

---

## **SIMPLICITY: UNA HERRAMIENTA ACCESIBLE DE MICROSIMULACIÓN URBANA PARA PROYECTAR LAS DINÁMICAS DE LOCALIZACIÓN DE AGENTES**

Ricardo Hurtubia, Escuela de Arquitectura & Departamento de Ingeniería de Transporte y Logística, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile – [ricardo@simplici-city.cl](mailto:ricardo@simplici-city.cl)

Hugo Silva, Departamento de Economía y Departamento de Ingeniería de Transporte y Logística, Pontificia Universidad Católica de Chile – [hugo@simplici-city.cl](mailto:hugo@simplici-city.cl)

Francisco Garrido-Valenzuela, Technology, Policy & Management, Technology University of Delft – [francisco@simplici-city.cl](mailto:francisco@simplici-city.cl)

Janus Leonhardt, Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería – [janus@simplici-city.cl](mailto:janus@simplici-city.cl)

Pablo Paredes, Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería – [pablo@simplici-city.cl](mailto:pablo@simplici-city.cl)

*Palabras clave: microsimulación, economía urbana, modelos de localización, uso de suelo y transporte, planificación urbana*

### **RESUMEN**

Se propone una herramienta para la simulación de las dinámicas de localización de agente urbanos en escenarios futuros. La plataforma SimpliCity ([www.simplici-city.cl](http://www.simplici-city.cl)) se basa en modelos de localización que se estiman a partir de información pública y mediante algoritmos de procesamiento de datos automatizados, lo que facilita la implementación del modelo. La herramienta utiliza microsimulación basada en agentes para proyectar escenarios futuros, donde distintos tipo de actores inmuebles (e.g desarrollos inmobiliarios residenciales y no residenciales) deciden localizarse en función de los atributos espaciales de un territorio subdividido en celdas, y que se ve alterado por cada nueva decisión de localización, simulando así las interacciones y dinámicas endógenas del crecimiento urbano. El presente artículo describe los enfoques de procesamiento de datos, modelación y simulación, presentando además resultados preliminares para una aplicación al caso de estudio de Puerto Varas. Los resultados indican que la herramienta podría ser utilizada para evaluar escenarios futuros de crecimiento urbano ante cambios en planos reguladores, la infraestructura de transporte y/o el desarrollo de grande proyectos inmobiliarios.

## 1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento urbano sostenible es una condición necesaria para abordar la crisis climática. Problemas como la segregación socioespacial, el acceso equitativo y eficiente a oportunidades o el avanzar hacia una forma urbana que incentive a patrones sostenibles de movilidad, son desafíos clave que enfrentan nuestras ciudades. La planificación urbana requiere de herramientas que permitan un análisis exhaustivo y multidimensional, capaces de lidiar con la complejidad inherente en la modelación y simulación de las dinámicas urbanas, desde las interacciones socioeconómicas hasta la localización de infraestructura (Batty, 2005).

Los Modelos de Uso de Suelo y Transporte (LUTI, por sus siglas en inglés) han sido una respuesta a estos desafíos, proporcionando un marco para analizar y proyectar los patrones de desarrollo del uso del suelo y transporte, y las interacciones entre ambos (Wegener, 2004). Estos modelos se hacen cada vez más necesarios para la evaluación de políticas públicas aplicadas a nivel de ciudad, con un énfasis cada vez mayor en el desarrollo urbano sustentable (Bierlaire et al., 2015).

Existe amplia literatura sobre modelos LUTI, los que se pueden categorizar según el nivel de agregación de agentes, agregación espacial, y enfoque de modelación. Modelos preliminares, tales como MUSSA (Martinez, 1996) y TRANUS (de la Barra et al., 1984) generalmente emplearon estructuras de datos agregadas y se enfocaron en resolver equilibrios de mercado. Sin embargo, a medida que se incrementó la disponibilidad de datos y la capacidad de computación, estos modelos evolucionaron hacia representaciones más desagregadas de los sistemas urbanos.

Algunos modelos como ILUTE (Salvini y Miller, 2005) se orientan hacia la solución parcial de los equilibrios de mercado dentro del sistema de uso del suelo, permitiendo una mayor especificidad en la representación de las interacciones económicas y sociales urbanas. Otros modelos como UrbanSim (Waddell, 2002) adoptan un enfoque de microsimulación, en el que no se busca una solución explícita de equilibrio. Este último enfoque permite una simulación detallada de los comportamientos y decisiones individuales, permitiendo un análisis más granular de las dinámicas urbanas.

Este progreso ha permitido una mejora continua en la capacidad de los modelos LUTI para simular y predecir la evolución de los sistemas urbanos, cuyas ventajas y desventajas son reportadas por Wegener (2011). En este sentido, existe cierto consenso de que, para un análisis a una escala razonable y a un mediano plazo, los enfoques basados en microsimulación desagregada pueden ser efectivos para informar a la política pública y apoyar la toma de decisiones de los planificadores urbanos (Miller, 2018).

No obstante, la implementación efectiva de estos modelos presenta desafíos considerables, dado que enfrentan limitaciones inherentes que han frenado su aplicabilidad en la planificación urbana a gran escala. En este sentido, los modelos LUTI existentes requieren una gran cantidad de información detallada, empleada para caracterizar los diversos agentes que interactúan en el mercado. Estos modelos, ya sean basados en equilibrio o microsimulación, requieren de un elaborado trabajo de estimación de parámetros, calibración y ajuste que es, por lo general, costoso, demandante en datos, y requiere de capital humano altamente calificado. A lo anterior, se suma la necesidad de interac-

ción con un modelo de transporte, los que son aún más demandantes en términos de recolección, procesamiento de datos y calibración.

En la práctica, para ciudades de tamaño medio, con poca posibilidad de contar con recursos humanos especializados o con bajo presupuesto para la planificación y obtención de datos detallados, resulta, por ende, prácticamente imposible emplear herramientas que integren modelos LUTI. Esto es especialmente cierto en el contexto de ciudades de países en vías de desarrollo, incluyendo a las chilenas.

Adicionalmente, en el contexto de la docencia, no hay modelos de uso de suelo que sean suficientemente flexibles como para desarrollar casos de estudio abordables en el contexto de un curso semestral, o que permitan dar énfasis en un aspecto particular de la modelación sin tener que modificar intensivamente el código o configuración del *software*. Similarmente, en el contexto de la investigación, los modelos existentes son poco flexibles para integrar nuevos modelos de comportamiento o redefinir las interacciones entre componentes de este (Hurtubia y Bierlaire, 2015). Esto implica que, para evaluar una nueva hipótesis o enfoque de modelación, generalmente sea necesario escribir código nuevo desde cero.

Frente a esta situación, SimpliCity se propone como una herramienta que aplica un modelo LUTI, adoptando un enfoque de modelación basado en agentes (ABM, por sus siglas en inglés), con un modelo de transporte simplificado y cuya arquitectura modular y escalable permite ofrecer tanto un uso sencillo por parte de tomadores de decisiones que no tengan acceso a especialistas en el área, como aplicaciones complejas por parte de expertos o la evaluación de nuevos mecanismos de modelación para la investigación. El reto fundamental radica en desarrollar un enfoque de modelación que permita interactuar eficazmente con bases de datos de acceso público, facilitando una automatización significativa del procesamiento de datos, estimación y calibración de modelos, así como en su implementación posterior para la simulación de la localización de agentes dentro del entorno urbano.

A partir de la disponibilidad de una plataforma de simulación urbana de bajo costo de implementación como SimpliCity, se pretende superar las principales limitaciones que a menudo restringen la aplicación de los modelos LUTI en la planificación urbana y en la toma de decisiones. En este sentido, la propuesta metodológica subyacente representa una oportunidad significativa para democratizar el acceso a herramientas de calidad en la modelación urbana. Al permitir la exploración de nuevos mecanismos y técnicas de modelación, proporciona también un recurso valioso para impulsar la investigación y el desarrollo en este campo.

## 2. ENFOQUE DE MODELACIÓN

En el marco de modelación implementado por SimpliCity, los agentes son unidades inmobiliarias, que deciden localizarse o ya están localizados, y que se caracterizan por un tipo de uso de suelo, que puede ser residencial, comercial, educacional, etc., y se describe por su superficie construida y el año de su localización.

Bajo este esquema, SimpliCity articula su funcionamiento a través de dos componentes fundamentales: Territorio y Escenarios.

## **2.1. Territorio**

El componente Territorio representa la unidad espacial geográfica sobre el que se sitúan los agentes, se estiman los modelos, y se efectúa la simulación de sus localizaciones futuras. Se especifica a partir de un área de estudio, determinada por el usuario, dentro de la que se genera una zonificación homogénea e uniforme. Cada zona homogénea se denomina celda y corresponde a la mínima unidad espacial que se utiliza para la modelación de SimpliCity. De esta manera, cada celda representa una opción de localización para los agentes. Para obtener una subdivisión homogénea del espacio que se aproxime lo más posible a un círculo (minimizando la distorsión que generan las esquinas) pero que logre teselar todo el territorio, las celdas implementadas en SimpliCity son hexágonos regulares.

## **2.2. Escenario**

El componente Escenario constituye el mecanismo a través del cual se implementan distintos escenarios de modelación y simulación. Contempla la definición del conjunto de parámetros de modelación que se aplican al territorio en cuestión y los valores de variables objetivo (e.g., oferta total de un tipo de uso de suelo en un año determinado) permitiendo explorar diversos futuros posibles y evaluar las consecuencias de diferentes intervenciones urbanas o políticas públicas. Bajo esta configuración, un territorio se compone de un Escenario Base y un conjunto de Escenarios Alternativos.

### **2.2.1. Escenario Base**

El Escenario Base representa una proyección *ceteris paribus* de los patrones de localización observados de los agentes en el área de estudio, es decir, manteniendo constantes las condiciones actuales. Se configura a partir de: (i) el registro de los agentes localizados en una zonificación específica, y (ii) los planes reguladores comunales, seccionales y/o intercomunales aplicables al área de estudio, que muestran las regulaciones de uso de suelo y constructibilidad que restringen la localización de agentes.

La información de los agentes se obtiene de bases de datos catastrales que registran todas las propiedades inmuebles dentro del área de estudio, identificándolas por un rol único correspondiente al polígono en que se encuentran. Cada polígono dentro del área de estudio debe contener información específica de los agentes que lo componen, incluyendo sus respectivos usos de suelo, superficie construida y año de localización.

Además, es fundamental contar con alguna estimación del precio por metro cuadrado construido

de cada celda para modelar las decisiones de localización de los agentes. Para esto, se requiere información de precio de ventas recientes o, en caso de no estar disponibles, de información sobre el valor fiscal de la línea de construcción del agente. A partir de estos datos, se puede estimar un precio por metro cuadrado construido para cada polígono de la zonificación de la base catastral.

A partir de esta información, se realiza una integración automatizada de los datos desde los polígonos de la zonificación catastral hacia una resolución a nivel de celda. Para este propósito, se emplean metodologías de geoprocésamiento espacial (detalladas en el Capítulo 3), que permiten mantener un registro de información sobre la cantidad total de metros cuadrados construidos y el conteo de agentes localizados en cada celda.

Un proceso similar se lleva a cabo con la normativa de los planes reguladores comunales, seccionales y/o intercomunales, que deberán hacer referencia a la situación presente del área de estudio. La información de estos planes, en relación a los usos de suelo permitidos por polígono y sus constructibilidades, son integradas a las celdas del área de estudio. Este procedimiento permite indicar: (i) los usos de suelo permitidos y restringidos en cada celda; (ii) el total de metros cuadrados que se puede construir de cada uso de suelo; y (iii) cuánto espacio está actualmente construido y cuánto queda disponible para futuras localizaciones, en base a la asignación de metros cuadrados derivada de la integración de las bases catastrales.

Tras la caracterización de cada celda, se prosigue con la implementación de los principales modelos de SimpliCity. Se inicia con el Modelo de Accesibilidades que permite la generación de una matriz simplificada (ignorando congestión) de tiempos de viaje estimados por modo de transporte, que puede ser automóvil, transporte público y/o caminata. Esta matriz se emplea posteriormente para calcular las accesibilidades de cada celda a cada uno de los usos de suelo disponibles, utilizando el método descrito en la Subsección 4.1.

Posteriormente, se sigue con el Modelo de Precios, que considera la estimación de un modelo hedónico que permite predecir los precios por metro cuadrado construido en cada una de las celdas del área de estudio (ver, e.g., Rosen (1974)). Este modelo utiliza las accesibilidades calculadas previamente como variables explicativas, basándose en un Modelo de Regresión Lineal Múltiple. La finalidad de este modelo es prever las variaciones en los precios de las celdas del área de estudio como consecuencia de la localización de los agentes durante la simulación.

Con ello, es posible implementar el Modelo de Localización, basado en un enfoque *choice* de modelación. Según este enfoque, los agentes seleccionan y se localizan en la ubicación que maximiza su utilidad, bajo el supuesto de que se comportan como tomadores de precios. Formalmente, se utiliza un modelo de elección discreta tipo Logit donde cada agente decide entre un conjunto de alternativas disponibles (ver Anas (1982) para una aplicación a elección residencial). El modelo de localización se estima usando datos de un período inmediatamente anterior al actual, llamado período de estimación. Las observaciones de agentes en este período son las elecciones y se debe incluir también una muestra de localizaciones como alternativas no seleccionadas por cada agente (McFadden, 1978). Estas localizaciones se seleccionan aleatoriamente de entre las celdas disponibles que son factibles de recibir al agente (no están saturadas y permiten al uso de suelo en cuestión). A partir de lo anterior, se estructuran las funciones de utilidad para cada agente, lineales en las variables independientes correspondientes (accesibilidades y precios). Luego, se estiman los

parámetros de las funciones de utilidad para cada agente, mediante la librería Biogeme de Python. A partir de los valores estimados, se tiene el Modelo Logit Multinomial (MNL) que rige las localizaciones de agentes.

De esta manera se llega finalmente al Módulo de Simulación, un componente clave de SimpliCity que simula la interacción de los agentes con el entorno construido implementando los modelos previos. Primero, el modelo determina un escenario de crecimiento tendencial del número de agentes por tipo a partir de la información histórica capturada. Con esto, se tiene los nuevos agentes que tomarán decisiones de localización en un periodo de tiempo posterior. A continuación, determina el conjunto completo de posibles localizaciones para cada agente, teniendo en cuenta la disponibilidad y normativas específicas del uso de suelo. Luego, calcula la utilidad de cada alternativa para cada agente, determina la distribución de probabilidades de elección aplicando el MNL y asigna una celda al agente mediante simulación de Monte Carlo. Una vez realizadas las asignaciones para un período, el modelo actualiza la disponibilidad de las celdas y, finalmente, recalcula las accesibilidades y los precios con los modelos correspondientes para capturar el impacto de las ubicaciones de los agentes. Esta secuencia se repite para cada periodo de simulación, lo que permite emular el desarrollo urbano del área de estudio y del Territorio.

### **2.2.2. Escenarios Alternativos**

Una vez configurado y simulado el Escenario Base, es necesario identificar el conjunto de opciones que se desean analizar en el horizonte temporal de evaluación, las cuales se estructuran como escenarios alternativos. Un escenario alternativo se enmarca en el Territorio ya creado, permitiendo la manipulación de dos variables claves: (i) la actualización de las regulaciones aplicables al área de estudio, incluyendo las versiones más recientes o futuras de los planes reguladores, seccionales y/o intercomunales que se deseen evaluar; (ii) la localización de proyectos de infraestructura, como por ejemplo, la construcción de un hospital, la localización de un centro comercial, el desarrollo de proyectos de vivienda social, entre otros y (iii) cambios en la red de transporte, como, por ejemplo, la construcción de un nuevo acceso a la ciudad. Los tres tipos de variables inducen cambios en los criterios de simulación que se aplican. Por tanto, se procede a realizar una simulación alternativa utilizando los modelos estimados previamente, pero considerando estas variables modificadas.

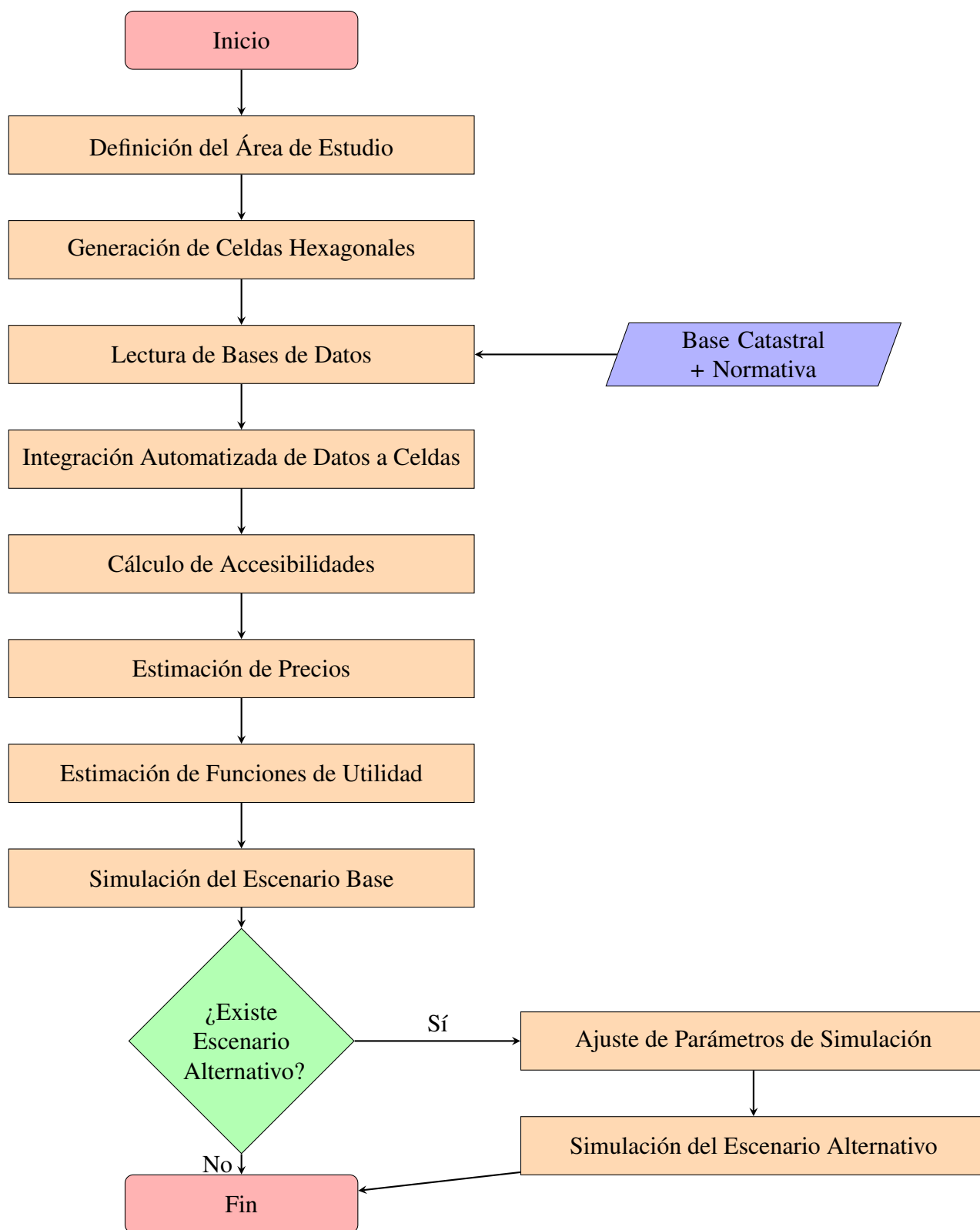


Figura 1: Representación del Enfoque de Modelación

### 3. INFRAESTRUCTURA DE DATOS Y PROCESAMIENTO

El éxito de cualquier Modelo de Interacción de Uso de Suelo y Transporte, como SimpliCity, depende principalmente de la calidad de los datos utilizados y de la eficiencia de los sistemas de procesamiento que se implementen. Bajo este contexto, la presente sección introduce la arquitectura y el manejo de los datos de entrada de SimpliCity. Se pone énfasis en las estrategias de integración geoespacial que permiten dar lugar a la implementación de los modelos explicados en detalle en la Subsección 4.

#### 3.1. Área de Estudio

El Territorio delimita el área de estudio  $A$ , definida por un polígono que engloba las zonas en las que se implementan los modelos de SimpliCity. A partir de este polígono, se genera una zonificación homogénea que contiene completamente el área de estudio  $A$ , constituyendo una teselación de hexágonos regulares. Estos hexágonos son la unidad mínima de agregación espacial, denominada celda  $c$ , con  $c \in C$  y  $C \subseteq A$ . Los hexágonos, a diferencia de otros polígonos regulares, presentan una distancia mínima entre sus centroides, permitiendo una representación espacial más precisa y uniforme.

Para ello, se implementa un método que permite teselar  $A$  en un conjunto de  $n$  hexágonos utilizando la librería  $h3$  desarrollada por Uber (2021), de manera tal que  $\{c_i\}_{i=1}^n$  contenga completamente a  $A$ . La librería  $h3$  corresponde a un sistema de teselación hexagonal jerárquico que mapea la tierra esférica y asigna índices a todas las celdas que genera, basándose en su jerarquía espacial. La flexibilidad y precisión inherentes al sistema  $h3$  lo hacen ideal para su uso en SimpliCity, ya que permite adaptar su resolución, lo que significa que los hexágonos pueden ser escalados para acomodar diferentes grados de detalle. De esta manera es posible calibrar el alcance del estudio, facilitando enfoques macro y microscópicos dependiendo del modelador.

#### 3.2. Información Catastral

Las Bases de Datos Catastrales (BDC) constituyen un recurso invaluable para el análisis del desarrollo urbano y territorial, y para la aplicación efectiva de modelos LUTI. Incluyen todas las propiedades inmuebles del país, caracterizadas por su superficie predial y sus líneas de construcción (superficies construidas), y que son identificadas por un rol único correspondiente al polígono en el que se sitúan, dado por  $p \in P$ , con  $P \subseteq A$ . En general las BDC se separan en las categorías agrícolas y no agrícolas (urbanas). De esta manera, las BDC albergan información detallada a nivel de agente, siendo que cada agente  $h \in H$  corresponde a una línea de construcción, que se caracteriza por un tipo específico de uso de suelo  $u \in U$  con  $U = \{\text{residencial, comercial, educacional, ...}\}$ , su superficie construida en metros cuadrados  $q \in N$  y su año de localización (o construcción).

Dado que los polígonos  $p$  están georreferenciados, su manipulación permite una representación espacial y temporal detallada del desarrollo de una ciudad o región, proporcionando un marco



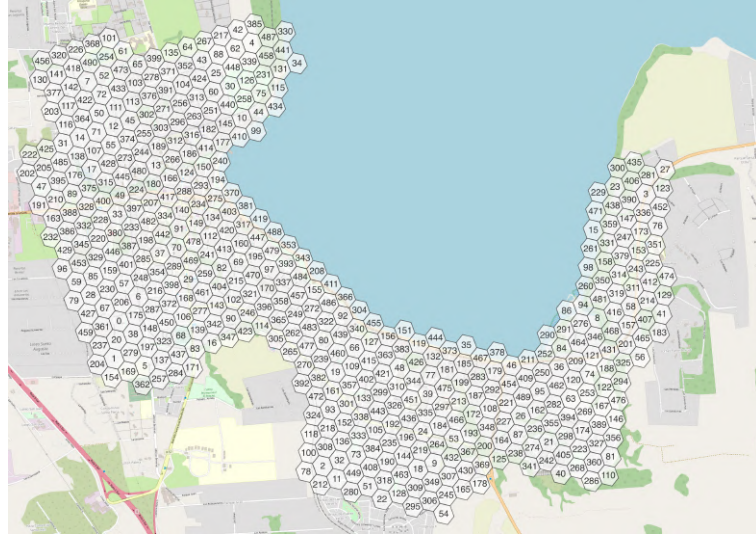


Figura 2: Ejemplo de Teselación

sólido para entender y modelar las interacciones y dinámicas de los diferentes agentes en el espacio urbano.

### 3.3. Información Normativa

Para la ejecución de los modelos de SimpliCity, es necesario contar con un archivo geográfico que indique la normativa aplicable al área de estudio  $A$ . Esta información proviene de los Instrumentos de Planificación Territorial (IPT) vigentes, tales como planes reguladores comunales, seccionales y/o intercomunales, que definen zonas  $z \in Z$ , con  $Z \subseteq A$ , las que no necesariamente coinciden con los polígonos  $p$  y las celdas  $c$ .

Dado que a nivel administrativo no existe un estándar en cómo se maneja la información geográfica proveniente de los IPT, para crear la normativa se ha dispuesto de un formato en específico. A continuación, la Tabla 1 presenta un extracto de la información contenida.

Tabla 1: Extracto de Datos Normativos

Zona	Coef	A	B	C	D	E	F	G	H	I	L	M	O	P
ZAV	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ZH1	7.0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
ZH2	3.0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1

De la Tabla 1 se observa que cada fila representa una zona del IPT, indicando: (i) su coeficiente de constructibilidad  $coef_z$ , que establece la relación entre el total de metros cuadrados construibles y la superficie del terreno; y (ii) los usos permitidos y restringidos, los cuales se denotan por una variable binaria  $b_z^u$  para cada uso de suelo  $u \in U$  considerado, quedando definida de la siguiente manera.

$$b_z^u = \begin{cases} 1 & \text{si el uso de suelo } u \text{ se permite en la zona } z, \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

### 3.4. Integración Geoespacial

La integración de datos geoespaciales representa un componente clave en SimpliCity, permitiendo la integración de la información proveniente tanto de los polígonos  $p \in P$  y de las zonas  $z \in Z$  al nivel de las celdas  $c \in C$ . Este proceso de integración consolida la información en una unidad de agregación común, facilitando un análisis integral del Territorio en cuestión.

Sea  $P_c$  el conjunto de polígonos  $p$  que se intersectan con la celda  $c$ ,  $q_p^u$  el total de metros cuadrados construidos del uso de suelo  $u$  en el polígono  $p$ ,  $A_{cp}$  el área de intersección de la celda  $c$  con el polígono  $p$ , y  $A_p$  el área del polígono  $p$ , entonces el total de metros cuadrados construidos del uso de suelo  $u$  en la celda  $c$  será  $q_c^u$ , tal que se cumpla la Ecuación 1.

$$q_c^u = \sum_{p \in P_c} \frac{A_{cp}}{A_p} \cdot q_p^u \quad (1)$$

Análogamente, sea  $Z_c$  el conjunto de zonas  $z$  que se intersectan con la celda  $c$ ,  $coef_z$  el coeficiente de constructibilidad de la zona  $z$ ,  $A_{cz}$  el área de intersección de la celda  $c$  con la zona  $z$ , y  $A_c$  el área de la celda  $c$ , entonces el coeficiente de constructibilidad de la celda  $c$  será  $coef_c$ , tal que se cumpla la Ecuación 2.

$$coef_c = \sum_{z \in Z_c} \frac{A_{cz}}{A_c} \cdot coef_z \quad (2)$$

Luego, se define  $b_c^u$  como una variable binaria que indica, para cada uso de suelo  $u \in U$  si este se permite o se restringe en la celda  $c$ , de manera tal que se cumple la Ecuación 3.

$$b_c^u = \max \{b_z^u \mid \forall z \in Z_c\} = \begin{cases} 1 & \text{si el uso de suelo } u \text{ se permite en la celda } c, \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (3)$$

Para llevar a cabo estas integraciones geoespaciales, particularmente para determinar  $A_{cp}$  y  $A_{cz}$ , se hace uso del método *overlay* de la biblioteca *GeoPandas* de *Python*. *GeoPandas* es una herramienta de código abierto que extiende las funcionalidades de *Pandas*, una de las bibliotecas más populares para el análisis de datos en *Python*, para permitir operaciones espaciales en tipos de datos geométricos. El método *overlay*, específicamente, es una operación de tipo *set-theory* que compara dos *GeoDataFrames* y genera un nuevo *GeoDataFrame* que contiene la intersección, unión, diferencia, o simetría de los dos *GeoDataFrames* de entrada, dependiendo del parámetro establecido. En

este caso, se utiliza el método para obtener la intersección entre las celdas y los polígonos o zonas, permitiendo de esta manera asignar características a cada celda según su intersección respectiva.

## 4. MODELOS

Esta sección ofrece una visión detallada de los diferentes modelos que se emplean en SimpliCity. Cada modelo desempeña una función específica en la estimación y/o simulación de las decisiones de localización de los agentes y su interacción con el entorno construido. Así, el objetivo es explicar cómo estos modelos trabajan en conjunto para estimar y simular los patrones de uso del suelo y las dinámicas de transporte.

### 4.1. Modelo de Accesibilidad

Sea  $M$  un conjunto de modos de transporte, donde cada modo de transporte  $m \in M$  representa una manera en que los agentes pueden desplazarse por el Territorio. Cada celda  $c \in C$  está conectada al nodo más cercano de la red de transporte. Se define la distancia desde el centroide de la celda  $c$  hasta su nodo más cercano en la red de transporte como  $d_{cn}^m$ , donde  $n$  es el nodo y  $m$  es el modo de transporte.

Para cada modo de transporte  $m$ , la velocidad de viaje  $v^m$  es constante y se expresa en km/h. Esta velocidad se emplea para calcular el tiempo de viaje desde el centroide de la celda hasta su nodo más cercano en la red de transporte, que es  $t_{cn}^m = d_{cn}^m / v^m$ , expresado en horas.

La red de transporte se representa como un grafo  $G^m = (N^m, E^m)$ , donde  $N^m$  es el conjunto de nodos y  $E^m$  es el conjunto de arcos para el modo de transporte  $m$ . La distancia entre cualquier par de nodos  $n_i$  y  $n_j$  en el grafo, denotada como  $d_{n_i n_j}^m$ , es la longitud del camino más corto entre esos dos nodos. El tiempo de viaje entre los nodos,  $t_{n_i n_j}^m$ , se calcula de la misma manera que antes, dividiendo la distancia por la velocidad:  $t_{n_i n_j}^m = d_{n_i n_j}^m / v^m$ .

Por lo tanto, el tiempo total de viaje  $T_{ij}^m$  entre dos celdas  $c_i$  y  $c_j$  para el modo de transporte  $m$  se calcula sumando el tiempo desde la celda  $c_i$  hasta su nodo más cercano, el tiempo entre los nodos más cercanos a las celdas  $c_i$  y  $c_j$ , y el tiempo desde el nodo más cercano hasta la celda  $c_j$ , cumpliéndose la Ecuación 4.

$$T_{ij}^m = t_{c_i n_i}^m + t_{n_i n_j}^m + t_{n_j c_j}^m \quad (4)$$

Este cálculo se realiza para todos los pares de celdas y para todos los modos de transporte, resultando en una matriz de tiempos de viaje  $T^m$  para cada modo de transporte, donde cada fila y cada columna corresponden a una celda y cada entrada  $T_{ij}^m$  representa el tiempo de viaje desde la celda  $c_i$  hasta la celda  $c_j$  para el modo de transporte  $m$ .

Una vez obtenida la matriz de tiempos de viaje  $T^m$  para cada modo de transporte  $m \in M$ , el

siguiente paso es determinar la función de impedancia. Para cada modo de transporte  $m$ , se define un tiempo máximo de viaje  $T_{\max}^m$ . Este valor representa el tiempo máximo que un individuo estaría dispuesto a viajar utilizando el modo de transporte  $m$ . Luego, la impedancia se calcula utilizando una función exponencial, de modo que la impedancia aumenta exponencialmente a medida que el tiempo de viaje se acerca a  $T_{\max}^m$ . Matemáticamente, la función de impedancia  $F_{ij}^m$  se define de la siguiente manera para un modo de transporte  $m$  y un tiempo de viaje  $t_{ij}^m$  entre dos celdas  $c_i$  y  $c_j$ .

$$F_{ij}^m = \exp \left( \frac{\ln(0,01) \cdot t_{ij}^m}{T_{\max}^m} \right) \quad (5)$$

En esta ecuación,  $\ln(0,01)$  es el valor al que converge la función de impedancia cuando  $t_{ij}^m = T_{\max}^m$ .

Una vez que se han calculado las impedancias, se procede a estimar la accesibilidad a los diferentes usos del suelo  $u \in U$ . Para cada celda  $c_i$ , la accesibilidad a un uso de suelo  $u$  utilizando el modo de transporte  $m$  se calcula como la suma de los metros cuadrados construidos de  $u$  en todas las demás celdas, ponderados por la impedancia. Denotando el total de metros cuadrados construidos del uso de suelo  $u$  en la celda  $c_j$  como  $q_j^u$ , la accesibilidad se calcula de la siguiente manera.

$$acc_i^{m,u} = \sum_{j \neq i} q_j^u \cdot F_{ij}^m \quad (6)$$

Finalmente, todas las accesibilidades se normalizan dividiéndolas por el valor máximo de accesibilidad para cada modo de transporte y uso del suelo.

$$acc_i^{m,u} = \frac{acc_i^{m,u}}{\max_j acc_j^{m,u}} \quad (7)$$

Estas medidas normalizadas de accesibilidad, que varían entre 0 y 1, son los *outputs* finales del Modelo de Accesibilidades. Así, estas medidas permiten comparar la accesibilidad a diferentes usos del suelo utilizando diferentes modos de transporte. El máximo utilizado para normalizar se determina al calcular las accesibilidades para la estimación de modelos y se mantiene constante para fases de simulación posteriores. De esta forma, es posible que en escenarios con aumentos de superficies construidas o disminuciones de los tiempos de viaje se tengan medidas de acceso con valores superiores a 1.

## 4.2. Modelo de Precios Hedónicos

El objetivo de este modelo es estimar el precio que debería pagar un agente por localizarse en cada celda  $c$ . Se define  $\rho_c$  como el precio observado por metro cuadrado construido en la celda  $c$ , el cual corresponde al avalúo fiscal promedio de las líneas de construcción presentes en dicha celda. Por otro lado, se denomina  $\rho'_c$  al precio estimado por metro cuadrado construido en la celda  $c$ , el cual

es función de las características del entorno construido. Un conjunto de estas características están representadas por las accesibilidades  $acc_c^{m,u}$ , donde  $m$  representa el modo de transporte y  $u$  el uso de suelo.

Como SimpliCity se basa en información agregada y pretende ser simple de estimar, existen muchas variables no observadas y otras no observables que generarían un sesgo de variable omitida significativo. Para minimizar este sesgo, se incluye un conjunto de variables indicativas geográficas que pretenden representar zonas homogéneas en cuanto a atractividad para un agente y así capturar estas características no observadas. Estas pueden ser anillos de distancia al centro de la ciudad, o zonas homogéneas del Servicio de Impuestos Internos. Sea  $\Upsilon$  el conjunto de zonas homogéneas a utilizar, se define para cada zona homogénea  $v$  la variable indicativa  $I_{cv}$  que toma valor 1 si la celda  $c$  se encuentra en la zona  $v$ .

Así, con el fin de estimar  $\rho'_c$  se emplea un Modelo de Regresión Lineal Múltiple dado por la Ecuación 8, siguiendo un enfoque de modelación de precios hedónicos, propuesto por Rosen (1974).

$$\rho'_c = \alpha_0 + \sum_{m \in M} \sum_{u \in U} \alpha_{m,u} \cdot acc_c^{m,u} + \sum_{v \in \Upsilon} \delta_v \cdot I_{cv} + \epsilon_c \quad (8)$$

El término  $\hat{\alpha}_0$  representa el intercepto del modelo,  $\hat{\alpha}_{m,u}$  corresponde al coeficiente estimado para la accesibilidad  $acc_c^{m,u}$ , mientras que  $\hat{\delta}_v$  el coeficiente de cada zona homogénea. El término  $\epsilon_c$  corresponde al error aleatorio, que sigue una distribución normal.

Los coeficientes se obtienen al ajustar el modelo a los datos observados minimizando la suma de los errores cuadrados, de modo que los coeficientes representan la relación existente entre cada característica del entorno construido y el precio de la celda. Para ello, se hace uso de la librería *statsmodels*, que proporciona una amplia gama de funcionalidades estadísticas en *Python*. De esta manera, dado el conjunto de accesibilidades  $acc_c^{m,u}$  de cualquier celda  $c$ , es posible predecir su precio  $\rho'_c$ .

Las estimaciones de estos coeficientes  $\alpha_{m,u}$ ,  $\alpha_v$ , junto con el intercepto  $\alpha_0$ , se almacenan para su posterior utilización. En particular, para cada celda  $c$  se calcula un precio estimado  $\rho'_c$  a partir de la Ecuación (8), que será utilizado en la simulación para la asignación de agentes. Con esto, se espera que este modelo permita prever las variaciones en los precios de las celdas del área de estudio como consecuencia de la localización de los agentes durante la simulación.

### 4.3. Modelo de Localización

Basándose en la teoría microeconómica de la utilidad aleatoria (McFadden, 1978), el Modelo de Localización de SimpliCity proporciona un enfoque analítico robusto para estimar las dinámicas de localización de los agentes en un Territorio. Este modelo propone que un agente  $h \in H$  asigna una utilidad  $U_c^h$  a cada celda  $c$  que representa una potencial localización en el Territorio. Esta utilidad se determina en función de las características del agente, específicamente su superficie construida

$q^h$ , y las características de la celda  $c$ , que incluyen su precio por metro cuadrado construido  $\rho_c$ , las accesibilidades  $acc_c^{m,u}$  asociadas con cada uso de suelo  $u$  diferenciadas por modo de transporte  $m$ , y las características de cada zona homogénea. Sean  $\beta_\rho$  y  $\beta_{m,u}$  los parámetros del modelo que representan el peso relativo del precio y la accesibilidad en la decisión del agente  $h$  de localizarse en la celda  $c$ , y  $\delta_v$  la valoración de la zona  $v$ , entonces la utilidad  $U_c^h$ , que se separa en una componente determinística  $V_c^h$  y otra estocástica  $\epsilon_c$ , queda definida según la Ecuación (9).

$$U_c^h = V_c^h + \epsilon_c = \beta_\rho(\rho_c \cdot q^h) + \sum_{m \in M} \sum_{u \in U} \beta_{m,u} \cdot acc_c^{m,u} + \sum_{v \in \Upsilon} \delta_v \cdot I_{cv} + \epsilon_c \quad (9)$$

La premisa central del modelo es que un agente  $h$  seleccionará la celda  $c$  que maximice su utilidad  $U_c^h$ . Esta decisión implica que si el agente elige la celda  $c_i$ , entonces la utilidad  $U_i^h$  debe ser mayor que la de cualquier otra ubicación  $c_j$ , de manera tal que  $U_i^h > U_j^h \quad \forall j \neq i$ .

Sin embargo, dado que la utilidad no puede ser completamente observada debido a la presencia del término de error aleatorio  $\epsilon_c$ , se opta por modelar la probabilidad  $\phi_c^h$  de que la celda  $c$  sea seleccionada por el agente  $h$ , en lugar de la utilidad directamente. Asumiendo que  $\epsilon_c$  sigue una distribución Extreme Value y que  $C^h$  es el conjunto total de alternativas de celdas  $c$  disponibles para la localización del agente  $h$ , la probabilidad  $\phi_c^h$  se puede modelar a partir de un Modelo Logit Multinomial, representado en la Ecuación 10.

$$\phi_i^h = \frac{\exp(V_i^h)}{\sum_{j \in C^h} \exp(V_j^h)} \quad (10)$$

Los parámetros  $\beta_\rho$ ,  $\beta_{m,u}$ , y  $\delta_v$ , se obtienen de maximizar la función de verosimilitud  $\mathcal{L}$  (Ecuación 11) donde  $y_i^h$  es una variable binaria que toma el valor de 1 si la ubicación  $c_i$  es la elegida y 0 en caso contrario.

$$\mathcal{L} = \sum_{h \in H} \sum_{i=1}^{C^h} y_i^h \cdot \log(\phi_i^h) \quad (11)$$

Para simplificar y automatizar este proceso, SimpliCity integra la librería *Biogeme* de *Python*, que proporciona un marco flexible y ágil para la estimación de modelos de elección discreta basados en la máxima verosimilitud (Bierlaire, 2003).

#### 4.4. Simulación

Sea  $H'$  un conjunto de agentes a ser localizados en un periodo de tiempo específico dado por  $T$ . Para cada agente  $h' \in H'$  con una superficie a localizar  $q^{h'}$ , se define  $C^{h'} \subseteq C$  dado por las celdas que cumplen con el criterio de disponibilidad y restricciones de uso de suelo, tal que se cumple la Ecuación 12.

$$C^{h'} = \{c \in C : b_c^u = 1 \wedge coef_c > 0\} \quad (12)$$

Una vez definido  $C^{h'}$ , se calcula la utilidad  $U_c^{h'}$  y la probabilidad  $\phi_c^{h'}$  para cada celda  $c \in C^{h'}$ , de acuerdo con lo especificado en el Modelo de Localizaciones. Luego, se realiza la asignación de localizaciones a través de una simulación de Monte Carlo basada en la distribución definida por (10), en el cual un agente  $h'$  selecciona una celda  $c$  para localizarse con una probabilidad  $\phi_c^{h'}$ . La asignación se representa matemáticamente mediante una función de asignación  $W : H' \times C^{h'} \rightarrow C$  que asigna a cada agente  $h'$  una celda  $c$ . La función  $W$  toma un par ordenado que consta de un agente  $h' \in H'$  y su correspondiente conjunto de celdas factibles  $C^{h'} \subset C$ , y devuelve una única celda  $c \in C$  en la que se localiza el agente  $h'$ . Esto refleja el hecho de que, en el contexto de este modelo, cada agente se localiza en una única celda en un periodo de tiempo dado.

A partir de la localización del agente  $h$  en  $c$ , se actualiza el total de metros cuadrados construidos del uso de suelo  $u$  en la celda  $c$ , representado por  $q_c^u$ , y se ajusta el coeficiente de constructibilidad  $coef_c$  para reflejar la nueva localización. Esta actualización se realiza siguiendo las Ecuaciones 13 y 14.

$$q_c^u = q_c^u + q^{h'} \quad (13)$$

$$coef_c = coef_c - \frac{q^{h'}}{A_c} \quad (14)$$

Después de este paso, es necesario recalcular  $b_c^u$  para determinar si la celda  $c$  sigue disponible para el uso de suelo  $u$ , según si  $coef_c$  sigue siendo mayor que 0.

Este proceso de asignación se repite para cada agente  $h' \in H'$  que se localiza en el año  $t \in T'$ . Esta repetición a lo largo de todos los agentes  $h'$  para cada año  $t$  garantiza que todos los agentes se asignen correctamente durante la simulación.

$$\forall h' \in H', \forall t \in T, W(h', C^{h'}) \rightarrow c \quad (15)$$

Adicionalmente, cada  $t$  años en los que se asigna un subconjunto de  $H'$ , las medidas de accesibilidad y los precios de las celdas se recalculan debido a los cambios en  $q_c^u$ . Este proceso iterativo continúa hasta el periodo  $t_{final}$ .

El proceso integral descrito previamente es ejecutado de manera automatizada por SimpliCity. Esta automatización se traduce en la posibilidad de efectuar un conjunto de simulaciones, dado lugar a la creación del Escenario Base y diferentes Escenarios Alternativos que sean de relevancia para el modelador.

## 5. APLICACIONES DE SIMPLICITY EN PUERTO VARAS, CHILE

Ubicada en la Región de Los Lagos, la comuna de Puerto Varas se enmarca en la cuenca surponiente del Lago Llanquihue. Su geografía le proporciona dos accesos relevantes desde la Ruta 5 Sur, situados en los extremos norte y sur de la comuna. Adicionalmente, desde el sur, es posible el ingreso a través de la ruta V-505, que, proveniente de la capital regional Puerto Montt, conduce a la comuna tras atravesar la localidad de Alerce.

La ordenación territorial de Puerto Varas, actualmente bajo la jurisdicción de la Ilustre Municipalidad de Puerto Varas, está fundamentada en el Plan Regulador Comunal (PRC) establecido en 1990. Dado su desfase temporal, y pese a los Planes Seccionales que se han aprobado en el último tiempo, el PRC ha suscitado una marcada tendencia hacia la peri-urbanización de zonas rurales en las últimas décadas. Este proceso ha hecho que las nuevas periferias sean preferidas por los estratos socioeconómicos altos, quienes optan por residir en parcelas de agrado, lo cual ocurre en detrimento de las áreas urbanas (Zerán Ruiz-Clavijo, 2019). A pesar de la relevancia de este tipo de bien inmueble, la versión de SimpliCity que se presenta en este artículo aún no incorpora información sobre parcelas de agrado (pero se planea incorporar este y otros tipos de agentes clave en versiones futuras).

En este contexto y en consonancia con el actual proceso de actualización del Plan Regulador Comunal que está llevando a cabo la Ilustre Municipalidad de Puerto Varas, este estudio de caso se erige como un referente relevante para la implementación de SimpliCity. Esto se logra a través de la contrastación de dos escenarios: un Escenario Base, que se proyecta bajo el marco del Plan Regulador de 1990, y un Escenario Alternativo, que considera la propuesta del Plan Regulador que se encuentra actualmente en tramitación (este escenario aún no ha sido simulado por lo que solo se presentan resultados para el escenario base, proyectado al año 2035)

### 5.1. Recopilación y Procesamiento de Datos

En el caso de Chile, se opta por emplear al Detalle Catastral del Servicio de Impuestos Internos (SII), que corresponde a una base de datos que proporciona información detallada y actualizada sobre las propiedades inmuebles en el país, identificadas por un rol único, y separadas entre agrícolas y no agrícolas (urbanas). Para cada propiedad, se cuenta con información asociada a su predio y a las construcciones que en ella se encuentran. Adicionalmente, el SII proporciona un archivo en formato *shapefile* con las geometrías de las manzanas para las principales ciudades del país, cada una de las cuales tiene un identificador que permite asociar cada rol de propiedad a una manzana específica.

#### 5.1.1. Manzanas

La manzana es una unidad espacial que se representa con un polígono. Cada comuna en Chile se segmenta en estas unidades espaciales, constituyendo una malla de terreno urbano que estructura la



geografía del territorio. El SII disponibilizó la geometría de las manzanas en un archivo en formato *shapefile* para el año 2014, siendo el archivo utilizado por SimpliCity para relacionar cada rol de propiedad a una manzana específica.

### **5.1.2. Predios**

Un predio es una subdivisión espacial que se encuentra dentro de una manzana. Se define por un código o rol único y puede estar edificado o vacío. Así, cada manzana puede albergar uno o más predios, los cuales constituyen los lotes o parcelas de tierra individualizadas en el marco de la estructura urbana. El SII disponibiliza la información predial a nivel nacional en archivos de texto que son actualizados semestralmente. En ellos, cada fila corresponde a un predio del SII, los que se encuentran identificados para cada comuna y manzana, y caracterizados por su superficie, su código de destino principal, su avalúo fiscal, entre otras variables.

### **5.1.3. Líneas de Construcción**

La línea de construcción se refiere a una edificación o estructura construida. Esta se encuentra dentro de un predio específico. Un único predio puede contener más de una línea de construcción, lo que significa que puede haber múltiples estructuras o edificaciones situadas en un mismo lote o parcela de tierra. De igual manera, el SII disponibiliza la información de las líneas de construcción a nivel nacional en archivos de texto que son actualizados semestralmente. En este caso, cada fila corresponde a una construcción que se encuentra en un predio del SII, los que se encuentran identificados por cada comuna, manzana y predio al que pertenece, y son caracterizados por su superficie construida, su código de destino, su año de construcción, su material estructural, entre otras variables.

En base a la información obtenida del Detalle Catastral del SII para la localidad de Puerto Varas, se realiza un procesamiento automatizado de los datos. Este procesamiento consiste en agregar, inicialmente, la información a nivel de manzana y, posteriormente, consolidarla a nivel de celda, siguiendo la metodología expuesta en la Sección 3. Es relevante destacar que, para los objetivos de este estudio, se optó por teselar el área de estudio en celdas h3 de resolución igual a 10, lo que corresponde a una superficie de 1,32 hectáreas por celda.

## **5.2. Implementación de los Modelos**

La implementación de los modelos para la simulación urbana en Puerto Varas se llevó a cabo considerando un conjunto de criterios de modelación que se interrelacionan para proporcionar una representación adecuada y coherente de la realidad urbana de la ciudad.

En primer lugar, se seleccionó el sistema de referencia de coordenadas (CRS) 32719, que corres-

ponde a la proyección UTM Zona 19S. Esta elección se realizó con el objetivo de garantizar una representación geoespacial precisa de la información catastral y de los resultados de las simulaciones, permitiendo efectuar un adecuado análisis espacial de los agentes urbanos.

Además, se tuvo en cuenta el Plan Regulador Comunal vigente para la definición del Escenario Base, asegurando así que la estimación y la simulación esté alineada con las regulaciones vigentes de uso del suelo y los planes de desarrollo urbano existentes. De esta manera, se garantiza que las proyecciones y resultados obtenidos en el modelo sean coherentes con la realidad normativa de la ciudad.

En lo que respecta al periodo de estimación de los modelos de SimpliCity, este se define desde el 2015 al 2023, durante el cual se analizaron y examinaron detalladamente los datos catastrales disponibles para capturar las transformaciones urbanas más recientes. Esta fase permitió comprender la evolución pasada y presente de Puerto Varas, brindando una base sólida para la estimación de los modelos de SimpliCity.

Para modelar el comportamiento de los agentes a través de los modelos implementados por SimpliCity, se consideró un periodo de estimación entre 2015 y 2023, considerando un conjunto de variables predictoras que representaban los diferentes tipos de usos de suelo presentes en Puerto Varas. Estas variables incluían las accesibilidades a Habitación Pequeño (H1), Habitación Mediano (H2), Habitación Grande (H3), Oficinas (O), Comercio (C), Educación (E), Servicios (S), Transporte (T), Administración Pública (P) e Industria (I), y Áreas Verdes (AV). Esta fase permitió comprender la evolución pasada y presente de Puerto Varas, brindando una base sólida para la estimación de los modelos de SimpliCity.

En cuanto a las variables a predecir, se proyectó un crecimiento para las categorías de Habitación Pequeño (H1), Habitación Mediano (H2), Habitación Grande (H3) y Oficina (O), que reflejan la expansión significativa en el contexto urbano actual de Puerto Varas. Se estableció un crecimiento proyectado de un 1,05 % compuesto anual para ambas categorías, basado en las tendencias de desarrollo actuales y la demanda futura proyectada, permitiendo estimar su evolución a mediano plazo.

De esta manera, se realizó la simulación proyectando la localización de agentes Habitación Pequeño (H1), Habitación Mediano (H2), Habitación Grande (H3) y Oficina (O) desde 2023 hasta 2035. Esta proyección a mediano/largo plazo permitió examinar posibles tendencias de desarrollo y cambios en la distribución del uso del suelo, brindando una visión anticipada de los escenarios futuros de la ciudad.

## 6. RESULTADOS

A continuación, se presentan los principales resultados de la implementación de SimpliCity en la localidad de Puerto Varas, focalizados en la definición del Escenario Base bajo el Plan Regulador Comunal vigente desde 1990.

## 6.1. Accesibilidades

A partir de la información del Detalle Catastral de Bienes Raíces del SII integrado a las celdas del área de estudio y de la aplicación del Modelo de Accesibilidades descrito en la Sección 4, se estimaron las accesibilidades a los usos de suelo Habitación Pequeño (H1), Habitación Mediano (H2), Habitación Grande (H3) y Oficina (O), Oficinas (O), Comercio (C), Educación (E), Servicios (S), Transporte (T), Administración Pública (P) e Industria (I), y Áreas Verdes (AV), para los modos de transporte de caminata y automóvil, siguiendo una función exponencial negativa con tiempos máximos de 15 y 30 minutos, y velocidades máximas de 4 y 20 km/h respectivamente. La Figura 3 presenta las accesibilidades estimadas para los usos de suelo a predecir.

## 6.2. Precios

En relación con el Modelo de Precios Hedónicos, se incorporaron las accesibilidades previamente descritas, en conjunto con un conjunto de variables zonales obtenidas desde las Áreas Homogéneas que disponibiliza regularmente el SII. La Figura 4 describe la categorización de los precios estimados para 2023, a partir de la implementación de este modelo hedónico.

## 6.3. Funciones de Utilidad y Simulación

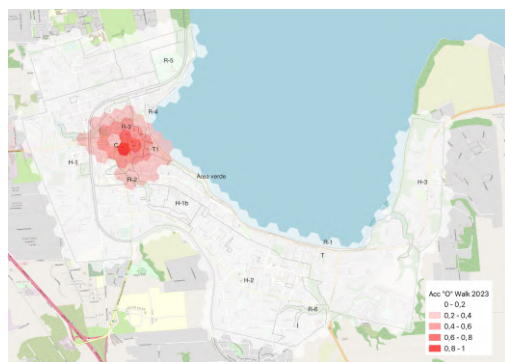
Con respecto a la estimación de las funciones de utilidad, estas se obtuvieron a partir de la aplicación del Módulo de Localizaciones, estableciendo un periodo de estimación entre 2015 y 2023, con el objetivo de capturar las decisiones de localización de la última década en Puerto Varas. Con ello se obtienen las funciones de utilidad para los agentes Habitación Pequeño (H1), Habitación Mediano (H2), Habitación Grande (H3) y Oficina (O).

Finalmente, se ejecutó un proceso de simulación entre 2023 y 2035, bajo la regulación del Plan Regulador de 1990, de manera tal de analizar un posible escenario futuro de desarrollo urbano. Los resultados de las simulaciones para Habitación Pequeño (H1), Habitación Mediano (H2), Habitación Grande (H3) y Oficina (O) se presentan en la Figura 5

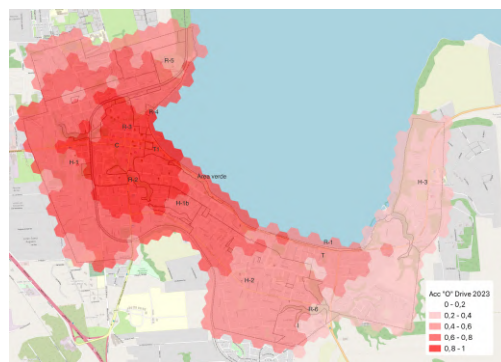
A partir de los resultados obtenidos, se ha identificado la formación de múltiples polos de localización para el agente Oficina (O) al 2035. Estos polos emergen principalmente alrededor del centro de Puerto Varas. Sin embargo, también se observa la aparición de nuevos centros de oficinas en áreas cercanas a Puerto Chico y hacia el sector sur-oriental de la comuna, específicamente a lo largo del acceso Alerce.

Esta configuración de polos de localización para el agente Oficina (O) puede manifestar el surgimiento y consolidación de nuevos *Central Business District* (CBD) en Puerto Varas. Estos centros de negocios emergentes podrían desempeñar un papel crucial al diversificar la oferta laboral hacia diferentes sectores de la comuna.

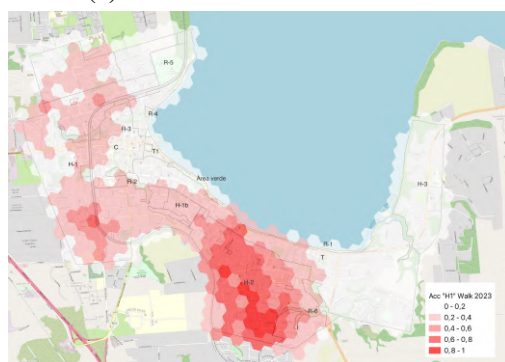
La identificación de estos posibles CBD ofrece una valiosa oportunidad para la planificación urbana



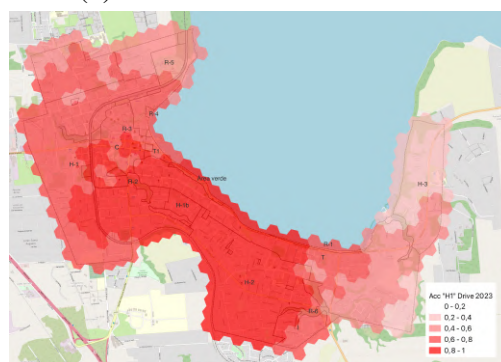
(a) Accesibilidad Caminata O



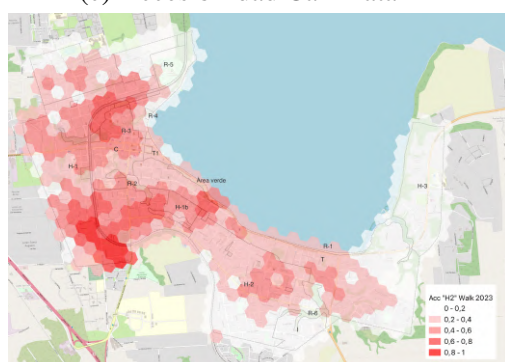
(b) Accesibilidad Automóvil O



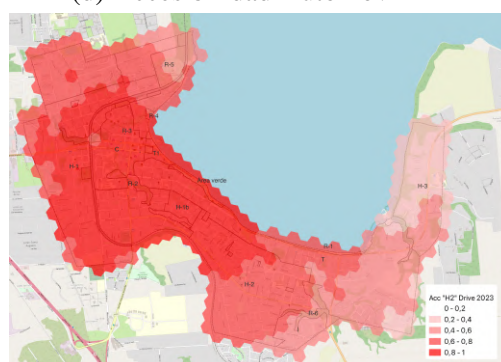
(c) Accesibilidad Caminata H1



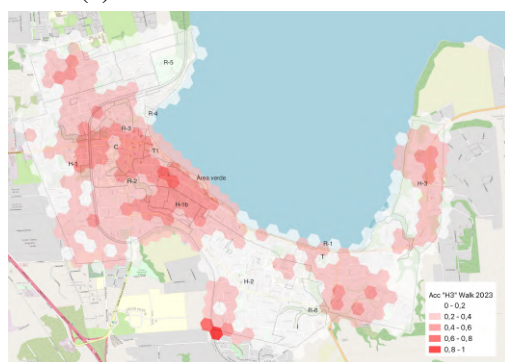
(d) Accesibilidad Automóvil H1



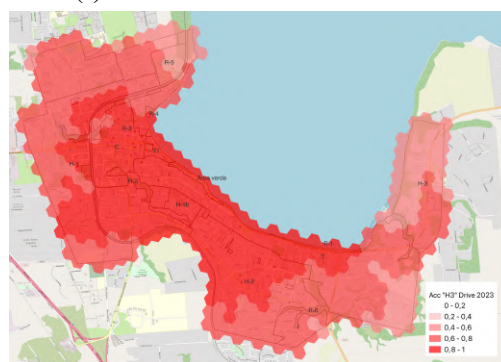
(e) Accesibilidad Caminata H2



(f) Accesibilidad Automóvil H2



(g) Accesibilidad Caminata H3



(h) Accesibilidad Automóvil H3

Figura 3: Accesibilidades 2023

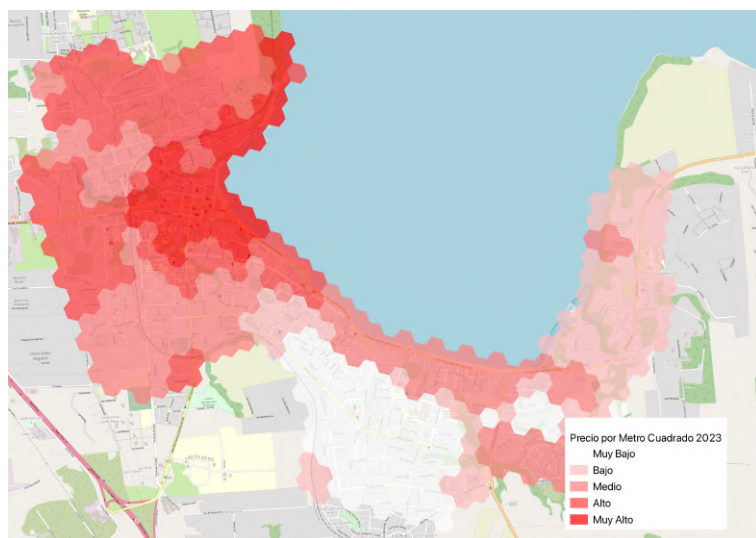


Figura 4: Precios Estimados 2023

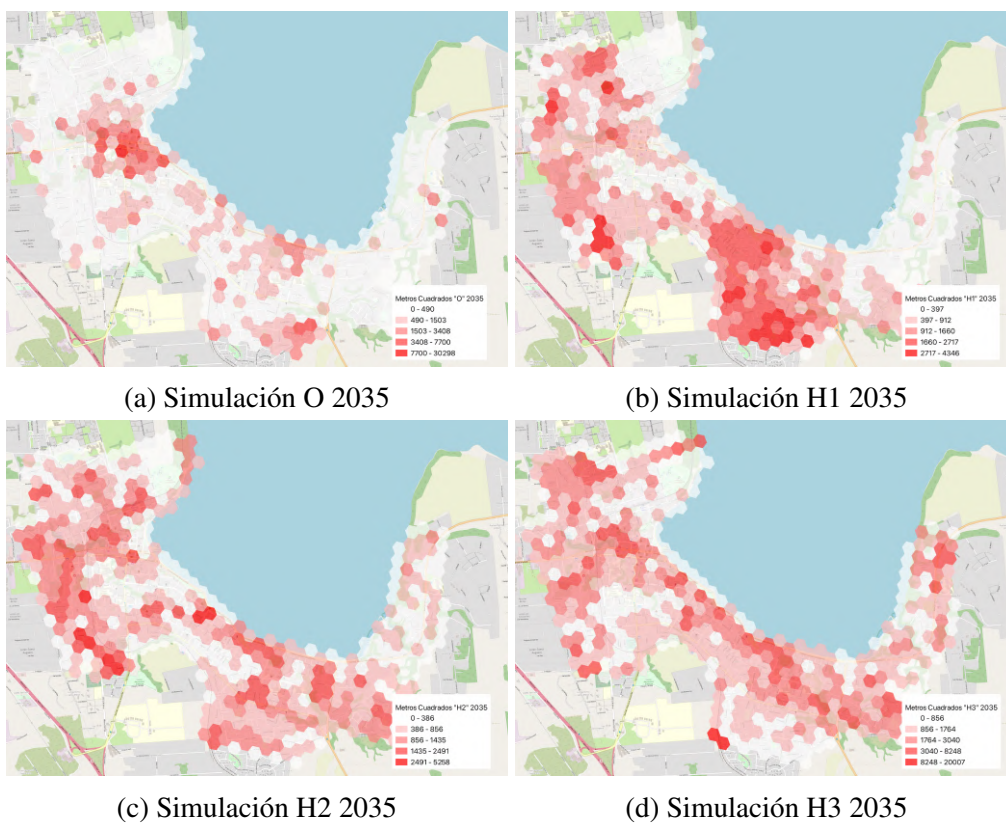


Figura 5: Resultado Simulaciones

en una localidad como Puerto Varas. Si se considera como un objetivo prioritario, la propuesta de Plan Regulador podría abordar la creación de incentivos y medidas que fomenten el desarrollo equitativo de estos polos, incluyendo el diseño de zonas mixtas que combinen espacios de oficinas con áreas residenciales, comerciales y recreativas. De esta manera, se promovería la integración de distintas actividades urbanas y se fomentaría un desarrollo urbano más sostenible y cohesionado.

Además, es importante considerar aspectos relacionados con la conectividad y la movilidad urbana, garantizando un acceso adecuado a estos nuevos centros de negocios desde diferentes partes de la comuna. La planificación de infraestructuras de transporte público y vialidades eficientes sería esencial para facilitar la movilidad y evitar congestiones que puedan afectar negativamente el desarrollo de estos polos.

En paralelo, el análisis del agente Habitacional revela interesantes patrones de localización en Puerto Varas. Se observa que la categoría Habitación Pequeño tiende a concentrarse a lo largo de la Avenida Colón hacia la salida a Alerce. Por otro lado, las categorías Habitación Mediano y Habitación Grande muestran un patrón de localización más disperso en el territorio, sin formar conglomeraciones claras al 2035.

Este hallazgo es significativo ya que sugiere una fuerte carga de residentes distribuida en toda la comuna. La propuesta del Plan Regulador para extender el área urbana, en este sentido, parece estar en línea con abordar esta problemática. Al permitir una expansión planificada y controlada, se podrían proporcionar nuevas oportunidades de vivienda sin generar una alta concentración en áreas específicas, lo que podría contribuir a evitar problemas de congestión y sobrepoblación.

Sin embargo, es esencial analizar cómo esta propuesta de extensión del área urbana impactaría los patrones de densificación actuales. La creación de una ciudad compacta y sostenible es un objetivo clave para el desarrollo urbano a largo plazo. Por tanto, se debiese garantizar que, con esta expansión, se mantengan, al menos, los patrones de densificación observados actualmente. En este sentido, el Plan Regulador podría incluir políticas que fomenten la densificación en áreas específicas, especialmente en aquellas que ya presentan una infraestructura y servicios adecuados. De esta manera, se podría aprovechar de manera eficiente los recursos existentes y reducir la necesidad de expansión hacia áreas menos desarrolladas.

## **7. CONCLUSIONES**

Tras analizar los resultados y evaluar el funcionamiento de SimpliCity, se concluye que la herramienta tiene el potencial de ser utilizadas para orientar la toma de decisiones en el ámbito de la planificación urbano. A partir del Caso de Estudio desarrollado en la comuna de Puerto Varas, fue posible evidenciar su capacidad para modelar y simular diferentes escenarios, proporcionando una base sólida para la planificación estratégica y el desarrollo de políticas urbanas efectivas como sería, por ejemplo, un nuevo plan regulador.

En este sentido, su aplicación ha permitido validar un enfoque de modelación que permite interactuar de manera eficaz y automatizada con bases de datos de acceso público para la estimación y



calibración de los modelos, así como también para su implementación en la simulación de agentes urbanos.

Teniendo en consideración estos atributos, el proyecto ofrece tanto un uso sencillo por parte de tomadores de decisiones que no tengan acceso a especialistas en el área, como aplicaciones complejas por parte de expertos o la evaluación de nuevos mecanismos de modelación para la investigación.

El trabajo a futuro considera la incorporación de otros agentes clave en la problemática contingente actual para las ciudades chilenas, como lo son las parcelas de agrado y los campamentos y el desarrollo de una interfaz que permita a los usuarios el explorar sus propios escenarios de simulación de tendencias de localización de áreas urbanas chilenas

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo de el Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería, ISCI (ANID PIA/BASAL AFB180003) y el financiamiento de CORFO (Crea y Valida I+D+i Colaborativo 22CVC-206609)

## REFERENCIAS

- Anas, A. (1982). **Residential location markets and urban transportation: Economic theory, econometrics, and policy analysis with discrete choice models**. Academic Press.
- Batty, M. (2005). **Cities and complexity: Understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals**. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Bierlaire, M. (2003). Biogeme: A free package for the estimation of discrete choice models. En **Swiss transport research conference**.
- Bierlaire, M., de Palma, A., Hurtubia, R., y Waddell, P. (Eds.). (2015). **Integrated transport and land use modeling for sustainable cities**. EPFL Press / Routledge.
- de la Barra, T., Pérez, B., y Vera, N. (1984). Tranus-j: Putting large models into small computers. **Environment and Planning B: Planning and Design**, 11, 87–101.
- Hurtubia, R., y Bierlaire, M. (2015). Microsimulation for land use modeling: implementation challenges. En M. Bierlaire, A. de Palma, R. Hurtubia, y P. Waddell (Eds.), **Integrated transport and land use modeling for sustainable cities**. EPFL Press / Routledge.
- Martinez, F. (1996). Mussa: land use model for santiago city. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board** (1552), 126–134.
- McFadden, D. L. (1978). Modeling the choice of residential location. En A. Karlqvist et al. (Eds.), **Spatial interaction theory and planning models** (pp. 75–96). Amsterdam: North Holland.

- Miller, E. (2018). The case for microsimulation frameworks for integrated urban models. **Journal of Transport and Land Use**, 11 (1), 1025–1037.
- Rosen, S. (1974). Hedonic prices and implicit markets: product differentiation in pure competition. **Journal of Political Economy**, 82 (1), 34–55.
- Salvini, P., y Miller, E. J. (2005). Ilute: An operational prototype of a comprehensive microsimulation model of urban systems. **Networks and Spatial Economics**, 5 (2), 217–234.
- Waddell, P. (2002). Urbansim: Modeling urban development for land use, transportation, and environmental planning. **Journal of the American Planning Association**, 68 (3), 297–314.
- Wegener, M. (2004). Overview of land use transport models. En **Handbook of transport geography and spatial systems** (pp. 127–146). Emerald Group Publishing Limited.
- Wegener, M. (2011). From macro to micro, how much micro is too much? **Transport Reviews**, 31 (2), 161–177.