

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES
FACULTAD DE CIENCIAS PURAS Y NATURALES
CARRERA DE INFORMATICA**



TESIS DE GRADO

**“MODELO DE CRECIMIENTO DE LA MANCHA
URBANA DE LA CIUDAD DE EL ALTO USANDO
AUTOMATAS CELULARES”**

**PARA OPTAR AL TITULO DE LICENCIATURA EN INFORMATICA
MENCION: INGENIERIA DE SISTEMAS INFORMATICOS**

POSTULANTE: ERIKA TICONA SANGA

TUTOR METODOLOGICO: Lic. GROVER ALEX RODRIGUEZ RAMIREZ

REVISOR: Lic. GERMAN HUANCA TICONA

**LA PAZ – BOLIVIA
2015**



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE CIENCIAS PURAS Y NATURALES
CARRERA DE INFORMÁTICA**



LA CARRERA DE INFORMÁTICA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS PURAS Y NATURALES PERTENECIENTE A LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la referencia correspondiente respetando normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADOS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

DEDICATORIA

A mis padres Pedro Ticona y Primitiva Sanga, quienes siempre se esforzaron y apoyaron incondicionalmente.

A mi familia por el apoyo brindado para la realización de esta tesis, y especialmente a mi esposo Ronald Callata, a mis queridas hijas Alejandra y Vianca.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Pedro Ticona y Primitiva Sanga, a mi esposo Ronald Callata, a toda mi familia por el apoyo y fuerza que me brindan.

Al Lic. Grover Alex Rodríguez Ramírez, tutor metodológico, por el seguimiento, observaciones pertinentes de la presente tesis.

Al Lic. German Huanca Ticona, por su tiempo, aportes, sugerencias y conocimiento entregados en el transcurso de la investigación.

A todos los Docentes de la Carrera de Informática que nos incentivan y nos brindan sus conocimientos.

RESUMEN

El crecimiento de las ciudades de Bolivia, en especial la Ciudad de El Alto, presenta un gran crecimiento urbano a causa de factores reproducción vegetativa y de la migración, haciendo que la mancha urbana se expanda y por ese motivo se realizó el presente trabajo se usó los **autómatas celulares**, para la proyecciones de espacios ocupados por la mancha urbana obteniendo resultados analíticos y gráficos en el tiempo.

El modelo de **autómata celular**, una herramienta útil para el estudio y modelado de dicho crecimiento, son sistemas dinámicos discretos cuyos elementos tienen una interacción constante entre sí, tanto en el espacio como en el tiempo, también poseen la capacidad de representar comportamientos complejos a partir de dinámicas sencillas.

En este trabajo se ha realizado el modelo de predicción, generado por el prototipo realizado a partir del 2015 de la mancha urbana de la ciudad de El Alto con la imagen satelital del mismo año, y así simular para años futuros tomando en cuenta datos recolectados e imágenes de dicha ciudad.

La comparación entre este modelo de predicción y la realidad muestra una alta coincidencia en cuanto al área de crecimiento.

Palabras claves: mancha urbana, autómatas celulares, modelo.

INDICE

| | |
|--|----|
| CAPITULO I | 1 |
| MARCO REFERENCIAL | 1 |
| 1.1 INTRODUCCION | 1 |
| 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 1 |
| 1.2.1 ANTECEDENTES | 1 |
| 1.2.2 PROBLEMÁTICA | 4 |
| 1.2.3 FORMULACION DEL PROBLEMA | 4 |
| 1.3 OBJETIVOS | 5 |
| 1.3.1 OBJETIVO GENERAL | 5 |
| 1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 5 |
| 1.4 LÍMITES Y ALCANCES | 5 |
| 1.5 JUSTIFICACION | 5 |
| 1.5.1 JUSTIFICACION SOCIAL | 5 |
| 1.5.2 JUSTIFICACIÓN TECNOLÓGICO | 6 |
| 1.5.3 JUSTIFICACIÓN CIENTÍFICA | 6 |
| 1.5.4 JUSTIFICACION ECONOMICA | 7 |
| 1.6 HIPOTESIS | 7 |
| 1.7 DISEÑO DE METODOLOGIA | 7 |
| 1.7.1 MÉTODOS Y MEDIOS DE INVESTIGACION CIENTIFICA | 7 |
| CAPITULO II | 9 |
| MARCO TEORICO | 9 |
| 2.1 MANCHA URBANA | 9 |
| 2.2 SIMULACION | 9 |
| 2.2.1 LA NECESIDAD DE SIMULAR | 9 |
| 2.2.2 TIPOS DE SIMULACION | 10 |
| 2.3 MODELOS | 11 |
| 2.3.1 UTILIDAD DE LOS MODELOS | 11 |
| 2.3.2 CLASIFICACION DE MODELO | 12 |
| 2.3.2.1 SEGÚN LA EVOLUCION DEL TIEMPO | 12 |
| 2.3.2.2 SEGÚN ALEATORIDAD | 12 |
| 2.3.2.3 SEGÚN LA ESTRUCTURA | 12 |
| 2.3.2.4 SEGÚN EL CAMBIO DE ESTADO EN EL TIEMPO | 13 |
| 2.3.2.5 MODELOS ANALOGICOS Y MODELOS DIGITALES | 13 |

| | |
|--|----|
| 2.3.2.6 MODELOS BASADOS EN AGENTES..... | 13 |
| 2.4 MODELOS DE PREDICCIÓN..... | 13 |
| 2.5 MODELO DE CRECIMIENTO URBANO | 14 |
| 2.6 LA GENERACION DE MODELOS..... | 15 |
| 2.7 AUTOMATAS CELULARES | 15 |
| 2.7.1. ANTECEDENTES DE AUTOMATAS CELULARES | 16 |
| 2.8 MODELO DE CRECIMIENTO URBANO | 22 |
| 2.9. LA GENERACION DE MODELOS..... | 23 |
| 2.10 CIUDAD DE EL ALTO | 23 |
| 2.10.1 HISTORIA | 23 |
| 2.10.2 DATOS GEOGRÁFICOS..... | 25 |
| 2.10.3 CRECIMIENTO DE LA CIUDAD DE EL ALTO | 25 |
| 2.10.2.3 CRECIMIENTO DE LA MANCHA URBANA DE LA CIUDAD DE EL ALTO EN EL AÑO 2013..... | 28 |
| 2.11. DISEÑO DE METODOLOGIA..... | 33 |
| 2.11.1 METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN DE MODELOS | 33 |
| CAPITULO III | 35 |
| DISEÑO METODOLOGICO | 35 |
| 3.1 IDENTIFICACION Y ANALISIS DE OBJETIVOS | 37 |
| 3.2 RECOLECCION DE DATOS | 38 |
| 3.3 CONSTRUCCION DEL MODELO | 40 |
| 3.3.1 INTRODUCCION DEL MODELO | 40 |
| 3.2 DESCRIPCION FORMAL DE MODELO | 41 |
| 3.2.1 FORMULACION GENERICA DEL MODELO | 41 |
| 3.3.2.2. POTENCIAL DE CAMBIO PARA LA TRANSICION P | 41 |
| 3.3.2.2.1. CONSTRUCCION DEL PRIMER AUTOMATA CELULAR | 42 |
| 3.3.2.3 INFLUENCIA DE VECINDARIO DISTANTE D | 48 |
| 3.3.2.3.1 CONSTRUCCION DEL SEGUNDO AUTOMATA CELULAR..... | 48 |
| 3.3.2.4 PARAMETRO DE PERTURBACION ALEATORIO E | 55 |
| 3.3.2.5 TRATAMIENTO FINAL DEL MODELO..... | 56 |
| CAPITULO 4 EVALUCION DEL MODELO..... | 58 |
| 4.1 IMPLEMENTACION DEL MODELO | 58 |
| 4.2 MODULOS | 59 |
| 4.2 EXPERIMENTACION DEL MODELO | 60 |
| 4.2.1 PARAMETRO DE ENTRADA..... | 60 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2.2 RESULTADOS DE LA SIMULACION..... | 63 |
| 4.3 VALIDACION DEL MODELO..... | 67 |
| 4.4 PRUEBA DE HIPOTESIS..... | 69 |
| CAPITULO V..... | 71 |
| CONCLUSION Y RECOMENDACIONES..... | 71 |
| 5.1 CONCLUSIONES..... | 71 |
| 5.2 RECOMENDACIONES..... | 71 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 73 |
| DOCUMENTACION..... | 75 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.3: abstracción y realización de un modelo a partir del mundo real..... | 11 |
| Figura 2.7.1: Vecindad von Neumann..... | 18 |
| Figura 2.7.2: Vecindad Moore..... | 19 |
| Figura 2.7.3: A las configuraciones que permanecen estables durante toda la evolución del autómata celular se les conoce como <i>still life</i> | 20 |
| Figura 2.7.4: Configuraciones en las que todas la células vivas mueren | 20 |
| Figura 2.7.5: Uno de los descubrimientos de Conway..... | 21 |
| Figura 2.10.3.1: mapa de El Alto y esquematización de sus anillos..... | 27 |
| Figura 2.10.3.2: Crecimiento urbano de El Alto en una década..... | 28 |
| Figura 3.1: Metodología de Modelo de simulación..... | 37 |
| Figura 3.1.2: metodología adecuada para modelo de crecimiento de mancha urbana..... | 38 |
| Figura 3.2.1: Mapa Cartográfico de la ciudad de El Alto..... | 39 |
| Figura 3.2.3: Mapa de la ciudad de El Alto en el año 2015..... | 39 |
| Figura 3.2.2.1.1 Vecindad de Moore..... | 42 |
| Figura 3.2.2.1.2: imagen de simulación..... | 43 |
| Figura 3.2.2.1.3 estados posibles del vecindario..... | 47 |
| Figura 3.2.3.1.1: Estructura del segundo AC utilizado por el Modelo..... | 48 |
| Figura 3.2.3.1.4 Matriz diseñada para expansión emergente de la mancha urbana Matriz de Filtrado M..... | 52 |
| Figura 3.2.3.1.4: Matriz diseñada para expansión emergente de la mancha urbana..... | 53 |
| FIGURA 3.3.2.3.1.5: retícula representa la expansión creciente de la mancha urbana..... | 53 |
| Figura 3.3.2.3.1.6: Estados posibles del vecindario Moore Expandido.... | 54 |
| Figura 4.1 secuencia de pasos para elaboración de prototipo..... | 58 |
| Figura 4.2.1 Interfaz del módulo inicio..... | 59 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.2.1.1 imagen de mancha urbana de la Ciudad de El Alto en 1992..... | 60 |
| Figura 4.2.1.2 mancha urbana 2011 municipio de El Alto..... | 61 |
| Figura 4.2.2.1 mancha urbana de la ciudad de El Alto en crecimiento.... | 64 |
| Figura: 4.2.2.2 simulaciones al 2025..... | 65 |
| Figura 4.3 comparación visual..... | 68 |
| Figura 4.4 área de confianza..... | 70 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 2.10.1: población de la Ciudad de El Alto..... | 24 |
| Tabla 2.10.3.3: habitantes por distrito..... | 31 |
| Tabla 2.10.3.4: tabla de distritos con zonas céntricas..... | 32 |
| Tabla 2.10.2.3.5: La población y área de los distritos ocupados por la ciudad de El Alto censo 2001..... | 34 |
| Tabla 3.3.1: tabla de datos recolectados..... | 40 |
| Tabla 3.2.2: Proyección del crecimiento de la superficie urbana, por hectáreas según INE en tesis de Economía..... | 40 |
| Tabla 3.2.2.1: Valores de asignación para las células de la Retícula del primer AC..... | 44 |
| Tabla 3.3.2.3.1.1: de valores asignados para las células de la retícula del segundo AC..... | 49 |
| Tabla 3.2.3.1.2: Valores de asignación para las células de la retícula del segundo AC..... | 51 |
| Tabla 4.2.1 Datos de la mancha urbana..... | 63 |
| Tablas 4.2.2.1 tabla de la simulación..... | 65 |
| Tabla 4.2.2.2 diferencia entre datos a proyectar..... | 66 |
| Tabla 4.2.2.3 datos a proyectados..... | 66 |
| Tabla 4.3 diferencia de datos reales a datos de la simulación..... | 69 |

MARCO REFERENCIAL

1.1 INTRODUCCION

El crecimiento urbano es un tema que ha cobrado relevancia en las últimas décadas debido al crecimiento vegetativo y demográfico de ciudades en nuestro territorio. Por otro lado, en las ciudades latinoamericanas pre modernas - modernas se empiezan a crear anillos de periferia ya que sus habitantes carecen de servicios básicos. De ahí el estudio que se plantea es de interés no solo en el campo del desarrollo sostenible (social) sino, también, en la percepción de las ciencias de la información.

Nuestra investigación tomará como referente a una de las ciudades nuevas en su conformación que tiene uno de los índices más representativos en la proporción de habitantes en nuestro territorio, El Alto ha sido la segunda urbe que más habitantes ha ganado en el país en cifras absolutas: de 649.958 censados en el año 2001 ha pasado a tener 848.840 en 2012, y se ubica por encima de Nuestra Señora de La Paz. La sede de gobierno ha quedado detrás con 764.617 habitantes, 84.223 menos que El Alto. El primer lugar entre las ciudades lo ocupa Santa Cruz de la Sierra con 1.453.549, según datos del Censo de Población 2012 (la razón)

Para representar el crecimiento de la mancha urbana a través del tiempo, la presente investigación pretende utilizar una herramienta útil para el estudio y modelado de dicho crecimiento, como son los autómatas celulares. Los autómatas celulares son sistemas dinámicos discretos cuyos elementos tienen una interacción constante entre sí, tanto en el espacio como en el tiempo, también poseen la capacidad de representar comportamientos complejos a partir de dinámicas sencillas.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1 ANTECEDENTES

Se conoce como dispersión urbana, dispersión suburbana, urbanización por derrame o sub-urbanización por derrame (traducido del inglés *urban sprawl*), al fenómeno de propagación de una ciudad y sus barrios, hacia tierra rurales, dicho fenómeno se establece en las periferias de zonas urbanas. Los residentes de los barrios en expansión

tienden a vivir en casas unifamiliares y como mecanismos para desplazarse al trabajo utilizan automóviles propios y/o de servicio público. Bajo esta premisa se puede mencionar que la baja densidad de población es un indicador de la dispersión.

Los planificadores urbanos hacen hincapié en los aspectos cualitativos de la expansión como la falta de opciones de transporte, seguridad, educación, salud y entre otros, para que estos barrios puedan tener una mejor calidad de vida. Sus detractores, en cambio, tienden a centrarse en la cantidad real de tierra que ha sido urbanizada por la expansión de la mancha urbana.

Las ciudades son sistemas complejos. Aunque recientemente, los científicos han sido capaces de simular su complejidad. Uno de las técnicas más simples pero exitosas para lograr este objetivo son los autómatas celulares (AC). Lahthi (2008). Xibao (2006) ha utilizado los Autómatas Celulares en una aplicación de percepción remota para modelar los impactos de diferentes escenarios políticos en el crecimiento urbano, en Lanzhou, China. En ese mismo camino Xi (2009) ha utilizado las mismas técnicas para simular el crecimiento de Shenyang y Fushun, también, en China, ambos estudios utilizaron como herramienta el SLEUTH, un modelo que extiende los Autómatas Celulares y que toma como datos de entrada: la pendiente, el uso de la tierra, las restricciones, la extensión urbana, el transporte y un hillshade de la zona de estudio. Abiden (2010) se enfoca en la problemática de la variabilidad de factores que afecta el desarrollo de las ciudades y propone una solución genérica para detectar patrones de crecimiento urbano, para cualquier región de interés usando un método basado en píxeles, en el que aplica la teoría de AC (autómatas celulares) para determinar los estados de los píxeles después del filtrado y la selección sobre la región de interés, su caso de estudio se llevó a cabo en el valle Klang en Malasia.

Se tiene también publicación referente a este tema: Generación de escenarios de crecimiento de la mancha urbana de la ciudad de Cusco para el periodo 2010-2020. La gestión del crecimiento urbano de la ciudad del Cusco es una actividad que puede hacerse más eficiente y efectiva si se contara con predicciones de su estado futuro en diferentes escenarios.

Tales escenarios implican la influencia de diferentes decisiones asumidas en la actualidad por los tomadores de Decisiones y autoridades y que se verán reflejadas a futuro. Además de estas decisiones se consideran otros factores que muestran los diferentes tipos de aptitud que fomentan el crecimiento urbano.

Un modelo adecuado que hace uso de los factores antes mencionados, está basado en Autómatas Celulares (AC), que simula el comportamiento global de las ciudades en base a fenómenos locales. Los elementos que se caracterizan por los fenómenos locales, pueden ser descritos mediante mapas raster que representan cada pixel o unidad de estudio, así se pueden representar los diversos fenómenos físicos y sociales que ocurren a nivel local. El comportamiento local se debe ajustar al comportamiento global representado por las tasas de crecimiento identificado en pasos de tiempo determinados.

El estudio muestra la aplicación de estos modelos de Autómatas Celulares a la predicción del crecimiento de la mancha urbana de la ciudad del Cusco, basado en imágenes LANDSAT clasificadas de los años 2007 y 2010, variables espaciales continuas, variables espaciales discretas y restricciones.

Se crearon tres escenarios futuros de cómo se apreciará la mancha urbana para el año 2020 dependiendo del grado de restricción aplicado administrativamente sobre el crecimiento urbano, en base a los patrones identificados con AC validados para el año 2010 y calibrando la influencia de las variables según el grado de restricción que se desea explorar en cada escenario. (Huamani, 2010).

Como también, tesis en la universidad mayor de San Andrés de Carrera de Informática, modelo de crecimiento de mancha urbana mediante autómatas celulares (MCMU). El modelo elaborado y nombrado MCMU (calisaya, 2008).

El crecimiento urbano es un tema que ha cobrado relevancia en las últimas décadas debido al crecimiento vegetativo y demográfico de las ciudades de nuestro planeta, por otro lado, se empiezan a crear en las ciudades anillos de periferia ya que sus habitantes carecen de servicios básicos. De ahí el estudio que se plantea es de interés no solo en el campo del desarrollo sostenible sino, también, en la percepción de las ciencias de la información.

No existen muchos estudios informáticos publicados sobre el crecimiento urbano para la ciudad de El Alto, sobre las tendencias de desarrollo urbano para todo el departamento. También, se debe tomar en cuenta que la Municipalidad trabaja con datos del censo para las proyecciones trazados para alcanzar una visión de la ciudad a futuro, lo cual se lo realiza cada diez años. Asimismo, esta joven ciudad tiende a seguir en crecimiento y bajo esta lógica implica también la conformación de barrios periféricos que trae consigo demandas públicas de sus habitantes, para lo cual el Gobierno Municipal tiene que prever políticas del crecimiento de la mancha urbana.

1.2.2 PROBLEMATICA

- Crecimiento poblacional debido a la migración tanto de ciudades troncales, ciudades intermedias y de las áreas rurales, Según el INE; El Alto considerada la segunda ciudad más poblada de Bolivia, presenta una tasa neta de migración de 18,53%, que afectan al crecimiento de mancha urbana.
- La delimitación del radio urbano deja mucho espacio entre lo que es la ciudad y el tejido lo que hace incontrolable el crecimiento, las urbanizaciones distintamente en el territorio abierto dejando grandes áreas sin continuidad del tejido urbano, por lo que en mucho tiempo no reciben atención por parte del municipio.
- La pérdida de zonas de producción agrícolas por la el crecimiento de la población alteña.
- Contaminación de las aguas servidas por el crecimiento de la población, puesto que, no cuentan con planificación de riesgos de contaminación.
- Contaminación de desechos sólidos por el crecimiento poblacional y no contar por parte de las autoridades municipales con políticas de prevención y planificación ya que en centros urbanos periféricos no se cuenta con carros basureros.
- Carencia de Unidades educativas, ya que, no se hizo una planificación por parte de la alcaldía y en las sub-alcaldías a futuro, tomando en cuenta que la ciudad de El Alto tiene un crecimiento con una tasa media anual de crecimiento de 5,10%, que informó el Instituto Nacional de Estadísticas (INE).
- Crecida de consumo de servicios básicos (agua, energía eléctrica, gas, etc., etc.).
- La existencia de modelos matemáticos para el crecimiento poblacional, pues ninguno está basado en la teoría autómata celular, ya que los modelos no llegan a mostrar visualmente el comportamiento del crecimiento de mancha urbana.

1.2.3 FORMULACION DEL PROBLEMA

¿Será posible desarrollar un modelo de crecimiento de la mancha urbana que en lo posible mejoré las estimaciones demográficas y predecir a futuro el crecimiento de la mancha urbana, se ajuste a una realidad poblacional desde el enfoque de autómatas celulares?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un modelo de simulación que refleje el crecimiento de la mancha urbana de la ciudad de El Alto, a partir de datos reales, para un análisis y predecir el crecimiento demográfico y poblacional, que permita plantear políticas de desarrollo sostenible, aplicando autómatas celulares.

1.3.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Modelar el crecimiento de la mancha urbana aplicando autómatas celulares.
- Desarrollar un modelo mediante el cual nos sirva para la simulación del crecimiento de la mancha urbana de la ciudad de El Alto teniendo como variable las tasas de crecimiento poblacional y tasas de mortalidad.
- Evaluar los resultados obtenidos, con los datos emitidos del INE.
- Diseñar un modelo de simulación que represente gráficamente la expansión de la mancha urbana.

1.4 LIMITES Y ALCANCES

El trabajo se realiza en la representación visual estática de una población sobre la extensión territorial en un tiempo determinado “**t**” para proyecciones a futuro hasta una visualización dinámica de mancha urbano para los tiempos ($t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$)

Este trabajo se lo realiza por medio del modelo de autómatas celular, por consiguiente se mostrara gráficamente le expansión territorial a futuro con el prototipo que se desarrolla.

1.5 JUSTIFICACION

1.5.1 JUSTIFICACION SOCIAL.

Las autoridades de la ciudad de El Alto requieren de herramientas posibles que den soporte a sus decisiones administrativas y políticas para una adecuada gestión. En el caso específico de la planificación urbana, la posibilidad de observar, analizar y elegir entre diversos escenarios de crecimiento urbano a futuro, otorga a dichos entes, la capacidad de tomar mejores decisiones en bienestar de la población en general. Planificando eficientemente e implementando políticas de prevención, expresados en salud, educación, vivienda, seguridad ciudadana, transporte y medio ambiente; de beneficio colectivo que

permita a las futuras zonas periféricas proveer las mencionadas políticas y de esta manera se reducirá el desorden demográfico y vegetativo de la ciudad de El Alto.

1.5.2 JUSTIFICACIÓN TECNOLÓGICO

Con las computadoras y la rápida evolución del hardware y del software, se puede aspirar al procesamiento de grandes cantidades de información y se realiza cálculos que no se lograrían manualmente. Esta ventaja originaría la utilización de dicha simulación en la investigación del comportamiento de sistemas complejos, como ser la simulación del crecimiento de la mancha urbana.

1.5.3 JUSTIFICACIÓN CIENTÍFICA

Los modelos dinámicos como los autómatas celulares son una buena manera de entender las dinámicas de un sistema urbano complejo, permiten evaluar el impacto del crecimiento urbano en el terreno y sirven como una herramienta de planificación para planificadores y tomadores de decisión. El modelo de crecimiento urbano es poderoso para la representación, modelamiento y la predicción de crecimiento urbano, y útil, también, para entender los escenarios de planificación alternativos a futuro.

Los autómatas celulares ofrecen una variedad de ventajas para la simulación urbana y en muchas formas remedian las diferencias particulares de los modelos tradicionales. Los autómatas celulares son inherentemente espaciales y descentralizados. Son dinámicos del mismo modo intuitivo y de un comportamiento realista.

Considerado como un modelo tipo de AC DINAMICA, es un modelo de simulación espacial de las dinámicas del paisaje, pensada como una herramienta para investigar la trayectoria de los paisajes y las dinámicas de los fenómenos espaciales, diseñado para ser un software de propósito general para el modelamiento de la dinámica, ha sido aplicado para simular una gran variedad de fenómenos espaciales tales como el cambio de uso de la tierra y el crecimiento urbano (Filho et al., 2009b)

Entre otras aspectos, dinámica incorpora funciones de transición a multi-escala basadas en vecindad, simulación estocástica multi-paso, un módulo de difusión, métodos espaciales de retroalimentación para el cálculo de variables dinámicas y la aplicación de regresión logística o pesos de evidencia para calcular los mapas de probabilidades de transición utilizando información almacenada en un SIG. (Filho *et al.*, 2009a).

1.5.4 JUSTIFICACION ECONOMICA

La elaboración de este modelo hasta llegar a la simulación no requirió de grandes costos, es decir, se ahorró gastos económicos a la administración pública en la adquisición de herramientas equivalentes. Además, el producto resultante del presente trabajo coadyuvará en el ahorro de pérdidas económicas que pueden ser causadas por falta de una planificación para los futuros asentamientos urbanos, apoyada o complementados como trabajos como este.

1.6 HIPOTESIS

“El modelo de simulación de crecimiento de la mancha urbana basada en autómatas celulares ayuda a mejorar las estimaciones demográficas y predicción de la expansión urbana de la ciudad de El Alto”

VARIABLES INDEPENDIENTES.

T: tiempo de las estimaciones del crecimiento de la mancha urbana.

VARIABLES DEPENDIENTES.

C: crecimiento de la mancha urbana en un tiempo determinado.

1.7 DISEÑO DE METODOLOGIA

1.7.1 MÉTODOS Y MEDIOS DE INVESTIGACION CIENTIFICA

Este trabajo toma como base la metodología de investigación del método científico.

A continuación detallamos las técnicas utilizadas en la metodología de investigación científica.

Análisis y síntesis. El análisis se refiere a la descomposición de un todo en sus distintos elementos, con el fin de estudiar estos de manera separada, para luego, llegar a un proceso de síntesis integral en todos los elementos. En el presente trabajo de investigación se pretende observar, describir, analizar y formular el proceso del crecimiento de la mancha urbana, mediante los procesos que este tiene. Y así llegar al modelo matemático basado en autómatas celulares, la misma que será utilizada para estimar futuras poblaciones.

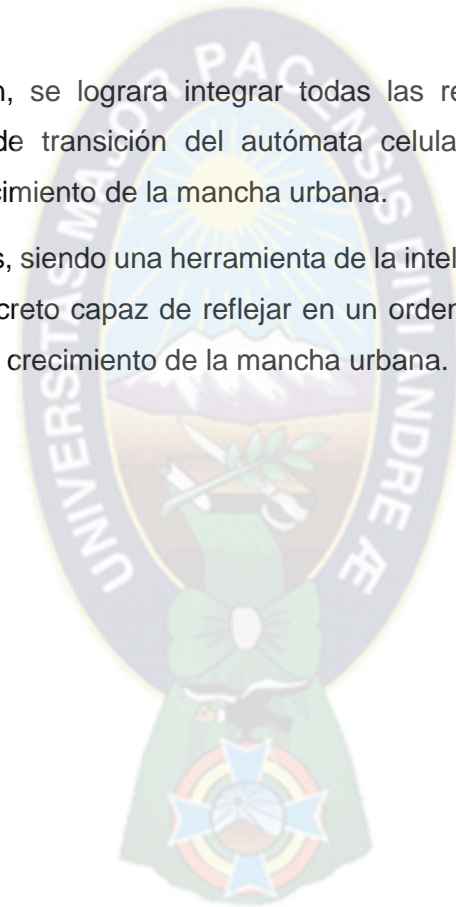
Inducción y deducción, se refiere a la generalización de una observación, razonamiento o conocimiento establecido a partir de los casos particulares. La deducción

es la aplicación de teorías genéricas a situaciones. Es así, que el propósito del presente trabajo es de encontrar un nuevo modelo que permita realizar mejores estimaciones aplicando una herramienta de la inteligencia artificial como son los autómatas celulares, y la teoría de probabilidades.

Abstracción y concertación: la abstracción es un proceso de suma importación para la comprensión del objeto, mediante ella se detecta la prioridad o relación de las cosas y fenómenos. Lo concreto es la síntesis de muchos conceptos y por lo consiguiente de las partes. En este sentido la abstracción permitirá separar las diferentes etapas que tiene un ser humano en su vida.

La concertación, se lograra integrar todas las reglas de evolución llegando a encontrar en función de transición del autómata celular y luego formular el modelo matemático para el crecimiento de la mancha urbana.

Los autómatas celulares, siendo una herramienta de la inteligencia artificial, el mismo es un modelo matemático discreto capaz de reflejar en un ordenador sistemas complejos de la realidad en este caso el crecimiento de la mancha urbana.



MARCO TEORICO

2.1 MANCHA URBANA

Se refiere al área que ocupa la población en una ciudad. Esta mancha crece a diario, debido a que mucha gente emigra del campo y va aumentando el número de habitantes y de viviendas

Se conoce como dispersión urbana, dispersión suburbana, urbanización por derrame o sub-urbanización por derrame (traducido del inglés urban sprawl), al fenómeno de propagación de una ciudad y sus barrios hacia la tierra rural en la periferia de una zona urbana.

2.2 SIMULACION

La simulación es, esencialmente, una técnica que enseña a construir un modelo de simulación real integrada a la realización de experimentos con el modelo (Naylor, Balintfy, burdick, & Chu, 1980).

Desde tiempos antiguos la humanidad ha tratado de saber lo que sucederá en el futuro, intentando predecir acontecimientos dentro de un determinado sistema, bajo la influencia de diferentes factores que condicionan su comportamiento. El uso moderno de la palabra simulación se inició con John Von Neuman y Stanislav Ulam afines de 1940, al desarrollar el modelo Montecarlo. Posteriormente con el advenimiento de las computadoras de gran capacidad, a principios de 1950 la aplicación de la simulación tomo mayor fuerza. De esta, manera surgieron muchas aplicaciones y problemas teóricos como prácticos.

2.2.1 LA NECESIDAD DE SIMULAR

Cuando se tiene la responsabilidad de concluir un sistema dado, se toman continuamente decisiones acerca de las acciones que se ejecutaran sobre el sistema, es en estas circunstancias en las que se necesita saber cómo responderá el sistema ante determinadas decisiones y de manera correcta elegir de entre las alternativas. La experimentación directa sobre el sistema real, además de los otros inconvenientes que son muy costosas.

Entonces, uno de los principales objetivos de la simulación es dar la posibilidad de realizar ensayos de cambios en el sistema probándolos en el modelos que lo representa, con el fin de elegir la mejor alternativa (FIUBA, 2013).

2.2.2 TIPOS DE SIMULACION

- **Simulación Discreta:** tiene que ver con el modelado de un sistema que evoluciona en el tiempo, mediante una representación en la cual las variables de estado cambian instantáneamente, esto es cuando ocurren diferentes eventos. Aunque la simulación discreta podría conceptualmente ser realizada mediante cálculos manuales, la cantidad de datos que deben ser almacenados y manipulados en la mayoría de los sistemas del mundo real, el cual obliga a que la simulación discreta sea realizada en computadoras digitales.
- **Simulación Continua:** se aplican cuando las variables de estado cambian continuamente con respecto al tiempo. Por consiguiente, los modelos de simulación continua involucran ecuaciones diferenciales que dan relaciones para las tasas de cambio de las variables con el tiempo. Si las ecuaciones diferenciales son particularmente simples, pueden ser resueltas para dar valores a las variables de estado para todos los valores del tiempo con una función de los mismos en el tiempo 0 o inicial. Sin embargo para la mayoría de los modelos continuos, no son posibles las soluciones analíticas, y se usan técnicas de análisis numérico.
- **Simulación Discreto-Continua combinada:** como algunos sistemas no son completamente discretos, ni continuos, es por eso que se tiene la necesidad de construir un modelo, tanto de simulación discreta como continua, y se obtendrá un resultado de una simulación combinada Discreta-Continua.
- **Simulación basada en agentes:** es un enfoque computacional que permite crear sociedades artificiales para estudiar el comportamiento global que emerge desde la interacción de agentes individuales operando en un determinado entorno bajo reglas limitadas, solo por la información y la capacidad de procesamiento de cada uno.

Recurrir a la simulación implica el tratamiento de modelos. No obstante, los modelos para la simulación vienen a ser una simplificación de la realidad a través de la abstracción. Sin embargo, el procedimiento del modelado nos aproxima razonablemente a la representación del sistema real en estudio permitiéndonos la acción misma de simular.

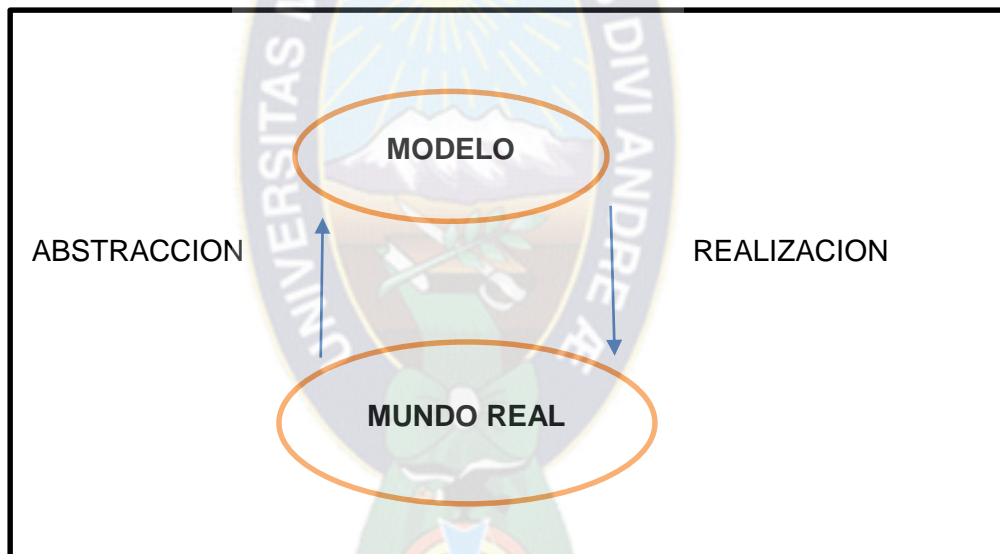
2.3 MODELOS

El mundo físico está formado por innumerables sistemas, estos al presentarse como objetos de estudio, conlleva a que los investigadores quieren saber las leyes que los gobiernan. He aquí la importancia de la construcción de modelos.

Los modelos surgen del análisis de las variables que intervienen en ese sistema y de las relaciones existentes entre ellas. Vienen a ser el resultado de la abstracción, representando solo las cualidades relevantes que son del interés para el estudio determinado a llevar a cabo ver figura 2.3.

De esta manera, esta técnica de representación ayuda a explicar, entender y mejorar un sistema, dándonos la posibilidad de emplear para propósitos de predicción y control.

Figura 2.3: abstracción y realización de un modelo a partir del mundo real.



2.3.1 UTILIDAD DE LOS MODELOS

Los modelos son útiles para:

- **El pensamiento:** Al construir un modelo necesariamente se debe ordenar y completar el conocimiento que se tiene del sistema real.
- **La comunicación:** Un modelo elimina la ambigüedad del lenguaje para comunicarse con expertos.
- **El entrenamiento y la instrucción:** un modelo puede ser utilizado para entrenar con costo y riesgo casi nulos.

- **La predicción:** un modelo sirve para predecir la conducta del sistema real.
- **La experimentación:** la experimentación con un modelo es barata y segura, se emplea frecuentemente en el diseño de un sistema.
-

2.3.2 CLASIFICACION DE MODELO

Existen varias clasificaciones de modelos basados en diferentes criterios, aquí presentamos algunos de ellos:

2.3.2.1 SEGÚN LA EVOLUCION DEL TIEMPO

- **Dinámicos:** Al transcurrir el tiempo todos o algunos de sus atributos son modificados o cambiados. Son utilizados para representar sistemas cuyo estado varía con el tiempo.
- **Estáticos:** Modelos en el que los atributos no cambian o modifican durante el tiempo que se lo utiliza. Son aquellos modelos que no toman en cuenta, explícitamente, al variable tiempo.

2.3.2.2 SEGÚN ALEATORIDAD

- **Determinísticos:** son modelos donde la solución para determinadas condiciones es única y siempre la misma. Existe estricta casualidad, por lo tanto se puede hablar de variables dependientes e independientes.
- **Estocásticos:** Representan sistemas donde los hechos suceden al azar, lo cual no es repetitivo. No se puede asegurar cuales acciones ocurren en un determinado instante. Se conoce las probabilidades de ocurrencia y su distribución probabilística. Se habla de casualidad y por consiguiente de las variables controlables y las incontrolables.

2.3.2.3 SEGÚN LA ESTRUCTURA

- **Icónicos:** estos modelos representan al mundo físico mediante una imagen. El modelo puede ser una verdadera reproducción del sistema estudiado, pero a escala diferente. Un ejemplo de modelo icónico es una maqueta, donde se ha establecido una reducción de tamaño conservando las relaciones dimensionales básicas.
- **Análogos:** Poseen algunas propiedades similares a los objetos representados pero sin ser un replica morfológica de los mismos. Normalmente, para su construcción se

utiliza un conjunto de convenciones que sintetizan y codifican propiedades del objeto real para facilitar la lectura o interpretación de las mismas.

- **Simbólicos:** estos modelos representan la máxima abstracción y, por supuesto, la máxima generalidad; puede decirse que son universales. Esta denominación suele aplicarse al caso en los que el objeto real se presenta mediante una codificación matemática.

2.3.2.4 SEGÚN EL CAMBIO DE ESTADO EN EL TIEMPO

- **Continuos:** representan sistemas cuyos cambios de estado son graduales. Las variables intervinientes son continuas.
- **Discretos:** representa sistemas cuyos cambios de estados son de entradas. Las variables varían en forma discontinua.

2.3.2.5 MODELOS ANALÓGICOS Y MODELOS DIGITALES

- **Analógicos:** son modelos que están codificados en cifras. Son modelos físicos, como los ya mencionados como una maqueta como modelo icónico, o un mapa convencional como modelo análogo.
- **Digitales:** los modelos digitales son, por tanto, modelos simbólicos y para construirlos es necesario un proceso de codificación de la información, que permite una representación virtual mediante por medios informáticos.

2.3.2.6 MODELOS BASADOS EN AGENTES

Es un modelo en el que los agentes interactúan en repetidas ocasiones. por ejemplo, cuando los agentes debe optimizar su comportamiento colectivo a través de simples intercambios de información, como se hace en la optimización de una colonia de hormigas o en optimización de un enjambre de partículas, el objetivo es alcanzar un estado final deseado, es decir, el sistema optimizado, más que simular la dinámica del proceso.

2.4 MODELOS DE PREDICCIÓN

En estos últimos años, y en el marco de un creciente de interés por la modelización de fenómenos complejos, los modelos predictivos del crecimiento urbano basados en Autómatas Celulares, han experimentado una gran importancia (White & Engelen, 1997; torrens, 200; Barredo, 2003; Berling-Wolf&Wu, 2004). Para White (1997) estos autómatas celulares, puede entrar como sistemas espaciales dinámicos muy simples en los que el

estado de cada celda depende de los estados previos de celdas vecinas, de acuerdo de un conjunto de reglas de transición.

Estos modelos se han vuelto tan populares gracias a su manejabilidad, su capacidad de generar dinámicas que producen bien los procesos tradicionales de cambio basados en la difusión (ya descritos por Haggett) pero además porque son capaces de reproducir fenómenos que muestran complejidad desde el punto de vista de dinámicas determinísticas no lineales, pudiendo simular algunos procesos de cambio de los más recientes y sorprendentes (De Almeida eyal, 2003). Batty (2007) señala como las ciudades crecen principalmente a causa de acciones que tiene lugar a nivel local e individual, de modo que su morfología puede ser entendida desde su nivel más descentralizado y local, haciendo del todo idóneo el ejemplo de modelos que representen los procesos urbanos desde un enfoque de “abajo arriba” (botton-up), y que simulen las ciudades como conjuntos de elementos básicos que actúen como células

2.5 MODELO DE CRECIMIENTO URBANO

Los primeros modelos de uso de la tierra y transporte se basaron en el supuesto de que los patrones urbanos son el resultado de los cambios en el equilibrio dentro del sistema urbano, lo que podía ser entendido desde un nivel macro. Estos modelos son denominados “tradicionales” o modelos “basados en ecuaciones” (Torrens, 2001). La realidad es que las ciudades están lejos de equilibrio.

De acuerdo a Torrens (2001), los modelos tradicionales tienen las siguientes limitaciones

- Una estructura centralizada.
- No son buenos para el manejo de la dinámica.
- Falta de detalle.
- Poca facilidad de uso, flexibilidad y realismo.

Cuando se asume *a priori* una estructura centralizada no es posible lograr la transición de una ciudad mono céntrica a poli céntrica, lo que es común en nuestros días. Kloosterman and Musterd citados por Lahti (2008) (Torrens, 2001). Una consecuencia de la falta de detalle es que un cambio en la escala, puede requerir un nuevo modelo para explicar el comportamiento cambiado (Batty, 2000).

2.6 LA GENERACION DE MODELOS

La nueva generación de modelos, trata de modelar los patrones macro a partir de las entidades más pequeñas, o los átomos del sistema. Estos modelan la dinámica en el nivel micro (Batty and Xie, 2005) lo que se conoce como el método bottom-up opuesto al método top-down.

La comprensión de los sistemas sociales como sistemas complejos, también, ha alterado la visión del propósito de los modelos urbanos. En lugar de ser considerados herramientas de predicción, simulando el exacto comportamiento del sistema son cada vez más comprendidos como herramientas para pensar (Engelen et al., 1997) (Engelen et al., 2000).

Entre las nuevas generaciones, basadas en el método bottom-up, se encuentran los autómatas celulares (AC) y los modelos de agentes y multi-agentes.

Los modelos basados en agentes, modelan las interacciones entre “agentes”. Los agentes típicamente representan a los humanos (Arentze and Timmermans, 2003), animales (Ahearn *et al.*, 2005) o a cualquier otro tipo de entidad que no está restringida a permanecer en una localización específica.

En contraste a los modelos basados en agentes, los modelos AC están basados en un vecindario definido. Todas las entidades solo interactúan con las celdas que las rodean. Es por esto que los AC han sido considerados los más adecuados para los procesos donde los vecinos inmediatos tienen una influencia en la celda, tales como los procesos de difusión. Esto incluye los procesos de dinámicas ecológicas. Parker *citado por* Lahti(2008).

Un método basado en agentes es mejor para explicar las interacciones humanas y la acción a distancia. En el campo del modelamiento urbano se han combinado ambos modelos, una combinación es capaz de compensar las limitaciones entre ambos modelos (Torrens, 2001).

2.7 AUTOMATAS CELULARES

Los autómatas celulares son sistemas dinámicos discretos cuyos elementos tienen una interacción constante entre sí tanto en el espacio como en el tiempo.

Los autómatas celulares tienen la capacidad de representar comportamientos complejos a partir de una dinámica sencilla. Debido a esto, desde su origen se les ha utilizado como elementos de la computación para la modelación de fenómenos biológicos y físicos. Además, los autómatas celulares son estudiados como objetos matemáticos

debido al interés intrínseco relativo a los aspectos formales de su comportamiento. Por consiguiente, se dará algunos antecedentes sobre el origen de la teoría de autómatas celulares. Además, se explica la estructura de los autómatas celulares en una dimensión y se describen de manera general tanto el autómata celular *Life* como la clasificación de Wolfram. Por último, se presentan algunos elementos que sirven para el análisis del comportamiento de los autómatas celulares y que serán utilizados en esta tesis en particular.

2.7.1. ANTECEDENTES DE AUTOMATAS CELULARES

Aunque el nombre de John von Neumann en la actualidad es fuertemente asociado con las computadoras que tienen una arquitectura de una sola UCP (Unidad Central de Procesamiento), es necesario recordar que von Neumann también es uno de los principales pioneros de la computación paralela.

A principios de 1942, J. Presper Eckert, John W. Mauchly y sus asociados de la Escuela de Ingeniería Eléctrica Moore de la Universidad de Pennsylvania comenzaron la construcción de una computadora electrónica digital de "alta velocidad" para satisfacer las necesidades de las Fuerzas Armadas de los Estados Unidos. Eckert y Mauchly llamaron a su máquina "Electrical Numerical Integrator And Calculator", la cual vino a ser conocida públicamente y simplemente como ENIAC en 1946.

En 1945, von Neumann inició un estudio analítico de la computación y probó que una computadora podía tener una estructura física fija y simple, a diferencia del diseño original de la ENIAC, en el cual el sistema operativo y los programas de aplicación estaban almacenados en unidades separadas las cuales tenían que ser conectadas a la ENIAC para poder realizar los cálculos, además, las conexiones variaban de un programa a otro. Poco tiempo después de su análisis, von Neumann formó un grupo de investigación encabezado por él mismo, Howard Aiken y Norbert Wiener para trabajar en problemas sobre computadoras, comunicaciones, análisis de series de tiempo y los "aspectos de comunicación y control del sistema nervioso humano". El último tópico fue incluido debido al gran interés de von Neumann en el trabajo sobre redes neuronales realizado por McCulloch y Pitts en 1943. En 1946, von Neumann diseñó la EDVAC (Electronic Discrete Variable Computer), la primera máquina con un programa almacenado. En 1947, bajo la influencia de las ideas sobre autómatas desarrolladas por Post y Turing (1936), von

Neumann comenzó estudios sobre la complejidad requerida para que un dispositivo o sistema fuese auto-reproductivo. Estos estudios también incluían el problema de organizar un sistema básicamente desde componentes no confiables (un campo de estudio que actualmente se conoce como "computación tolerante a fallas"). En un principio, von Neumann investigó un modelo continuo de un autómata auto-reproductivo basado en ecuaciones diferenciales parciales, pero cuando encontró dificultades para proveer reglas rigurosas y explícitas e instrucciones necesarias para poder llevarlo a la práctica y cuando se hizo evidente que este autómata podría ser muy grande, re direccionó sus esfuerzos hacia un modelo de auto-reproducción utilizando un arreglo de elementos computacionales (células). Tanto Burks (1970) como Goldstine (1972) confirman que la idea de tal arreglo fue sugerida a von Neumann por Stanislaw Ulam. A von Neumann le atrajo la idea de utilizar paralelismo porque esto podría eventualmente proporcionarle una mayor velocidad en las computaciones. Desafortunadamente, su muerte prematura en 1957 no le permitió alcanzar completamente sus metas. De esta manera, se puede decir que a principios de los 1950's von Neumann concibió a los autómatas celulares.

La construcción original de von Neumann de un arreglo celular (autómata celular) auto-reproductivo requería que cada célula de un espacio celular representado por una cuadrícula bi-dimensional soportara un conjunto de 29 estados. El arreglo por sí mismo requería aproximadamente 200,000 células. Además, el valor del estado en que se encuentra cada célula del arreglo localizada en una posición (i, j) (donde i es la columna y j el renglón) en un tiempo t estará determinado por los valores de los estados en que se encuentran las células localizadas en las posiciones $(i - 1, j)$, $(i + 1, j)$, $(i, j + 1)$ e $(i, j - 1)$ y el valor del estado en que se encuentra la célula central localizada en la posición (i, j) en el tiempo $t - 1$; cada célula del arreglo en algún momento será una célula central, la cual junto con las células ubicadas arriba, abajo, a la izquierda y a la derecha (ortogonalmente) de la misma forman lo que se conoce como vecindad von Neumann (ver figura 2.7.1). Las interacciones locales de las vecindades en un tiempo t determinan el estado global del arreglo (el cual es actualizado sincrónicamente) en el tiempo $t + 1$.

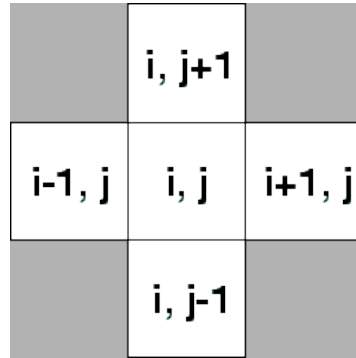


Figura 2.7.1: Vecindad von Neumann.

Este grado de complejidad fue necesario debido a que von Neumann buscaba diseñar su autómata como un sistema de computación universal o máquina de Turing. En los 1960's, E.F. Codd propuso una variante la cual requería ocho estados por célula y seguía utilizando la vecindad von Neumann; otros investigadores, en particular los del Instituto de Tecnología de Massachusetts (M.I.T.) encontraron constructores auto-reproductivos, aunque no universales de una naturaleza más simple, en particular un autómata celular descubierto por Fredkin, el cual era capaz de auto-reproducir cualquier configuración inicial utilizando la vecindad von Neumann y solamente dos estados por célula.

Ulam y Schrandt (1967) también investigaron la dinámica de estos autómatas celulares de dos estados por célula, y de hecho, extendieron su investigación estudiando autómatas celulares en tres dimensiones. Su trabajo, junto con el de investigadores tales como Tratcher, Moore, Myhill, Stein y Holland son coleccionados en. Subsecuentemente, Banks (un estudiante de Fredkin) probó la existencia de un autómata celular tipo von Neumann auto-reproductivo utilizando cuatro estados por célula.

Durante su investigación sobre autómatas celulares de dos estados (en este caso 0 y 1), Ulam y Schrandt tenían especial interés por los patrones formados por los grupos de células en estado 0 y los grupos de células en estado 1 en varias etapas durante las computaciones. Para ciertas reglas, una configuración inicial de células en estado 1 "sobre un fondo" de células en estado 0 evolucionaba de tal forma que las células en estado 1 se disipaban completamente, mientras que con otras reglas el efecto era totalmente opuesto.

John Conway, investigador interesado en encontrar una construcción más simple que la de von Neumann, descubrió una regla para un autómata celular de dos estados y un tipo de vecindad parecida a la de von Neumann, con la variante de que se toma en cuenta a los

vecinos ubicados en las esquinas. A este tipo de vecindad se le conoce como vecindad Moore (ver figura 2.7.1). Esta regla tenía un efecto intermedio, es decir, llevaba eventualmente al autómata ya sea a un patrón de comportamiento estable o a patrones que exhibían algo repetitivo (por ejemplo, patrones de comportamiento oscilatorios). Conway presentó en 1970 su regla a la cual bautizó con el nombre "Life".

| | | |
|------------|----------|------------|
| $i-1, j+1$ | $i, j+1$ | $i+1, j+1$ |
| $i-1, j$ | i, j | $i+1, j$ |
| $i-1, j-1$ | $i, j-1$ | $i+1, j-1$ |

Figura 2.7.2: Vecindad Moore.

Life representa una especie de "juego ecológico" ya que las células del autómata pueden estar "vivas" o "muertas". *Life* trabaja sobre una cuadrícula bi-dimensional infinita y los estados de las células están determinados por las siguientes condicionantes:

- **NACIMIENTO.** Una célula que está muerta en un tiempo t estará viva en un tiempo $t + 1$ si y sólo si exactamente tres de sus ocho vecinos están vivos en el tiempo.
- **MUERTE POR SOBRE-POBLACIÓN.** Una célula que está viva en un tiempo t morirá en un tiempo $t + 1$ si cuatro o más de sus ocho vecinos están vivos en el tiempo t .
- **MUERTE POR POCA POBLACIÓN (AISLAMIENTO).** Una célula que está viva en un tiempo t morirá en un tiempo $t + 1$ si a lo más uno de sus ocho vecinos están vivos en el tiempo t .
- **SOBREVIVENCIA.** Una célula que está viva en un tiempo t permanecerá viva en un tiempo $t + 1$ si dos o tres de sus ocho vecinos están vivos en el tiempo t .

Life comienza a funcionar a partir de una configuración inicial de células vivas sobre un fondo de células muertas. Si se dan las condiciones, tanto los nacimientos como las muertes

de las células ocurrirán de manera simultánea y formarán la configuración que constituirá una nueva *generación* dentro de la evolución de *Life*.

Existen configuraciones que permanecen estables durante toda la evolución de *Life*. En el vocabulario de *Life* a estas configuraciones se les conoce como "still life". En la figura 2.7.1, en la cual las células vivas se representan con el color negro y las células muertas con el color blanco, se pueden observar algunas configuraciones still life.

También existen configuraciones que desaparecen después de transcurridas ciertas generaciones. En la figura 2.7.4 se pueden observar algunas de estas configuraciones.

Uno de los descubrimientos de Conway más remarcable es la figura formada por cinco células vivas llamada *glider* (ver figura 2.7.5).

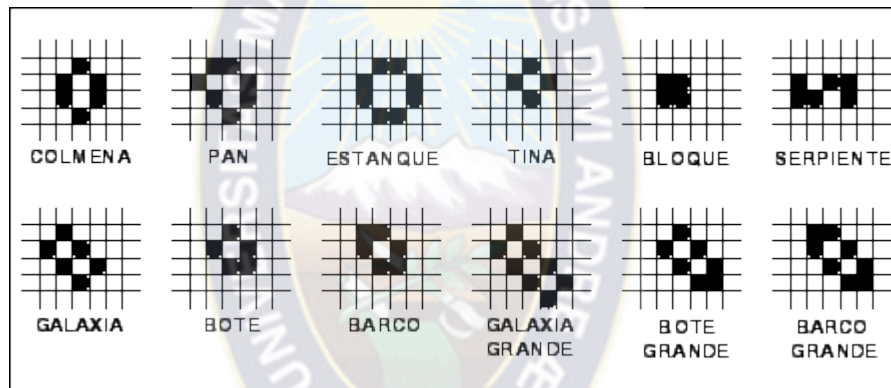


Figura 2.7.3: A las configuraciones que permanecen estables durante toda la evolución del autómata celular se les conoce como *still life*.

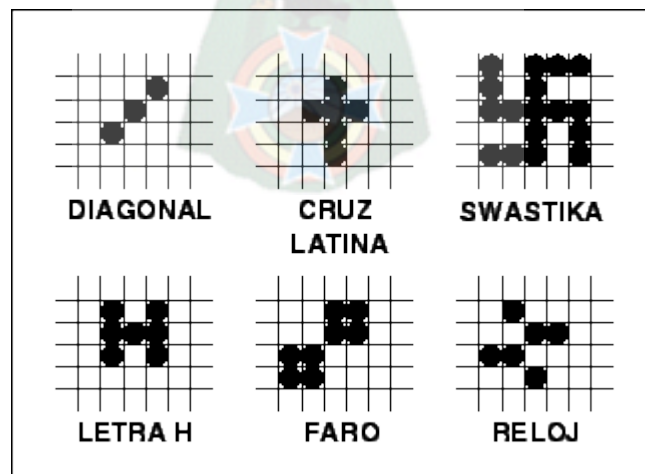


Figura 2.7.4: Configuraciones en las que todas la células vivas mueren.

Como se observa en la figura 2.7.5, después de transcurridas dos generaciones, el *glider* tiene un ligero acarreo hacia la derecha, el cual se ve reflejado en una línea diagonal. A este fenómeno se le conoce como “*glide reflection*” debido al nombre de la figura. Una vez que transcurren dos generaciones más, el *glider* se endereza a sí mismo y entonces se ha movido en la cuadrícula un lugar diagonalmente hacia abajo y a la derecha desde su posición inicial. Conway eligió el término *velocidad de la luz* (haciendo una analogía del juego de ajedrez con respecto a la velocidad a la que se desplaza el rey) para ilustrar que el *glider* es el patrón que más rápido se mueve sobre la cuadrícula. Ningún otro patrón puede reproducirse a sí mismo lo bastante rápido como para moverse a tal velocidad. De esta manera, Conway probó que la máxima velocidad diagonalmente es un cuarto de la *velocidad de la luz* ya que el *glider* se reproduce a sí mismo en la misma orientación después de cuatro generaciones y ha viajado un lugar diagonalmente en la cuadrícula. Por lo anterior, se dice que un *glider* se desliza de un lado a otro del campo a un cuarto de la *velocidad de la luz*.

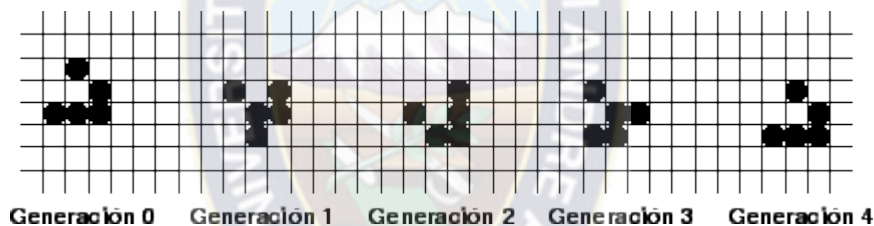


Figura 2.7.5: Uno de los descubrimientos de Conway más remarcable es la figura formada por cinco células vivas llamada *glider*. Después de transcurridas dos generaciones, el *glider* tiene un ligero acarreo hacia la derecha, el cual se ve reflejado en una línea diagonal. A este fenómeno se le conoce como “*glide reflection*” debido al nombre de la figura. Una vez que transcurren dos generaciones más, el *glider* se endereza a sí mismo y entonces se ha movido en la cuadrícula un lugar diagonalmente hacia abajo y a la derecha desde su posición inicial.

“*Life*” se popularizó a partir de su publicación en la columna mensual de Martin Gardner llamada “*Mathematical Games*” en *Scientific American* y posteriormente varias personas presentaron resultados interesantes basados en sus propias experimentaciones con “*Life*”. Aunque no de valor práctico, “*Life*” ha tenido el mayor impacto en la investigación sobre autómatas celulares.

En la década de los 1980's, los estudios de Stephen Wolfram sobre autómatas celulares

arrojaron resultados interesantes. Wolfram realizó una investigación sobre las propiedades de los autómatas celulares en una dimensión utilizando conceptos de mecánica estadística y aprovechando que las microcomputadoras, los lenguajes de programación, y los monitores de video disponibles en ese momento eran lo suficientemente capaces como para llevar a cabo un gran número de estudios experimentales con autómatas celulares.

A diferencia de otros investigadores como Conway, por ejemplo, el cual se concentró en una sola regla que sirviera para sus propósitos, Wolfram comparó un gran número de reglas diferentes y posteriormente propuso una clasificación de acuerdo a los diferentes patrones de comportamiento que había observado.

Por otro lado, a pesar de que von Neumann no pensó en los autómatas celulares como un objeto matemático de estudio y aunque desde su surgimiento se les ha utilizado en aplicaciones prácticas específicas como el reconocimiento de patrones y el procesamiento de imágenes por citar algunas, el estudio de los aspectos formales sobre el comportamiento de los autómatas celulares también resulta muy interesante. En este sentido, se han encontrado trabajos con resultados aplicables al análisis teórico de los autómatas celulares como los trabajos de Hedlund y Birkhoff sobre sistemas dinámicos.

2.8 MODELO DE CRECIMIENTO URBANO

Los primeros modelos de uso de la tierra y transporte se basaron en el supuesto de que los patrones urbanos son el resultado de los cambios en el equilibrio dentro del sistema urbano, lo que podía ser entendido desde un nivel macro. Estos modelos son denominados “tradicionales” o modelos “basados en ecuaciones” (Torrens, 2001). La realidad es que las ciudades están lejos de equilibrio.

De acuerdo a Torrens (2001), los modelos tradicionales tienen las siguientes limitaciones

- Una estructura centralizada.
- No son buenos para el manejo de la dinámica.
- Falta de detalle.
- Poca facilidad de uso, flexibilidad y realismo.

Cuando se asume *a priori* una estructura centralizada no es posible lograr la transición de una ciudad mono céntrica a poli céntrica, lo que es común en nuestros días. Kloosterman

and Musterd *citados por* Lahti (2008) (Torrens, 2001). Una consecuencia de la falta de detalle es que un cambio en la escala puede requerir un nuevo modelo para explicar el comportamiento cambiado (Batty, 2000).

2.9. LA GENERACION DE MODELOS

La nueva generación de modelos, trata de modelar los patrones macro a partir de las entidades más pequeñas, o los átomos del sistema. Estos modelan la dinámica en el nivel micro (Batty and Xie, 2005) lo que se conoce como el método bottom-up opuesto al método top-down.

La comprensión de los sistemas sociales como sistemas complejos, también, ha alterado la visión del propósito de los modelos urbanos. En lugar de ser considerados herramientas de predicción, simulando el exacto comportamiento del sistema son cada vez más comprendidos como herramientas para pensar (Engelen et al., 1997) (Engelen et al., 2000).

Entre las nuevas generaciones, basadas en el método bottom-up, se encuentran los autómatas celulares (AC) y los modelos de agentes y multi-agentes.

Los modelos basados en agentes, modelan las interacciones entre “agentes”. Los agentes típicamente representan a los humanos (Arentze and Timmermans, 2003), animales (Ahearn *et al.*, 2005) o a cualquier otro tipo de entidad que no está restringida a permanecer en una localización específica.

En contraste a los modelos basados en agentes, los modelos AC están basados en un vecindario definido. Todas las entidades solo interactúan solo con las celdas que las rodean. Es por esto que los AC han sido considerados los más adecuados para los procesos donde los vecinos inmediatos tienen una influencia en la celda, tales como los procesos de difusión. Esto incluye los procesos de dinámicas ecológicas. Parker *citado por* Lahti(2008).

Un método basado en agentes es mejor para explicar las interacciones humanas y la acción a distancia. En el campo del modelamiento URBANO se han combinado ambos modelos, una combinación es capaz de compensar las limitaciones entre ambos modelos (Torrens, 2001).

2.10 CIUDAD DE EL ALTO

2.10.1 HISTORIA

El 6 de marzo de 1985, el Congreso Nacional sancionó la Ley 728, que dice: “Créase la **cuarta sección municipal de la provincia Murillo con su capital El Alto de La Paz,**

del departamento de La Paz...”. La Ley 1014, del 26 de septiembre de 1988, eleva a rango de ciudad a la capital de la cuarta sección municipal de la provincia Murillo del departamento de La Paz, a partir de ese momento es la ciudad de El Alto.

La urbanización de la ciudad del El Alto se inicia a partir de 1940, fundándose en esta década la primera zona de Villa Dolores con 1.087 manzanos. A partir de los cambios sociales de 1953 con la Reforma Agraria se produce una migración del campo a la ciudad de La Paz poblándose de una forma desorganizada y con múltiples problemas de urbanización.

En sus inicios la ciudad de EL Alto era el espacio de comunicación con la ciudad de La Paz, al transcurrir los años se van poblando por personas que se reubican al no encontrar espacio para habitar en la hoyada, Por otro lado, la crisis económica que vivía el país repercute en el área rural empujando a sus habitantes hacia la migración del campo a la ciudad desde las provincias Ingavi, Pacajes, Los Andes, Omasuyos y Manco Kapac predominantemente. La caída del estaño tuvo también repercusiones en los habitantes de las minas de los departamentos de La Paz, Oruro y Potosí, que también migraron a esta ciudad.

Los habitantes alteños fundamentalmente son migrantes, "en 1998 el 88 % de los pobladores de esta ciudad, habían nacido en otras áreas del país, siendo el flujo migratorio más importante el del departamento de La Paz con el 84 % con respecto a las otras regiones (PNUD/Hábitat, 1991). El Alto recibió hasta ese año el 13.7% del total de la población migrante del país" (Nota de prensa, enero 2000)

Tabla 2.10.1: población de la Ciudad de El Alto

| Fuente | Habitantes | Año |
|------------------|------------|------|
| PNUD/ HABITAT | 30.000 | 1960 |
| Censo INE. | 95.434 | 1976 |
| Censo INE. | 307.403 | 1988 |
| Censo INE. | 405.492 | 1992 |

Fuente: Instituto Nacional de Estadística

El crecimiento de la población alteña es una de las características más importantes del país, está dentro de las cuatro ciudades más importantes del país después de la ciudad

de Cochabamba, este crecimiento es desproporcional al desarrollo urbanístico. De acuerdo a la pirámide poblacional. El Alto tiene habitantes mayoritariamente joven, lo que genera mayores demandas por terrenos, servicios básicos, infraestructura educativa y en salud y recursos humanos.

Según el Instituto Nacional de Estadística el "72.9% de la población urbana vive en situación de pobreza, que representa la existencia de 58.822 unidades familiares sin acceso adecuado a servicios e insumos básicos, educación, salud y/o vivienda y de ella un 12% en indigencia" (Plan Regulador de El Alto, 2000)

La pobreza de la población se expresa por medio de los insuficientes ingresos, riesgos de desnutrición infantil, bajo rendimiento escolar, abandono temprano de la escuela, enfermedades no atendidas, trabajo infantil, etc. En 1988 El Alto adquirió el rango de CIUDAD y en 1991 a causa de sus múltiples problemas de infraestructura y servicios básicos, se la declara "ciudad en emergencia"³

En 1997, se promulga el Decreto Supremo 24929, creando el Plan de Emergencia Para Combatir la Pobreza, se estructura la comisión impulsora de la lucha contra la pobreza, con el objetivo de lograr asentamientos humanos que expresen la superación de la pobreza en infraestructura básica, vivienda educación, salud, participación social, etc. para reducir la pobreza en la Ciudad de El Alto.

2.10.2 DATOS GEOGRÁFICOS

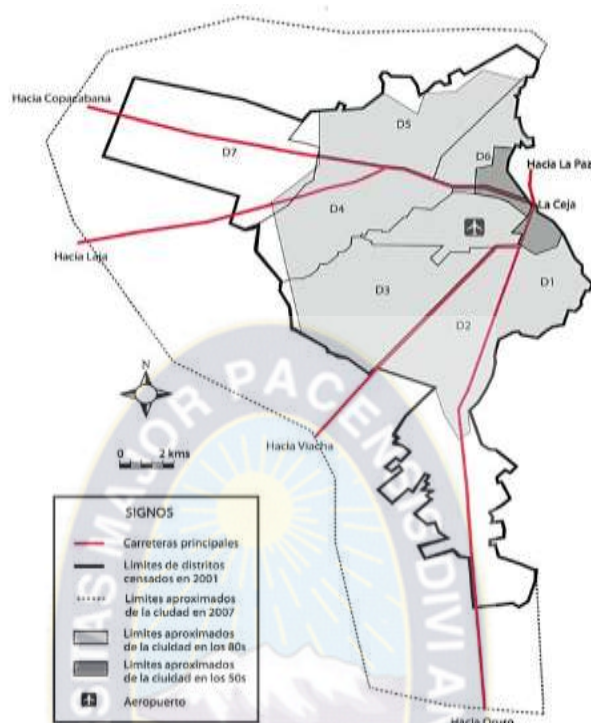
El Alto, la ciudad más alta y joven de Bolivia, está localizada a 16° 31' de la latitud sur y 68° 13' de longitud oeste, Limita al norte con el cantón Zongo del municipio de La Paz de la provincia Murillo, al sur con el municipio de Viacha de la provincia Ingavi, al este con la Ciudad de La Paz, al sureste con el Municipio de Achocalla provincia Murillo y al oeste con el Municipio de Laja provincia Los Andes.

2.10.3 CRECIMIENTO DE LA CIUDAD DE EL ALTO

La ciudad de El Alto puede ser concebida como la más joven y de mayor crecimiento de Bolivia, ya que, según proyecciones del Instituto Nacional de Estadística de Bolivia (INE), pasó tener una población de menos de 30 mil personas en 1960 a tener alrededor de un millón de habitantes en 2011. Otra característica importante de la ciudad de El Alto es que la mayor parte de su población es indígena – específicamente hablando, de origen Aimara. Gran parte del crecimiento de El Alto se debe a la migración proveniente del área rural o altiplano. Una de las más importantes razones por la que cientos de miles de personas han

migrado del área rural a la ciudad de El Alto es la búsqueda de oportunidades de trabajo y el hecho de que esta ciudad es la antesala a la ciudad de La Paz. Entre las motivaciones para la búsqueda de oportunidades se encuentran el incesante deseo de movilidad social debido a la discriminación social y económica de las urbes hacia los habitantes del área rural, el abandono político y estatal que sufren las comunidades rurales, y las consecuencias del calentamiento global que obliga a campesinos/indígenas a migrar hacia las urbes en busca de trabajo. El crecimiento poblacional acelerado de la ciudad de El Alto, experimentado en las décadas de los 80 y 90, tuvo un importante efecto en el crecimiento económico. Según el análisis cartográfico de Garfias y Mazurek (2005, citado en Poupeau 2010, p. 439), El Alto estaría compuesto por tres círculos espaciales distintos, correspondientes a la antigüedad de los diferentes barrios y a la centrífuga dinámica urbana (Ver gráfico). En el análisis de Garfias y Marzurek se elaboraron varios indicadores, teniendo en cuenta la calidad de las viviendas (paredes de ladrillo o de adobe, suelo de cemento o tierra, número de habitaciones, etc.), su acceso a los servicios urbanos, las características sociodemográficas de los jefes de familia (profesión, sector en el que trabajan), la dependencia de la familia de la persona activa, el acceso a los servicios de salud (con el número de partos a domicilio). El primer círculo está constituido por La Ceja y los primeros barrios construidos en los años 1950 (Villa Dolores, Ciudad Satélite, 16 de Julio, Ballivián). Este anillo se caracteriza por una elevada densidad demográfica, viviendas construidas con materiales modernos y con buen acceso a los servicios básicos, un elevado porcentaje de la población activa empleada principalmente en el sector del comercio y los servicios, que coexiste con pequeños empresarios independientes y personas que trabajan en su casa: todas estas características del empleo explican la baja tasa de analfabetismo y la gran proporción de mujeres. El segundo anillo se caracteriza por situaciones de lo más variadas, pues corresponde al asentamiento en los años 1970-1990: migración rural debida al clima (fenómeno de El Niño) y la crisis de reproducción del pequeño campesinado del altiplano, enfrentada a parcelas demasiado estrechas, heredadas de la distribución de la revolución de 1952, cierre de las minas debido a la crisis en los mercados mundiales y a las reestructuraciones liberales de 1985 y crecimiento endógeno de la población alteña. Se puede distinguir al norte del aeropuerto una población que trabaja por cuenta propia o empleada a domicilio y al sur una población de obreros y empleados, a la vez, más estable y más calificada, pero al parecer con viviendas todavía relativamente precarias.

Figura 2.10.3.1: mapa de El Alto y esquematización de sus anillos



Fuente: Poupeau (2010)

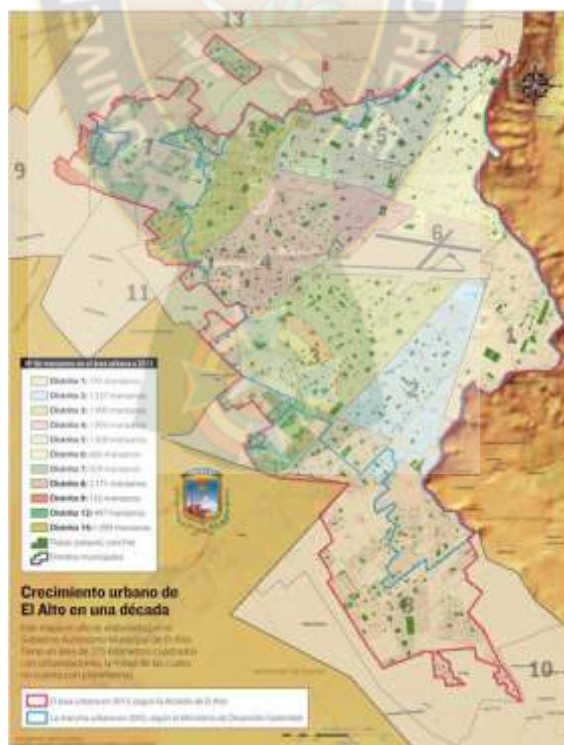
El tercer anillo está compuesto por las urbanizaciones más recientes, que datan de la segunda mitad de los años 1990, agrupadas en los distritos 7 y 8, así como en el norte de los distritos 5 y 6 y al oeste de los distritos 3 y 4. Este círculo presenta las superficies más grandes y también los niveles de densidad de viviendas más bajos, lo cual dificulta su acceso a los servicios básicos. Al norte del aeropuerto se encuentra, al igual que en el segundo anillo, una población poco calificada y más joven que en el resto de la ciudad. La estructuración socio espacial a la que obedecen la mayoría de las variables y que lleva a interpretar el espacio urbano alteño en términos de segregación, presenta un interés científico particular: los indicadores de ubicación espacial son, al 5 menos, igual de predictivos que los indicadores sociales tradicionales. El análisis cartográfico o división por distritos y zonas resulta ser pues un complemento muy útil en la encuesta sociológica, cuando los datos sobre la profesión o la clase social, en un contexto muy segregado, no aportan suficiente información sobre los individuos o los grupos encuestados (Poupeau, 2008). En lo económico, según el Atlas de El Alto (2011), durante los años 2000 a 2005, el Producto Interno Bruto (PIB) de la ciudad de El Alto fue de aproximadamente 500 millones de dólares. Esta suma representaría el 25 por ciento del PIB departamental y el seis por

ciento del PIB nacional, según datos del Gobierno Municipal de El Alto (2010, citado en el Atlas de El Alto 2011, p. 73). La ciudad de El Alto concentra la mayor parte de la actividad productiva del departamento de La Paz y contribuye significativamente a su crecimiento. Según datos del Ministerio de Economía y Finanzas Públicas de Bolivia, el crecimiento promedio del Departamento de La Paz, entre 2006 y 2011, fue de 5 por ciento. Adicionalmente, es importante mencionar que el PIB per cápita del Departamento de La Paz pasó de 887 USD, en 2005, a 2.086 en 2011 y este incremento se debe sobre todo a sectores como el comercio, los servicios, y al sector público.

2.10.2.3 CRECIMIENTO DE LA MANCHA URBANA DE LA CIUDAD DE EL ALTO EN EL AÑO 2013

En los últimos diez años, la denominada mancha urbana ha crecido de 115 kilómetros cuadrados a 270 kilómetros cuadrados. Actualmente, El Alto tiene 1.200 urbanizaciones.

Figura 2.10.3.2: Crecimiento urbano de El Alto en una década



Fuente: La Razón / Miguel Rivas / El Alto
 00:00 / 21 de julio de 2013

En 2003, la mancha urbana de El Alto tenía una extensión de 115 kilómetros cuadrados. Diez años después, las urbanizaciones de esta ciudad ocupan un área de 270 kilómetros cuadrados, 160% más que hace una década.

Son datos de un crecimiento geométrico, aunque las proyecciones futuras son más modestas: 30% para los siguientes diez años. Ambos son datos del jefe de la Unidad de Límites de la Alcaldía de El Alto, Honorato Llusco.

Para el oficial mayor de Desarrollo de Infraestructura Pública, Salim Yapur, las razones de esta expansión se las encuentra en las migraciones, las que marcaron los cuatro hitos principales del desarrollo urbano de esta urbe de 4.000 msnm.

En los 270 kilómetros cuadrados ocupados por asentamientos urbanos, actualmente existen 1.200 barrios distribuidos en los diez distritos urbanos.

Hace una década la cantidad, aunque no exacta, de barrios era la mitad: entre 600 y 800, estimó Llusco.

Pero la expansión de El Alto se realiza sin el acompañamiento de servicios y de manera clandestina. “Del total de las 1.200 urbanizaciones actuales, sólo entre 600 y 700 cuentan con planimetría, es decir son legales”, dijo Yapur.

“Las otras o son asentamientos con algún tipo de problema legal o sus papeles fueron extraviados en la quema de la Alcaldía en 2002”, apuntó el funcionario.

La ciudad de El Alto es la segunda más grande del país, detrás de Santa Cruz, si se toma en cuenta la cantidad de predios existentes en cada jurisdicción. En esta urbe hay al menos 255.000 predios: unos ocupados, otros con muro de cerco o perimetral, y otros que ni siquiera tienen muralla y son considerados lotes. “En Santa Cruz, en cambio, existen 330.000 predios y en La Paz, 226.000”.

El crecimiento de su población también fue geométrico. Entre 1940 y 1950, el área tenía unos 1.000 habitantes; en 1985, cuando fue creada, se calculó una cantidad de 400.000 personas. Ahora, las autoridades municipales estiman que cuenta con un millón de habitantes.

De acuerdo con los técnicos ediles, el crecimiento URBANO de El Alto se dio en un sentido inverso al de cualquier ciudad: Aquí la expansión fue de la periferia al centro, es decir hacia la Ceja, que es actualmente el área con mayor densidad poblacional por ser la más comercial.

Esta forma de crecimiento se debe a las migraciones, que primero se asentaron en los sectores periurbanos de esta planicie y luego se fueron acercando al núcleo. Las primeras vistas aéreas de las urbanizaciones existentes muestran, en 1956, a la zona 16 de Julio (Distrito 6) como la más poblada, seguida de Ciudad Satélite (Distrito 1).

“La urbe tiene un comportamiento altamente migrante. Se empezaron a concentrar grandes masas de gente, provenientes del área rural, en los extremos de la ciudad. Es un comportamiento especial”.

Otro aspecto que apuntan las autoridades municipales es que los migrantes llegan a El Alto no con el objetivo de asentarse permanentemente, sino momentáneamente mientras logran un crecimiento económico, mediante actividades que son básicamente en la construcción, comercio, entre otros.

Aunque el crecimiento es constante, las autoridades municipales pretenden que éste no continúe hacia los distritos rurales porque esto representaría un problema para el abastecimiento de los alimentos. Por eso planifican que la expansión futura sea hacia arriba, es decir con la construcción de edificios como en la ciudad de La Paz.

También en términos de planificación urbana, los técnicos prevén la conformación de sólo cuatro macro distritos urbanos para no perder el control administrativo de las zonas. De acuerdo a los resultados del Censo 2012 realizado por el Instituto Nacional de Estadística (INE) la ciudad de El Alto tiene un población de 848.452 habitantes. Desde el anterior censo -realizado en 2001- la población aumentó en 198.494 habitantes. En el censo de 2001 la urbe alteña contaba con 649.958 habitantes.

POBLACIÓN POR DISTRITO

De los 14 distritos municipales que tiene El Alto, en cada una de ellas residen diferente cantidad de habitantes. En la siguiente tabla detalla la distribución de habitantes por distrito:

Tabla 2.10.3.3: habitantes por distrito

| N° | DISTRITO | Nro DE HABITANTES |
|----|----------------|-------------------|
| 1 | Distrito 1 | 87.997 |
| 2 | Distrito 2 | 73.939 |
| 3 | Distrito 3 | 144.828 |
| 4 | Distrito 4 | 107.147 |
| 5 | Distrito 5 | 104.226 |
| 6 | Distrito 6 | 90.538 |
| 7 | Distrito 7 | 44.535 |
| 8 | Distrito 8 | 121.843 |
| 9 | Distrito 9 | 1.720 |
| 10 | Distrito 10 | 785 |
| 11 | Distrito 11 | 1.081 |
| 12 | Distrito 12 | 19.816 |
| 13 | Distrito 13 | 2.085 |
| 14 | Distrito 14 | 47.912 |
| | TOTALES | 848.452 |

Fuente: Instituto Nacional de Estadística (INE)

El Distrito 3 es el con mayor población, con 144. 828 habitantes. Comprende zonas como Villa Adela, Cosmos 78, Alto de la Alianza, Villa Calama, Luis Espinal entre muchos otros.

En el Distrito 10 habitan solamente 785 personas, por lo que es el distrito menos habitado de la urbe. Corresponde al área rural de El Alto y están comunidades como Amachuma y Parcopata.

Son cuatros los distritos que tiene una población mayor a los 100.000 habitantes. Estos son los Distritos 3, 4, 5 y 8.

La ciudad de El Alto es una ciudad y municipio de Bolivia, se encuentra en cuarta sección representando el 7,58% de la provincia Murillo, contando con 14 distritos de los cuales 11 son urbanos y 3 rurales.

Tabla 2.10.3.4: tabla de distritos con zonas céntricas

| DISTRITOS | ZONAS PRINCIPALES |
|------------------|--|
| Distrito 1 | Ciudad Satélite, Rosas Pampas, Villa Dolores, Villa Bolívar A, 12 de octubre, Barrio Minero, Tejada Triangular, Tejada Rectangular. |
| Distrito 2 | Nuevos Horizontes, El Kenko, Santiago I y II, Bolívar (B, D, E), Senkata, y otros. |
| Distrito 3 | Cosmos 79, Villa Adela, 1ro de Mayo, Luis Espinal, Bolívar (C, F), Romero Pampa, Amor de Dios, Yunguyo. |
| Distrito 4 | San Felipe de Seque, Villa Tunari (1,2,3,4), Franz Tamayo, Estrella de Belén, San José de Yunguyo, 23 de Marzo, Mercedario,. |
| Distrito 5 | Villa Ingenio, Rio Seco, Huayna Potosí, Mercurio, Villa Esperanza, Túpac Katari, Tawantisuyo, Mariscal Sucre. |
| Distrito 6 | 16 de Julio, Alto Lima (1, 2, 3, 4 secciones), Ballivian, Ferropretrol, Los Andes. |
| Distrito 7 | Urb. Bello Horizonte, Urb. Las Lomas, Urb. Utama, Urb. Porvenir, San Antonio, Urb. San Luis, Urb. San Roque, Urb. Fortuna, Urb. 6 de Agosto. |
| Distrito 8 | Mercedes (A, B, C, D, E, F, G), Zenkata, Cumaravi, Junthuma, San Francisco, Khantati, Ventilla, Atipiris, Andino. |
| Distrito 9 | Villa Andrade, Urb. Rosario, Urb. San Ramon, Urb. Mercedes, Urb. Topater. |
| Distrito 10 | Zona rural (Achuma, Amachuma). |
| Distrito 11 | Zona Rural Ocomisto, Tacachira |
| Distrito 12 | Barrió San Carlos, Barrio San Juan, Urb. Señor de la Exaltación, San Pedro Laja, Urb. San Felipe, San Martin de Porres. |
| Distrito 13 | Zona Rural (El Ingenio, Milluni Alto, Bajo Milluni). |
| Distrito 14 | Bautista Saavedra, Puerto Camacho, Villa Cooperativa, Néstor Taboada, Los pinos, Illimani, Estrellas de Norte. |

Fuente: Municipio de El Alto

Tabla 2.10.2.3.5: La población y área de los distritos ocupados por la ciudad de El Alto censo 2001.

| DISTRITO | AREA Km² | POBLACION | DENSIDAD |
|-----------------|----------------------------|------------------|-----------------|
| Distrito 1 | 9,16 | 98.982 | 10.806 |
| Distrito 2 | 11,82 | 74.413 | 6.296 |
| Distrito 3 | 26,54 | 132.879 | 5.007 |
| Distrito 4 | 15,12 | 89.799 | 5.939 |
| Distrito 5 | 14,68 | 89.916 | 6.125 |
| Distrito 6 | 8,05 | 100.347 | 12.465 |
| Distrito 7 | 53,17 | 18.120 | 341 |
| Distrito 8 | 15,21 | 28.940 | 1.903 |
| Distrito 9 | 0 | 16.562 | 0 |
| Distrito 10 | 15,12 | 89.799 | 5.939 |
| Distrito 11 | 14,68 | 89.916 | 6.125 |
| Distrito 12 | 8,05 | 100.347 | 12.465 |
| Distrito 13 | 53,17 | 18.120 | 341 |
| Distrito 14 | 15,21 | 28.940 | 1.903 |
| TOTAL | 153,75 | 649.958 | 4.227 |

Fuente: Instituto Nacional de Estadística (INE)

2.11. DISEÑO DE METOLOGIA

2.11.1 METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN DE MODELOS

Los pasos para realizar la simulación del modelo, de manera secuencial consiste en:

1. Identificación y análisis de objetos.
2. Recolección de datos.
3. Diseño del modelo de simulación.
4. Construcción del modelo de simulación.
5. Validación y verificación.
6. Simulación.
7. Análisis de la simulación.
8. Alternativas de solución generadas.

Muchos analistas introducen pasos adicionales entre los mencionados, puede existir la retroalimentación. Esta metodología pretende dar por enterado que dicha retroalimentación es un paso que se efectúa constante e inherentemente en cada una de las etapas como un proceso cíclico en toda la metodología, ya que la comunicación de retroalimentación en cada avance hace que el analista reflexione respecto a cómo está realizando su trabajo. La identificación y análisis se refiere a definir plenamente el modelo que se estudiara. Las entidades que conforman el modelo, las variables independientes, las variables dependientes, las variables de salida, los atributos, las interrelaciones, los supuestos, el entorno, los límites y objetivo del sistema.

La recolección de datos es la parte más lenta y costosa, ya que exige tiempo y dedicación por parte del responsable de dicha recolección. También es la que se reflejara el éxito de los resultados según la calidad de la información, refleja por el grado de certeza de esta.

El diseño del modelo de simulación es donde aterrizaremos los conocimientos e información de los dos puntos anteriores, dentro de una mezcla que constituirá un reflejo de la esencia del modelo, así como los cambios deseados en parámetros y variables para ver distintos escenarios de este.

La construcción del modelo de simulación está enfocando, a la captura del código en la computadora y que refleje el diseño del modelo.

La validación y verificación consiste en despejar todas las dudas que se tengan respecto a la credibilidad de diseño del modelo, el programa computacional y su funcionamiento.

La simulación es el proceso de repetir el comportamiento del sistema mediante el modelo, bajo diferentes condiciones en su operación o en sus estímulos: por lo general se realiza aprovechando los medios computacionales, debido a la rapidez y precisión que brindan.

El análisis de la simulación es la fase donde se estudian los resultados obtenidos mediante varias corridas y se detectan soluciones para el objetivo planteado para el sistema.

Las alternativas de solución generadas es la parte final del proceso y consiste en enmarcar el análisis dentro de distintas perspectivas para brindar los caminos que puede tomar según el modelo.

DISEÑO METODOLOGICO

La presente metodología representa las etapas y actividades que se realizarán para lograr los objetivos planteados en un proyecto de simulación. Las etapas, si bien se presentan como secuenciales, éstas son totalmente recíprocas, ya que durante la construcción del modelo se van realizando ajustes debido a que surgen aspectos del modelo que son difíciles de predecir al inicio del proyecto.

Las etapas se pueden separar en la identificación y análisis del objetivo, recolección de datos, diseño del modelo de simulación, Construcción del modelo, validar y verificar, simulación, análisis de simulación. A continuación se describe cada una de estas etapas:

Etapas 1: identificación y análisis del objetivo

Consiste en estudiar el contexto del problema, identificar los objetivos del proyecto, especificar los índices de medición de la efectividad del sistema, especificar los objetivos específicos del modelamiento y definir el sistema que se va a modelar.

Etapas 2: Recolección de datos.

En esta etapa se recogen los datos en terreno de todas aquellas variables que definen las condiciones de entrada del modelo. Es decir, se debe disponer de los datos que describen el sistema, que representen su comportamiento y su eficiencia actual, como también recoger los datos que describan las alternativas que se van a evaluar. Los datos que describen el sistema son aquellos que están vinculados con la estructura del sistema, con los componentes individuales del sistema, con la interacción entre ellos, y con las operaciones que se realizan en el sistema. Con esta información se genera la descripción de los estados del sistema. La cantidad de veces en que se realizará el muestreo depende de cada sistema a estudiar, dependiendo de la variabilidad de la información recolectada. Normalmente se definen tres periodos de muestreo. El primero de ellos se concentrará en el muestreo de las variables exógenas al sistema, es decir, las variables externas al sistema. El segundo periodo de muestreo se concentra en la toma de datos endógenos del sistema, es decir, de las operaciones propias del sistema en estudio, los que se usarán en la comparación con los resultados que entrega el modelo. Esta comparación es el proceso de verificación que se describe más adelante. El tercer periodo se ocupa para recoger

alguna información que sea necesaria para complementar la información anterior, o bien para ratificar las mediciones anteriores.

Etapa 3: Construcción Del Modelo

Esta etapa corresponde a la generación del programa computacional que representará el sistema, de acuerdo a como se ha concebido el modelo en la etapa anterior. Esta etapa consiste de tres actividades: el desarrollo del modelo, la recolección de datos y la definición de las experimentaciones que se desean realizar.

Etapa 4: Verificación y Validación

- **Verificación.**

En esta etapa se comprueba que la corrida de simulación se ejecuta de acuerdo a lo especificado en el prototipo, que cada elemento del modelo representa adecuadamente al modelo y que la relación entre ellos está de acuerdo a lo especificado.

- **Validación**

Se comprueba que la simulación del modelo es una representación razonable del sistema. Se Compararán las operaciones del sistema con las operaciones del modelo. Se revisa cada uno de los componentes y sus interrelaciones.

Etapa 5: Simulación

Después de cada corrida del modelo, se comprobará la consistencia de los resultados e identificar cualquier resultado incongruente con el comportamiento del prototipo. Al corregir estas inconsistencias, es posible una modificación en el modelo a un nuevo tiempo. De esta etapa ya es posible elaborar interpretaciones de los resultados con bastante detalle, sobre todo en sus magnitudes, de modo que refleje el comportamiento real del sistema.

Etapa 6: Análisis de simulación

En esta etapa se infieren las conclusiones y se evalúa el funcionamiento de todas las alternativas hipotéticas del sistema que se estima que puedan resolver el problema planteado.

Figura 3.1: Metodología de Modelo de simulación



Fuente: elaboración según Begoña González y Busto Mujica

3.1 IDENTIFICACION Y ANALISIS DE OBJETIVOS

Habiendo reconocido los objetivos, tenemos los siguientes:

- Modelar el crecimiento urbano aplicando autómatas celulares.
- Desarrollar un modelo mediante el cual nos sirva para la simulación del crecimiento de la mancha urbana de la ciudad de El Alto teniendo como variable las tasas de crecimiento de mancha urbana.
- Evaluar los resultados obtenidos, con los datos emitidos del INE.
- Diseñar un modelo de simulación que represente gráficamente la expansión de la mancha urbana.

- Simular el crecimiento de la mancha urbana contemplando políticas públicas de población (salud, educación, seguridad, medio ambiente, vivienda y otros)

Y como objetivo general tenemos:

“Desarrollar un modelo de simulación que refleje el crecimiento de la mancha urbana de la ciudad de EL Alto, a partir de datos reales, para un análisis crecimiento demográfico y poblacional, que permita plantear políticas de desarrollo sostenible, aplicando autómatas celulares”.

3.2 RECOLECCION DE DATOS

La recolección de datos es la parte más lenta y costosa, ya que exige tiempo y dedicación por parte del responsable de dicha recolección. También es la que reflejara el éxito de los resultados según la calidad de la información, refleja por el grado de certeza de esta.

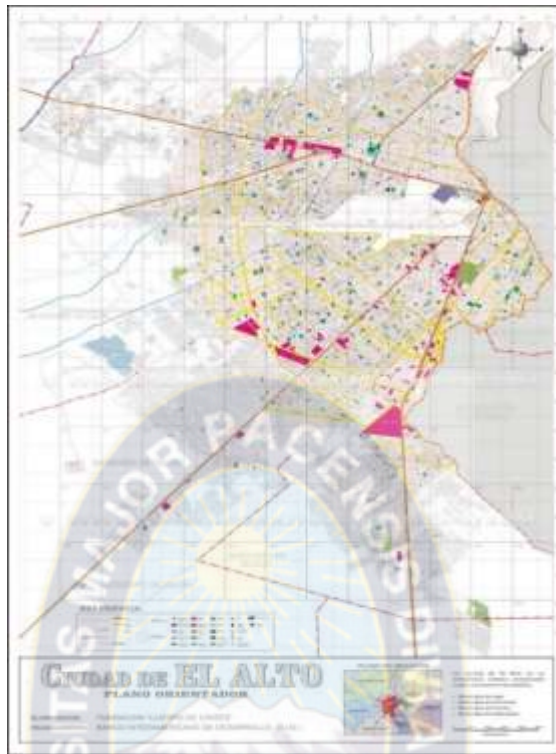
En la recolección tenemos los mapas de la ciudad de El Alto y como se expandió el crecimiento de la mancha urbana gráficamente como el área ocupada.

Figura 3.2.1: Mapa Cartográfico de la ciudad de El Alto



Fuente: fundación Cuerpo de Cristo

Figura 3.2.2: MANCHA URBANA DEL 2011



Fuente: fundación Cuerpo de Cristo

Figura 3.2.3: Mapa de la ciudad de El Alto en el año 2015



Fuente: Google Heard 2015

Tabla 3.3.1: tabla de datos recolectados

| AÑO | SUPERFICIE [hectáreas][Ha] |
|------------|-----------------------------------|
| 1990 | 4334,4 |
| 2004 | 12000 |
| 2006 | 14911 |
| 2015 | 20431,94 |

Fuente: recolección INE y GAMEA

La tasa de crecimiento de la mancha urbana propuesto por el INE es de 2,8, en los años antes del 2006 con la tasa de 8,4 ya que afectaron la gran migración de mineros relocalizados y la gran sequía por el fenómeno del niño en los años 90.

Tabla 3.2.2: Proyección del crecimiento de la superficie urbana, por hectáreas según INE en tesis de Economía

| Ciudad | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| / | | | | | | | | | |
| La Paz | 6496, | 6657, | 6818, | 6979, | 7140, | 7461, | 7622, | 7783, | 7944, |
| El Alto | 10079, | 11076, | 12074, | 13071, | 14068, | 16062, | 17060, | 18057, | 19054, |
| Total | 16.576, | 17.734, | 18.892, | 20.050, | 21.208, | 23.524, | 24.682, | 25.840, | 26.998, |

Fuente: tesis análisis socioeconómico del crecimiento de la aglomeración urbana paceña en base al precio del suelo marginal e informal

3.3 CONSTRUCCION DEL MODELO

3.3.1 INTRODUCCION DEL MODELO

El proceso de construcción del modelo de crecimiento de la mancha urbana para la ciudad de El Alto, se ha tomado en cuenta una de las partes que es muy importante de todo modelo predictivo, que es la flexibilidad de adaptación, es decir, que al modelo elaborado se le puede modificar hasta ciertos grados de funciones que determinan su funcionamiento, para adecuarlos a nuevas exigencias de respuesta a obtención de resultados, tomando en cuenta que un modelo predictivo considera solo un número reducido de variables de entrada dentro de una cantidad aun mayor de variables existentes, mismas que podrían ser consideradas de manera progresiva, con la finalidad de modelo planteado adquiere una mayor precisión.

3.2 DESCRIPCION FORMAL DE MODELO

El diseño del modelo de crecimiento de la mancha urbana es donde aplicaremos los conocimientos e información de los dos puntos anteriores de una mezcla que continuara en un reflejo de la esencia del sistema, así como de los cambios deseados en los parámetros y variables para ver distintos escenarios de este.

3.2.1 FORMULACION GENERICA DEL MODELO

La formulación del modelo es el resultado obtenido a partir de las variables, que condicionan la función de crecimiento o evolución de la mancha urbana, al cambio producido por las urbanizaciones de un tiempo t_1 a un tiempo t_j se lo denomina en el modelo el **potencial de cambio**.

En términos técnicos se puede decir que este factor muestra la tendencia de cada pixel unas celdas si hablamos de los autómatas celulares a transformarse en suelo urbana. El potencial de cambio para cada celda en un tiempo t , viene dado por la siguiente función.

$$P = F(V, D, E)$$

P: potencial de cambio para la transición. (Primer autómata celular diseñado para este tipo de relación).

D: Influencia del vecindario distante para una transición. (Segundo autómata celular diseñado para este tipo de relación).

E: Parámetro estocástico o de perturbación aleatoria.

V: Influencia del vecindario inmediato para una transición

3.3.2.2. POTENCIAL DE CAMBIO PARA LA TRANSICION P

El potencial de cambio para la transición representa la aptitud de cada pixel, de ser ocupada o no, es decir pasar de un estado urbanizable o no urbanizado que es lo principalmente importante al modelo.

Los parámetros determinan el valor final del potencial de cambio, que son la influencia del vecindario inmediato y distante más el factor estocástico, se encuentra relacionados proporcionalmente, es decir la transmisión es afectada directamente por la disposición de estos parámetros, esto según los antecedentes y análisis previamente explicados en los

capítulos anteriores. Es en este sentido que la ecuación formulada del modelo viene dado de la siguiente forma:

$$P = 2(V + 1) * (D + 1) * E$$

El primer parámetro de esta ecuación **V** toma valores que se encuentran en un intervalo de [0-1], en el segundo parámetro **D** los valores son mayores o iguales a 0 y finalmente el ultimo parámetro **E** toma valores dentro de un rango [1-2]. Las correlaciones existentes entre cada uno de estos parámetros se explican de la siguiente forma:

El parámetro **V**, que es la influencia del vecindario inmediato, tiene un peso superior a las demás variables ya que está determinada la accesibilidad más influyente de que un espacio sea o no ocupado.

Parámetro **D**, que es la influencia del vecindario distante, tiene un peso menor al parámetro asignado a **V**, pero este peso asignado a **D** es significativo y justificado, debido principalmente a que la accesibilidad, de un espacio está influenciado también por el conjunto de vecinos dispuestos en este caso a lo largo de un radio superior a una celda.

Parámetro **E**, que es la perturbación aleatoria, tiene un peso únicamente proporcional a su valor, es decir al factor estocástico que se encuentra en la dinámica de todo fenómeno, y está determinada en relación a un coeficiente aleatorio.

3.3.2.2.1. CONSTRUCCION DEL PRIMER AUTOMATA CELULAR

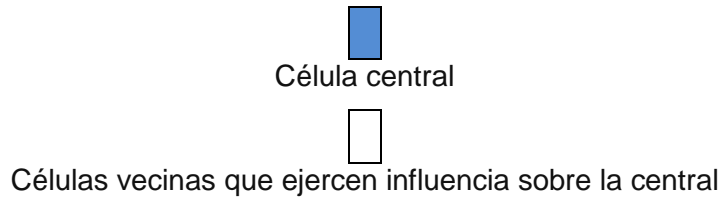
El primer autómata celular que el modelo utiliza este encargado de procesar el conjunto de valores en que el vecindario inmediato pueda estar en un tiempo t.

ESTRUCTURA DEL AUTOMATA CELULAR

El autómata celular tiene la siguiente estructura:

Figura 3.2.2.1.1 Vecindad de Moore

| | | |
|---------------|-------------|---------------|
| $H_{i,j-1}$ | $H_{i,j}$ | $H_{i,j+1}$ |
| $H_{i-1,j}$ | $H_{i,j}$ | $H_{i+1,j}$ |
| $H_{i-1,j-1}$ | $H_{i-1,j}$ | $H_{i-1,j+1}$ |



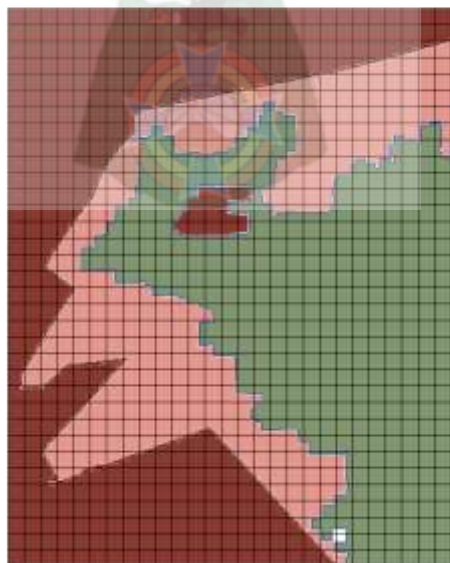
Fuente: Mooru

El tipo de vecindad teóricamente hablando es la de Moore, esta disposición establece 8 células $H_{i-1,j-1}$, $H_{i-1,j}$, $H_{i-1,j+1}$, $H_{i,j+1}$, $H_{i,j+1}$, $H_{i+1,j-1}$, $H_{i+1,j}$, $H_{i+1,j+1}$, cuya influencia determinara la transición de estados de la célula central $H_{i,j}$, conformado así, un total de 9 células.

RETICULA

La Retícula o Lattice está constituida por un dominio bidimensional, necesario para el autómata celular de la figura 3.1 efectuó las interacciones a lo largo de cada transición celular, es también conocido como evolución. Los límites de la retícula están condicionados a los bordes absorbentes, es decir que se considera únicamente las dimensiones $N \times M$ establecidas para capturar la imagen del territorio en el cual se realizara la simulación. En realidad se tiene una malla de células relacionadas unas con otras de tal manera que la dinámica de un conjunto de elementos puede ser convenientemente representada. Una imagen de un determinado territorio en la que se distingue una figura en particular como las zonas urbanizadas de un espacio bidimensional puede ser representada dentro de una retícula de la siguiente manera:

Figura 3.2.2.1.2: imagen de simulación



Fuente: elaboración propia

Como se observa en la anterior figura la malla tiene una dimensión, esto es un ejemplo de la forma en la cual se dispondrán los pixeles. Ahora el termino aplicativa en autómatas celulares a esta malla compuesta por pixeles cabe aclarar una vez más es bajo el nombre de retícula, compuesta por células o celdas, cuya dimensión de 200 x 200, esta adecuado al tamaño del territorio en estudio cada célula representa un sub-espacio cuya unidad será la hectárea, es decir una celda equivaldría X[Ha] de terreno en caso de que el territorio sea de una dimensión muy extensa.

ESTADOS

Los estados de cada célula del autómata celular están determinados en función a los estados más relevantes en que un espacio territorial suele estar. Este conjunto de estados son principalmente los espacios en condiciones de urbanización, los que se encuentran ya urbanizados, los espacios que representan las áreas protegidas y finalmente los espacios que no presentan condiciones de urbanización.

En resumen, para este autómata celular del modelo, una célula podrá estar únicamente dentro de estos 4 estados posibles. Los valores asignados vienen dados de siguiente forma: Valores de asignación para las células de la Retícula del primer Autómata Celular.

Tabla 3.2.2.1: Valores de asignación para las células de la Retícula del primer AC.

| VALOR | ESTADO POSIBLE DE UNA CELULA |
|-------|---|
| 0 | Célula que representa un área en condiciones de ser urbanizada. |
| 1 | Célula que representa un área urbanizada. |
| -1 | Célula que representa un área con construcciones de ser urbanizado. |
| -2 | Célula que representa un área sin condiciones de urbanización. |

Fuente: [elaboración propia]

Especificaciones

- Un área en condiciones de ser urbanizada, es aquella en que en espacio territorial presenta un suelo susceptible a ser habitables, pudiendo ser utilizado como un terreno para la vivienda, comercio, industria, parque, calle, y todos otros escenarios en que se desarrollan las actividades de una urbe.
- Un área urbanizada es aquella cuyo espacio territorial se encuentra ocupado por viviendas, comercios, industrias, parques, calles, y otros escenarios de similar índole.

- En área con restricciones de ser urbanizado es aquel espacio geográfico que cuenta con una protección de tipo estratégico o esencial, ya sea para una ciudad o una región en particular de un país, como ejemplo se tiene los bloques o áreas forestales protegidas y terrenos extensos asignados como zonas militares.
- Un área sin condiciones de urbanización es aquella que presenta un impedimento para cualquier tipo de asentamiento humano, estos son de tipo natural como los ríos, lagos, cordilleras sumamente empinadas y otros de condiciones similares.

CONFIGURACION INICIAL

La configuración inicial de autómata celular específicamente hablando se la obtiene de la siguiente forma:

- I. El territorio objeto de la simulación, está dividido de forma conveniente en hectáreas o millas cuadradas, las cuales se asignan a células que componen la retícula.
- II. Para cada célula se asigna un valor numérico, mismo que sirve para el análisis evolutivo del autómata celular. El valor numérico que se asigna a cada célula, es determinado según los estados posibles.
- III. Los valores asignados a todo el conjunto de celdas que componen la retícula corresponden al tiempo inicial t_0 , este tiempo es el estado original de territorio en el cual se realizará la simulación.

Dicho de otra manera, se tiene el conjunto de estados en el tiempo t_0 , representa la configuración inicial del autómata celular, misma que será la base de la cual se generaran todas las evoluciones o en otras palabras todas las iteraciones que darán lugar a los diferentes estados de transición.

REGLAS DE EVOLUCION

Las reglas de evolución del autómata celular son las que determinan el estado de las células en un instante dado, es decir, que debe cambiar de estado de un tiempo t , a un t_{i+1} dependiendo del estado inmediato anterior de vecindad. Este conjunto de reglas hará posible la transición evolutiva del conjunto de celdas.

La célula central que sufre la transición a partir del valor de estados de vecinos inmediatos, tiene la posibilidad de adquirir únicamente 4 valores, de manera formal se puede denotar de la siguiente forma:

$$S_1 = \{0,1,-1,-2\}$$

$$B_1 = \{0, 1\}$$

Donde:

S_1 : conjunto de valores posibles en que las células.

B_1 : conjunto de valores que la célula central puede tomar.

Tal que:

$$H_{i,j} = \Phi(H_{i-1,j-1}, H_{i-1,j}, H_{i-1,j+1}, H_{i,j+1}, H_{i,j+1}, H_{i+1,j-1}, H_{i+1,j}, H_{i+1,j+1})$$

Es decir que las celdas central $H_{i,j}$ está en función de las celdas vecinas $H_{i-1,j-1}, H_{i-1,j}, H_{i-1,j+1}, H_{i,j+1}, H_{i,j+1}, H_{i+1,j-1}, H_{i+1,j}, H_{i+1,j+1}$, mismas que tienen un valor dentro del conjunto S_1 . Por otro lado la celda central tiene uno de los dos valores de B_1 .

El valor de 0 o 1 de la celda central $H_{i,j}$, responden al hecho que el autómata celular determine de la manera exclusiva el cambio de transición que un determinado espacio puede estar no urbanizado 0 y a estar urbanizado 1.

Una vez definido los condicionantes para una evolución, a partir de los estados posibles de la célula central y las células vecinas, se fija la regla evolutiva para un paso de tiempo, la misma viene dado por la siguiente función de transición:

FUNCION DE YTRANSICION PARA EL PRIMER AUTOMATA CELULAR

$$\Phi^{t+1} = \begin{cases} 0 & \text{si } H_{i,j} = 0 \wedge \in 2 < \sum(H_{f,c}) < 8 \\ 1 & \text{si } H_{i,j} = 0 \wedge \notin 2 < \sum(H_{f,c}) < 8 \\ x & \text{si } H_{i,j} = x / x = 1, -1, -2 \end{cases}$$

Donde:

$$\sum(H_{f,c}) = H_{i-1,j-1} + H_{i-1,j} + H_{i-1,j+1} + H_{i,j+1} + H_{i,j+1} + H_{i+1,j-1} + H_{i+1,j} + H_{i+1,j+1}$$

Estas tres reglas de evolución discretas determinan la dinámica de crecimiento de la mancha urbana tomando el criterio único respecto a la influencia de la vecindad inmediata.

Así, a partir de los datos urbanos de un periodo en particular, el autómata celular del modelo ejecutara las iteraciones respectivas para obtener una predicción del suelo en la que cada espacio representado por una célula puede ser ocupado o no en un periodo posterior.

La evolución de cada una de las células, determinadas por la función de transición tiene la facilidad específica de reflejar el crecimiento urbano por agregación, este tipo de

crecimiento se da cuando un espacio no ocupado al lado de un espacio urbanizado se convierte en una zona o espacio también urbanizado.

Finalmente es, en este sentido, en que se produce el crecimiento o expansión de la marcha urbana por agregación.

Como se observa la figura que corresponde a la mancha urbana de un territorio, cambia paulatinamente de un tiempo A hasta un tiempo D, este cambio producido es el resultado del crecimiento urbano por agregación.

El autómata celular a través de sus reglas de evolución anteriormente definido refleja este comportamiento expansivo, quedando así en claro que este fenómeno del sistema urbano está siendo tratado oportunamente por el modelo.

VECINDARIO

El vecindario de la célula central, que está compuesto de 8 células, mismas que tienen la posibilidad de tomar uno de los 4 valores de S_1 , de tal manera que los estados posibles en que se podrán encontrar todo el conjunto que constituye la vecindad sería 65536.

Figura 3.2.2.1.3 estados posibles del vecindario



Fuente: elaboración propia

Formalmente:

$$E=4*4*4*4*4*4*4*4$$

$$E=4^8$$

$$E= 65636$$

Donde:

E=estados posibles del conjunto de células constituyen la vecindad.

RELOJ VIRTUAL DE CÓMPUTO

El reloj virtual que está conectado a cada celda del autómata, la cual se encarga de generar pulsos que indican cuando debe establecerse los cambios de estado de las células según de reglas de evolución: una iteración equivaldría al cambio producido en el crecimiento de mancha urbana durante el periodo de 1 año.

3.3.2.3 INFLUENCIA DE VECINDARIO DISTANTE D

La influencia de vecindario distante es aquella donde se considera una distancia radial superior a 1, por el cual un espacio puede cambiar de un estado urbanizable a uno urbanizado. Esta influencia de vecindario está determinado por otro autómata celular, el segundo a ser utilizado en el modelo propuesto.

3.3.2.3.1 CONSTRUCCION DEL SEGUNDO AUTOMATA CELULAR

El segundo autómata celular que el modelo utiliza esta encargado de procesar el conjunto de valores adquiridos por el vecindario que se encuentran dentro de un radio igual a 4, en un tiempo t .

ESTRUCTURA DEL AUTOMATA CELULAR

El autómata celular tiene una configuración bidimensional que presenta la siguiente estructura:

Figura 3.2.3.1.1: Estructura del segundo AC utilizado por el Modelo

| | | | | | | | | |
|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $H_{i-4,j-4}$ | $H_{i-4,j-3}$ | $H_{i-4,j-2}$ | $H_{i-4,j-1}$ | $H_{i-4,j}$ | $H_{i-4,j+1}$ | $H_{i-4,j+2}$ | $H_{i-4,j+3}$ | $H_{i-4,j+4}$ |
| $H_{i-3,j-4}$ | $H_{i-3,j-3}$ | $H_{i-3,j-2}$ | $H_{i-3,j-1}$ | $H_{i-3,j}$ | $H_{i-3,j+1}$ | $H_{i-3,j+2}$ | $H_{i-3,j+3}$ | $H_{i-3,j+4}$ |
| $H_{i-2,j-4}$ | $H_{i-2,j-3}$ | $H_{i-2,j-2}$ | $H_{i-2,j-1}$ | $H_{i-2,j}$ | $H_{i-2,j+1}$ | $H_{i-2,j+2}$ | $H_{i-2,j+3}$ | $H_{i-2,j+4}$ |
| $H_{i-1,j-4}$ | $H_{i-1,j-3}$ | $H_{i-1,j-2}$ | $H_{i-1,j-1}$ | $H_{i-1,j}$ | $H_{i-1,j+1}$ | $H_{i-1,j+2}$ | $H_{i-1,j+3}$ | $H_{i-1,j+4}$ |
| $H_{i,j-4}$ | $H_{i,j-3}$ | $H_{i,j-2}$ | $H_{i,j-1}$ | $H_{i,j}$ | $H_{i,j+1}$ | $H_{i,j+2}$ | $H_{i,j+3}$ | $H_{i,j+4}$ |
| $H_{i+1,j-4}$ | $H_{i+1,j-3}$ | $H_{i+1,j-2}$ | $H_{i+1,j-1}$ | $H_{i+1,j}$ | $H_{i+1,j+1}$ | $H_{i+1,j+2}$ | $H_{i+1,j+3}$ | $H_{i+1,j+4}$ |
| $H_{i+2,j-4}$ | $H_{i+2,j-3}$ | $H_{i+2,j-2}$ | $H_{i+2,j-1}$ | $H_{i+2,j}$ | $H_{i+2,j+1}$ | $H_{i+2,j+2}$ | $H_{i+2,j+3}$ | $H_{i+2,j+4}$ |
| $H_{i+3,j-4}$ | $H_{i+3,j-3}$ | $H_{i+3,j-2}$ | $H_{i+3,j-1}$ | $H_{i+3,j}$ | $H_{i+3,j+1}$ | $H_{i+3,j+2}$ | $H_{i+3,j+3}$ | $H_{i+3,j+4}$ |
| $H_{i+4,j-4}$ | $H_{i+4,j-3}$ | $H_{i+4,j-2}$ | $H_{i+4,j-1}$ | $H_{i+4,j}$ | $H_{i+4,j+1}$ | $H_{i+4,j+2}$ | $H_{i+4,j+3}$ | $H_{i+4,j+4}$ |

Fuente: elaboración propia

El tipo de vecindad teóricamente hablando es la de Moore Extendido con radio a 4, esta disposición establece 80 células $H_{i-4,j-4}$, $H_{i-4,j-3}$, $H_{i-4,j-2}$, $H_{i-4,j-1}$, ..., $H_{i+1,j+1}$, ..., $H_{i+3,j+1}$, ..., $H_{i+3,j+4}$, vecinas y una central $H_{i,j}$, haciendo un total 81 celdas que serán evaluadas por el autómata celular.

RETICULA

Los límites de la retícula están condicionados a los bordes absorbentes, es decir que se considera únicamente las dimensiones 200 * 200 establecida para capturar la imagen del territorio en el cual se realizara la simulación.

En realidad se tiene la misma malla de células relacionadas unas con otras, misma que son utilizadas por el primer autómata celular construido, con la diferencia principal e importante en los procesos de evaluación de estados de un determinado territorio en el que se distingue las zonas urbanizadas

La imagen de un determinado territorio en el que se distingue las zonas urbanizadas dentro de espacio bidimensional, están representadas dentro de la retícula.

En resumidas cuentas la retícula de este segundo autómata es la misma que el de la primera, de lo que se concluye que se utilizara una solo retícula para los dos autómatas celulares del modelo. Cada célula también representara un sub espacio cuya unidad será las hectáreas (ha), es decir una célula o celda equivale a X[ha] de terreno.

ESTADOS

Los estados de cada célula de este segundo autómata celular están determinados en función de únicamente dos estados: urbanizable y urbanizado. Esto debido al objetivo que se persigue, que es establecer la potencial de urbanización exclusivamente en la relación de distancia que existe entre una zona urbanizable respecto a las ya urbanizadas. Los espacios que en la retícula representa las áreas de transporte y finalmente los espacios que no presentan condiciones de urbanización son consideradas de valor nulo para este segundo autómata celular, en otras palabras no son evaluados.

Este segundo autómata celular del modelo, específicamente podrá tomar únicamente 2 estados, los valores asignados vienen dados de la siguiente forma.

Tabla 3.3.2.3.1.1: de valores asignados para las células de la retícula del segundo AC

| VALOR | ESTADO POSIBLE DE LA CELULA |
|-------|---|
| 0 | Célula que representa un área en condición de ser urbanizada. |
| 1 | Célula que representa un área urbanizada. |

Fuente: elaboración propia

Especificaciones

- Un área en condiciones de ser urbanizada, es aquella en que el espacio territorial presenta un suelo susceptible, pudiendo ser utilizado como en terreno para la vivienda, comercio, industria, parques, calles, y todos otros escenarios en que se desarrollan las actividades de una urbe.
- Un área urbanizada es aquella cuyo espacio territorial se encuentra ocupado ya sea por viviendas, comercio, industria, parques, calles y otros escenarios.

CONFIGURACION INICIAL

La configuración inicial del autómata celular se la obtiene de la siguiente forma:

1. El territorio objeto de la simulación, está dividido en hectáreas, las cuales se asignan a las células que componen la retícula.
2. Los valores asignados a todo en conjunto de celdas que componen la retícula correspondiente al tiempo t_0 , este tiempo es el estado origen del territorio en el cual se realizara la simulación.
3. Por tanto, se tiene que el conjunto de estados en el tiempo t_0 , representa la configuración inicial de este segundo autómata celular, misma que será la base por lo cual se generan todas las evoluciones o en palabras todas las iteraciones que darán lugar a los diferentes estados de transición.

REGLAS DE EVOLUCION

Las reglas de evolución de este segundo autómata celular determinaran el estado de las células en un tiempo dado, es decir, la forma en que se realizara el cambio de estados, conjunto de celdas de un tiempo t_i a un t_{i+1} dependiendo del estado inmediatamente anterior de su vecindad, en este caso una vecindad expandida.

La célula central que sufre la transición a partir del valor de estados de todos sus vecinos distantes que se encuentran dentro del radio especificado, tiene la posibilidad de adquirir únicamente 2 valores, formalmente se denota de la siguiente manera:

$$S_2=\{0,1\} \quad B_2=\{0,1\}$$

Donde:

S_2 : es el conjunto de valores posibles en que puede estar las células vecinas.

B_2 : es el conjunto de valores que la célula puede tomar.

Entonces:

$$H_{i,j} = \Phi(H_{i-4,j-4}, H_{i-4,j-3}, H_{i-4,j-2}, H_{i-4,j-1}, \dots, H_{i+1,j+1}, \dots, H_{i+3,j+1}, \dots, H_{i+3,j+4})$$

Es decir la celda central $H_{i,j}$ está en función del estado de las celdas $H_{i-4,j-4}, H_{i-4,j-3}, H_{i-4,j-2}, H_{i-4,j-1}, \dots, H_{i+1,j+1}, \dots, H_{i+3,j+1}, \dots, H_{i+3,j+4}$, mismas que tienen un valor dentro del conjunto S_2 . Por otro lado la celda central tiene uno de los valores de B_2 .

El valor de 0 o 1 de la celda central $H_{i,j}$, responde al mismo hecho que en el primer autómata celular el cual determinaba de manera exclusiva el cambio de transición que un determinado espacio podía tomar los valores:

Tabla 3.2.3.1.2: Valores de asignación para las células de la retícula del segundo AC

| CLAVE | CLASE DE COBERTURA |
|-------|--------------------|
| 1 | URBANIZADO |
| 0 | NO URBANIZADO |

Fuente: Elaboración propia

Una vez definidos los condicionantes para una evolución, a partir de los estados posibles de célula central y las células vecinas, se fija la regla de evolución para un paso de tiempo, la misma viene dada por la siguiente función de transición:

$$\Phi^{t+1}_2 = \begin{cases} 0 & \text{Si } H_{i,j} = 0 \wedge \Psi(H_{f,c}) < 0.15 \\ 1 & \text{Si } H_{i,j} = 0 \wedge \Psi(H_{f,c}) > 0.15 \wedge rand < 1 \\ 0 & \text{Si } H_{i,j} = X / X = 1, -1, -2 \end{cases}$$

Donde:

$$\psi(H_{f,c}) = A_2 \times M \wedge rand = \# Randomico[0-80]$$

A_2 : valores de estado del cevindario expandido del Automata Celular

M : valores de estado de la Matriz de Filtrado

Figura 3.2.3.1.4 Matriz diseñada para expansión emergente de la mancha urbana

Matriz de Filtrado M

| | | | | | | | | |
|------|------|------|------|----|------|------|------|------|
| 0 | 0.15 | 0.4 | 0.6 | 1 | 0.6 | 0.3 | 0.15 | 0 |
| 0.15 | 0.3 | 0.6 | 1.25 | 2 | 1.25 | 0.6 | 0.3 | 0.15 |
| 0.3 | 0.6 | 1.25 | 3.5 | 5 | 3.5 | 1.25 | 0.6 | 0.3 |
| 0.6 | 1.25 | 3.5 | 7 | 10 | 7 | 3.5 | 1.25 | 0.6 |
| 1 | 2 | 5.5 | 10 | 1 | 10 | 5 | 2 | 1 |
| 0.6 | 1.25 | 3.5 | 7 | 10 | 7 | 3.5 | 1.25 | 0.6 |
| 0.3 | 0.6 | 1.25 | 3.5 | 5 | 3.5 | 1.25 | 0.6 | 0.3 |
| 0.15 | 0.3 | 0.6 | 1.25 | 2 | 1.25 | 0.6 | 0.3 | 0.15 |
| 0 | 0.15 | 0.4 | 0.6 | 1 | 0.6 | 0.3 | 0.15 | 0 |

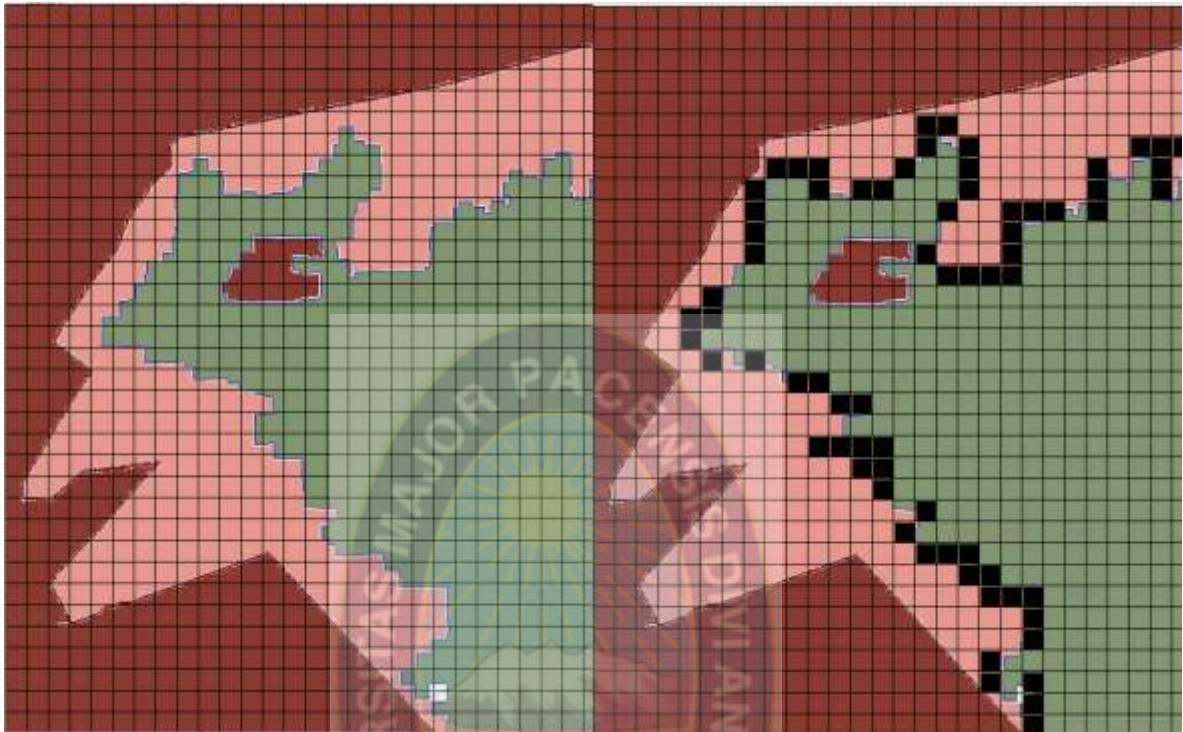
Fuente: [Elaboración propia]

Estas tres reglas de evolución descritas más la matriz de filtrado M, determinan la dinámica de crecimiento de mancha urbana, tomando en este caso el criterio de la influencia del vecindario expandido.

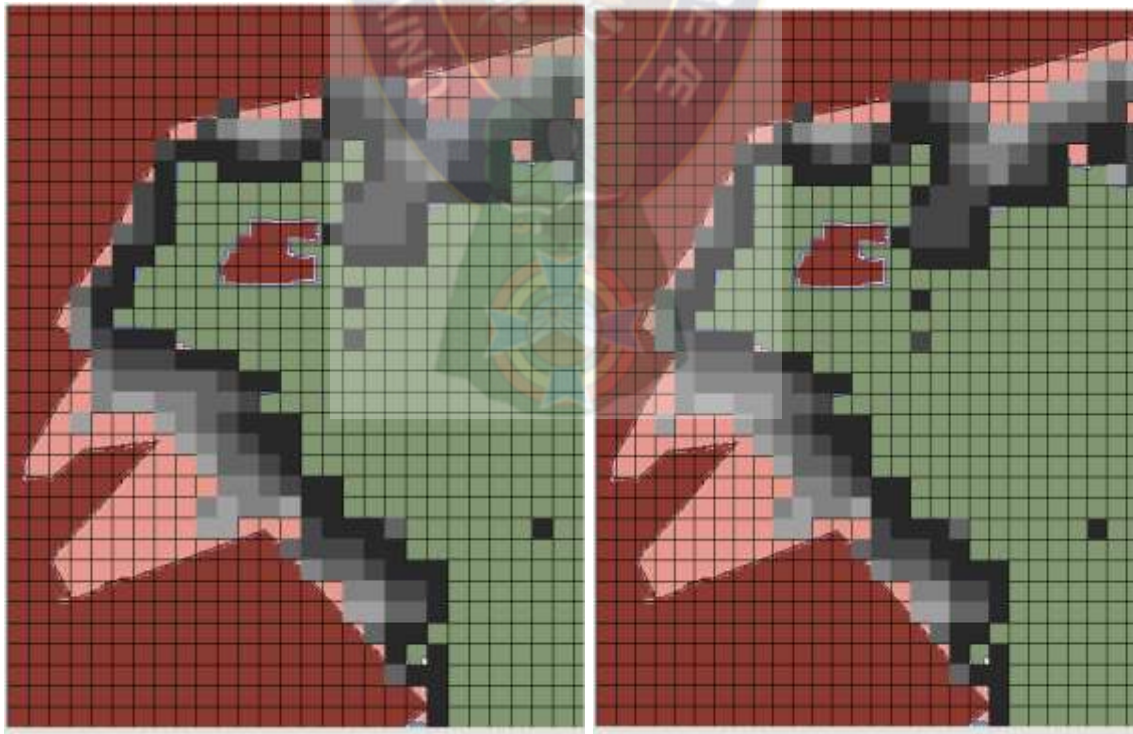
Los datos de suelo urbano de un periodo en particular construirán para este segundo autómata celular del modelo la ejecución de las iteraciones respectivas, a objeto de obtener la predicción del estado del suelo, en la que cada espacio representado por una célula pueda ser o no ser zona urbana en un periodo posterior.

La evolución de cada una de las células, determinadas por la defunción de transición tiene para este segundo caso la finalidad específica de reflejar el crecimiento urbano emergente, esto significa que el crecimiento se da no solo cuando un espacio no ocupado ubicado al lado de un espacio urbanizado se convierta en un espacio urbanizado, si no también cuando se encuentra a cierta distancia de las zonas urbanizadas. Por tanto se tiene aquí la segunda forma posible por la cual se producirá un crecimiento o expansión de la mancha urbana.

FIGURA 3.3.2.3.1.5: retícula representa la expansión creciente de la mancha urbana en tiempos t_1 hasta t_4



Fuente: elaboración propia



Fuente: elaboración propia

Los cambios que se observa desde tiempo t_1 hasta el tiempo t_4 , corresponde a la expansión de la mancha urbana de un territorio en particular, este resultado, es el producto del crecimiento paulatino urbano bajo características emergentes, es decir se produce apariciones espaciales urbanas en inmediaciones distantes pero no muy lejanos del territorio que es objeto de estudio.

El autómata celular a través de sus reglas de evolución anteriormente definido, reflejara este comportamiento expansivo, permitiendo así que el modelo considere dentro de sus parámetros que lo constituye, esta segunda forma de expansión en la dinámica de un sistema urbano.

VECINDARIO

El vecindario de la célula central, para este autómata celular, que está compuesto de 80 células, mismas que tiene la posibilidad de tomar los valores de S_2 , que en este caso son 2, configurando así, un total de 1208925819614629174706176 combinaciones posibles entre todos los estados de la vecindad.

Figura 3.3.2.3.1.6: Estados posibles del vecindario Moore Expandido

| | | | | | | | | |
|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $H_{i-4,j-4}$ | $H_{i-4,j-3}$ | $H_{i-4,j-2}$ | $H_{i-4,j-1}$ | $H_{i-4,j}$ | $H_{i-4,j+1}$ | $H_{i-4,j+2}$ | $H_{i-4,j+3}$ | $H_{i-4,j+4}$ |
| $H_{i-3,j-4}$ | $H_{i-3,j-3}$ | $H_{i-3,j-2}$ | $H_{i-3,j-1}$ | $H_{i-3,j}$ | $H_{i-3,j+1}$ | $H_{i-3,j+2}$ | $H_{i-3,j+3}$ | $H_{i-3,j+4}$ |
| $H_{i-2,j-4}$ | $H_{i-2,j-3}$ | $H_{i-2,j-2}$ | $H_{i-2,j-1}$ | $H_{i-2,j}$ | $H_{i-2,j+1}$ | $H_{i-2,j+2}$ | $H_{i-2,j+3}$ | $H_{i-2,j+4}$ |
| $H_{i-1,j-4}$ | $H_{i-1,j-3}$ | $H_{i-1,j-2}$ | $H_{i-1,j-1}$ | $H_{i-1,j}$ | $H_{i-1,j+1}$ | $H_{i-1,j+2}$ | $H_{i-1,j+3}$ | $H_{i-1,j+4}$ |
| $H_{i,j-4}$ | $H_{i,j-3}$ | $H_{i,j-2}$ | $H_{i,j-1}$ | $H_{i,j}$ | $H_{i,j+1}$ | $H_{i,j+2}$ | $H_{i,j+3}$ | $H_{i,j+4}$ |
| $H_{i+1,j-4}$ | $H_{i+1,j-3}$ | $H_{i+1,j-2}$ | $H_{i+1,j-1}$ | $H_{i+1,j}$ | $H_{i+1,j+1}$ | $H_{i+1,j+2}$ | $H_{i+1,j+3}$ | $H_{i+1,j+4}$ |
| $H_{i+2,j-4}$ | $H_{i+2,j-3}$ | $H_{i+2,j-2}$ | $H_{i+2,j-1}$ | $H_{i+2,j}$ | $H_{i+2,j+1}$ | $H_{i+2,j+2}$ | $H_{i+2,j+3}$ | $H_{i+2,j+4}$ |
| $H_{i+3,j-4}$ | $H_{i+3,j-3}$ | $H_{i+3,j-2}$ | $H_{i+3,j-1}$ | $H_{i+3,j}$ | $H_{i+3,j+1}$ | $H_{i+3,j+2}$ | $H_{i+3,j+3}$ | $H_{i+3,j+4}$ |
| $H_{i+4,j-4}$ | $H_{i+4,j-3}$ | $H_{i+4,j-2}$ | $H_{i+4,j-1}$ | $H_{i+4,j}$ | $H_{i+4,j+1}$ | $H_{i+4,j+2}$ | $H_{i+4,j+3}$ | $H_{i+4,j+4}$ |



| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|-----------|---|---|---|---|
| 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 2 | 2 | 2 | 2 | $H_{i,j}$ | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |

Fuente: Elaboración propia

Formalizando:

$$E=2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 \times 2 \times 2 \times 2$$

$$E=2^{80}$$

Donde E es, estados posibles de conjunto de células que constituye la vecindad.

RELOJ VIRTUAL DE CÓMPUTO

El reloj de computo está definido de similar forma que el primer autómata celular, es decir que está conectado a cada celda, la cual se encarga de generar pulsos que indican cuando debe establecerse los cambios de estado de cada célula según las reglas de evolución aquí descritas, haciendo por ende que todas las células cambien de estado al mismo tiempo, de esta manera se puede decir que la expansión de la mancha urbana en el reloj de computo por periodo es equivalente también a 2 años, que es la escala de tiempo considerado por el modelo aquí propuesto.

3.3.2.4 PARAMETRO DE PERTURBACION ALEATORIO E

Este parámetro estocástico se emplea para tratar de replicar el grado de aleatoriedad inherente a los procesos exógenos que envuelven al fenómeno de crecimiento urbano. Una manera de comprender esta situación es considerada todos los motivos posibles por los cuales los asentamientos urbanos han sido realizados dentro de un ámbito geográfico territorial, desde políticas de estado hasta factores limitantes de difícil control como una explosión demográfica o desastres naturales. Tales consideraciones demuestran que todo fenómeno sistemático está sujeto a perturbaciones aleatorias, las mismas que de una forma u otra tienen su participación en el conjunto de factores que influyen el crecimiento de una mancha urbana dentro de un territorio cualquiera, independientemente a su situación geográfica.

Para hallar el valor de parámetro E, es a partir de un número pseudo aleatorio, que es el que un computador puede generar. La ecuación para hallar este valor el cual se representa de la siguiente manera:

$$E=(Rand)+1$$

Dónde:

E: es el parámetro estocástico o de perturbación aleatorio.

Rand: es el número pseudo aleatorio entre 0,1.

El peso de 1 que se agrega a la ecuación, permite que exista una tendencia a obtener un valor igual o mayor a 1 en el resultado de la multiplicación en que E participa en la ecuación general del modelo, en otras palabras permite que se trabaje con valores no sea inferior a la unidad.

Gracias a este parámetro se conseguirá generar una simulación con un grado de desorden real, puesto que el modelo debe necesariamente reflejar un comportamiento de expansión urbana tan real como sea posible.

3.3.2.5 TRATAMIENTO FINAL DEL MODELO

Luego de haber tratado los parámetros que constituyen de fondo el modelo, se tiene finalmente la forma evaluativa de estos parámetros. Considerado la función anteriormente descrita, se obtiene la ecuación última y determinante del modelo que viene dado de siguiente manera:

$$P = F(V, D, E) = 2(V+1) \times (D+1) \times E$$

Se tiene que el resultado del potencial de cambio P, que es un coeficiente, mismo que representa el valor de las celdas con posibilidades de transición, es decir a convertirse en espacios urbanos. De este conjunto de celdas se toman los que alcancen los coeficientes más altos, en una cantidad que representa la tasa de crecimiento urbano real del territorio que es objeto de la simulación.

Los valores de las V y D, que derivan de los coeficientes asociados al primer y al segundo autómata celular respectivamente, determinan en gran parte el resultado final de la ecuación, se obtiene una normalización de estos parámetros mediante las siguientes ecuaciones:

ECUACIONES PARA LOS COEFICIENTES DEL PRIMER Y SEGUNDO AUTOMATA CELULAR

$$V = \left| \Sigma(H_{f,c}^1) / 8 \right|$$

$$D = \left| \Psi(H_{f,c}^2) \right|$$

Donde:

$\Sigma(H_{f,c}^1)$: Coeficiente asociado a la celda por el primer autómata celular.

$\Psi(H_{f,c}^2)$: Coeficiente asociado a la celda por el segundo autómata celular

Las dos ecuaciones se encuentran normalizadas, para la primera se considera las 8 celdas que constituyen el vecindario de los primer autómata celular, para la segunda también se considera todo el conjunto de celdas que constituyen el vecindario que en este caso suman el total de 80.

Es por tanto que las ecuaciones están en correlación con la estructura y funcionalidad de los autómatas celulares que les corresponde, en consecuencia se concluye el tratamiento de estos dos últimos parámetros que forman parte de los factores de la ecuación general que describe al modelo de crecimiento de la mancha urbana.



EVALUCION DEL MODELO

4.1 IMPLEMENTACION DEL MODELO

La implementación del modelo en un prototipo permite realizar la experimentación y sus correspondientes consideraciones en caso del resultado del trabajo realizado, para objetivo se consiguió una metodología que permite a que respondiéndose a tal objeto, en este sentido se puede distinguir una secuencia de cuatro pasos fundamentales, mismos que fueron la guía para el desarrollo del prototipo.

Figura 4.1 secuencia de pasos para elaboración de prototipo



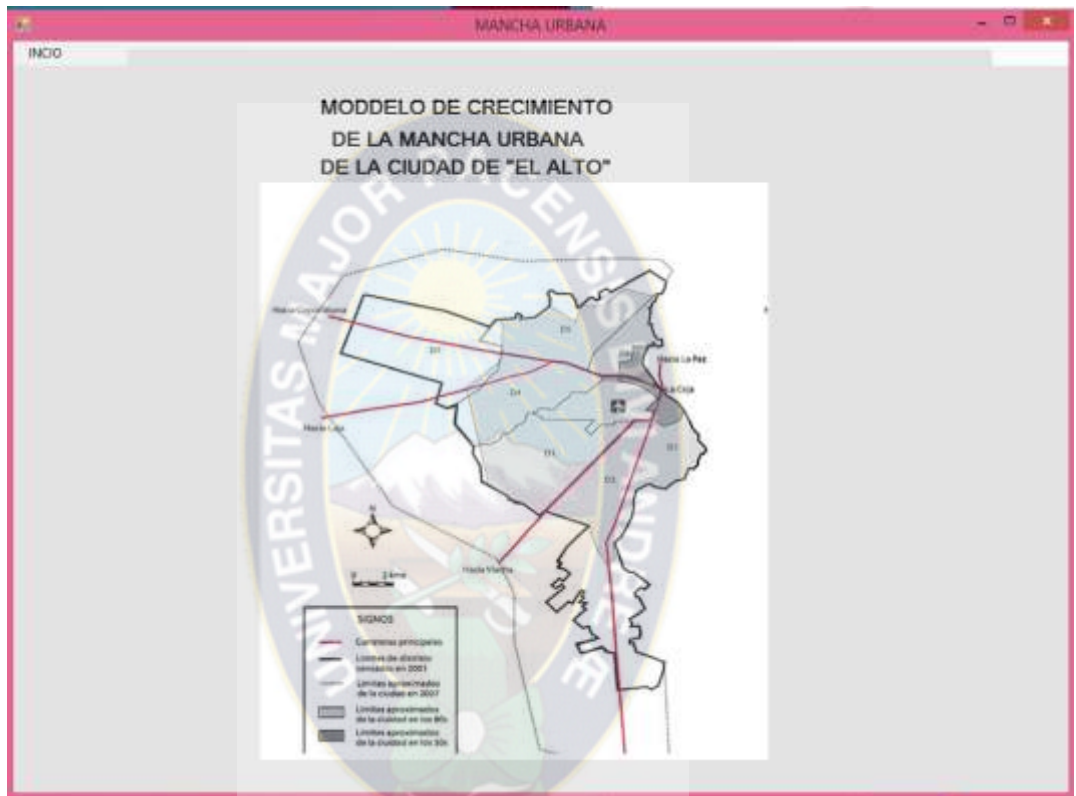
Fuente: [K. Kendall and J. Kendall]

4.2 MODULOS

El prototipo cuenta con dos módulos básicos entrada de datos y según esos datos hacer la simulación.

1. Capturar datos de entrada del modelo.

Figura 4.2.1 Interfaz del módulo inicio

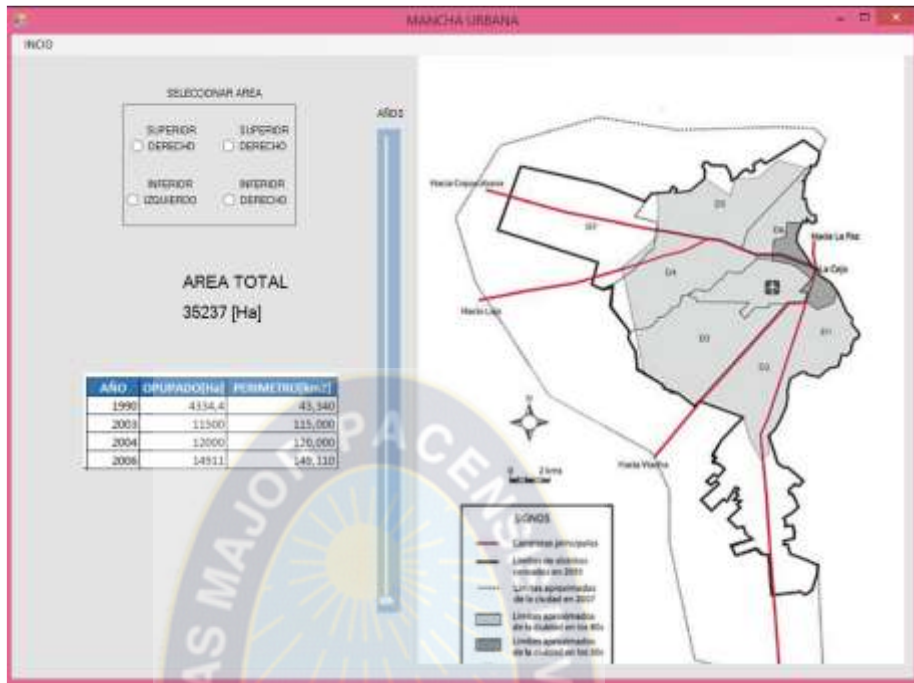


Fuente: elaboración propia

En la primera pantalla se muestran los datos iniciales en el mapa luego empezamos la simulación en segunda ventana:

2. Aquí se introduce la proyección a cantidad de años que se quiere hacer tienen en cuenta que la mancha urbana crecerá un máximo de 35.237 [ha].

Figura 4.2.2 Interfaz del modulo de analisis e introduccion de datos



Fuente: elaboración propia

4.2 EXPERIMENTACION DEL MODELO

En esta sección se describe la experimentación funcionalidad del modelo con sus operaciones respectivas para una simulación, todo esto a objeto de observar el comportamiento del modelo ante una representación del crecimiento urbano de una región en particular, en este caso de la ciudad de El Alto.

4.2.1 PARAMETRO DE ENTRADA

Los parámetros de entrada del modelo son específicamente: primero la imagen correspondiente a la mancha urbana de los datos adyacentes relevantes que componen la región, segundo el valor cuantitativo en hectáreas que ocupa toda la zona urbanizada y finalmente como tercer y último parámetro la tasa de crecimiento de mancha urbana de la ciudad de El Alto.

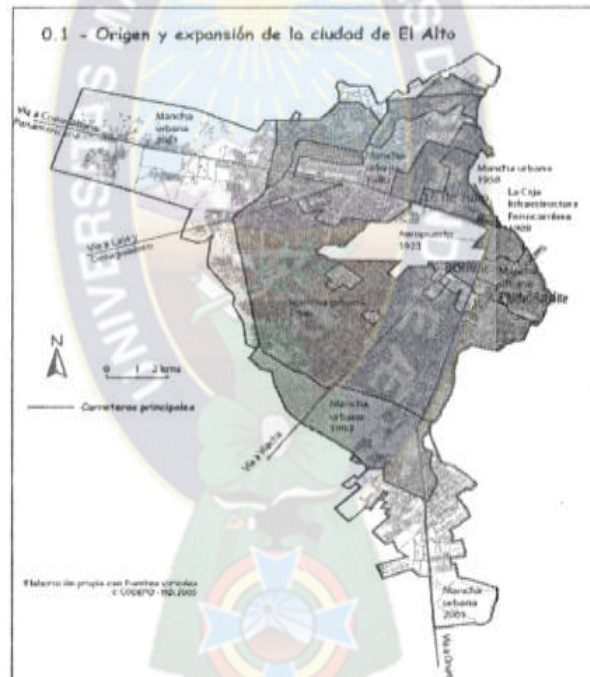
Es importante mencionar, que el modelo no trabaja con los datos relacionados al tamaño de población que se encuentra dentro de la mancha urbana, debido fundamentalmente a que no existe una relación estrictamente proporcional entre el tamaño de la mancha urbana, se tiene entendido al respecto que dos manchas urbanas de similar dimensión podría contener diferente tamaño de población y también es posible que un mismo tamaño de población corresponde a dos manchas urbanas de diferente extensión, esta fluctuación de densidad poblacional sobre una región impide relacionar

proporcionalmente el tamaño poblacional cuantitativo con la expansión urbana. En cuanto al número de viviendas que si tiene una influencia directa en la expansión de una urbe ya considerada en la magnitud territorial de la región en estudio, puesto que una vivienda no es más que un espacio de terreno que forma parte del espacio territorial total urbano.

Se concluye en este sentido que los parámetros que el modelo necesita para establecer las condiciones iniciales que requiere una simulación son los tres parámetros en principio mencionados. A continuación se presentan los parámetros de entrada para experimentación y prueba del modelo sobre la ciudad de El Alto.

- **IMAGENES DE LA REGION EN PRUEBA**

Figura 4.2.1.1: imágenes de mancha urbana de la Ciudad de El Alto en 1992

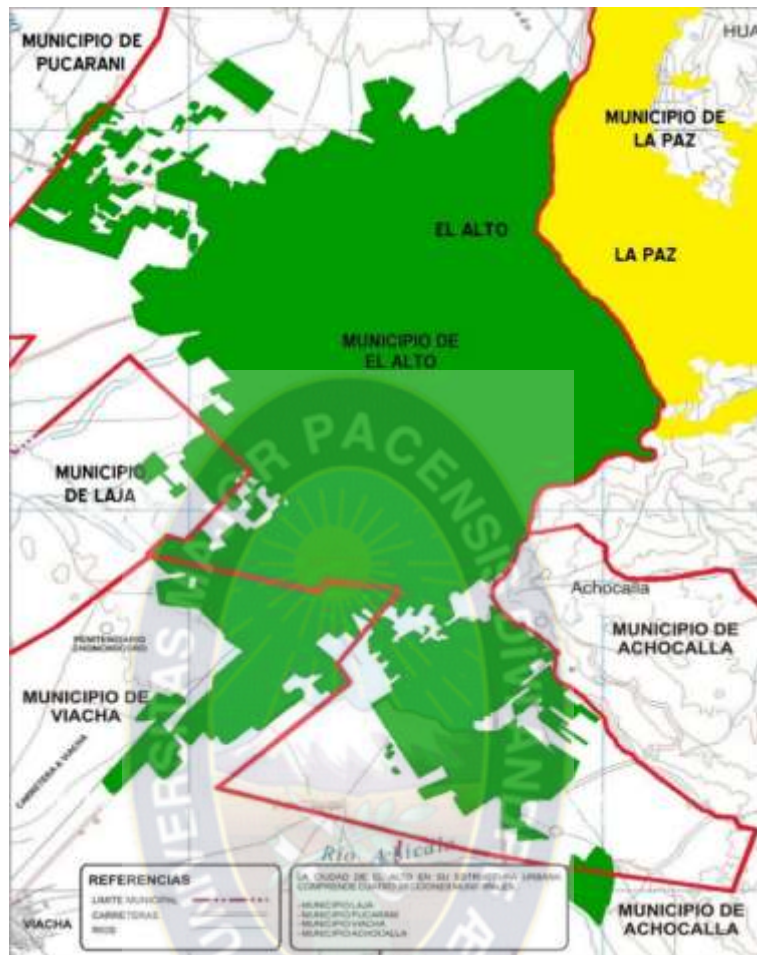


Fuente: [revistas Bolivianas, 2008]

En este mapa se nota las primeras expansiones de la mancha urbana de la ciudad de El Alto.

En el 2004 la mancha urbana ocupó 12000 de las 35.237 hectáreas del municipio.

Figura 4.2.1.2: mancha urbana 2011 municipio de El Alto



Fuente: Elaboración propia en base al gráfico de www.imagenesbolivianas.blogspot.com

De las figuras anteriores se utiliza la primera figura que corresponde a la mancha urbana de la Ciudad de El Alto en el año 1992 y al otro a al año 2011, ambas configuran el escenario en el cual el modelo podrá realizar las simulaciones que forman parte de la experimentación: una simulación para determinar el grado de predicción del modelo a partir de dos imágenes y la última simulación que consiste en obtener una mayor proyección del crecimiento urbano de la ciudad de El Alto a futuro, propiamente para el 2017.

- **ESPACIO TERRITORIAL DE LA MANCHA URBANA**

El espacio territorial ocupado de la cuenta en la simulación del modelo descrito en la siguiente tabla:

Tabla 4.2.1 Datos de la mancha urbana

| AÑO | ESPACIO OCUPADO EN [Ha] | PERIMETRO DEL AREA EN [Km²] |
|------------|--------------------------------|---|
| 1990 | 4.334,4 | 43,344 |
| 2003 | 11.500.0 | 115.00 |
| 2004 | 12.000.0 | 120.00 |
| 2006 | 14.911,0 | 149.11 |

Fuente: elaboración propia en base a la intervención de Nuños, Llusco.

- **LA TASA DE CRECIMIENTO DE MANCHA URBANA**

La tasa de crecimiento de la mancha urbana de la Ciudad de El Alto entre los años 1990 y 2006 es de 8,4[Ha]/año, es decir aproximadamente de 8,4 hectáreas por año.

Este parámetro cobra mucha importancia en el modelo, puesto que gracias a él se podrá hacer la proyección para años futuros como el 2017 reduciendo el error de exceso o defecto de la expansión urbana en el momento de la simulación.

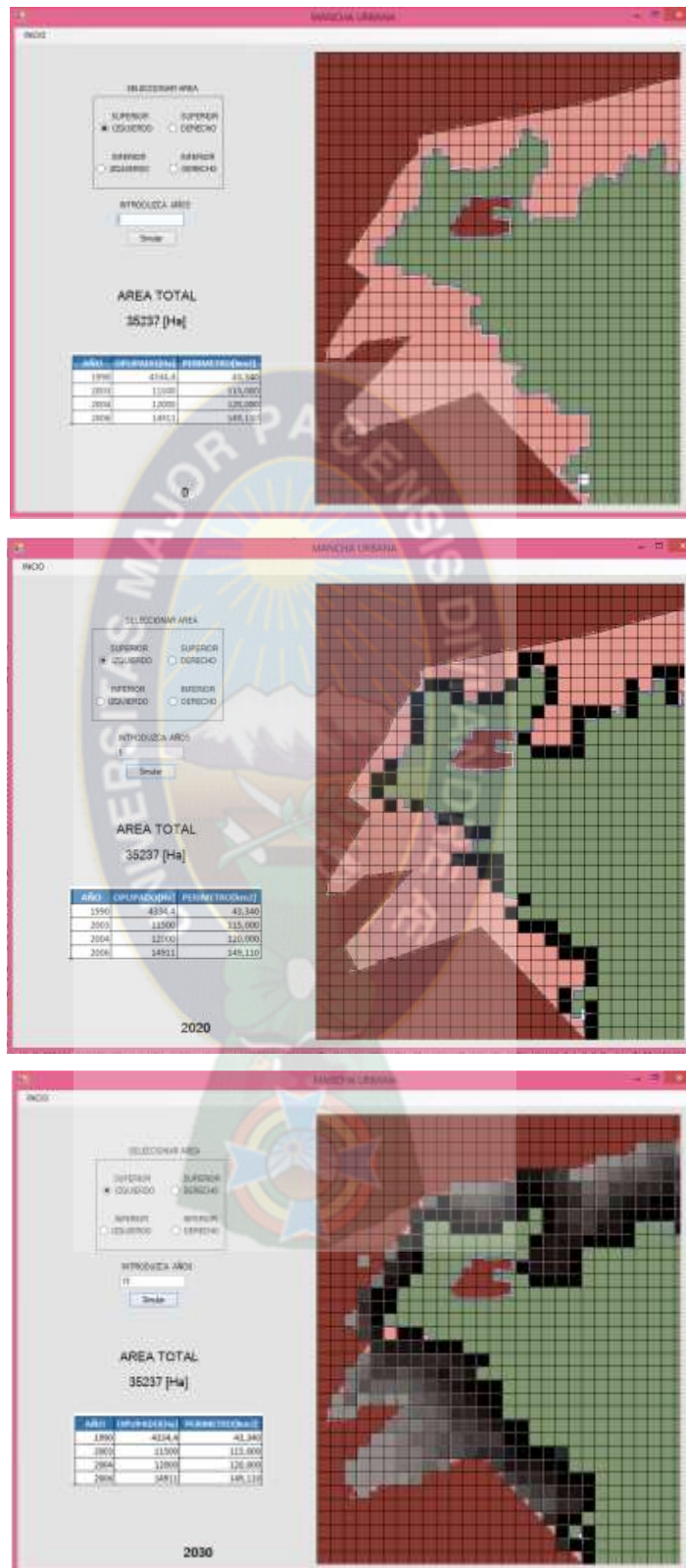
4.2.2 RESULTADOS DE LA SIMULACION

Las simulaciones realizadas consisten básicamente en dos fases, la primera tiene el objetivo de establecer que el funcionamiento del modelo se ajusta al comportamiento expansivo de la mancha urbana de la región de prueba a través del tiempo, la segunda fase corresponde a la simulación efectuada para proyectar el crecimiento urbano a un periodo futuro de 20 años, es decir se obtiene una proyección para 2021 a partir de las condiciones iniciales de anteriores años mostrados.

- **FASE I**

El resultado obtenido de la primera simulación como se observa en figura refleja como las funciones de transición empleadas en los autómatas celulares y la forma en su conjunto del modelo logra obtener por medio de la simulación la mancha urbana de la Ciudad de El Alto del 2020 Y 2030 a partir del año 2015.

Figura 4.2.2.1: mancha urbana de la ciudad de El Alto en crecimiento



Fuente: elaboración propia

Los datos respecto al resultado cuantitativo obtenido del espacio urbano total ocupado y encontrado por el modelo se encuentra la siguiente tabla.

Tablas 4.2.2.1 tabla de la simulación

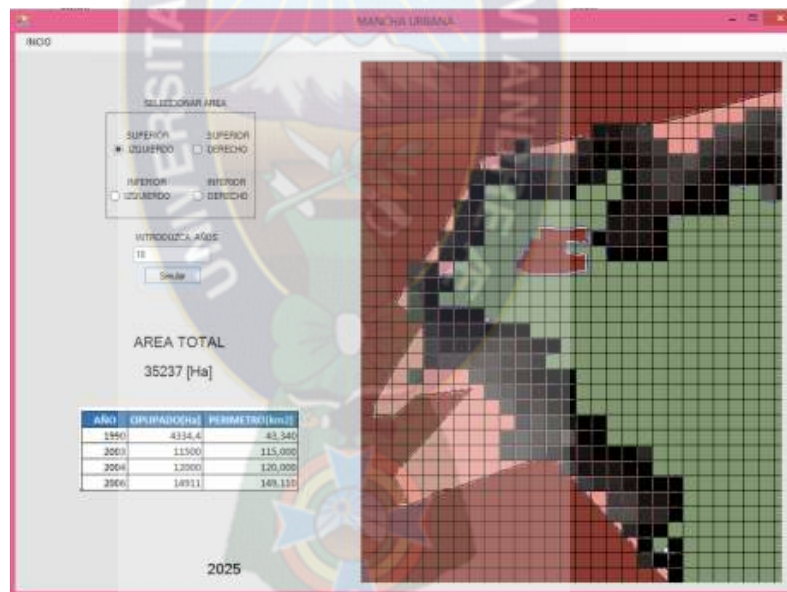
| AÑO | TIPO | [Ha] |
|------|------------|----------|
| 1990 | REAL | 4334,4 |
| 2015 | SIMULACION | 20421,94 |

Fuente: elaboración propia

- **FASE II**

La segunda fase muestra el resultado obtenido por la segunda simulación del modelo en el cual se refleja el crecimiento de la mancha urbana en la región de estudio (Ciudad de El Alto), para el 2025, esta expansión urbana como se observa en la figura:

Figura: 4.2.2.2 simulaciones al 2025



Fuente: elaboración propia

En la siguiente tabla se tiene el valor por espacio territorial urbano según la simulación del modelo, tomando como base el año 2015, del cual se obtuvo las condiciones iniciales para la proyección.

Tabla 4.2.2.2 diferencia entre datos a proyectar

| Característica | [Ha](hectárea) |
|---|----------------|
| Espacio urbano inicial (año 2015) | 20.431,94 |
| Espacio urbano proyectado (año 2025) | 28.994,30 |
| Espacio urbanizado durante 6 años de proyección | 8.562,36 |

Tabla 4.2.2.3 datos a proyectados

COMPARACION DE TADOS HASTA: 2025

| | AÑOS | DAT | DATOS DE | DIFERENCIA | % DE ERROR |
|---|------|----------|----------|------------|------------|
| | 2015 | 20431,94 | 19184,43 | 1247,51 | 3,54 |
| | 2016 | 21159,72 | 19729,19 | 1430,53 | 4,06 |
| | 2017 | 21913,42 | 20289,41 | 1624,01 | 4,61 |
| | 2018 | 22693,97 | 20865,54 | 1828,43 | 5,19 |
| | 2019 | 23502,33 | 21458,03 | 2044,30 | 5,80 |
| | 2020 | 24339,47 | 22067,35 | 2272,12 | 6,45 |
| | 2021 | 25206,44 | 22693,96 | 2512,48 | 7,13 |
| | 2022 | 26104,28 | 23338,38 | 2765,90 | 7,85 |
| | 2023 | 27034,11 | 24001,08 | 3033,03 | 8,61 |
| | 2024 | 27997,06 | 24682,61 | 3314,45 | 9,41 |
| ▶ | 2025 | 28994,30 | 25383,49 | 3610,81 | 10,25 |
| * | | | | | |

Fuente: elaboración propia

Previo a obtener las simulaciones, las dos simulaciones anteriores descritas se realizaron 10 pruebas, en las cuales se variaban cuidadosamente las funciones de transición de los dos autómatas celulares.

Para describir las variaciones aplicadas, es importante aclarar que estos cambios realizados no fueron hechos en la estructura formal del modelo ya que esto significa que es deficiente. Los cambios realizados fueron hechos en los intervalos de las funciones de transición de los autómatas celulares, mismas que hacen posible variar el patrón de evoluciones de expansión de las células, así poder obtener simulaciones que se ajusten al comportamiento real de la mancha urbana de la Ciudad de El Alto.

Finalmente se puede concluir de esta etapa que las simulaciones realizadas sobre la región de la Ciudad de El Alto fueron exitosas, considerando especialmente lo razonable de los resultados hallados por el modelo.

4.3 VALIDACION DEL MODELO

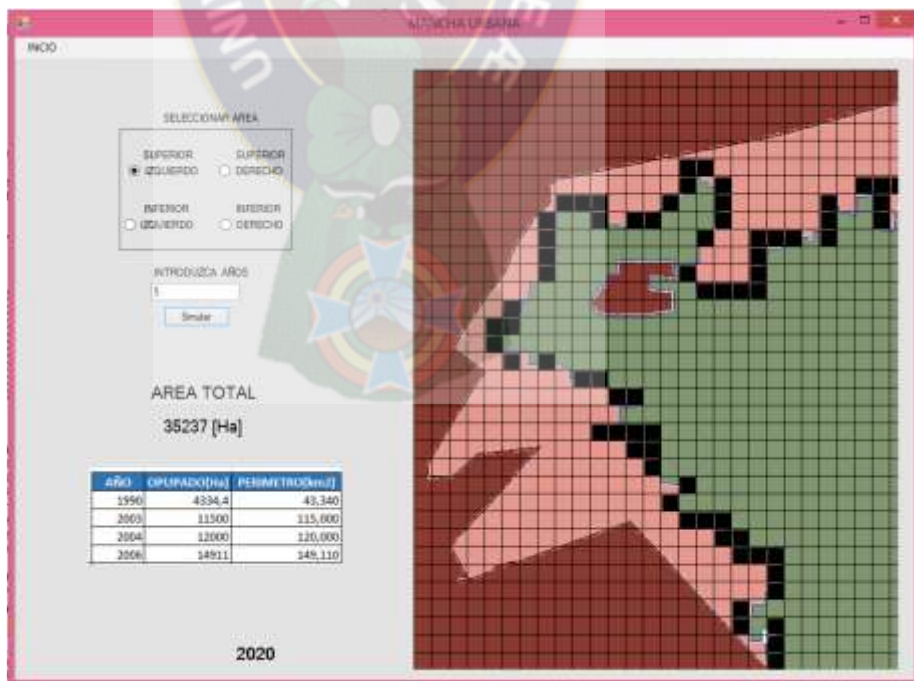
Para validar el modelo se considera tres aspectos, con los cuales se podrá certificar el mérito de la simulaciones obtenidas por el modelo, considerando que las representaciones de crecimiento de la mancha urbana fueron suficiente acertados en lo que respecta a las tendencias de expansión de la mancha urbana de la Ciudad de El Alto.

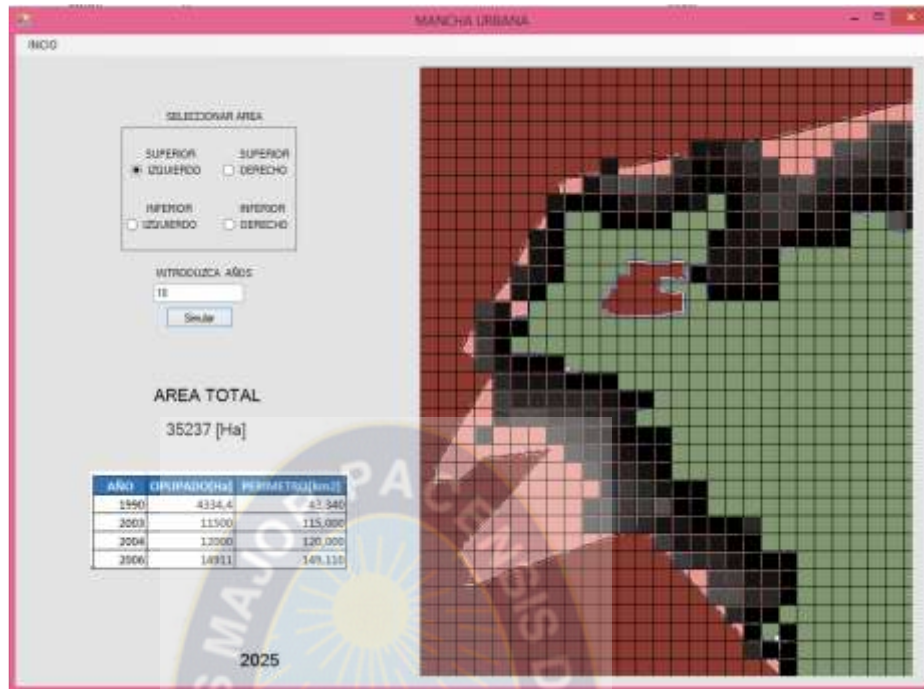
- **COMPARACION VISUAL**

Este primer aspecto de validación, considera la comparación visual de la mancha urbana real y la obtención por el modelo de simulación, ambas correspondientes al año 2015 de la región en estudio la Ciudad de El Alto.

Una similitud elevada de las dos imágenes constituye la mejor prueba de que el modelo alcanzo el objetivo esperado, que es la capacidad de predecir el crecimiento urbano de una región a través del tiempo con un realismo bastante aceptable.

Figura 4.3 comparación visual





Fuente: elaboración propia

Como se observa en la figura el grado de realismo alcanzado por el modelo para representar la mancha urbana de la Ciudad de El Alto a través de la simulación puede considerarse como la certificación más aceptable de la validación.

- **COMPARACION DE MAGNITUDES TERRITORIALES**

Es segundo aspecto trata la relación existente entre el la magnitud territorial alcanzada por la mancha urbana real y la obtenida mediante la simulación del modelo.

Esta segunda forma de validad el funcionamiento del modelo tiene los inconvenientes de que si bien el espacio territorial real y la obtenida por la simulación coincidiesen, no significaría que la configuración de las manchas en cuanto a la forma lo hicieran también, lo que significa un riesgo en los resultados, por tanto estos tipos de datos solo certifican la capacidad predictiva cuantitativa de la magnitud territorial de la mancha urbana.

Tabla 4.3: diferencia de datos reales a datos de la simulación

| Características | SUPERFICIE[Ha] |
|-----------------------------|----------------|
| Espacio urbano real | 14.911.0 |
| Espacio urbano simulado | 14622,82 |
| Diferencia(real-simulación) | 288,18 |
| Error simulación | 0,53 |

Fuente: elaboración propia

De la tabla se observa que la diferencia existente entre la magnitud territorial real y simulación es de 288,18 [ha], concluyendo con esto que el tamaño de las manchas urbanas se corresponden acertadamente con un error mínimo de 0,053%, es decir validando de esta forma la correlación existente entre los espacios territoriales de mancha urbana de la Ciudad de El Alto real y la obtención por la simulación del modelo.

4.4 PRUEBA DE HIPOTESIS

Para la evaluación del modelo utilizando medidas de variación, como ser la varianza y desviación estándar los mismos nos indicaran cuan alejados están la estimación de INE y Habitación Bolivia del modelo y de datos recabados. Encontrando también el intervalo de confianza de la estimación del modelo.

Para luego concluir cual es la desviación de estimación del modelo y así ver su precisión partiendo de los siguientes datos:

θ_c : mancha urbana del 2006 = 14.911,0 [ha]

θ_M : Promedio de estimaciones del modelo al año 2006 = 14622,82 [ha]

θ_I : Estimación del INE para el año 2006: 15.589,27[ha]

Con los anteriores datos verificamos la desviación estándar de las estimaciones con respecto a los datos del 2006, planteados de la siguiente interrogante a demostrar.

$$\sigma(\theta_M) < \sigma(\theta_I)?$$

Realizado cálculos tenemos:

Para el modelo:

$$V(\theta_M) = \Sigma(\theta_c - \theta_M)^2$$

$$V(\theta_M) = (14.911,0 - 14622,82)^2 / 1 = 288,18^2$$

Luego:

$$\sigma(\theta_M) = \sqrt{V(\theta_M)} = 288,18[\text{Ha}]$$

Para la estimación del INE:

$$V(\theta_M) = \Sigma(\theta_c - \theta_i)^2 / n = (14.911,0 - 15.589,27)^2 / 1 = 678,32^2$$

$$\sigma(\theta_M) = \sqrt{V(\theta_M)} = 678,32[\text{Ha}]$$

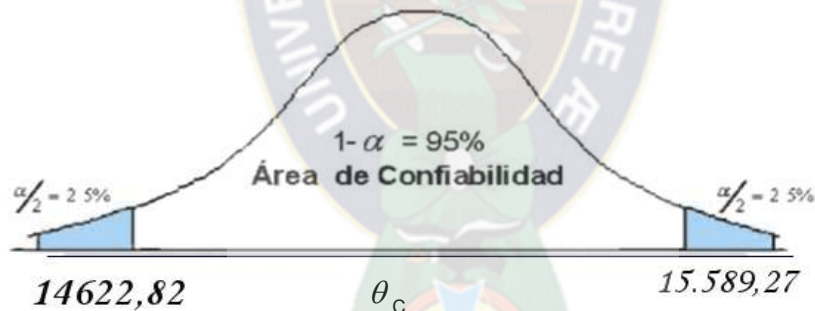
Como $\sigma(\theta_M) < \sigma(\theta_i)$, por lo tanto podemos concluir que el modelo planteado tiene una mejor estimación con respecto a las estimaciones realizadas por el INE.

Intervalo de confianza para θ_M con un 95% de confiabilidad.

$$I.C.: \theta_M \pm Z_{1-\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} = 14622,82 \pm \frac{288,18}{1,73} = 14622,82 \pm 166,58$$

$$I.C. = 14622,82 \pm 166,58$$

Figura 4.4 área de confianza



Fuente: elaboración propia

Como θ_c se encuentra dentro del intervalo de confianza $14.622,82 \leq \theta_c \leq 15.589,27$, lo cual indica la confiabilidad del modelo de un 95% al realizar estimaciones.

Finalmente se puede concluir que las estimaciones obtenidas por el modelo planteado tiene una mejor estimación con una confiabilidad del 95%.

Así queda demostrada la hipótesis.

CONCLUSION Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

A través de los resultados encontramos gracias al modelo basado en autómatas celulares, se puede afirmar que se construyó el modelo predictivo capaz de asimilar y representar los comportamientos expansivos de una mancha urbana tanto por agregación como también por dispersión, verificando una vez más que los autómatas celulares proporcionan un importante herramienta alternativa de análisis espacial.

En relación al modelo de simulación, se puede decir que fueron capaces de generar una representación bastante razonable del crecimiento de la mancha urbana de la Ciudad de El Alto, sobre todo en la predicción de las magnitudes territoriales, cuyos márgenes de error se encuentra entre 0,53% y 0,25%, con la configuración expansiva acordes a los patrones de expansión urbana en estudio.

Es importante resaltar, que existe una característica quizás relevante que este modelo como otros no consideró al momento de simular el crecimiento de un espacio urbano, y es el impacto que viene las condicionantes fuerzas socioeconómicas de una región urbana cualquiera, especialmente la influencia que tiene esta para hacer desarrollar y crecer una zona urbana en pocos años. Considerando todo lo mencionado se puede concluir diciendo que este modelo constituye una herramienta más, entre otras, capaz de generar posibles escenarios de manchas urbanas futuras y en este sentido ayudar a la toma de decisiones en cuanto a las políticas de infraestructura y planificación urbana.

5.2 RECOMENDACIONES

El presente trabajo principalmente se tuvo al momento de llevar a cabo la simulación al obtener los datos de entrada. Probablemente sea lo principal las observaciones de estructura y funcionamiento del modelo y sus consideraciones a tomar para trabajos futuros.

Se sugiere las siguientes investigaciones para realizar simulaciones:

- Generar modelos de crecimiento de mancha urbana y buscando escenarios de ocupación futuras ya que la capacidad del territorio se expandirá mucho más cada año, viendo a que provincias se expandirá.
- Experimentar nuevos modelos de crecimiento que se pueda simular en diferentes áreas como medicina, como también crecimiento poblacional.
- Generación de modelos en ciudades de nuestro país, en las áreas forestales y medio ambiente como la tala de árboles, crecimiento abundante de basura y la contaminación.



BIBLIOGRAFIA

- Aguilera, F. (2010). Simulación de escenarios futuros en la aglomeración de Granada a través de modelos basados en autómatas celulares. Asociación de geógrafos españoles, España.
- FIUBA. (2013). Sistemas, modelos simulación. Buenos Aires, Argentina. Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.
- Martínez, G.J.(2006), introducción a la simulación de procesos con autómatas celulares.
- Aguilera, F.(2008), Predicción del crecimiento urbano SIG y modelos basados en autómatas celulares.
- Rojas, H.L.(2010), Predicción y modelado del crecimiento urbano de la Ciudad de Chihuahua mediante autómatas celulares.
- Arquipino, E. (2012). Simulación del crecimiento urbano. La Paz, Murillo, Bolivia.
- Candela G., (07 de agosto de 2013), La Razón, La Paz.
- Modelo de crecimiento urbano, Serie Seminarios sobre Gestión Pública Local
- Sancho, F., (2010), Dpt. Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial. Univ. de Sevilla, Autómatas Celulares.
- Arias, R., (2010). Análisis socioeconómico del crecimiento de la aglomeración urbana paceña en base al precio del suelo marginal e informal.
- Callisaya, JC. (2000). crecimiento de la mancha urbana con autómatas celular
- Hernández, Fernández y Baptista, (Quinta Edición), metodología de la investigación.
- Sarmiento V.,(2005),La investigación científica en educación.
- El Alto: Aspectos que configuran la ciudad (unión europea, GMEA, 2006).
- Red Habitat,(2009), Taller de Investigación del hábitat El Alto.
- Pnuma, (2008), Perspectiva del medio ambiente Urbano GEO El Alto.

- GMEA, FACAPACI, (2008), Ordenamiento Urbano Territorial y Planificación del Desarrollo.
- Naylor, T., Balintfy, J., Burdick, D., & Chu, K. (1980). Técnicas de Simulación de computadoras. México, México: Limusa

