área suburbana respecto a la ciudad. La tasa de crecimiento 2001-2010 del área suburbana (parroquias rurales) duplica el crecimiento de la ciudad (4.1% respecto a 1.5%), (INEC, 2010). Esta característica demográfica evidencia también la consolidación de la urbanización y la expansión de la ciudad de Quito hacia los valles circundantes. En el 2010, la población urbana representa el 88%, mientras que la población en las áreas rurales es del 22% del total (INEC, 2010).

Particularmente desde el año 1982 la parroquia de Calderón muestra un crecimiento que supera considerablemente las cifras del resto de parroquias suburbanas del DMQ. Se cambia drásticamente el patrón de crecimiento, al punto que en el censo de 1990 (solo ocho años más tarde), se registra un total de 36.297 habitantes, es decir un incremento en valores absolutos de 18.238 habitantes que representan el 101% de crecimiento (8% anual). Este comportamiento poblacional, no solo que se mantiene, sino que sobrepasa lo esperado, tal es así que al año 2001, la población alcanza una cifra fenomenal de 84.848 habitantes, que representan un incremento de 133% en relación al año 1990. Esta cifra significó un crecimiento de 48.551 habitantes, que en términos de tasas de crecimiento anual, en los dos últimos periodos censales, significó un crecimiento de 7.7 %, dato considerado como el más alto observado en el DMQ., Calderón se encuentra entre las parroquias con mayor evolución de número de habitantes con respecto al DMQ.(Durán, 2016)

En los últimos tres años, el crecimiento urbano del DMQ ha experimentado una relativa pausa en la continua expansión de su mancha urbana, probablemente debido a las limitaciones geográficas existentes, algunas restricciones exclusivas por parte del municipio, o en fin, hasta por la crisis económica que atravesó el país en los últimos años. En el caso muy particular de las parroquias suburbanas continúan creciendo en forma expansiva cubriendo áreas cada vez más alejadas de los lugares concentrados, amerita colocar mucha atención en este fenómeno existente, debido a que, dentro de la planificación para atender con los servicios a la ciudadanía depende muy íntimamente del histórico crecimiento y la proyección de años venideros de la consolidación de nuevos asentamientos que derivan en nuevos consolidados rurales y urbanos que en futuro cercano deberán ser atendidos por parte del Gobierno Local.

El presente estudio de investigación se realizará en la zona extrema norte de la parroquia de Calderón (zona en expansión urbana), en los barrios Bellavista y San Juan de Calderón ( Figura 1).

## MODELOS DE SIMULACIÓN URBANOS

Los modelos de simulación urbanos se podrían considerar herramientas relativamente nuevas en su utilización, sin embargo el surgimientos de estas registran desde alrededor de los año cincuenta (Batty, 2005). Cabe recalcar que los fundamentos teóricos sobre

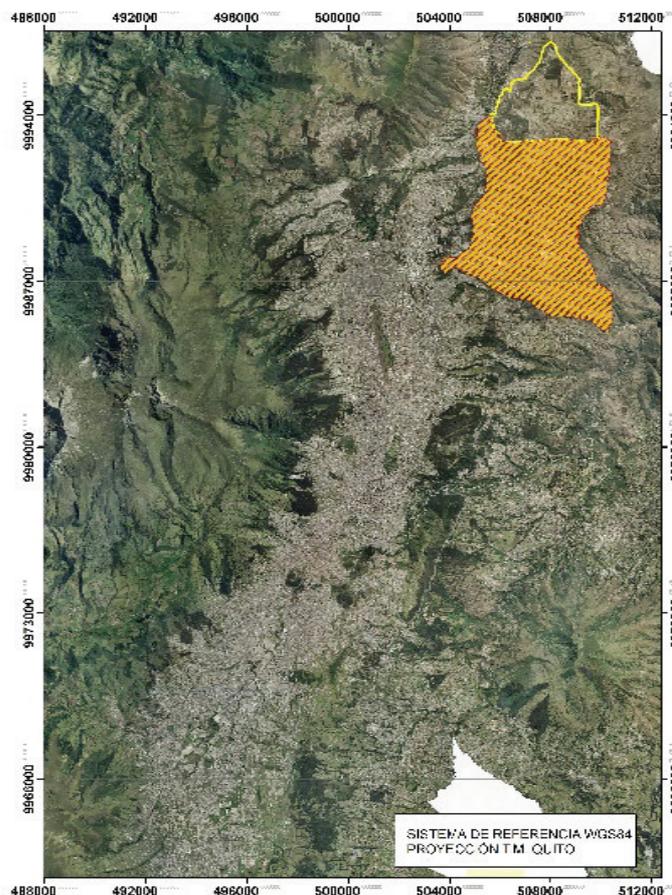


Figura 1. Izq. Ubicación de la Parroquia de Calderón en la Ciudad de Quito, Drcha. Ubicación de la zona de estudio en la parroquia de Calderón ( en amarillo)

estos modelos, teorías y estudios aparecen tiempo atrás como la teoría de los lugares centrales de Christaller y las modificaciones de Lösch, que de alguna forma influyen en las metodologías sobre los cambios en el uso del suelo (Briassoulis, 2000). Los trabajos de simulaciones urbanas que actualmente se realizan difieren en buena razón con la forma de construir los primeros modelos de este tipo, debido principalmente al desarrollo de la tecnología y computación. En los años setenta se desvía la atención hacia los modelos de gran escala para la planificación de los usos del suelo y del transporte; como los gravitacionales, que fueron los primeros de estructura espacial urbana (Aguilera, 2005); uno de los modelos más destacados para la planificación del uso del suelo, aplicado en la ciudad de Pittsburg EE.UU. es el de Lowry, que integra otras teorías económicas y explica el crecimiento urbano sobre la base del crecimiento de las actividades económicas y sus relaciones de empleo y residencia. Estos modelos experimenta una crisis tras el conocido “Requiem” otorgado por Lee en 1973, en el que se criticaba sus elevados costes, elevada complejidad que no ayudarían a entender mejor las dinámicas urbanas o el ultranacionalismo de sus premisas. Para los años noventa con el gran impulso de la informática y los Sistemas de Información Geográfica atados a los gigantes desarrollos

de las áreas urbanas se vuelve a retomar y a considerar las técnicas de simulación en los procesos urbanos, generando una nueva ola de la simulación urbana (Benenson & Torres, 2004). Este nuevo período de la simulación urbana, en el que la producción científica ha sido extraordinariamente prolífica (Batty, 2005), debe caracterizarse en cualquier caso por un enfoque diferente al empleado en los años sesenta y setenta, que tantas críticas había suscitado. En este sentido, la diferencia debe radicar en que en el contexto actual los modelos de simulación no se deben entender como los instrumentos definitivos que decidirán por los planificadores cómo solucionar los problemas urbanos (Blecic & Cecchini, 2008) ni tampoco como bolas de cristal para predecir el futuro. Por el contrario, se deben entender como instrumentos que pueden ayudar a explorar diferentes posibilidades o escenarios de evolución de las dinámicas urbanas (crecimiento urbano por ejemplo), de acuerdo con las tendencias actuales del pensamiento prospectivo (Berdoulay, 2009). Este nuevo enfoque de la simulación urbana, denominada simulación prospectiva, tendría como objetivo la generación de imágenes futuras posibles que constituyan una importante herramienta de soporte a la planificación de estos ámbitos, ayudando a mostrar posibles consecuencias de tendencias, metas deseables a alcanzar, cambios necesarios para alcanzar determinados objetivos, generando imágenes diversas que faciliten una planificación más participativa, entre otros. Dentro de los modelos de simulación prospectivos se destacan los pensamientos exploratorios y normativos, algunos de los principales modelos de simulación del crecimiento urbano se pueden presentar agrupados en dos grupos principales: aquellos de una mayor aplicabilidad para la simulación de escenarios exploratorios como pueden ser los modelos basados en autómatas celulares o basados en agentes; y aquellos de mayor aplicabilidad en la simulación de escenarios normativos, como son la EMC (Evaluación Multicriterio) y la lógica borrosa. No obstante, esta división no supone que los diferentes modelos presentados tengan utilidad exclusiva para la simulación de escenarios de un único tipo, sino que es posible emplearlos en la simulación de ambos.

## **MODELOS DE SIMULACIÓN BASADOS EN AUTÓMATAS CELULARES (AC)**

Los modelos basados en AC, han sido ampliamente discutidos en los últimos años como un instrumento adecuado para la representación y simulación espacial de crecimientos urbanos (Aguilera, 2008; Li & et al., 2008; Petrov & et al., 2009), aunque no se trata de una herramienta nueva. En concreto, los AC como herramienta matemática vieron la luz en los años cuarenta, de la mano de los matemáticos John von Neuman y Stanislaw Ulam, aunque la idea de AC pertenece a Alan Turing y su máquina universal (O'Sullivan & Torrens, 2000). Se pueden definir como un sistema dinámico formado por un conjunto de elementos sencillos idénticos entre sí, pero que en conjunto son capaces de demostrar comportamientos complejos y que por ello son muy adecuados para la simulación de procesos urbanos (Frankhauser, 1998). Este sistema dinámico estaría compuesto, desde un punto de vista formal, de los siguientes elementos (White & Engelen, 2000). Los autómatas celulares saltaban así del campo teórico a la escena de la modelización geográfica, siendo uno de los pioneros en su aplicación Aldo Tobler, con su Cellular Geography. Desde entonces, mucho se ha escrito acerca de la aplicabilidad de los AC a

la modelización de procesos urbanos (O'Sullivan & Torrens, 2000; Benenson & Torrens, 2004), así como sobre su aplicación para la simulación del crecimiento urbano (Barredo & et al., 2003, 2004; Petrov & et al., 2009...), pudiendo establecerse que se trata de un instrumento adecuado para la simulación de escenarios exploratorios.

No obstante conviene destacar que los modelos empleados para la simulación de las dinámicas de la ocupación del suelo no están constituidos por un autómatas celular estricto, como el descrito en el Game of Life, de Conway. Por el contrario, buena parte de estos modelos (Santé & et al., 2010) determinan un potencial de transición de los diversos usos urbanos (o posibles estados de los AC) en función de diversos factores (Figura. 3) como son la accesibilidad, la aptitud del territorio para los crecimientos urbanos, un factor estocástico, así como un factor denominado de vecindad que estaría basado en los autómatas celulares propiamente dichos. Este factor de vecindad consistiría en un potencial de cambio calculado en función del efecto de atracción/repulsión que ejercerían los usos de los autómatas de la vecindad sobre cada autómatas en cuestión.

Esta estructura ha sido popularizada por los trabajos que han empleado el modelo desarrollado en el proyecto MOLAND (Barredo & et al., 2003; Barredo & et al., 2004; Gómez & Barredo, 2008; Petrov & et al., 2009), aunque también ha inspirado los modelos desarrollados en otros estudios (Aguilera, 2008; Valenzuela & et al., 2008).

Para finalizar, la intensión de este artículo se enmarca dentro de los siguientes objetivos Generales y Específicos:

Generar un modelo matemático de predicción geográfico que permitan revelar los asentamientos futuros de la zona norte de la parroquia de Calderón basado en Autómatas Celulares.

- Recopilación, análisis y procesamiento de la información base, imágenes satelitales históricas del sector.
- Definir las variables que contribuyen a la expansión de los asentamientos en la zona de estudio.
- Generar el modelo geográfico predictivo con base en Autómatas Celulares.
- Verificar y calibrar el modelo.

## **METODOLOGÍA**

La investigación parte con la recolección de imágenes satelitales del sector de estudio de diferentes años, con la finalidad de evaluar la transición que ha experimentado la zona, para este caso se ha extraído áreas de imágenes satelitales desde Google Earth (Sensores DigitalGlobe y CNES/AirBus con resolución espacial de 1 metro.) de los años marzo 2003, Septiembre 2005, julio 2008, noviembre 2009, abril 2010, junio 2011, junio 2012, enero 2013, julio 2014, marzo 2015, enero 2016; esta serie de datos geográficos se traduce en la serie temporal con la que se dispone.

Las imágenes seleccionadas se deben geo referenciar al sistema oficial para el Distrito Metropolitano de Quito TMQuito, para su posterior digitalización. Para este caso de estudio el objetivo es producir imágenes (cobertura raster) con la clasificación 1: asentamientos y 0: sin asentamientos. Las imágenes satelitales extraídas desde el aplicativo de Google Earth no recibieron ningún tipo de corrección, ya que para el objetivo y alcance de este estudio solo se evaluó las ocupaciones espaciales de estas que visualmente son claras y se puede identificar las categorías deseadas sin dificultad

Paralelamente se definen variables complementarias que según criterios expertos colaboran a la proliferación del fenómeno estudiado, para este proyecto se han escogido, disposición de vías y carreteras, disposición de servicios básicos y forma del terreno (topografía), estas variables también son de tipo geográficas (cobertura raster). Obtenidas desde la plataforma geográfica del gobierno abierto del Distrito Metropolitano de Quito a escala 1:1000 (Quito, 2017)

Con las series temporales, para este caso se generan las matrices de transición entre los años detallados, con el objetivo de determinar las probabilidades de cambio de estado con base al histórico, es decir de 0 a 1 o viceversa, consiste en evaluar los patrones de cambios y brindar información al modelo de la cantidad de transiciones y la localización más probable de los mismos

Se calcula las matrices de transición históricas (asentamientos urbanos civiles), que permite describir los cambios de un sistema a través de periodos de tiempo discretos, la variable a ser analizada es (área de ocupación civil – asentamientos urbanos), estas matrices de cambio (matriz de Markov) indican la probabilidad de ocurrencia de cada transición durante un año y permite realizar proyecciones sobre una base anual. Para el caso de este estudio la matriz utilizada es de pasos múltiples que representa la tasa de transición para cada periodo de tiempo (año). Las tasas de transición determinan, en este caso, el porcentaje de área que será cambiado a otro estado. Esta comparación permite establecer una relación entre el potencial del cambio y las variables a través de diferentes enfoques como análisis muticriterio, regresiones, pesos de evidencia o redes neuronales, entre otros.

Para calibrar el modelo se ha utilizado variables explicativas que ha criterio incentivan la ocupación espacial con infraestructura civil, relativamente el área de estudio es pequeña pero de suma importancia debido a que es una de las pocas zonas en expansión de la parroquia de Calderón en la Ciudad de Quito Ecuador, de manera que, se ha elegido las siguientes variables más representativas; Morfología del Terreno, ya que esta variable es importante en la calibración del modelo puesto que permite la restricción del uso del suelo en laderas erosivas de pendiente pronunciada o probables fenómenos de inestabilidad, Acceso Vial y Acceso a Servicios básicos (Agua Potable, Luz Eléctrica, Telefonía Fija), Potencial disponibilidad del servicio de internet fijo, transporte público. Identificando las variables que no son categóricas en las cuales se han creado rangos (tipo buffers) cada cierta distancia para categorizarlas en cada uno de los rangos, se procede a

calcular las evidencias en cada buffer basados en el método geo-estadístico de pesos de evidencia y obtener un mapa de probabilidades de transición, el cual muestra las áreas donde el cambio es más propenso a ocurrir (ecuación 1), La ocurrencia del evento A (Asentamientos) dado un patrón espacial B (ej. Distancia a vías)

$$O\{A|B\} = \frac{P\{A|B\}}{P\{A\}} \quad (1)$$

Para determinar el mapa de probabilidades se ocupa los pesos calculados de todas las variables consideradas (Morfología del Terreno M, Acceso Vial V y Acceso a Servicios básicos (Agua Potable, Luz Eléctrica, Telefonía Fija) S, Potencial disponibilidad del servicio de internet fijo I, transporte público T), se utiliza la ecuación 2:

$$P\{cambio|M \cap V \cap S \dots N\} = \frac{e^{\sum W_N}}{1+e^{\sum W_N}} \quad (2)$$

Con los procedimientos anteriores ya se han calculado los rangos de cada variable, si estas no son categóricas, y los pesos de evidencia para cada rango y el mapa de probabilidad. Inmediatamente se debe realizar un Análisis de Correlación de Mapas. En principio se supone que las coberturas utilizadas como variables explicativas son espacialmente independientes, para comprobar la validez de este supuesto se utiliza el test de Cramer de información de Incertidumbre conjunta, para este proceso se utilizó la herramienta Dinámica EGO que realiza pruebas pareadas para mapas categóricos para comprobar la independencia, básicamente los métodos empleados son Chi Cuadrado, Crammers, Contingencia, Entropía e Incertidumbre de información relacionada (Bonhan-Carter 1994).

Dentro del modelo se ha utilizado un artificio para otorgar una probabilidad adicional a los pixeles más cercanos a los asentamientos existentes de la imagen de partida (más antigua) con la herramienta “*Cal Distance Map*”, Figura 2. Las funciones Patcher y Expandar son los modelos de autómatas celulares que reproducen los patrones espaciales de cambio. En síntesis el Patcher genera o forma nuevas piezas a través del mecanismo semilla, busca las celdas de alrededor de una ubicación central para ejecutar un cambio a la misma clase, seleccionando la celda central y asignando un la cantidad de celdas alrededor de la central en función de su probabilidad y el Expandar se dedica a la expansión o reducción de piezas de una clase ya existente.

El resultado del modelo de entrenamiento es la simulación correspondiente al año 2016 que es comparado con la realidad del mismo año, figura 6, esto permite validar el grado de predicción, el proceso de validación se resuelve mediante el modelo de la figura 3. En esta instancia salen a relucir que procedimiento necesita ser reanalizado y reconsiderado, así después de realizar los ajustes necesarios; y con esto mejorar el índice de correlación, se podría establecer que el modelo está calibrado y listo para predecir las siguientes temporalidades.

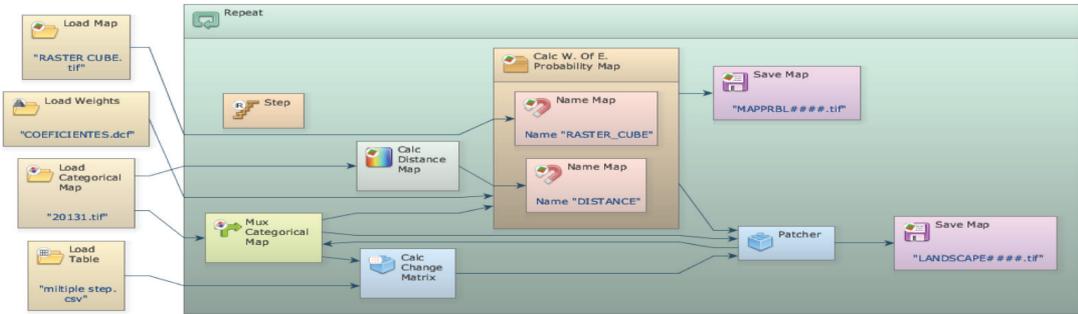


Figura 2. Modelos de Entrenamiento entre 2013 y 2016, las matrices de transición se calculan entre 2003 y 2016.

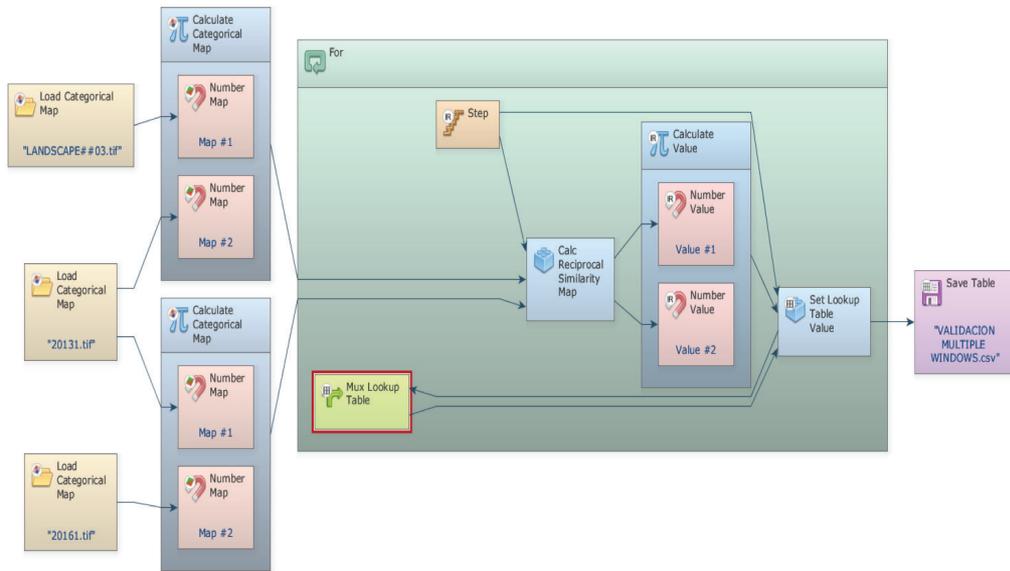


Figura 3. Modelo de Validación con la simulación del año 2016 vs. La realidad del año 2016 de los asentamientos en la zona de estudio

Para ejecutar las predicciones futuras es necesario incorporar una función adicional que permite generar comportamientos nuevos como es la función Expander de esta manera y de forma iterativa se genera el mapa con la predicción al tiempo requerido, figura 4.

El resultado es un mapa raster con el pronóstico de los asentamientos en los próximos años, con la misma clasificación que las imágenes de entrada (temporales).

Después de realizar algunas iteraciones, el resultado será validado con datos de la misma serie de entrenamiento.

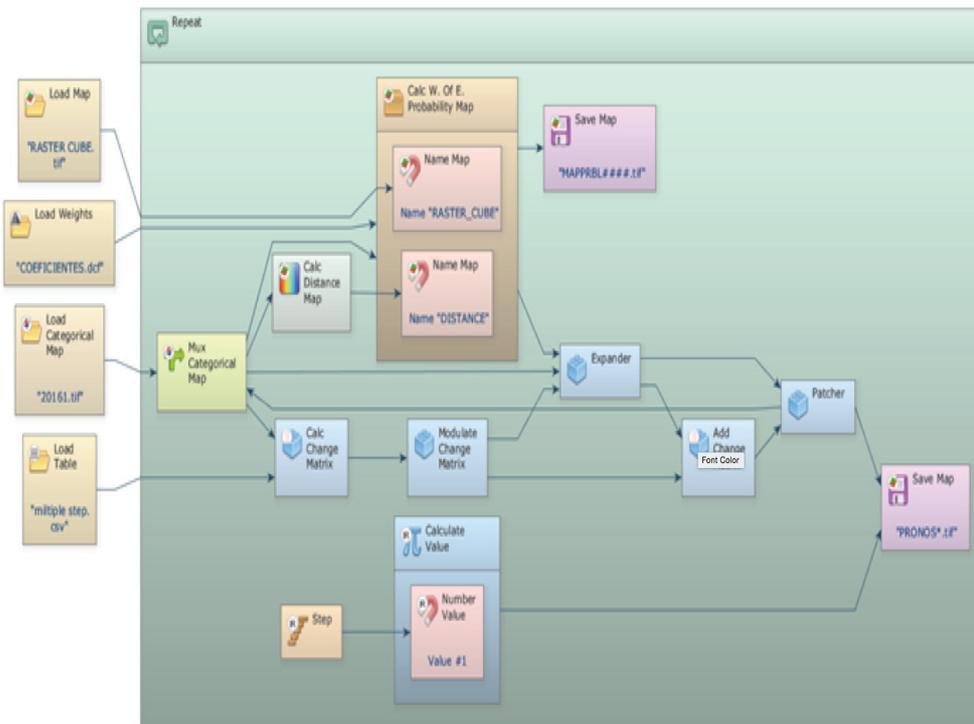


Figura 4. Modelos de Estimación Asentamientos con infraestructura Civil.

## RESULTADOS

- **Datos de entrada (situación histórica- Actual):** series temporales satelitales, las imágenes representan los asentamientos con infraestructura civil en el sector de estudio que en esa determinada fecha existían, en la figura 5 se presentan los asentamientos de los años 2003, 2011 y 2016, con dos objetivos principalmente: recalcar el crecimiento ocupacional espacial histórico registrado y mostrar que las imágenes han sido tratadas como binarias para ingresar al modelo, el color amarillo representa la ocupación con estructura civil y negro representa zonas sin ocupación.
- **Correlación y prueba del modelo:** Tomando como referencia la situación registrada real del año 2016, después de correr el modelo, es necesario evaluarlo para determinar qué grado de predicción se consigue con la metodología aplicada; de manera que, en este proceso el modelo se ha ejecutado para obtener una simulación del año 2016 y con este resultados contrastar la situación real en el mismo año, en la figura 6, se presenta la simulación del modelo entrenado (derecha) para el año 2016 en comparación con la situación real (izquierda). La validación obtenida fue del 60% (correlación 0.6).
- **Resultados de las predicciones:** Después de aceptar el nivel de correlación arrojado por el modelo construido, se ejecutó este para tratar de predecir los asentamientos urbanos (ocupación espacial) en la zona de estudio para los años 2018 - 2020 – 2025.

En la figura 7 se muestran los resultados de las predicciones para los años detallados, se interpreta el aumento de la ocupación espacial es considerable, en la zona que anteriormente ya estaba ocupada (Centro inferior de la zona de estudio) se vuelve más densa obedeciendo su propagación hacia los servicios básicos y ejes viales existentes; otra característica de la mancha urbana es que tiende a expandirse hacia el norte y hacia el Oeste, ocupando quebradas y espacios sin ocupación entre las parroquias de Calderón y las Parroquias de Pomasqui y San Antonio. Por otro lado las particularidad de las manchas tipo spray representan sectores con alta probabilidad de ser ocupados por infraestructura civil, a medida que avanza el tiempo estas siguen densificándose.

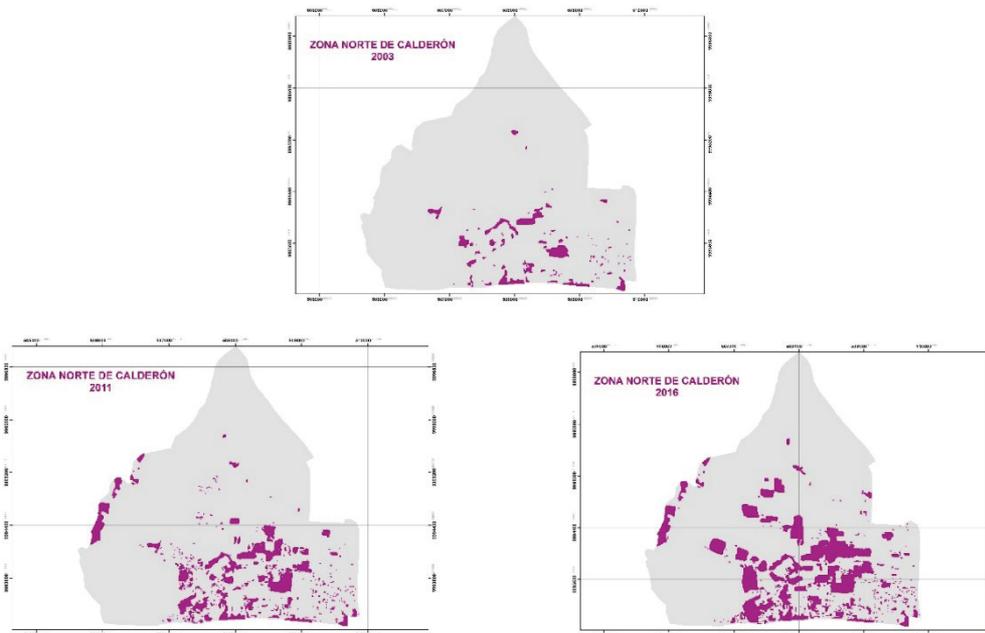


Figura 5. Zona de Estudio digitalizada y geo referenciada, color púrpura representa asentamientos civiles

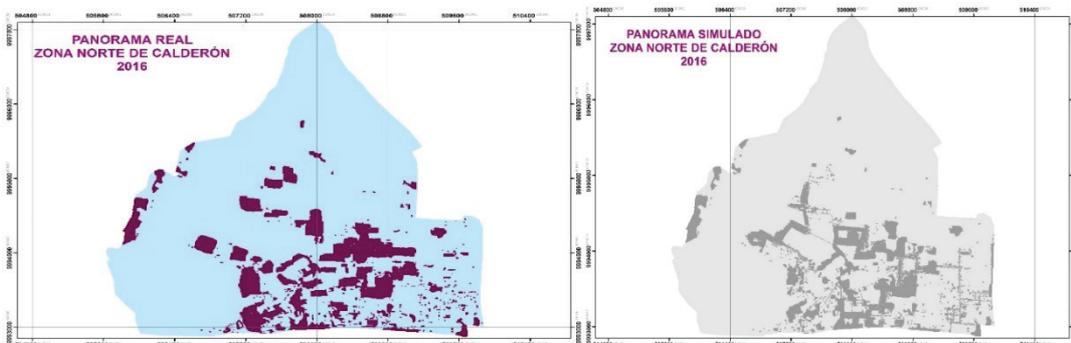


Figura 6. Comparación del resultado simulado a partir del modelo construido con el panorama real 2016, color plomo oscuro representa asentamientos civiles.

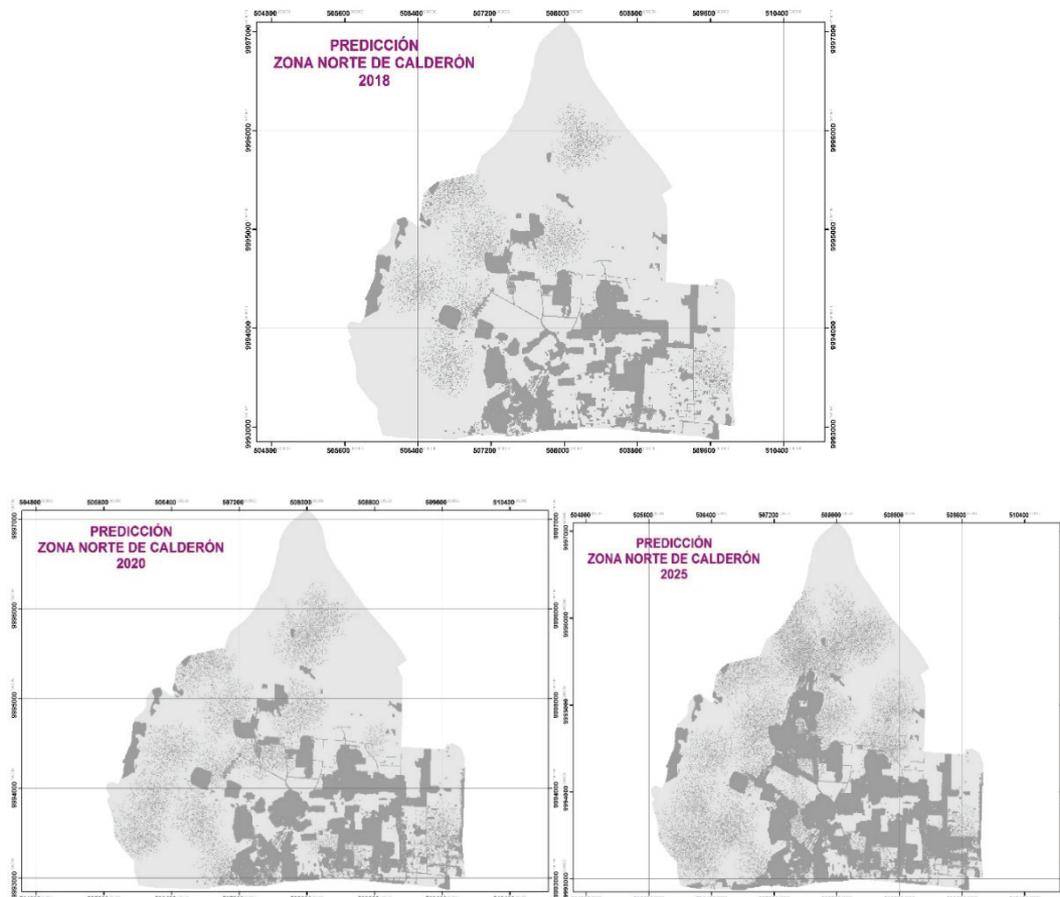


Figura 7. Predicciones futuras resultados del modelo matemático geográfico, color plomo oscuro representa asentamientos urbanos.

## CONCLUSIONES

- La incorporación de variables explicativas provee al modelo más eficiencia en su predicción, complementar estos procedimientos con técnicas como Evaluación Multicriterio y para este caso en particular trabajar paralelamente con Modelos basados en Agentes aumentará el coeficiente de correlación y brindará perspectivas sociales más acentuadas.
- El disponer de una serie temporal de imágenes extensa siempre brinda mejores resultados debido a que el modelo adquiere más información y se entrena más robusto, para este caso en particular la serie completa ayudó para calcular las matrices de transición, pero distorsionó en cierta manera los resultados, se presume que los cambios en el uso y ocupación del suelo de este sector fueron de alto contraste hasta el 2010 que definitivamente cambio a ser uso residencial, fue por esta razón que se tomó desde esta fecha para entrenar al modelo y validarlo.

- Los resultados obtenidos de las predicciones tienen lógica y se concluye que posee mucho acercamiento a la realidad con la futura ocupación, tomando como referencia que en los sectores pronosticados ya existen indicios antrópicos como limpieza de la vegetación y límites físicos, incluso en las zonas con restricción de uso de suelo como laderas, presentan posibles asentamientos obedeciendo al típico comportamiento de las ocupaciones ilegales en zonas restringidas, que en el sector de estudio se han presentado.
- En los resultados, Figura 7, las manchas tipo spray representan los sectores con alta probabilidad a ser ocupados, en los próximos años hasta el 2020 según el alcance de este estudio.
- Para estudios de crecimiento espacial urbano con esta metodología los costes asociados al desarrollo son bajos, debido a que la información principal para adquirir la serie temporal se pueden obtener desde imágenes satelitales de la aplicación de Google Earth, que visualmente brinda una interpretación directa de los asentamientos urbanos sin la necesidad de realizar correcciones con técnicas especializadas y que además cuentan con suficiente resolución y su disponibilidad es asequible.
- El método aplicado no se limita solo a fenómenos de crecimiento urbano; por su forma de modelar, estas técnicas permiten predecir comportamientos con base a la vecindad inmediata tomando en cuenta variables que determinan la naturaleza que hace proliferar al fenómeno, como por ejemplo: cambios de cobertura vegetal, estudios de Aguas Contaminadas, Tratamiento de Aguas residuales, comportamientos Sociales, estudio de clientes en su consumo, voluntad de pago, morosidad y comportamientos Económicos, Evolución del Factor Socio económico.

## REFERENCIAS

- Aguilera, F. (2008): *Análisis Espacial Para La Ordenación Ecopaisajística De La Aglomeración Urbana De Granada*, Tesis Doctoral, Universidad De Granada.
- Batty, M. (2005): *Cities And Complexity: Understanding Cities With Cellular Automata, Agent-Based Models, And Fractals*, The Mit Press.
- Batty, M., & Torrens, P. M. (2005). Modelling And Prediction In A Complex World. *Futures*, 37(7), 745-766. Doi:10.1016/J.Futures.2004.11.003
- Barredo, J. I. & M. Kasanko & N. Y. McCormick & C. Lavallo (2003): “Modelling Dynamic Spatial Processes: Simulation Of Urban Future Scenarios Through Cellular Automata”, *Landscape And Urban Planning*, 64: 145-160.
- Barredo, J. I. & L. Demicheli & C. Lavallo & M Kasanko & N. McCormick (2004): “Modelling Future Urban Scenarios In Developing Countries: An Application Case Study In Lagos, Nigeria”, *Environment and Planning B: Planning And Design*, 32: 65-84.
- Benenson, I. & P. M. Torrens (2004): *Geosimulation: Automata-Based Modeling Or Urban Phenomena*, John Wiley & Sons, Ltd.
- Blecic, I. & A. Cecchini (2008): “Design Beyond Complexity: Possible Futures-Prediction Or

- Design? (And Techniques And Tools To Make It Possible)", *Futures*, Vol. 40: 537-551.
- Briassoulis, H. (2000): "Analysis Of Land Use Change: Theoretical And Modeling Approaches", En: [Fttp://Www.Rri.Wvu.Edu/Webbook/Briassoulis/Contents.Htm](http://www.rri.wvu.edu/webbook/briassoulis/contents.htm) [Mayo, 2007].
- Cootad, F. (2010). Código Orgánico De Organización Territorial, Autonomía Y Descentralización. De Quito, C. M. (2012). Ordenanza Metropolitana 0171: Que Aprueba El Plan Metropolitano De Ordenamiento Territorial (Pmot) Del Distrito Metropolitano De Quito. Registro Oficial, 29.
- Durán, G., Martí, M., & Mérida, J. (2016). Crecimiento, Segregación Y Mecanismos De Desplazamiento En El Periurbano De Quito. *Iconos. Revista De Ciencias Sociales*, (56), 123-146.
- Epmaps. (Marzo De 2011). Google. Recuperado El 04 De Abril De 2015, De Plan Maestro De Agua Potable 2010-2040: [Http://Www.Aguaquito.Gob.Ec/Sites/Default/Files/Documentos/Plan\\_Maestro\\_Agua\\_Potable.Pdf](http://www.aguaquito.gob.ec/sites/default/files/documentos/Plan_Maestro_Agua_Potable.pdf)
- Gómez Delgado, M. & J. I. Barredo Cano (2005): *Sistemas De Información Geográfica Y Evaluación Multicriterio En La Ordenación Del Territorio*, Editorial Ra-Ma, Paracuellos De Jarama. — (2008): "Towards A Set Of Ippc Sres Urban Land Use Scenarios: Modelling Urban Land Use In The Madrid Region", En M. Paegelow & M. T Camacho (Eds.): *Modelling Environmental Dynamics*, Springer-Verlag, Berlín.
- Inec, I. (2010). Censo De Población Y Vivienda. Censo De Población Y Vivienda.
- Martínez, G. (2013). Sistemas Urbanos De Drenaje Sostenible "Suds" Como Alternativa De Control Y Regulación. *Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada*.
- O'sullivan, D. & P. Torrens (2000): "Cellular Models Of Urban Systems", *Casa Working Paper Series*, 22.
- Petrov, L. & C. Lavallo & M. Kasanko (2009): "Urbanland Use Scenarios For A Tourist Region In Europe: Applying The Moland Model To Algarve, Portugal", *Landscape And Urban Planning*, 92 (1): 10-23.
- Plan Metropolitano De Ordenamiento Territorial 2012 –2022. (2012). Quito: Secretaría De Territorio, Hábitat Y Vivienda
- Quito, A. D. (2017, Junio 01). Gobierno Abierto. Retrieved From [Www.Gobierno Abierto.Gob.Ec/?Page\\_Id=1122](http://www.gobiernoabierto.gob.ec/?Page_Id=1122)
- Quito, A. M. (2013). Ordenanza Metropolitana Reformatoria De La Ordenanza Metropolitana No. 0172, Que Establece El Regimen Administrativo Del Suelo En El Distrito Metropolitano De Quito. In Ordenanza Metropolitana No. 0432. Quito.
- Valenzuela, L. M. & F. Aguilera & J. A. Soria & E Molero (2008): "Designing And Assessing Of Development Scenarios For Metropolitan Patterns", En Paegelow, M. & M. T. Camacho (Eds.): *Modelling Environmental Dynamics*, Springer-Verlag, Berlín