



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

# **GENERACIÓN DE DATOS DE DELINCUENCIA VÍA SIMULACIÓN CON MODELOS BASADOS EN AGENTE**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN  
GESTIÓN DE OPERACIONES**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO  
CIVIL INDUSTRIAL**

**NELSON ESTEBAN DEVIA CAMPOS**

PROFESOR GUÍA:  
SR. RICHARD WEBER HAAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
SR. FERNANDO ORDÓÑEZ PIZARRO  
SR. GASTÓN L'HUILLIER CHAPARRO  
SR. JOSÉ MIGUEL BENAVENTE HORMAZÁBAL

SANTIAGO, CHILE  
2012

# Agradecimientos

Este trabajo es el último paso de una etapa muy importante de mi vida, que no sólo me formó profesionalmente, sino que también como persona. El aprendizaje, la enseñanza, la amistad, el trabajo en equipo, la solidaridad y el compañerismo han formado parte de este camino y han dejado su huella en mí durante todos estos años, por esta razón me siento muy orgulloso de ser un Ingeniero de la Universidad de Chile.

Quiero agradecer en primer lugar al profesor Richard Weber por su guía, su experiencia y sus consejos durante todo este proceso, además de las oportunidades que me ha dado, desde poder ser profesor auxiliar hasta la pasantía en Canadá. También agradezco a Fernando Ordoñez, Gastón L'Huillier y José Miguel Benavente por brindar otra mirada sobre esta tesis y aconsejarme para mejorarla. Aprovecho de agradecer al Centro de Análisis y Modelamiento en Seguridad (CEAMOS)<sup>1</sup>, al Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ISCI) y al Institute for Canadian Urban Research Studies (ICURS) por contribuir tanto académica como económicamente al desarrollo de esta tesis. Agradezco especialmente a Julie por jugársela siempre y tener una voluntad de oro conmigo, sobre todo en la parte de los papeleos finales.

Agradezco también a Bryan Kinney, Paul y Patricia Brantingham por invitarme y recibirme en la Simon Fraser University, Vancouver, Canadá, durante más de un mes, y por toda la ayuda que me brindaron mientras estuve allá, además de compartir su experiencia para apoyar el desarrollo de esta tesis.

Quiero agradecer a mis padres María y Nelson, a mi hermanita Claudia, a mis abuelos María, Leonel, Ana y Raúl, y a todos mis tíos y primos. Sin el apoyo de mi familia hubiese sido imposible conseguir este logro. Agradezco mucho que me inculcaran desde pequeño el gusto por aprender y que me incentivaran a llegar lejos sin importar el costo ni las dificultades.

A los grandes amigos que he tenido la oportunidad de conocer en el primer año de

---

<sup>1</sup>ICM: P-05-004-F, CONICYT: FBO16; [www.isci.cl](http://www.isci.cl). Proyecto Anillo ACT87 "Métodos cuantitativos en seguridad" ([www.ceamos.cl](http://www.ceamos.cl))

---

universidad: Marcela, Jocelyn, Fabiola, Edu y Lalo les agradezco enormemente los momentos de alegría y de pasarlo bien, así como también el estar ahí en los momentos no tan buenos. Gracias por los consejos, los retos y el apoyo en los momentos difíciles de la carrera, que nunca escasearon.

Son muchos los amigos que he encontrado durante esta carrera, algunos como auxiliares, otros como compañeros y también como alumnos, todos ellos han compartido conmigo este camino en algún momento: Josefina, Paula R., Víctor, Paula P., Fran, Rubí, André, Héctor, Ana, Christian, Thiare, Feña, Marce, Cecy, Claudia, Clemente, Javi, Paz, Rodrigo A. Se agradece el apoyo, los trabajos en equipo y las jornadas de arduo estudio que en su compañía se hicieron más amenas.

Mención especial para mis amigos del MGO y de la oficina 103: Luife, Gabo, Jacki, Thamara, Charly, Mao, Cinthya y Olivia, que han hecho que los años del magíster y de la tesis sean de lo mejor, a pesar de la dificultad del primero y la duración de la segunda.

Por último, no puedo dejar de agradecer la tremenda oportunidad que me brindó la Comunidad InGenio de desarrollar una de mis vocaciones, que es la enseñanza. Por el apoyo y los consejos que me han servido para desenvolverme cada vez mejor en este ámbito, agradezco a Evelyn, Ma. José, José, Ester y también a Naty.

---

## Resumen Ejecutivo

El empleo de modelos cuantitativos en el estudio de la delincuencia es una tendencia relativamente reciente, que tiene un gran potencial en el descubrimiento de patrones delictivos, que no se aprecian con sólo observar este fenómeno, y en la generación de nuevas teorías criminológicas a partir de ellos.

En esta tesis se propone un modelo de simulación basado en agente para la generación de datos de delincuencia en la vía pública, el cual pretende apoyar futuras investigaciones cuantitativas del crimen, aportando datos que no presentan los inconvenientes ya mencionados y que provienen de la interacción entre los tres actores ligados al crimen: ciudadanos, delincuentes y policías. Éstos son asignados a una ciudad y siguen un conjunto de sencillas reglas de comportamiento e interacción con los demás agentes, lo que permite al modelo replicar el fenómeno de una manera realista, ya que lo modela desde una perspectiva de nivel individual, tal como ocurre en la realidad.

El modelo considera que los agentes se mueven por la ciudad siguiendo una ruta, compuesta de varios lugares a visitar, lo que produce encuentros que pueden terminar en un delito, si se dan las condiciones apropiadas. La vigilancia policial es importante en este sentido, ya que influye directamente en la probabilidad de que un delincuente decida o no robar.

Para mostrar el potencial de este modelo se implementó un simulador de delitos en la vía pública a partir de él, usando el software Repast Symphony®, y se testearon aproximadamente 300 escenarios con diversas cantidades y tipos de policías, bajo cuatro estrategias de distribución policial, para seis ciudades distintas, dos de las cuales corresponden a representaciones de ciudades reales. En todas las ciudades, los resultados muestran que la cantidad de delitos ocurridos es fuertemente dependiente de la dotación policial, pero no del tipo de policía utilizado, mientras que sólo una de las estrategias de distribución policial presenta una influencia significativa en la magnitud del crimen.

El modelo de simulación basado en agente desarrollado en esta tesis, tiene un gran potencial en el apoyo a la toma de decisiones en cuanto a políticas anti-delictivas, ya que hace posible ensayar virtualmente las posibles estrategias policiales antes de aplicarlas en la realidad, con lo que se puede anticipar el surgimiento de efectos no deseados, como por ejemplo, el desplazamiento del crimen. Por otra parte, la generación de datos de delincuencia bajo un conjunto de supuestos sencillos puede ser de una enorme utilidad para el apoyo de futuras investigaciones que requieren de una gran cantidad de datos limpios y completos.

# Índice general

Agradecimientos	I
Resumen Ejecutivo	III
Índice general	IV
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos . . . . .	3
1.1.1. Objetivo General . . . . .	3
1.1.2. Objetivos Específicos . . . . .	3
1.2. Metodología . . . . .	3
1.3. Alcances y Limitaciones . . . . .	5
1.4. Estructura del Trabajo . . . . .	7
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>9</b>
2.1. Introducción . . . . .	9
2.2. Enfoque de Criminología . . . . .	10
2.2.1. El Entorno . . . . .	10
2.2.2. El Delincuente . . . . .	12
2.3. Modelos Matemáticos Aplicados al Estudio del Crimen . . . . .	13
2.3.1. Modelos Estadísticos . . . . .	14

2.3.2. Modelos de Simulación . . . . .	15
2.4. Modelos Basados en Agente . . . . .	17
2.4.1. Introducción . . . . .	17
2.4.2. Conceptos Técnicos . . . . .	18
2.4.3. Simulación . . . . .	19
2.4.4. Aplicaciones . . . . .	20
2.4.5. Crítica a los Modelos Basados en Agente . . . . .	23
2.5. Complejidad al Modelar el Crimen . . . . .	26
<b>3. Descripción del Modelo</b>	<b>28</b>
3.1. Introducción . . . . .	28
3.2. Principales Supuestos . . . . .	29
3.3. El Entorno . . . . .	30
3.4. Los Agentes . . . . .	31
3.4.1. Ciudadanos . . . . .	32
3.4.2. Delincuentes . . . . .	33
3.4.3. Policía . . . . .	34
3.5. Reglas de Comportamiento . . . . .	35
<b>4. Implementación del Modelo</b>	<b>38</b>
4.1. Introducción . . . . .	38
4.2. Repast Symphony . . . . .	39
4.3. Visualización . . . . .	41
4.4. Definición de Escenarios . . . . .	42
4.4.1. Ciudades . . . . .	43
4.4.2. Número de Policías . . . . .	44
4.4.3. Tipo de Policías . . . . .	46
4.4.4. Estrategias Policiales . . . . .	47

4.4.5. Casos Extremos . . . . .	48
4.4.6. Sensibilidad de Parámetros . . . . .	48
4.5. Aspectos Generales de las Simulaciones . . . . .	49
<b>5. Análisis y Validación de Resultados</b>	<b>51</b>
5.1. Introducción . . . . .	51
5.2. Análisis por Variable . . . . .	52
5.2.1. Caso Base . . . . .	52
5.2.2. Número de Policías . . . . .	53
5.2.3. Tipo de Policías . . . . .	55
5.2.4. Estrategia Policial . . . . .	57
5.3. Análisis General . . . . .	59
5.3.1. Análisis Global . . . . .	59
5.3.2. Análisis por Ciudad . . . . .	62
5.4. Validación del Modelo . . . . .	66
5.4.1. Validación de Eventos y por Datos Históricos . . . . .	68
5.4.2. Animación y Gráficos Operacionales . . . . .	71
5.4.3. Validación Interna . . . . .	73
5.4.4. Sensibilidad de Parámetros . . . . .	74
5.4.5. Condiciones Extremas . . . . .	81
<b>6. Aplicaciones del Modelo</b>	<b>86</b>
6.1. Introducción . . . . .	86
6.2. Modelo Estático de Teoría de Juegos para el Control del Crimen . . .	87
6.2.1. Introducción . . . . .	87
6.2.2. Descripción del Modelo . . . . .	88
6.2.3. Aplicación del Simulador . . . . .	89
6.2.4. Resultados y Análisis . . . . .	91

6.3. Modelo Dinámico de Teoría de Juegos para el Control del Crimen . . .	93
6.3.1. Introducción . . . . .	93
6.3.2. Aplicación del Simulador . . . . .	94
6.3.3. Resultados y Análisis . . . . .	95
6.4. Modelo de Simulación de Robo en Tiendas en un Mall . . . . .	97
6.4.1. Introducción . . . . .	97
6.4.2. Descripción del Modelo . . . . .	98
6.4.3. Escenario Estándar . . . . .	99
6.4.4. Modelos Modificados . . . . .	101
6.4.5. Resultados . . . . .	102
6.4.6. Conclusiones . . . . .	106
<b>7. Conclusiones</b>	<b>108</b>
7.1. Introducción . . . . .	108
7.2. Resultados del Estudio . . . . .	109
7.3. Críticas a la Metodología . . . . .	111
7.4. Trabajo Futuro . . . . .	113
<b>Referencias</b>	<b>115</b>
<b>Anexos</b>	<b>120</b>
<b>A. Datos de Denuncias en Santiago Centro 2001-2004</b>	<b>121</b>
<b>B. Resultados de las Simulaciones</b>	<b>126</b>
<b>C. Regresiones Lineales por Ciudad</b>	<b>132</b>

# Índice de figuras

1.1. Principales preocupaciones de la población en Chile (2000-2010). Encuesta de opinión pública, Centro de Estudios Públicos. . . . .	2
2.1. Patrones del juego de la vida. . . . .	21
2.2. Patrones del modelo de segregación de Schelling. . . . .	22
2.3. Patrones en el modelo depredador-presa. . . . .	24
3.1. Diagrama del comportamiento de los ciudadanos. . . . .	36
3.2. Diagrama del comportamiento de los policías. . . . .	36
3.3. Diagrama del comportamiento de los delincuentes. . . . .	37
4.1. Leyenda de las figuras obtenidas de Repast Symphony. . . . .	39
4.2. Modelo de simulación de delincuencia desarrollado en Repast Symphony. . . . .	40
4.3. Agente versus objeto computacional. . . . .	41
4.4. Mapa delictual de Santiago Centro en Grass GIS. . . . .	42
4.5. Mapas delictuales de Santiago Centro en MatLab. . . . .	43
4.6. Las 4 ciudades en forma de Grilla. . . . .	45
4.7. Ciudades reales versus ciudades modeladas. . . . .	46
5.1. Distribución de delitos en los casos base y hotspots identificados. . . . .	54
5.2. Delitos en función del número de policías. . . . .	56
5.3. Delitos en función del tipo de policías. . . . .	58

5.4. Delitos en función de la estrategia policial. . . . .	60
5.5. Delitos denunciados en Santiago Centro 2001-2004. . . . .	68
5.6. Comparación por distribución temporal. . . . .	70
5.7. Comparación por distribución espacial. . . . .	72
5.8. Animación y gráfico operacional en Repast Symphony. . . . .	73
5.9. Validación interna de Santiago sin policías. . . . .	75
5.10. Validación interna de Santiago sin policías (mapas agregados). . . . .	76
5.11. Resultados para los distintos radios de visión. . . . .	77
5.12. Funciones de probabilidad de los delincuentes. . . . .	79
5.13. Resultados para las distintas funciones de probabilidad. . . . .	80
5.14. Resultados para las distintas tasas de generación de agentes. . . . .	80
5.15. Atractividad constante versus caso normal para Santiago y Vancouver. . . . .	84
5.16. Distribución de barrios y hotspots en las Grillas. . . . .	85
6.1. Grilla de 8x8 celdas utilizada en el modelo de teoría de juegos. . . . .	90
6.2. Resultados de mil simulaciones según estrategia policial. . . . .	92
6.3. Simulación del modelo dinámico de teoría de juegos para el control del crimen. . . . .	94
6.4. Esquema de la aplicación del simulador para el modelo dinámico de teoría de juegos para el control del crimen. . . . .	95
6.5. Gráfica de los resultados de la aplicación del simulador al modelo dinámico de teoría de juegos para 7 iteraciones. . . . .	96
6.6. Esquema del primer piso del mall Metrotown. . . . .	98
6.7. Modelo de simulación de robo en tiendas en Repast Symphony. . . . .	100
6.8. Distribución espacial de los robos en el escenario estándar. . . . .	103
6.9. Cantidad de robos según nivel de seguridad. . . . .	104
6.10. Cantidad de robos según número de trabajadores. . . . .	104
6.11. Cantidad de robos según tipo de ladrones. . . . .	105

6.12. Cantidad de robos según proporción de ladrones. . . . .	105
6.13. Resultados de todos los escenarios. . . . .	106
A.1. Robos y hurtos denunciados en Santiago Centro 2001-2004. . . . .	121
A.2. Clasificación general de los delitos denunciados en Santiago Centro 2001-2004. . . . .	122
A.3. Distribución anual de los delitos. . . . .	122
A.4. Distribución mensual de los delitos. . . . .	123
A.5. Distribución diaria de los delitos en un mes. . . . .	123
A.6. Distribución semanal de los delitos. . . . .	124
A.7. Distribución de los delitos por periodos del día. . . . .	124
A.8. Distribución horaria de los delitos. . . . .	125
A.9. Avalúo del monto robado. . . . .	125

# Índice de tablas

4.1. Periodos en los que se divide el día. . . . .	50
5.1. Resultados del caso base por ciudad. . . . .	52
5.2. Cantidades de policías consideradas para el análisis. . . . .	53
5.3. Tipos de policías considerados para el análisis. . . . .	55
5.4. Estrategias de distribución policial consideradas para el análisis. . . . .	57
5.5. Variables que contiene la base de datos de delitos simulados. . . . .	59
5.6. Variables transformadas para el análisis de los delitos simulados. . . . .	61
5.7. Coeficientes de regresión lineal 5.1. . . . .	63
5.8. Coeficientes de regresión lineal 5.2. . . . .	64
5.9. Coeficientes de regresión lineal 5.3 para la Grilla. . . . .	65
5.10. Coeficientes de regresión lineal 5.4 para la Grilla. . . . .	65
5.11. Escenarios de comparación con datos reales para Santiago. . . . .	69
5.12. Modelos usados para la validación interna. . . . .	74
5.13. Categorías de los parámetros analizados. . . . .	76
5.14. Funciones de probabilidad de los delincuentes. . . . .	78
5.15. Escenarios con más delitos en Santiago. . . . .	82
5.16. Escenarios con más delitos en la Grilla 3. . . . .	82
5.17. Escenarios con menos delitos en Vancouver. . . . .	82
5.18. Escenarios con menos delitos en la Grilla. . . . .	83

6.1. Variables y su explicación. . . . .	91
6.2. Resultados de mil simulaciones según estrategia policial. . . . .	91
6.3. Distintos valores para las variables de análisis. . . . .	102
6.4. Valores de las variables en cada modelo. . . . .	102
6.5. Resultados del escenario estándar. . . . .	103
B.1. Resultados de todos los escenarios. . . . .	131
C.1. Coeficientes de regresión lineal 5.3 para Santiago. . . . .	132
C.2. Coeficientes de regresión lineal 5.4 para Santiago. . . . .	133
C.3. Coeficientes de regresión lineal 5.3 para Vancouver. . . . .	133
C.4. Coeficientes de regresión lineal 5.4 para Vancouver. . . . .	134
C.5. Coeficientes de regresión lineal 5.3 para Grilla 2. . . . .	134
C.6. Coeficientes de regresión lineal 5.4 para Grilla 2. . . . .	135
C.7. Coeficientes de regresión lineal 5.3 para Grilla 3. . . . .	135
C.8. Coeficientes de regresión lineal 5.4 para Grilla 3. . . . .	136
C.9. Coeficientes de regresión lineal 5.3 para Grilla 4. . . . .	136
C.10. Coeficientes de regresión lineal 5.4 para Grilla 4. . . . .	137

# Capítulo 1

## Introducción

La delincuencia es una de las principales preocupaciones de la población en Chile, durante la última década [49] y ha sido la primera desde 2004, dejando atrás la salud, el empleo y la educación, como se aprecia en la Figura 1.1. Hacerse cargo de este problema es un desafío que presenta muchas aristas, ya sean preventivas o punitivas. Éstas pueden ser abordadas, por un lado, con enfoques de psicología, sociología y criminología, y por otro, usando técnicas estadísticas, geográficas y matemáticas.

La aplicación de modelos matemáticos y computacionales en el estudio del crimen es una tendencia que ha cobrado bastante fuerza en las últimas décadas, en gran medida, por el aumento generalizado de la capacidad computacional, el cual ha permitido que salgan a la luz patrones delictuales dinámicos que no podrían haberse detectado hace medio siglo. Si bien, el explicar las motivaciones individuales que llevan a los delincuentes a cometer delitos y a las víctimas a ser vulneradas está fuera del alcance de los modelos matemáticos, éstos aportan una amplia gama de técnicas que permiten detectar patrones de comportamiento agregado sobre la información de los delitos acontecidos.

Uno de los principales beneficios que tiene el uso de los modelos matemáticos en el ámbito delictual, es el de proveer indicadores que pueden ser usados por quienes se encargan de diseñar y aplicar políticas anti-delictivas, ya que éstas estarían basadas en una sólida base matemática, que permite no sólo su justificación, sino que también la toma de decisiones óptimas a la hora de asignar los recursos.

Los delitos cometidos en la vía pública, tienen una gran relevancia, debido a que pueden afectar a cualquier persona que circule por una ciudad, lo que restringe su libertad de movimiento. Los hurtos y robos en la vía pública están entre los “Delitos

de Mayor Connotación Social”<sup>1</sup> en Chile, debido a su frecuencia y a su alto impacto en la percepción de seguridad de los ciudadanos.

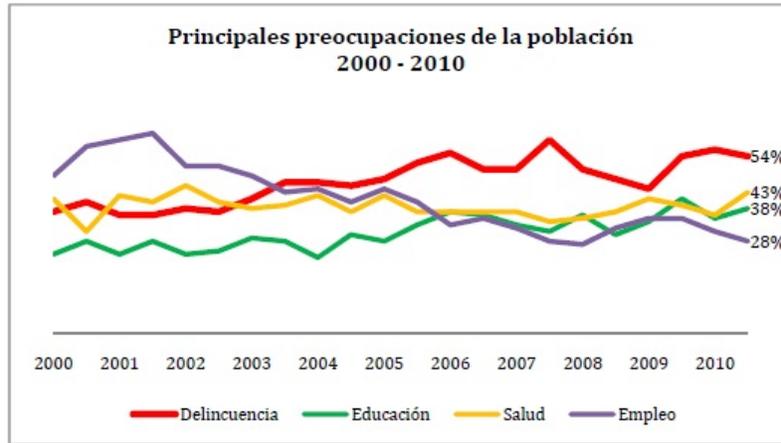


Figura 1.1: Principales preocupaciones de la población en Chile (2000-2010). Encuesta de opinión pública, Centro de Estudios Públicos.

Según la Constitución Política de Chile, Artículo N°101, Carabineros de Chile es una institución encargada de “*dar eficacia al derecho, garantizar el orden público y la seguridad pública interior*” [24]. Dentro de las acciones que realizan a diario está la vigilancia en la vía pública, especialmente, en los lugares más transitados, que suelen ser los más atractivos para los delincuentes, con el objetivo de reducir la cantidad de delitos cometidos en esos sectores. Sin embargo, no es claro que la reducción local de los delitos se traduzca en un descenso de la cifra total, ya que es muy probable que si un delincuente se ve imposibilitado de actuar en un lugar, se desplace hacia otro más propicio, o bien, espere a que los vigilantes dejen el lugar para cometer un delito. Por esta razón, sería de mucha utilidad para Carabineros conocer el real efecto que tiene su presencia en el comportamiento de los delincuentes.

Con este trabajo se pretende proveer una herramienta capaz de predecir la respuesta que los delincuentes tendrían ante las acciones policiales y otros tipos de políticas anti-delictivas, para que los encargados de tomar decisiones, lo hagan sobre una base bien fundamentada. La herramienta elegida para este propósito es el Modelamiento Basado en Agente y Simulación (ABMS), la cual es ideal para modelar sistemas sociales y económicos, ya que permite generar patrones globales a partir de reglas de comportamiento individual, tal y como ocurre en la realidad. Malleson (2010) considera que el modelamiento basado en agente es una técnica promisoriosa que

<sup>1</sup>Delitos de Mayor Connotación Social (DMCS): violación, homicidio, hurto, robo con fuerza, robo con violencia, robo por sorpresa, robo con intimidación y lesiones.

traslada la ciencia desde el estudio de lo agregado a lo individual [43]. La simulación de delitos puede ser una poderosa herramienta como sistema de soporte de decisiones, ya que permite evaluar, en un ambiente ficticio, la eficacia de una medida, antes de aplicarla en la realidad. De esta forma, es posible probar diversas estrategias y seleccionar la que genera los mejores resultados.

## 1.1. Objetivos

### 1.1.1. Objetivo General

El objetivo de este trabajo es desarrollar e implementar un modelo de simulación basado en agente para la generación de datos que permitan mejorar la comprensión del comportamiento delictivo y apoyar la toma de decisiones, en cuanto a la implementación de políticas anti-delictivas, mediante una herramienta computacional.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

1. Crear y desarrollar un modelo de simulación basado en agente que replique el comportamiento de los actores ligados al crimen.
2. Implementar un simulador de delincuencia, basado en el modelo anterior, que permita generar datos de delitos cometidos en la vía pública.
3. Validar el modelo, utilizando técnicas estándar diseñadas con este fin y datos reales de delincuencia, para obtener un modelo confiable.
4. Utilizar el simulador para estimar el efecto que tienen las acciones de la policía en el número de delitos cometidos y en su localización.

## 1.2. Metodología

Para el desarrollo de esta tesis, se realizó un trabajo estructurado en las siguientes etapas, enfocadas a conseguir los objetivos propuestos:

### 1. Revisión del estado del arte

Se revisaron los trabajos más relevantes relacionados con el comportamiento criminal, considerando tanto los que presentan enfoques cualitativos, como los

de criminología, sociología, psicología, entre otros. Además, se mencionan los trabajos previos relacionados con la aplicación de herramientas matemáticas, estadísticas y computacionales al fenómeno delictivo.

## 2. **Análisis de los datos disponibles**

Se cuenta con la información de las denuncias de delitos cometidos en el sector asignado a la Primera Comisaría de Santiago, en el periodo comprendido entre enero de 2001 y diciembre de 2004, la cual fue provista por Carabineros de Chile. La distribución de estos datos, así como los principales estadísticos obtenidos a partir de ellos, han sido considerados durante el desarrollo del modelo y utilizados en su proceso de validación y se encuentran en el Anexo A.

## 3. **Desarrollo del modelo basado en agente**

Se construyó un modelo basado en agente que representa el fenómeno del robo en la vía pública de una ciudad. Este modelo se basa en las reglas de comportamiento de cada uno de los actores ligados al crimen, las cuales provienen de la observación de su accionar rutinario.

Durante el desarrollo de este modelo se debió evaluar en varias ocasiones la conveniencia de agregar distintas aristas al comportamiento de los agentes, ya que, si bien, el hecho de darle más dimensiones a su actuar hace que el modelo sea más cercano a la realidad, esto requiere de un conocimiento preciso del comportamiento añadido y, además, le agrega una mayor complejidad del modelo, la cual se traduce en la necesidad de un mayor esfuerzo computacional y en una interpretación de resultados menos clara. Dado que esta es una primera versión de este modelo, en general, se optó por la simplicidad, dejando para futuras versiones la opción de agregar nuevas componentes que aporten a la comprensión del crimen. A pesar de esto, el modelo finalmente utilizado considera, al menos, las reglas de comportamiento mínimas necesarias para explicar el fenómeno criminal.

## 4. **Implementación del simulador**

El modelo desarrollado fue programado usando el lenguaje Java en la herramienta Repast Simphony®, un programa capaz de realizar simulaciones y, a la vez, visualizarlas a medida que se desarrollan. La simulación tiene como objetivo que el modelo cobre vida, para poder observar los patrones colectivos que se obtienen a partir de las reglas de comportamiento individual utilizadas en el desarrollo del modelo teórico.

El simulador obtenido es una herramienta flexible, que hace posible modificar fácilmente los parámetros de cada simulación, así como también permite que ésta se realice en cualquier ciudad, ya que ésta es también una de las entradas del modelo.

### 5. Análisis de los resultados y validación del modelo

El simulador fue testeado para seis ciudades distintas bajo un conjunto de reglas de comportamiento de sus agentes, así como también se evaluó la aplicación de algunas políticas anti-delictivas, con el objetivo de comparar los resultados y obtener una estimación de la efectividad de cada política.

Se efectuó una serie de análisis cuantitativos y geográficos, para evaluar tanto la cantidad, como la distribución de los delitos en cada escenario. Para estos análisis se utilizaron los softwares Microsoft Excel<sup>®</sup>, SPSS<sup>®</sup>, Grass GIS<sup>®</sup> y MatLab<sup>®</sup>.

Los resultados obtenidos han sido verificados mediante una serie de procesos de validación, detallados en la Sección 5.4, que permiten asegurar su confiabilidad y utilidad a la hora de aportar en la toma de decisiones, lo cual es un proceso de suma importancia para cualquier modelo de simulación, en particular en este caso, ya que de no realizarse, los datos obtenidos podrían ser distintos a lo que ocurre en la realidad y se podrían tomar decisiones erradas en base a ellos.

## 1.3. Alcances y Limitaciones

Como se mencionó en la Sección 1.1, el presente trabajo pretende implementar un simulador de delitos que ayude a mejorar la comprensión del comportamiento criminal y apoyar las decisiones de los encargados de implementar medidas anti-delictivas. Con este objetivo, se han definido algunos alcances y limitaciones para esta tesis.

### 1. Simplicidad

En primer lugar, se desarrolló un modelo relativamente simple, que sólo considera un conjunto reducido de posibles comportamientos para los agentes, suficiente para representar su accionar relacionado al crimen, con el objetivo de facilitar la interpretación de los resultados y evaluar solamente el efecto de los comportamientos generales como variables explicativas de éstos. Al mismo tiempo, esta simplicidad permite que cada simulación pueda ser ejecutada en un tiempo razonable, con lo que se hace posible realizar la evaluación de un número suficiente de escenarios para un buen análisis. A pesar de esto, el modelo es fácilmente adaptable a la inclusión de nuevas reglas de comportamiento y otros factores que, si bien le agregan complejidad, pueden ser útiles para explicar fenómenos que los resultados obtenidos en este trabajo no pueden.

Axelrod (2003) opina que cuando se obtienen resultados sorprendidos, es de mucha utilidad el poder entender todo lo que ocurrió en el modelo. Además,

la simplicidad ayuda a que otros investigadores puedan replicar y extender el trabajo en nuevas direcciones. Si bien el tema de investigación puede ser complejo, los supuestos del modelo basado en agente deben ser simples, ya que su complejidad debería estar en los resultados simulados y no en los supuestos del modelo [2].

## 2. Uso de Supuestos

Otro aspecto importante de este trabajo es el uso de los supuestos en el modelamiento del comportamiento de los agentes y de las interacciones entre ellos. Si bien, éstos se basan en la observación de patrones de comportamiento reales, no corresponden necesariamente a las motivaciones reales de los agentes y sería un error considerarlos como una verdad absoluta. Es fundamental, para la comprensión de este trabajo, interpretar su lógica de la siguiente manera:

*Dado un conjunto de reglas de comportamiento y de interacciones A, se obtiene un conjunto de patrones delictuales B.*

Lo anterior conlleva varias implicancias lógicas:

- El conjunto A puede ser ficticio, lo que permite simular escenarios del estilo “¿qué pasa si?”.
- El conjunto A puede ser falso, es decir, los agentes nunca se comportan de esa manera. En tal caso, los patrones obtenidos en B pueden ser inservibles.
- El conjunto de patrones B obtenido no es necesariamente exclusivo del conjunto A, y podría ser obtenido también por otro conjunto A’.
- Si el conjunto de patrones B fuese catalogado como falso, entonces, o bien, el conjunto A también es falso, o el modelo necesita incluir aspectos que han sido dejados fuera de los alcances de esta tesis.

Bratley et al. (1987) sostienen que la simulación nos permite hacer afirmaciones del tipo: “Tus costos serán C, si tomas la acción X”, pero no entrega respuestas como “El costo se minimiza si tomas la acción Y”, y que se necesitan repetidas simulaciones para identificar las buenas acciones o políticas [15].

## 3. Sólo 2 Tipos de Delitos

Un tercer alcance de este trabajo es el hecho de que se trabajó considerando sólo dos tipos de delitos cometidos en la vía pública:

- **Robo por Sorpresa:** “La apropiación de dinero u otras especies que los ofendidos lleven consigo, cuando se proceda por sorpresa o aparentando

*riñas en lugares de concurrencia o haciendo otras maniobras dirigidas a causar agolpamiento o confusión*". (Código Penal, Artículo 436) [22].

Este tipo de delito es popularmente conocido como **Lanzazo**, debido a que el accionar del delincuente es tan rápido como una lanza.

- **Robo con Violencia o Intimidación en las Personas:** "*El que sin la voluntad de su dueño y con ánimo de lucrarse se apropia cosa mueble ajena usando de violencia o intimidación en las personas*". (Código Penal, Artículo 432) [22].

En adelante se utilizará el término **Asalto** para referirse a este tipo de delito.

Con esto se dejan fuera del modelo delitos como: robo con fuerza en las cosas, robo de vehículos, lesiones, homicidios, daño a la propiedad pública y varios otros. La razón de esto es mantener la simplicidad del modelo limitando la modelación a dos tipos de delito comunes y con modos de actuar bien diferenciados.

## 1.4. Estructura del Trabajo

En el Capítulo 2, se presenta el estado del arte de las investigaciones desarrolladas a la fecha, en relación al crimen. En primer lugar, se resumen los factores más relevantes asociados al fenómeno criminal, desde un punto de vista general, incorporando enfoques sociológicos, psicológicos y geográficos. Luego, se hace una breve revisión de los modelos matemáticos que han sido utilizados para la comprensión del crimen, tanto estadísticos como geográficos y de simulación. Más adelante se describen los modelos basados en el agente, sus orígenes, sus más famosas aplicaciones y su potencial para el estudio de la delincuencia, así como el rol de la simulación en la investigación del crimen, usando este tipo de modelos. Finalmente, se hace referencia a la complejidad de enfrentar el problema usando modelos basados en el comportamiento desagregado de los individuos.

En el Capítulo 3, se hace una descripción más detallada del modelo desarrollado y utilizado en esta tesis. En primer lugar, se explican los principales supuestos y simplificaciones que se hicieron con respecto a la realidad, con el fin de obtener un modelo práctico y no extremadamente detallado. Luego, se describe el entorno de simulación, como la forma en la que se ha representado en el modelo el espacio físico donde ocurren los delitos. A continuación, se detallan las principales características de los agentes que forman parte del modelo y los personajes del mundo real a quienes representan. Finalmente, se presentan las reglas de comportamiento de cada uno de los agentes, según los distintos escenarios a los que se puede enfrentar.

En el Capítulo 4, se describe la forma en la que fue implementado este proyecto, presentando primero la herramienta computacional Repast Simphony®, utilizada para realizar las simulaciones. Luego, se muestran las herramientas de visualización en las que se presentan los resultados gráficos de este trabajo: GrassGIS® y MatLab®, las que permitieron su observación y análisis de una forma amigable. Además, se plantean los distintos escenarios que fueron simulados en este trabajo, describiendo sus características y principales diferencias, así como la finalidad con la que fueron considerados. Finalmente, se explican algunos aspectos que tienen en común todas las simulaciones realizadas, los cuales, en su mayoría, constituyen supuestos de carácter práctico, que permiten que las simulaciones se desarrollen en un tiempo razonable.

En el Capítulo 5, se presentan los resultados obtenidos para los diversos escenarios testeados para cada una de las ciudades a las que se les aplicó el modelo. Junto con estos resultados, se desarrollan algunos análisis de los mismos, incluyendo, análisis estadísticos globales y por variable, así como también, análisis espaciales cualitativos. Además, se realiza la validación de estos resultados, a través de la comparación con datos reales, análisis de sensibilidad de parámetros y de casos extremos, validación interna y visualización de la simulaciones.

En el Capítulo 6, se aluden las extensiones de este modelo, para ser aplicado en otras circunstancias, con otros tipos de delitos o con otros objetivos. En primer lugar, se presenta un modelo de asignación de recursos policiales basado en la teoría de juegos, el cual utilizó una variación del modelo de simulación desarrollado en esta tesis para ser testado en su versión estática, mientras que por otro lado, se basó en resultados del simulador original para la implementación de su versión dinámica, bajo una serie de supuestos propios de ese modelo. Además, se describe un modelo de robo en tiendas en un mall, en el que se identifican las primeras variables que pueden tener un efecto significativo en el fenómeno del *shoplifting*<sup>2</sup>.

Finalmente, el Capítulo 7 presenta las conclusiones obtenidas a partir de este trabajo, incluyendo lo descubierto a partir del análisis de los resultados, una crítica a la metodología propuesta en esta tesis, que consiste en aplicar este tipo de modelos al fenómeno criminal, y el trabajo futuro propuesto para extender este modelo y sus aplicaciones.

---

<sup>2</sup>Shoplifting es el nombre con que se conoce el “robo hormiga” en los países de habla inglesa.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

### 2.1. Introducción

Para el desarrollo de un modelo de simulación de la delincuencia confiable, es necesario tener una comprensión suficientemente amplia de este fenómeno, que incluya una visión multidisciplinaria, en la que cobran importancia la criminología, sociología, psicología, geografía, estadística y computación, entre otras. Sólo de esta manera es posible incorporar supuestos razonables y válidos sobre el comportamiento de los agentes o sobre el efecto que tienen entorno y las acciones policiales en ellos.

En este Capítulo se presentan los principales estudios relacionados con el crimen, mencionando el enfoque desde el cual fueron realizados. En la Sección 2.2 se hace una revisión de los principales estudios relacionados al crimen desde el punto de vista de la criminología, diferenciando aquéllos que lo analizan tanto desde la perspectiva del entorno como desde la del delincuente. La Sección 2.3 se centra en los estudios cuantitativos del crimen de mayor relevancia del último tiempo, donde destacan los estudios estadísticos y también los modelos de simulación. En la Sección 2.4 se introduce el concepto de modelo basado en agente con sus principales características, aplicaciones, ventajas y desventajas. La Subsección 2.4.3 es una breve introducción a la técnica de simulación como herramienta de investigación y de apoyo a la toma de decisiones. Finalmente, la Sección 2.5 explica la dificultad que existe en el modelamiento del comportamiento delictivo y las razones de ella.

## 2.2. Enfoque de Criminología

El crimen es un término que posee una amplitud muy grande, ya que abarca todo tipo de quebrantamiento de la ley. Esto implica que exista un sinnúmero de acciones que se catalogan como delitos, desde robos, lesiones y asesinatos, hasta estafas, evasión de impuestos y piratería. Esta tesis, sin embargo, se enfoca sólo en uno de ellos: el robo en la vía pública.

La criminología ofrece una amplia gama de estudios relacionados con el crimen, muchos de los cuales se centran en los robos y hurtos que ocurren en un ambiente urbano. La mayoría de ellos coincide en que un delito de este tipo necesita la concurrencia de un delincuente, un objetivo y un lugar. Paul y Patricia Brantingham (1981) describen las dimensiones del crimen, las que corresponden a cuatro componentes que deben converger para que un crimen exista. La primera que mencionan es la dimensión legal, ya que sin una ley que la prohíba, una acción no puede caracterizarse como un crimen. Esta dimensión concierne a abogados y sociólogos, quienes buscan, a través del ámbito legal, influir en el comportamiento de las personas. El delincuente es quien quebranta la ley y, por lo tanto, también es necesario para la existencia de un crimen. Los psicólogos, sociólogos y criminólogos abordan esta dimensión, en busca de las motivaciones que tienen las personas para cometer delitos. La tercera dimensión es el objetivo, o la víctima, que es el ente sobre el cual recae el delito. Esta dimensión es importante para los organismos de seguridad como la policía, ya que son los encargados de su protección, y para las personas en general, quienes pueden convertirse en víctimas de un crimen. Finalmente, la última dimensión es el lugar en el tiempo y el espacio en donde convergen las otras 3 dimensiones. La criminología ambiental se encarga del estudio de las características de los lugares y de los momentos donde ocurren los crímenes, de los factores que atraen tanto a los delincuentes como a las víctimas y del proceso de elección de los lugares en los cuales delinquir [9].

En esta Sección se presentan los principales estudios criminológicos enfocados tanto en el delincuente como en el lugar en que ocurre el delito, además de las principales teorías relacionadas al crimen que han surgido en el pasado siglo.

### 2.2.1. El Entorno

Actualmente, es bastante aceptado en la literatura que la componente espacial de la delincuencia es una dimensión de suma importancia para la comprensión de este fenómeno. Los primeros estudios de la época moderna que realizan un análisis geográfico del crimen son los de Quetelet (1831) y Guerry (1833), discutidos en la Sección 2.3.1. A pesar de que estos trabajos tenían una fuerte componente estadísti-

ca, lograron demostrar que la ubicación de los crímenes puede explicar mucho sobre su dinámica intrínseca [47].

Jeffery (1976) critica la poca atención que la criminología le había prestado hasta el momento al entorno físico en el cual ocurren los crímenes. Su trabajo se basa en modelos de comportamiento que incorporan el proceso de aprendizaje de las personas y su calidad de “animales sociales” para argumentar que el ambiente forma parte importante de este aprendizaje y que, por lo tanto, no puede excluirse del estudio de un proceso basado en el comportamiento humano como lo es el crimen [36].

Otro aspecto del entorno físico es la estructura de la ciudad, la que también juega un papel importante en la delincuencia. Brantingham y Brantingham (1981) propusieron un modelo teórico para analizar el crimen ocurrido en el espacio urbano, utilizando los conceptos de oportunidad y motivación, unidos con la movilidad y percepción del espacio por parte de los individuos. Una de las conclusiones de este estudio es que la ocurrencia de un delito no es el resultado directo de la motivación, sino que también depende de las oportunidades percibidas por el delincuente. Además, en este trabajo se argumenta que es posible predecir la distribución espacial del crimen, explorando la estructura urbana y la forma en que las personas interactúan con ella [9]. Otro estudio que incluye el diseño de la ciudad es el realizado por Beavon et al. (1994), quienes analizan la influencia que tiene el diseño de las calles en los crímenes contra la propiedad. El estudio se basa en la hipótesis de que el diseño vial influye en cómo se mueven las personas dentro de una ciudad y, como consecuencia de ello, tienen una mayor familiaridad con algunas zonas específicas. Los resultados muestran que el flujo de personas y la accesibilidad, medida como la cantidad de formas de llegar al lugar que la configuración de las calles permite, tienen una influencia significativa en este tipo de delitos [6].

Otro punto de vista utilizado es el de describir las zonas donde ocurren los delitos. Brantingham y Brantingham (1995) clasifican la ciudad en cuatro tipos de zonas: generadores de crimen, atractores de crimen, zonas neutrales al crimen y generadores de temor. Los generadores de crimen son áreas que atraen un gran número de personas por razones no relacionadas al crimen. En este tipo de lugares se generan las oportunidades propicias para que las personas que tienen suficiente nivel de motivación criminal, aunque no hayan ido al lugar con esa intención, las exploten y cometan un delito. Los atractores de crimen son áreas cuyas características tienen un gran atractivo para los delincuentes fuertemente motivados a cometer delitos, ya que saben que habrán buenas oportunidades para hacerlo. Las zonas neutrales son las que no atraen delincuentes ni generan grandes oportunidades para cometer delitos. Los generadores de temor son sectores en los cuales las personas perciben inseguridad, ya sea por la poca iluminación, desconocimiento de la zona, personas

extrañas, etc. Este temor tiene relación con la sensación de vulnerabilidad física y la falta de control sobre la situación [12]. Este enfoque es utilizado por los mismos Brantingham en su trabajo posterior: Brantingham y Brantingham (2003), en el que presentan un modelo conceptual para el anticipo del desplazamiento del crimen, en el cual se argumenta que los delincuentes que se mueven a otros lugares cuando se interviene una zona, lo hacen de una manera predecible. En el trabajo se utilizan los principios de la criminología ambiental para determinar la magnitud del desplazamiento de los delitos, así como su dirección más probable, dependiendo de las características de la zona intervenida, de la configuración vial del sector y del tipo de crimen en cuestión [13].

### 2.2.2. El Delincuente

Uno de los enfoques más clásicos en la criminología es el que se centra en el delincuente y las motivaciones que éste tiene para cometer delitos. Esta área por sí misma posee una gran riqueza proveniente del sinnúmero de posibles explicaciones para este fenómeno, que pasan por la psicología del delincuente y su proceso de toma de decisiones, la economía y la valoración de los costos y beneficios de delinquir y la sociología, entre otras disciplinas.

Una de las primeras teorías que logra combinar los aspectos espaciales y sociales del crimen es la teoría de la actividad rutinaria [23], desarrollada por Cohen y Felson (1979). Los autores sostienen que para que ocurra un crimen deben converger tres elementos: un objetivo, un delincuente y la ausencia de un guardián capaz. Además, se argumenta que la estructura social humana produce esta convergencia, facilitando las actividades ilegales entre las actividades legales que las personas realizan a diario. Malleon (2010) comenta que esta teoría se enfoca en el comportamiento de los individuos en vez de en los lugares y considera implícitamente la importancia espacio-temporal del crimen [43]. A pesar de su simpleza, esta teoría logra explicar diversos fenómenos delictuales, como el momento en que se cometen ciertos tipos de delitos. Por ejemplo, Chainey et al. (2004) encontraron un alto número de crímenes cometidos por jóvenes entre 11 y 14 años a las 4 pm, horario inmediatamente posterior a la salida de clases en las escuelas [17]. Más relacionado con esta tesis es el trabajo de Deakin (2007), quien encontró que el momento en que ocurre un delito depende del tipo de delincuente, por ejemplo, los robos a casas ocurren principalmente a la hora en que los padres llevan a sus hijos a la escuela, mientras que los robos en la vía pública ocurren mayoritariamente con luz de día [27].

Una segunda teoría sobre el crimen es la que presentan Brantingham y Brantingham (1981a), en la cual se intenta explicar cómo el contexto ambiental afecta el crimen. Este enfoque, conocido como la teoría de los patrones del crimen [10], es algo más

detallada que la teoría de la actividad rutinaria, ya que no se enfoca en aspectos de largo plazo como los cambios en los hábitos de las personas y la sociedad, sino en comportamientos y decisiones que las personas realizan a diario, como por ejemplo, la ruta que utilizan para ir al trabajo, y cómo esto se combina con otros factores para facilitar el crimen. Esta teoría sostiene que los ladrones no delinquen en lugares al azar, sino que prefieren hacerlo en los lugares más familiares, por donde más transitan y conocen mejor. Estos lugares, llamados nodos, y los caminos entre ellos, son de especial interés para esta teoría, ya que el conocimiento de ellos por parte de los delincuentes hace posible que, cuando se presentan oportunidades de crimen, se transformen en zonas con una alta tasa de delitos.

Clarke y Cornish (1985) proponen que el comportamiento criminal no debe ser visto como el resultado de disposiciones psicológicas y sociales a delinquir, sino como el resultado de un amplio proceso racional de toma de decisiones del delincuente. Según ellos, muchas teorías criminológicas tienden a ignorar el proceso de toma de decisiones y hacen prevalecer el determinismo a la hora de cometer delitos. Es necesario incorporar la perspectiva del delincuente, su visión del mundo y la información a la que tienen acceso para mejorar la comprensión del comportamiento criminal. Esta es otra de las teorías acerca del crimen conocida como la perspectiva de la elección racional [20], en la que se sostiene que el delincuente puede ser modelado como un agente tomador de decisiones en base al valor esperado de los beneficios obtenidos al intentar cometer un delito. Es importante notar que este valor esperado es el percibido por el individuo, dada su propia estimación de los beneficios y riesgos de delinquir, por esta razón se tiene un modelo bastante más enfocado en el individuo que los que admiten las teorías de actividad rutinaria y de los patrones del crimen. Más adelante Cornish y Clarke (1987) incorporan la teoría de la elección racional al análisis del fenómeno del desplazamiento del crimen. Ellos afirman que la perspectiva de elección racional en el crimen asume que los delincuentes buscan beneficiarse de su comportamiento criminal, sin embargo, estas elecciones están restringidas por el tiempo, las habilidades cognitivas del delincuente y su disponibilidad de información [21].

### **2.3. Modelos Matemáticos Aplicados al Estudio del Crimen**

Junto a los trabajos que observan la delincuencia desde la perspectiva de la criminología, en las últimas décadas ha surgido una vasta variedad de estudios cuantitativos del crimen, según Marris (2001) la literatura en modelamiento del crimen es “voluminosa” [44]. Esto puede deberse, en parte, a la mayor capacidad de almacena-

miento y análisis de datos que otorga la tecnología, así como también a la evidencia empírica que sugiere que existen patrones, tanto espaciales como temporales que vale la pena analizar. El enfoque de los estudios mencionados en esta Sección tiene un carácter más deductivo que los anteriores, ya que pretende investigar sobre la base de la evidencia empírica, los aspectos relevantes de la delincuencia.

Uno de los principales conceptos que se ha obtenido a partir de este tipo de estudios es el de los “hotspots de crimen”, los que corresponden a lugares con una alta concentración de delitos. Ratcliffe (2004) considera también la existencia de hotspots temporales, cuyas características, en conjunto con las de los hotspots espaciales, son relevantes a la hora de tomar decisiones estratégicas para asignar mejor los recursos policiales [51].

### 2.3.1. Modelos Estadísticos

Históricamente, los modelos cuantitativos del crimen han tenido el problema de la necesidad de una gran cantidad de datos y de capacidad suficiente para procesarlos, para obtener resultados importantes. Sin embargo, la tecnología y la formalización de instituciones encargadas de almacenar estos datos han permitido que en los últimos siglos estos estudios sean posibles. Quetelet (1831) fue uno de los pioneros en la introducción de técnicas cuantitativas al estudio del crimen. En su trabajo analizó la relación de algunos factores socio-demográficos con la localización física del crimen. Una de sus más importantes contribuciones es el concepto del hombre medio. Según él, el comportamiento humano obedece a una curva normal, debido a innumerables factores que afectan a cada individuo, sin embargo, como colectividad, éste sigue una ley bien definida [7]. También en el siglo XIX, Guerry (1833) analizó, desde un punto de vista estadístico y multivariado, la distribución espacial del crimen en Francia y realizó un análisis comparativo con la distribución encontrada en Inglaterra. Su ensayo de las “estadísticas morales” de Francia es uno de los primeros intentos por realizar estudios georreferenciales del crimen [33].

Durante el siglo XX, los métodos utilizados son numerosos y han ido cambiando con el tiempo, siendo muchos de ellos adaptaciones de métodos de otros campos de investigación. [43]. Los más comunes son el análisis de componentes principales (Giggs, 1970) [31], análisis de clusters (Brown et al., 1972) [16] y diversos tipos de regresiones (Baldwin y Bottoms, 1976a) [5].

Las técnicas del presente siglo se han centrado bastante en modelos de regresión, sin embargo, la gran desventaja de este tipo de técnicas es que abordan el crimen como un fenómeno agregado, no capturando la importancia de los eventos individuales, localizados en lugares y tiempos específicos e involucrando a personas individuales

[43]. Según Brantingham y Brantingham (1993), “*el modelo más productivo en criminología ambiental es aquél que logra unir los eventos criminales en un lugar, tiempo y situación específicos, con el individuo que los comete en un estado motivacional específico y en un contexto ambiental, que puede ser estable, regular y específico o puede ser irregular, cambiante e impredecible*” [11].

Grubestic y Mack (2008) utilizan varias técnicas estadísticas para integrar las componentes temporal y espacial de los delitos, las cuales han sido tratadas por separado en diversos estudios. Los tests de Knox y Jacquez’s k-NN ofrecen alternativas para formar clusters espacio-temporales del crimen, complementarias a los estudios que consideran por separado el tiempo y el lugar. Los autores encontraron que el robo, el robo a casas y los asaltos tienen patrones relativamente únicos y diferentes entre sí en la ciudad de Cincinnati [32]. Otro ejemplo reciente es el trabajo de Jofré (2011), en el que se analizaron los atributos del entorno que, según sugiere la literatura, tienen mayor influencia sobre el nivel de actividad delictual. En este trabajo se analizaron 18 atributos de la comuna de Santiago Centro y se utilizó un modelo de regresión logística sobre los datos otorgados por la Primera Comisaría de Santiago para estimar la magnitud del efecto que tienen estos atributos. Los resultados mostraron una relación positiva y significativa, con respecto al crimen, de los atributos: número de farmacias y presencia de paseos peatonales, seguidos en importancia por el número de comercio masivo y de bancos [37].

### 2.3.2. Modelos de Simulación

Los modelos de simulación son un gran aporte para el estudio del crimen, ya que permiten simular situaciones, que son riesgosas en la realidad, en un ambiente virtual sin comprometer la integridad de las personas, evitando los cuestionamientos éticos que esto traería [38]. De esta forma se pueden analizar casos extremos como los desarrollados en la Sección 5.4.5 y evaluar distintas estrategias y políticas anti-delictivas antes de ponerlas en la práctica, lo que permite anticipar posibles efectos no deseados como el desplazamiento de hotspots.

Los trabajos que aplican modelos de simulación al estudio del crimen son más bien recientes debido a la falta de capacidad de almacenamiento y procesamiento de datos que había hace algunas décadas, sin embargo, la explosión tecnológica ha permitido el desarrollo de este nuevo enfoque y ha abierto las puertas para el desarrollo de su potencial, especialmente en el modelamiento del comportamiento individual de las personas con modelos basados en agente. Uno de estos trabajos es el desarrollado por Winoto (2003), quien desarrolló un modelo basado en agente que utiliza la teoría de la elección racional, donde los agentes deciden si cometer o no un delito en base a las ganancias y pérdidas percibidas con él. Entre las conclusiones de este trabajo,

se encuentra que el aumentar la probabilidad de captura del delincuente no reduce significativamente las tasas de delincuencia y que la teoría de la elección racional sólo explica bien ciertos tipos de delitos económicos, como los delitos de “cuello blanco” [57].

Melo et al. (2005) desarrollaron un modelo que simula la reorganización física de los agentes, donde las rutas de patrullaje policial son la variable a analizar. Los resultados sugieren que la reorganización regular de las rutas policiales es beneficiosa en la reducción del número de delitos cometidos, sin embargo, no se consideraron los costos de reorganización, los cuales podrían hacer muy difícil que ésta ocurra con mucha frecuencia, por ejemplo, más de una vez por día, ya que el agente centralizado que dirige las fuerzas policiales debería considerar los costos y tiempos de traslado, así como la reducción en la efectividad por permanecer menos tiempo en cada punto [46].

Uno de los modelos de simulación más recientes es el de Short et al. (2008), quienes proponen un modelo de simulación de robo a casas sobre una grilla cuyas celdas tienen una atractividad variable, para estudiar las propiedades dinámicas de los hotspots. La atractividad de cada celda está formada por su atractivo intrínseco y la ocurrencia de delitos en las cercanías, lo que incorpora el fenómeno de “las ventanas rotas”<sup>1</sup> [56] al modelo. Los autores encontraron ciertas combinaciones de parámetros que llevan a algunas configuraciones de hotspots, como por ejemplo, hotspots localizados en grandes áreas, ciertas zonas más victimizadas y ausencia de hotspots [55].

Malleson et al. (2009) desarrollaron un modelo de simulación basado en agente para replicar el robo a casas en una ciudad ficticia, en el que se simulan tanto los factores humanos como los ambientales. En este modelo los delincuentes son liberados en la ciudad y, cuando aparece la necesidad, deciden dónde robar de acuerdo a los lugares que conocen debido al tránsito que realizan a diario según su rutina. Además, se incluyen las motivaciones de los delincuentes a través del enfoque PECS<sup>2</sup>, que considera las necesidades de dormir y de generar riqueza del delincuente para guiar sus actos. Entre los resultados más importantes se confirma la mayor efectividad de proteger barrios completos en lugar de casas en particular. Además, se obtuvo que la alta atractividad de ciertos barrios, en este caso el estudiantil, tiene un efecto no despreciable en las decisiones de los delincuentes, que es superior, por ejemplo, a la disuación por tener que recorrer una mayor distancia [42].

Furtado et al. (2009) desarrollaron un modelo bajo el concepto de sistema “bio-

---

<sup>1</sup>Resultados empíricos sugieren que los barrios que han sido robados anteriormente, tienen una mayor probabilidad de volver a serlo.

<sup>2</sup>PECS: Physical conditions, Emotional states, Cognitive capabilities and Social status (Condiciones físicas, estados emocionales, capacidades cognitivas y estatus social).

inspirado” de auto-organización, en el cual se utilizan algoritmos de optimización de colonias de hormigas para encontrar las preferencias de los delincuentes en cuanto a la selección de objetivos. En paralelo se utilizan algoritmos genéticos para la selección de “entradas” hacia los puntos de mayor concentración criminal, con el objetivo de servir como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones en cuanto a la vigilancia de estas entradas [30].

## 2.4. Modelos Basados en Agente

### 2.4.1. Introducción

Un modelo basado en agente es un modelo que representa un sistema como un conjunto de entidades autónomas y tomadoras de decisiones llamadas agentes, cada una de las cuales, individualmente, evalúa su situación y toma decisiones sobre la base de un conjunto de reglas [14].

Los modelos basados en agente corresponden a un nuevo enfoque de modelamiento que ha crecido en interés en los últimos diez años [39]. Este enfoque pretende modelar el sistema en estudio desde la perspectiva individual de cada uno de los agentes que participan en él, lo cual corresponde, precisamente, a la manera en que muchos sistemas se desarrollan. Este es el caso de los sistemas económicos, donde cada persona (o sociedad legal) toma las decisiones que le reportan la mayor utilidad posible, lo cual se traduce en patrones macroeconómicos, como el crecimiento, desempleo, inflación, etc. Otros sistemas que presentan estas características son los ecosistemas, donde los animales eligen donde ubicarse de tal forma que haya suficiente alimento y no demasiados depredadores, con lo cual se observan patrones de desplazamiento de las especies. Un tercer ejemplo de este tipo de sistemas son las interacciones sociales, donde los individuos son autónomos en la toma de decisiones y eligen las que les reportan mayor beneficio, lo cual genera los fenómenos sociales tales como el transporte, la contaminación, la economía y el crimen, entre otros.

Si bien, todos los ejemplos mencionados han sido estudiados de manera agregada, resulta lógico pensar que abordarlos desde la perspectiva individual permitiría obtener conclusiones más realistas, ya que se estaría reproduciendo el sistema del mismo modo en que ocurre en la realidad. Bonabeau (2002) afirma que “*en muchos casos ABM<sup>3</sup> es lo más natural para describir y simular un sistema compuesto por entidades “comportantes”. Si uno está tratando de describir la congestión vehicular, el mercado de acciones, los votantes, o cómo funciona una organización, ABM hace*

---

<sup>3</sup>ABM: Agent-Based Modeling (Modelamiento Basado en Agente).

que el modelo parezca más cercano a la realidad” [14]. Es por esto que el modelamiento basado en agente es una técnica plausible y promisorio para el estudio de este tipo de fenómenos.

Uno de los motivos por el cual este tipo de modelamiento ha ganado fuerza en la última década es el auge computacional, que permite realizar una cantidad de cálculos inimaginable hace unos cuantos años atrás. Este fenómeno ha hecho posible la aplicación de modelos cada vez más complejos en todas las áreas de investigación, abriendo una ventana al conocimiento oculto que dejan los modelos más simplistas. De esta manera, los sistemas que en la realidad son así de complejos, pueden ser modelados de forma fehaciente.

### 2.4.2. Conceptos Técnicos

Un modelo basado en agente, típicamente se compone de tres elementos fundamentales [41]:

1. Un conjunto de agentes
2. Un conjunto de relaciones entre agentes y formas de interacción
3. El entorno en el que viven los agentes

La definición del término “agente” no ha llegado aún a consenso en la comunidad científica, sin embargo, una descripción simple de lo que es un agente es la siguiente:

“Un agente es una unidad minimal capaz de tomar decisiones de manera autónoma, basadas en un conjunto de reglas de comportamiento y en su interacción con el entorno y con otros agentes”.

Las principales características de un agente según Macal y North (2010) [39, 41] son las siguientes:

- **Auto-contenido:** El agente es un individuo discreto e identificable fácilmente, con un conjunto de características, reglas de comportamiento y capacidad de tomar decisiones.
- **Autónomo:** El agente puede funcionar de manera independiente, es decir, basado sólo en sus reglas de comportamiento y su observación del entorno.
- **Social:** El agente tiene protocolos de comportamiento que rigen su interacción con los demás agentes.

Otras características que suelen tener los agentes, aunque no son imprescindibles, son, entre otros [39, 41]:

- **Adaptabilidad:** Capacidad de modificar sus propias reglas de comportamiento, basado en su experiencia.
- **Persecución de metas:** Criterio de medición de la efectividad de sus comportamientos actuales, para evaluar su posible modificación.
- **Heterogeneidad:** Los agentes pueden ser de diversos tipos y pueden tener distintas formas de comportarse o de interactuar.
- **Estado:** Conjunto de variables que describen la situación en la que se encuentra el agente.

### 2.4.3. Simulación

La simulación es otra de las técnicas que ha adquirido fuerza en los últimos años gracias al gran crecimiento de la capacidad de procesamiento de los computadores. Su aplicación es útil para diversos objetivos, tales como predicción, ejecución de tareas, entrenamiento, entretenimiento, educación, demostraciones y descubrimiento [2].

Axelrod (1997) cataloga a la simulación como “*una tercera forma de hacer ciencia*” [1], además de la deducción y la inducción. Luego continua: “*Como la deducción, comienza con un conjunto de supuestos explícitos. Pero, al contrario de la deducción, no demuestra teoremas. En vez de eso, una simulación genera datos que pueden ser analizados de forma inductiva. Al contrario de la inducción típica, sin embargo, los datos simulados vienen de un conjunto de reglas rigurosamente especificadas, en vez de medidas directas del mundo real. Mientras la inducción puede ser usada para encontrar patrones en los datos, y la deducción puede ser usada para encontrar consecuencias de los supuestos, los modelos de simulación pueden ser usados como un ayuda-intuición*” [1].

La gran ventaja que tiene la simulación por sobre la inducción y la deducción es su capacidad de modelar comportamiento tanto racional, como adaptativo. El comportamiento adaptativo es una alternativa a la racionalidad de los individuos que considera su proceso de aprendizaje y permite que sus comportamientos vayan cambiando a través del tiempo, de acuerdo a las circunstancias que enfrente. Según Axelrod (2003) cuando los agentes usan comportamiento adaptativo en lugar de estrategias optimizadoras, es usualmente imposible deducir las consecuencias, por lo que la simulación se hace necesaria [2].

La simulación es ideal para ser aplicada al modelamiento basado en agente, ya que se logran replicar las interacciones de los individuos entre ellos y con el entorno para emular fenómenos sociales a gran escala. Este enfoque es conocido en la literatura como “*bottom-up*” y puede capturar los procesos emergentes del sistema simulado, incorporando los comportamientos adaptativos de los agentes. De esta forma, la simulación puede lograr mejorar la comprensión de cómo estos comportamientos, que son relativamente simples, se traducen en fenómenos a gran escala cuya complejidad puede ser de grandes proporciones.

#### 2.4.4. Aplicaciones

El modelamiento basado en agente y la simulación han sido utilizados en una gran cantidad de áreas de investigación, incluyendo la física, la biología, la sociología y la gestión [41]. Algunas de sus aplicaciones más famosas se resumen a continuación:

##### **Autómatas Celulares**

Los autómatas celulares son sistemas dinámicos de tiempo y espacio discretos, representados por una grilla, en la cual cada celda tiene un número finito de estados posibles. El estado de cada celda es actualizado en cada periodo de acuerdo a una única regla de interacción básica y determinística [34].

Las primeras apariciones de autómatas celulares datan de finales de la década de 1940, siendo el pionero en dar a conocer este concepto John von Neumann, cuyo trabajo constituye el primer modelo aplicable de computación paralela masiva. Von Neumann pretendía imitar el comportamiento del cerebro humano para construir una máquina capaz de resolver problemas complejos. En particular, él visualizaba el concepto de una máquina capaz de replicarse a sí misma [18].

Quizás el ejemplo más conocido y más simple de un autómata celular es el juego de la vida (*Life*) desarrollado por John Conway en 1970. Este juego consiste en una grilla de dos dimensiones, cuyas celdas (o células) tienen dos posibles estados: viva y muerta y cuyas transiciones dependen del estado en el periodo anterior de las ocho celdas vecinas que rodean a la celda en cuestión. Las transiciones se describen a continuación:

- **Abandono:** Una célula viva con menos de 2 vecinas vivas muere por abandono.
- **Supervivencia:** Una célula viva con 2 ó 3 vecinas vivas continúa viva en la generación siguiente.

- **Sobrepoblación:** Una célula viva con más de 3 vecinas vivas muere por sobrepoblación.
- **Reproducción:** Una célula muerta con exactamente 3 vecinas vivas pasa a estar viva por reproducción.

La simpleza que poseen las reglas de este juego hace sorprendivos los patrones descubiertos por Conway a partir de él, ya que poseen una enorme riqueza que no había sido anticipada. La Figura 2.1 muestra algunos de estos patrones bautizados y clasificados según la forma que tienen y su movilidad sobre la grilla.

Según Bak et al., a pesar de su simpleza, las complejas dinámicas del juego son vagamente comprendidas [4]. Esta característica del juego se contrapone con la creencia de que una máquina sólo puede construir un objeto con menor complejidad que sí misma [18], sin embargo, este juego resulta ser un generador de complejidad y se ha sugerido su uso para replicar aspectos de emergencia de complejidad en la naturaleza [4].

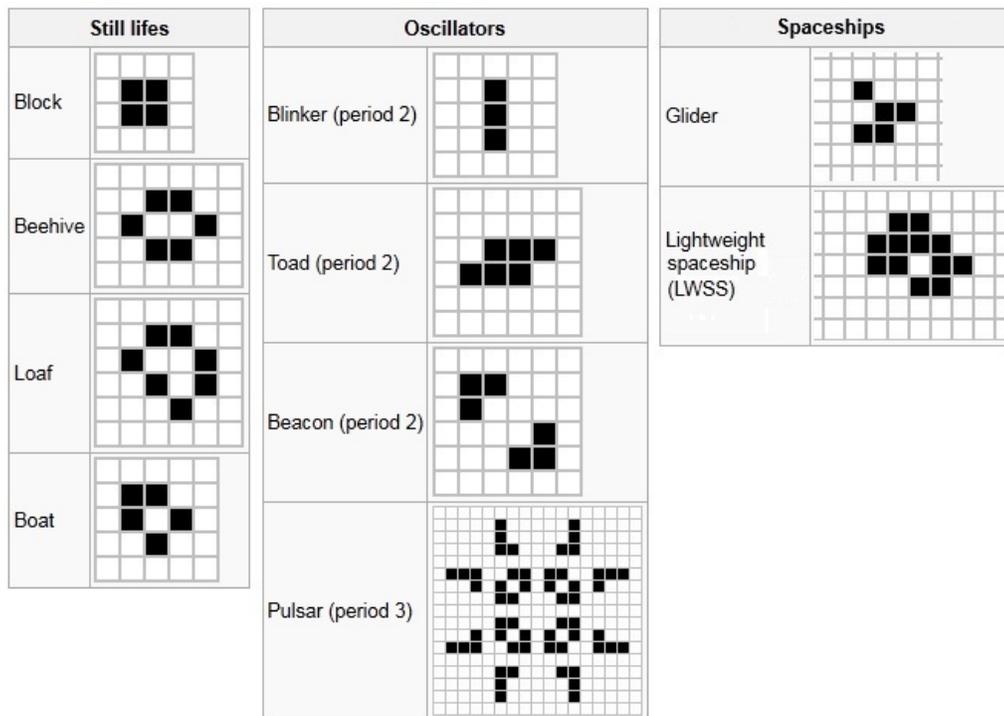


Figura 2.1: Patrones del juego de la vida.

## Modelo de Segregación Racial

Un segundo ejemplo de la utilización de modelos basados en agente es el modelo de segregación racial propuesto por Schelling (1971). Este modelo se desarrolla en una grilla de dos dimensiones que representa una ciudad, mientras que sus celdas son las casas o los lugares para vivir. Existen dos clases de personas, los que representan dos grupos en la sociedad, como por ejemplo grupos de distinta raza, religión, clase social, etc. Estas personas pueden sentirse insatisfechas si menos de cierto porcentaje de sus vecinos son de su misma clase, y en ese caso tienen la posibilidad de moverse al lugar más cercano que las haga sentir satisfechas, es decir, que tenga una cantidad suficiente de vecinos de su misma clase [54]. En cada paso de la simulación se elige al azar a un individuo insatisfecho y se le cambia a una celda desocupada que lo satisfaga. A medida que la simulación avanza los dos tipos de agentes se dividen en dos grupos claramente segregados y el número de individuos insatisfechos disminuye. El modelo muestra que la segregación emerge aún cuando los agentes se conforman con tener un porcentaje reducido de vecinos de la misma clase y que la segregación estricta emerge desapercibidamente [26].

La Figura 2.2 muestra los patrones encontrados utilizando el modelo de Schelling, tanto para los diversos porcentajes de tolerancia de la Figura 2.2a, como en distintos tiempos en la simulación, como se aprecia en la Figura 2.2b, donde los círculos pequeños representan a las personas insatisfechas.

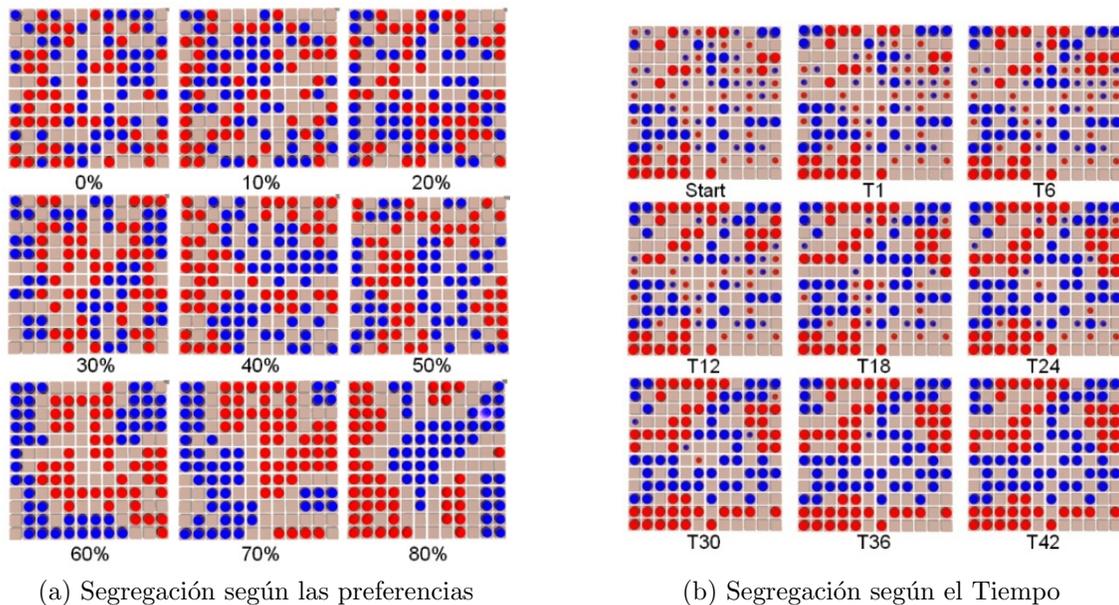


Figura 2.2: Patrones del modelo de segregación de Schelling.

## Modelo Depredador-Presa

El modelo depredador-presa replica la interacción que se produce entre dos especies, una de las cuales se alimenta de la otra. Ejemplos de estas especies son zorros y conejos, lobos y ovejas, tiburones y peces, etc. Alfred Lotka (1925) y Vito Volterra (1926), de forma independiente, describieron una primera versión de la ley Lotka-Volterra, la cual enuncia que “*cuando las poblaciones están involucradas en una retroalimentación negativa con otras especies, o incluso con componentes de su medio ambiente, es probable que se observe una dinámica oscilatoria (cíclica)*” [8]. Esta ley se refiere a la dependencia que tienen los tamaños de las poblaciones de ambas especies, ya que por ejemplo, al aumentar la cantidad de tiburones, la cantidad de peces disminuirá debido a que más de ellos son necesarios para alimentar a los tiburones. Cuando esto ocurre, la escasez de alimento produce una reducción en el número de tiburones y debido a esto, el número de peces vuelve a aumentar, volviendo a su tamaño original y comenzando nuevamente el ciclo. Notando este patrón, Lotka y Volterra modelaron este fenómeno utilizando ecuaciones diferenciales para describir el comportamiento de las poblaciones tanto del depredador como de la presa.

El fenómeno descrito puede ser modelado también utilizando modelos basados en agente, ya que el comportamiento de estos animales puede ser reducido a un conjunto pequeño de reglas simples. Por ejemplo, utilizando la interacción entre conejos y zorros, los conejos huyen si hay un zorro cerca, mientras que los zorros persiguen a los conejos si tienen hambre, además, ambas especies buscan a otros animales del mismo tipo para reproducirse. Con este tipo de reglas, Hawick et al. (2006) encontraron los patrones emergentes que aparecen en la Figura 2.3, a los cuales llamaron “organismos macroscópicos” e identificaron cuatro tipos: [35].

- **Olas:** Delgados frentes de onda de animales que parecen moverse de una forma coordinada.
- **Manchas:** Agrupamientos densos de animales, particularmente conejos.
- **Curvas Espirales:** Delicadas estructuras giratorias de animales.
- **Clusters:** Híbridos que fácilmente pueden convertirse en cualquiera de las otras formas.

### 2.4.5. Crítica a los Modelos Basados en Agente

En esta tesis se utiliza un modelo basado en agente para el estudio del robo en la vía pública, sin embargo, es necesario ver esta herramienta a través de un ojo crítico

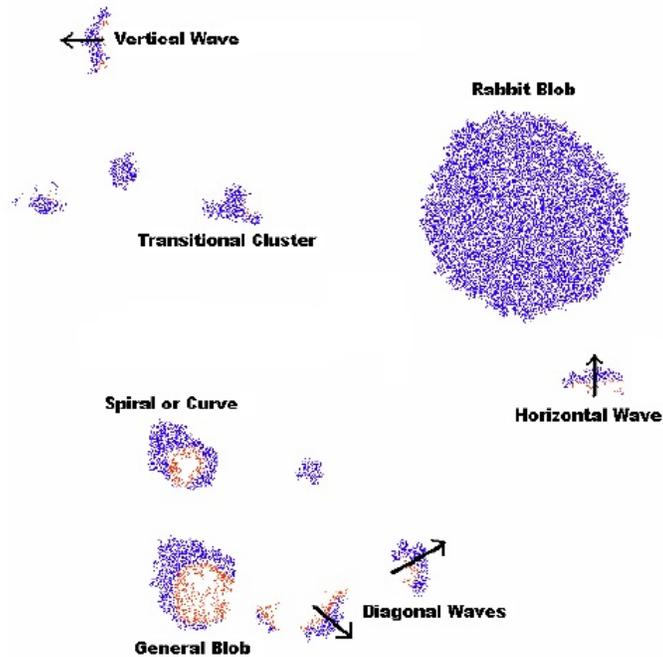


Figura 2.3: Patrones en el modelo depredador-presa.

que permita analizar sus ventajas y desventajas para así evitar obtener conclusiones equivocadas y lograr una mejor interpretación de los resultados obtenidos en ella.

Bonabeau (2002) clasifica las ventajas de los modelos basados en agente en tres aspectos fundamentales [14]:

**Captura fenómenos emergentes:** En la Subsección 2.4.3 se comentó la existencia de los fenómenos emergentes y de cómo el enfoque “*bottom-up*” puede ser capaz de capturarlos sin anticipar su existencia. Por definición, estos fenómenos no pueden ser reducidos a las partes del sistema, en otras palabras, no existen características a nivel individual que puedan explicar el fenómeno global. Según Bonabeau (2002), el modelamiento basado en agentes es el enfoque canónico para modelar fenómenos emergentes [14].

**Provee una descripción natural del sistema:** La ventaja más notoria de los modelos basados en agente es la naturalidad con la que son capaces de describir un sistema compuesto de entidades con comportamiento, ya que muchos fenómenos de la vida real son interacciones entre personas que poseen una forma de actuar particular y, a la vez, afectan a las demás y son afectadas por ellas. Existen muchos ejemplos de fenómenos sociales que pueden ser mo-

delados usando ABM, uno de ellos es el crimen, ya que la manera en que se comportan las personas es un aspecto fundamental de este fenómeno.

**Es flexible:** Otra ventaja de este tipo de modelos es que permiten manejar fácilmente la complejidad que se les desea incorporar. En otras palabras, este tipo de modelos puede ser tan complejo (o tan sencillo) como el modelador lo desee, lo cual se puede lograr variando la cantidad de agentes, los posibles comportamientos e interacciones de éstos y la complejidad de los mismos.

Si bien algunos autores sostienen que el modelamiento basado en agentes es el enfoque más apropiado para modelar sistemas sociales, existen algunos aspectos que dificultan su uso y deben ser considerados [43]:

**El comportamiento humano puede no ser racional:** Los modelos basados en agente requieren que todos los comportamientos individuales posibles sean programados explícitamente, aún cuando tengan una componente aleatoria. Sin embargo, en la realidad, las personas pueden presentar comportamiento irracional, elecciones subjetivas y psicología compleja [14] (ver Sección 2.5). Este tipo de comportamiento dificulta el modelamiento de las personas como agentes racionales y pueden hacer imposible la justificación de fenómenos reales a través de ABM.

**Requiere de una validación de sus resultados:** La confiabilidad de los resultados de un modelo de simulación es algo que no puede garantizarse simplemente alabando la bondad de sus supuestos y su parecido al fenómeno real. Este es un problema que enfrentan quienes deben tomar decisiones a partir de los resultados de un modelo de simulación y quienes se ven afectados por aquellas decisiones [52]. La validación de los resultados obtenidos a partir de un modelo de simulación se hace sumamente necesaria para dar respaldo a las conclusiones obtenidas a partir de él y así evitar que las decisiones tomadas en base a ellos sean equivocadas.

**Errores de programación pueden tener gran impacto:** Así como un ABM tiene facilidad para capturar fenómenos emergentes, lo mismo puede ocurrir con pequeños errores, ya sean conceptuales o de programación del modelo. Un pequeño desperfecto en el comportamiento de los individuos puede llegar a tener un efecto considerable en los resultados y, peor aún, puede llegar a confundirse con un fenómeno emergente en el caso de no detectarse el error que lo originó.

**ABM aún es computacionalmente costoso:** A pesar de que la tecnología ha aumentado en capacidad y velocidad de procesamiento, el ABM requiere replicar el comportamiento de (potencialmente) muchos agentes [14], por lo que

la menor complejidad extra en este comportamiento puede hacer necesaria un inmenso número de cálculos, siendo necesaria una gran cantidad de tiempo para obtener resultados, lo cual a veces es impracticable.

## 2.5. Complejidad al Modelar el Crimen

La delincuencia es un problema social que ha existido durante siglos y que ha atormentado a casi todas las civilizaciones durante la historia. La persistencia de este problema es una consecuencia clara de su complejidad, ya que, de existir una solución realista para este problema, ya se hubiese erradicado en algunos lugares. La complejidad del fenómeno delictual no sólo consiste en la dificultad de combatirlo de manera global, sino que también, es difícil evadirlo a nivel individual y, además, es sumamente complicado predecir dónde, cuándo y cómo ocurrirá un delito, y también predecir quién y por qué lo cometerá.

El comportamiento humano y los sistemas sociales, suelen ser extremadamente complicados debido a que no siempre se utiliza la racionalidad en la toma de decisiones. Algunos ejemplos de comportamiento irracional los entrega la teoría de juegos, en la que algunos experimentos con personas muestran que ellas, en promedio, no eligen la estrategia que les da un mayor beneficio esperado, por ejemplo en el juego del cienpiés, el juego del ultimátum o el juego de la gallina. McKelvey (1992) experimenta con el juego del cienpiés y a partir de sus resultados comenta que al ver el juego como uno de información completa, todos los conceptos de equilibrio teórico de la teoría de juegos predicen que el primer jugador debería llevarse el pozo en la primera ronda, sin embargo, esto no ocurre [45]. Este tipo de factores blandos dificultan la calibración, cuantificación y a veces la justificación del actuar humano [14], por lo que éste se hace, en algunos casos, impredecible.

El reduccionismo es la idea de que un sistema puede ser entendido examinando sus componentes individuales [29]. Sin embargo este enfoque queda obsoleto cuando se tienen sistemas altamente complejos, como los sociales, en los que ninguna característica explícita de los individuos ni de sus interacciones pueden explicar los patrones de comportamiento agregado que se producen. Anderson (1972) sostiene que la habilidad de descomponer un sistema en sus componentes no significa necesariamente que pueda ser reconstruido a partir de esas partes [3]. Esto significa que aunque un sistema complejo esté constituido por un gran número de partes relativamente simples y con interacciones simples, no está garantizado que se pueda comprender ni anticipar el estado del sistema en un futuro medianamente lejano.

La teoría del caos se encarga de estudiar sistemas que son determinísticos pero altamente dependientes de las condiciones iniciales. La implicancia directa de esto

es que, en este tipo de sistemas, es relativamente fácil predecir su estado en el corto plazo con mucha precisión, sin embargo, se hace imposible la predicción en el mediano y largo plazo. Según Flake (1998) el caos puede encontrarse cuando sistemas no lineales son iterados repetidamente, pero también en sistemas complejos multi-agentes como ecosistemas, la economía y estructuras sociales [29].

Es por esta razón que la delincuencia se debe tratar como un fenómeno caótico que debe estudiarse cuidadosamente, sin caer en las trampas que sugiere el comportamiento racional para, de esta forma, tener la capacidad de interpretar correctamente los resultados de los modelos utilizados.

# Capítulo 3

## Descripción del Modelo

### Índice

---

1.1. Objetivos . . . . .	3
1.2. Metodología . . . . .	3
1.3. Alcances y Limitaciones . . . . .	5
1.4. Estructura del Trabajo . . . . .	7

---

### 3.1. Introducción

En el Capítulo 2 se ha realizado un breve recorrido por los diversos estudios que se han realizado sobre el crimen y por los distintos enfoques y técnicas que se han utilizado. En este Capítulo, se procede a describir el modelo basado en agente desarrollado en este trabajo y utilizado para las posteriores simulaciones que se detallarán en el Capítulo 4. Para esto, se analizan las tres principales componentes de este modelo: el entorno, los agentes y sus reglas de comportamiento.

En primer lugar, la Sección 3.2 presenta los principales supuestos que se utilizaron durante el desarrollo de esta tesis. La Sección 3.3 describe el entorno donde se llevan a cabo las simulaciones, explicando los parámetros relacionados a la ciudad, las restricciones físicas y atributos de cada sector del terreno. La descripción de los agentes se encuentra en la Sección 3.4 y en ella se explican las características de las distintas clases de agentes que existen en el modelo, sus atributos y los actores del mundo real a los que representan. Por último, en la Sección 3.5 se presenta una revisión detallada de las reglas que rigen el comportamiento de los agentes en este modelo, así como las interacciones con el entorno y con los demás agentes.

## 3.2. Principales Supuestos

Como ya se ha mencionado en la Sección 1.3, durante el desarrollo de este modelo ha sido necesario hacer una serie de supuestos para mantener su simplicidad y la facilidad de interpretar los resultados, así como mejorar el rendimiento computacional para obtener resultados en un tiempo razonable.

Los supuestos que se mencionan a continuación han sido adoptados para todas las instancias evaluadas y no son variables analizadas en este trabajo. Esto no significa que sean supuestos irrefutables, sino que sólo se adoptan como base para el estudio de las demás variables, ante la imposibilidad de analizar un sinnúmero de variables por separado.

El primer supuesto adoptado es la unidad temporal, la cual se fija en 1 minuto por tick de simulación, ya que se estima que son pocos los comportamientos delictuales relevantes que se pueden realizar en menos de ese tiempo. Por otro lado, una unidad mayor, puede hacer que se pierda la continuidad de los desplazamientos de los agentes, ya que en el transcurso de 5 minutos, por ejemplo, una persona puede haberse desplazado una distancia considerable.

Relacionado con lo anterior, el segundo supuesto corresponde a la velocidad de los agentes, la cual corresponde a una variable aleatoria uniformemente distribuida entre 0.5 y 1.5 celdas por tick. Más formalmente, la velocidad del agente  $i$  está dada por  $v_i = U_i(0,5, 1,5)$ . Los únicos agentes que tienen una velocidad distinta son los que representan vehículos de la policía, los cuales se mueven a una velocidad dada por  $v_i = U_i(0,5, 4,5)$  celdas por tick.

Otro supuesto de este modelo es que todos los agentes tienen asignada una ruta, la cual corresponde a un conjunto ordenado de lugares por visitar. El comportamiento base de cada agente es el de seguir esta ruta y para el caso de los ciudadanos y los policías es el único. Para el caso de los delincuentes, si bien, también siguen una ruta determinada, al momento de alcanzar uno de los destinos, se quedan cerca de él buscando oportunidades para delinquir.

La policía tiene un papel exclusivamente preventivo y no punitivo, es decir, su acción se basa en la vigilancia de un sector para reducir la probabilidad de que ocurran delitos y no en la persecución de los ladrones que hayan cometido alguno. Por esta razón, la policía se limita a recorrer la ruta que se le asigna sin ningún desvío.

Existe un parámetro que regula la tasa de aparición de agentes en el modelo, este es distinto para cada periodo del día y para cada tipo de agente, así como también difiere si se trata de un día de semana o de un fin de semana. Además, cada tipo de edificio tiene una tasa propia de generación que también depende de la hora del

día. La combinación de estos parámetros produce un efecto que replica el número de personas que hay en el modelo en cada momento, el cual, como es de esperarse, es bajo durante las horas de la madrugada y alcanza su valor más alto durante la tarde.

### 3.3. El Entorno

El modelo está diseñado para ser ejecutado sobre la representación de una ciudad, ya sea ficticia o basada en una ciudad real. Esta representación corresponde a una grilla bidimensional donde cada celda representa un pedazo de terreno de la ciudad real. Las dimensiones que cada una de estas celdas representa en la realidad pueden variar, sin embargo, se debe considerar que ésta será la unidad geográfica atómica para el modelo y, por lo tanto, debe ser lo suficientemente detallada para describir bien los fenómenos locales asociados al crimen, pero no tan pequeña, para capturar sólo los eventos relevantes y evitar que el problema crezca en demasía.

La ciudad se divide, principalmente, en dos tipos de terreno: la vía pública y los recintos privados, donde la principal diferencia es que los agentes pueden transitar en la vía pública, pero no pueden entrar a los recintos privados. La vía pública se interpreta como las calles, paseos peatonales, parques y plazas, mientras que los recintos privados representan casas, edificios, comercio y centros educacionales, entre otros.

Este diseño obliga a que los agentes se muevan sólo a través de las calles y parques, tal como lo hacen las personas en las ciudades de verdad, generando patrones de desplazamiento realistas, algunos de los cuales pueden influir en las decisiones relativas al crimen.

Para que el movimiento de los agentes tenga sentido, es necesario que en la ciudad existan lugares de interés, entre los cuales los agentes se trasladen. Para representar esto, el modelo considera seis tipos de “edificios”, con los cuales se llenan los recintos privados: residencias, comercio, bancos, oficinas, establecimientos educacionales y accesos al transporte público, los que se describen a continuación:

- **Residencias:** Son los lugares donde viven los agentes y consideran casas, hoteles, edificios de departamentos, etc.
- **Comercio:** Representa todos los lugares donde se realizan transacciones comerciales, como tiendas, ferias, malls, supermercados, etc.
- **Bancos:** Han sido separados del comercio debido a que suelen ser atractores de crimen [12]. Para el modelo no son sólo sucursales bancarias, sino que además,

representan cajeros automáticos, sucursales de AFP, isapres, compañías de seguros, etc.

- **Oficinas:** Son los lugares de trabajo de las personas y, por lo tanto, no sólo corresponden a oficinas como tal, sino que también pueden representar hospitales, centros comerciales, lugares de servicio público, entre muchos otros.
- **Establecimientos Educativos:** Son los lugares destinados al estudio, los cuales se dividen en universidades, escuelas, liceos, CFT<sup>1</sup>, IP<sup>2</sup>, etc.
- **Accesos al Transporte Público:** Consideran paraderos de buses, accesos al Metro, terminales de buses y de trenes, etc.

Para representar la entrada y salida de las personas en los recintos privados, cada una de las instalaciones tienen la capacidad de generar y atraer agentes. La generación de agentes está determinada por el tipo de instalación y la hora del día, mientras que su atracción, por el atractivo que tenga para cada tipo de agente.

Como en toda ciudad real, existen lugares en donde hay un mayor tránsito de personas que en otros, debido a la presencia de lugares de interés, cercanía de los accesos al transporte, concentración de comercio o de fuentes de trabajo. El modelo considera este fenómeno, utilizando una función de atractividad, la cual, en cada lugar de la ciudad, asigna un valor de atractivo que depende de las instalaciones cercanas. Esto produce, indirectamente, que existan algunas zonas con un mayor tránsito que otras, no solamente las que tienen mayor atractividad, sino que también los lugares que sirven como tránsito hacia esas zonas.

### 3.4. Los Agentes

Se han considerado tres clases principales de agentes para este modelo, los cuales son los principales actores en el fenómeno delictivo: el ciudadano, el delincuente y el policía. El ciudadano se mueve por la ciudad según su comportamiento rutinario, mientras juega el papel de potencial víctima de los crímenes que pueden ocurrir. Los delincuentes siguen una rutina diferente a la de los ciudadanos y son los agentes que cometen los delitos. La policía es la encargada de patrullar la ciudad y su presencia puede disuadir un crimen que está por cometerse.

Los agentes, en general, tienen como principales atributos sus rutas, radio de visión y velocidad de desplazamiento. La información personal de los agentes no se ha

---

<sup>1</sup>CFT: Centros de Formación Técnica.

<sup>2</sup>IP: Institutos Profesionales.

considerado para caracterizarlos, ya que éstos juegan un papel anónimo en el modelo, siendo indistinguibles entre sí los agentes de un mismo tipo.

Una ruta está definida como un conjunto ordenado de instalaciones, las cuales el agente debe visitar. Durante la simulación, un agente en movimiento se dirige hacia el próximo destino en su ruta, a menos que se encuentre en una acción ligada al crimen, como por ejemplo, persiguiendo a una víctima o huyendo de un delincuente o de un policía.

El radio de visión de los agentes corresponde a la distancia dentro de la cual un agente puede detectar la presencia de los demás. Este valor juega un rol fundamental para la toma de decisiones de los agentes, las cuales dependen del entorno cercano.

La velocidad de desplazamiento corresponde a la distancia que recorre un agente en cada “tick” de simulación y está dada por una distribución aleatoria uniforme. Los únicos agentes con una velocidad considerablemente mayor al resto son los policías motorizados, con lo que se supone que todos los demás agentes se desplazan a pie.

El detalle de cada una de las clases de agentes se describe a continuación:

### 3.4.1. Ciudadanos

Los ciudadanos son las personas comunes y honradas que habitan la ciudad sin cometer delitos. Su participación en el modelo consiste en recorrer la ciudad, siguiendo la ruta que se les asigna, convirtiéndose en las potenciales víctimas de los delitos. Una vez que el ciudadano alcanza el último destino de su ruta, éste abandona el modelo.

La ruta que se le asigna a cada ciudadano es aleatoria, tanto en sus destinos como en la cantidad de ellos. Sin embargo, las instalaciones tienen distintas probabilidades de aparecer en estas rutas, las cuales dependen de lo atractivas que sean para cada tipo de ciudadano. Esto representa el fenómeno observable en una ciudad real, en la que existen zonas con una gran afluencia de personas, debido a la concentración de lugares de alto interés.

Se han definido tres tipos de ciudadanos:

- **Transeúntes:** Los transeúntes representan a las personas que recorren varios lugares, ya sea vitrineando o cotizando el mejor precio de lo que desean comprar. También representan a las personas que salen de paseo, como por ejemplo, los turistas. El hecho de que visiten más lugares, los hace pasar más tiempo dentro del modelo y, por lo tanto, quedan más expuestos a ser víctimas de delitos.

- **Trabajadores:** Los trabajadores, a diferencia de los transeúntes, sólo visitan unos pocos destinos antes de salir del modelo, ya que en general, van hacia (o vienen desde) su lugar de trabajo, por lo que sus desplazamientos son algo más rápidos, ya que tienen menos distracciones. Esto hace que su participación dentro del modelo sea más breve y su exposición a los delitos sea menor.
- **Estudiantes:** Los estudiantes tienen un comportamiento intermedio en relación a los otros ciudadanos, ya que a veces van directamente a sus lugares de estudio y otras veces visitan varios lugares antes de volver a sus hogares. Esto representa los distintos comportamientos que los estudiantes pueden mostrar antes y después de clases.

### 3.4.2. Delincuentes

Los delincuentes son los protagonistas del modelo, ya que son los encargados de cometer los delitos. Una vez que toman posición en algún lugar de la ciudad, se dedican a buscar la oportunidad de hacerlo, ya sea siguiendo a una potencial víctima o esperando en un lugar hasta que un ciudadano se acerque.

A los delincuentes se les asigna una ruta en la que, a diferencia de los ciudadanos, se pueden quedar en las cercanías de cada punto de destino y dedicarse a cometer delitos. Esto ocurre hasta que completan una cierta cantidad de delitos, que depende del tipo de delincuente. Cuando esto sucede, se trasladan hacia el siguiente destino en su ruta y repiten el procedimiento. Esto representa a los delincuentes que cambian de posición una vez que han cometido varios delitos, debido a que así disminuyen el riesgo de ser reconocidos y/o capturados.

Las rutas de los delincuentes son elegidas aleatoriamente, considerando la atraktividad de los lugares para ellos, la cual no es la misma atraktividad que para los ciudadanos. La atraktividad para los delincuentes, además de considerar las instalaciones del lugar, toma en cuenta la cantidad de personas que circula por esa zona y la vigilancia de la policía.

Los delincuentes presentan un comportamiento cauto ante la presencia de la autoridad. Esto se manifiesta al huir de la policía cuando la zona en donde pretenden delinquir está siendo vigilada. Además, la presencia policial afecta el proceso de decisión en cuanto a cometer o no un delito, reduciendo la probabilidad de que éste ocurra.

La decisión de cometer un delito se toma en base a una probabilidad, la cual depende del número de ciudadanos y de policías cercanos al delinciente. Claramente, el número de policías reduce esta probabilidad, sin embargo, el efecto de una mayor

cantidad de ciudadanos cerca es distinto para cada tipo de delincuente.

Se han considerado dos tipos de delincuentes:

- **Lanzas:** La palabra *lanza* es un término popular usado en Chile para nombrar a quienes cometen el delito “Robo por Sorpresa” (Código Penal, Artículo 436) [22], que consiste en robar a la víctima un objeto de valor y huir corriendo rápidamente, confundiendo con la multitud. En el modelo, los lanzas buscan posicionarse en lugares muy poblados para poder realizar los robos por sorpresa, por lo que, tanto la atractividad de un lugar como la probabilidad de cometer un delito, aumentan cuando hay un mayor tránsito de personas. Este tipo de delincuente no necesita huir de la policía, ya que mientras no cometa un delito, puede permanecer camuflado entre los ciudadanos.
- **Asaltantes:** Los asaltantes son los delincuentes que cometen el delito conocido como “Robo con Violencia” (Código Penal, Artículo 432) [22], en el cual están involucradas la violencia y/o la intimidación. En el modelo, los asaltantes buscan lugares poco poblados en los cuales puedan cometer un delito sin testigos, luego del cual, cambian su posición inmediatamente, debido a la alta posibilidad de ser denunciados, lo que podría llevarlos a ser capturados. Tanto la atractividad de un lugar como la probabilidad de cometer un delito en él disminuyen al aumentar la cantidad de personas en las cercanías. Además, la presencia policial reduce mucho la probabilidad de que se cometa este tipo de delitos y produce la huída del asaltante.

### 3.4.3. Policía

Los policías son los agentes encargados de prevenir que se produzcan delitos, lo que se logra patrullando la vía pública y cubriendo la mayor cantidad de territorio posible, ya que su presencia disuade parcialmente a los delincuentes de cometer delitos. Su accionar en este modelo se restringe completamente a prevenir delitos y no a capturar a los responsables, razón por la cual, no persiguen a delincuentes que han cometido delitos, ni se desvían de sus rutas de patrullaje.

Los policías permanecen en el modelo durante toda la simulación, lo cual se justifica debido a que si bien, no es posible tener a un oficial patrullando todo el día, éste se puede reemplazar por un relevo equivalente y con las mismas características, ya que los agentes de un mismo tipo son indistinguibles entre sí, como ya se había mencionado.

Las rutas asignadas para el patrullaje de la policía son cíclicas, por lo que, una vez que llegan al último destino, vuelven a comenzar la ronda. Estas rutas son aleatorias,

pero se mantienen dentro de cierto radio de acción en torno a su primer destino, el cual depende del tipo de policía.

Existen tres tipos de Policías:

- **Caminante:** Los caminantes representan a los oficiales que patrullan a pie, los que, generalmente, lo hacen en parejas, sin embargo, para efectos del modelo, una pareja de oficiales puede ser representada por un único agente. A los caminantes se les asignan rutas en las que los destinos a visitar están relativamente cerca entre sí, por lo que no deben recorrer largas distancias a pie y pueden volver a pasar por un mismo lugar con relativa frecuencia.
- **Motorizado:** Los motorizados son oficiales que patrullan en vehículos, tales como motocicletas, automóviles o furgones. Las rutas asignadas a estos policías son más extensas que las de los caminantes, sin embargo, su velocidad de desplazamiento es mayor, por lo que aún pueden mantener una cierta frecuencia de patrullaje.
- **Vigilante:** Los vigilantes son oficiales destinados a permanecer quietos en un lugar y vigilar esa zona. Son los únicos agentes estáticos del modelo, razón por la cual, no tienen rutas asignadas. Pueden representar, puestos de vigilancia, cuarteles policiales o guardias estáticos.

### 3.5. Reglas de Comportamiento

Una vez definido el entorno de simulación y los agentes que participarán en ella, el siguiente paso es describir la forma en que interactúan estos agentes y las reglas de comportamiento que siguen durante la simulación. Para ello, es necesario simplificar el comportamiento de las personas a unos cuantos procesos básicos de decisión, lo que constituye uno de los supuestos más fuertes de este modelo.

Las decisiones que toman los agentes en este modelo dependen exclusivamente de sus atributos y del entorno cercano a ellos, es decir, sus decisiones sólo se verán afectadas por lo que ocurra en un cierto radio de distancia en torno a la posición de cada agente. Cada clase de agente tiene sus propias reglas de comportamiento, mientras que los tipos de agente dentro de una misma clase siguen las mismas reglas, pero usando distintos parámetros.

Los ciudadanos tienen el proceso de decisión más simple, ya que ellos se limitan a recorrer sus rutas, visitando sus lugares de destino. En cada instante de la simulación, ellos avanzan hacia su próximo destino, hasta que, al llegar al final de la ruta,

abandonan la simulación. Este comportamiento se mantiene, a menos que el ciudadano sea víctima de un delito, en cuyo caso abandonará el modelo inmediatamente. La Figura 3.1 muestra el esquema del comportamiento de los ciudadanos.

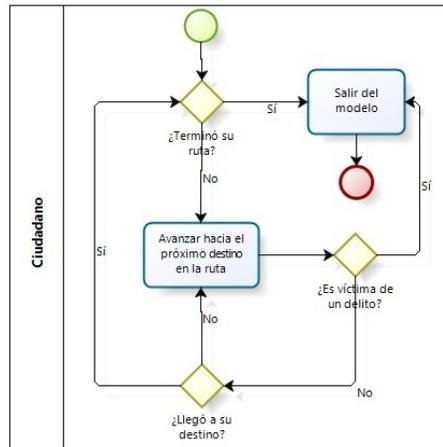


Figura 3.1: Diagrama del comportamiento de los ciudadanos.

Los policías tienen un comportamiento similar al de los ciudadanos, ya que también se dedican a recorrer la ruta que les ha sido asignada. La diferencia es que las rutas policiales son de patrullaje, por lo que al momento de llegar al final de ésta, retornan al punto de partida, desde donde vuelven a comenzar. Este comportamiento se ilustra en la Figura 3.2.

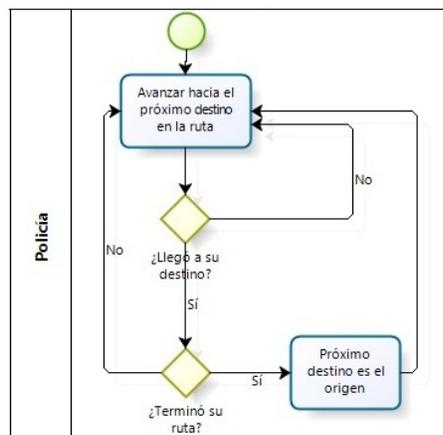


Figura 3.2: Diagrama del comportamiento de los policías.

La Figura 3.3 muestra el comportamiento de los delincuentes, quienes tienen el proceso de decisión más complejo del modelo, ya que considera diversas situaciones

que podrían presentarse en un escenario real. Por un lado, está la decisión de dónde ubicarse, mientras que por el otro, están las decisiones relacionadas con el hecho de cometer un delito, entre las cuales se encuentran: seguir a una potencial víctima, huir de un policía y, obviamente, si cometer o no el delito. La primera depende de la ruta asignada en un principio, mientras que las demás decisiones dependen del entorno cercano al delincuente.

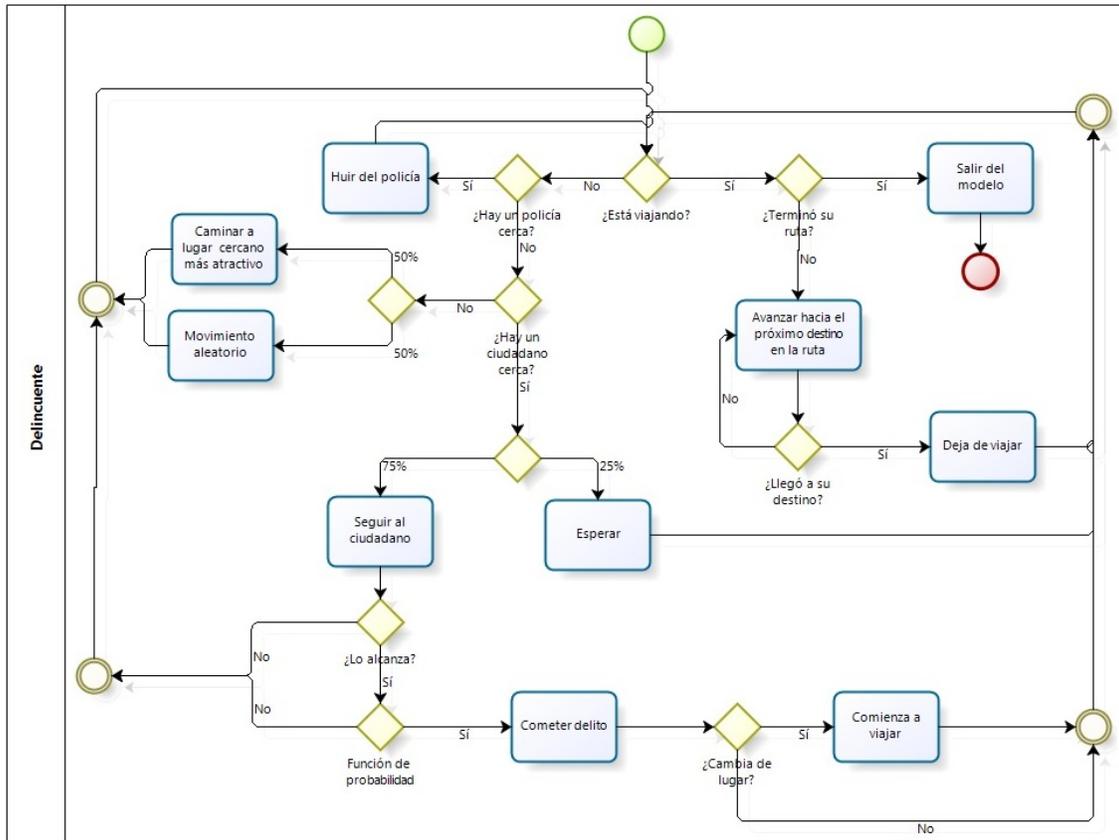


Figura 3.3: Diagrama del comportamiento de los delincuentes.

# Capítulo 4

## Implementación del Modelo

### Índice

---

2.1. Introducción . . . . .	9
2.2. Enfoque de Criminología . . . . .	10
2.3. Modelos Matemáticos Aplicados al Estudio del Crimen	13
2.4. Modelos Basados en Agente . . . . .	17
2.5. Complejidad al Modelar el Crimen . . . . .	26

---

### 4.1. Introducción

Uno de los objetivos específicos de esta tesis es el de implementar un simulador de delincuencia que permita generar datos sobre el crimen en la vía pública. Para cumplir este objetivo, es necesario implementar el modelo teórico, detallado en el Capítulo 3, y traducirlo a un lenguaje de programación en una herramienta computacional capaz de darle vida a los agentes y, así, observar las consecuencias del comportamiento que se les otorgó, en un ambiente dinámico, el cual permite apreciar fenómenos que, de otra forma, serían indetectables.

Además de esto, se requiere de un programa que permita visualizar los resultados de cada simulación de una forma amigable para observar patrones geográficos de manera clara. Las herramientas GIS<sup>1</sup> se hacen cargo de esta necesidad ya que son capaces de mostrar un conjunto de datos georreferenciados con una serie de carac-

---

<sup>1</sup>GIS: Geographic Information System (Sistemas de Información Geográficos).

terísticas no geográficas, permitiendo filtrarlos o agregarlos de acuerdo a ellas para hacer un análisis más completo.

En el Capítulo 3 se entregó una completa descripción del modelo basado en agente a utilizar en el desarrollo de este trabajo, desde una perspectiva teórica. En este Capítulo se dará a conocer la forma en que este modelo fue implementado para el desarrollo de las simulaciones realizadas. En la Sección 4.2 se presenta la herramienta computacional Repast Symphony, utilizada para programar y ejecutar el modelo. La Figura 4.1 muestra la leyenda que describe los lugares y los agentes que aparecen en todas las figuras obtenidas a partir de este programa, que se presentan en esta tesis. En la Sección 4.3 se dan a conocer los programas que se utilizaron para visualizar los delitos obtenidos a partir de las simulaciones. Finalmente, en la Sección 4.4 se detallan los diversos escenarios considerados para este estudio, en cuanto al número de policías, estrategia policial, ciudad y comportamiento de los agentes.

Leyenda			
	Calle		Transeúnte
	Plaza / Parque		Trabajador
	Residencia		Estudiante
	Comercio		Lanza
	Banco		Asaltante
	Transporte		Caminante
	Oficina		Motorizado
	Escuela		Vigilante

Figura 4.1: Leyenda de las figuras obtenidas de Repast Symphony.

## 4.2. Repast Symphony

Repast es una herramienta computacional diseñada para crear modelos basados en agente, ampliamente usada, gratuita y liberada. Su nombre proviene de “Recursive Porous Agent Simulation Toolkit” y fue desarrollado originalmente por el Laboratorio Computacional del Departamento de Investigación en Ciencias Sociales de la Universidad de Chicago, luego mantenido por Argonne National Laboratory y manejado por Repast Organisation for Architecture and Development (ROAD) [25].

Repast Symphony es una extensión de Repast que ofrece un nuevo enfoque para el desarrollo de la simulación y su ejecución, incluyendo una serie de tecnologías computacionales avanzadas para aplicaciones como simulación de fenómenos sociales [48]. Una de las principales, es la preconfiguración de un ambiente de desarrollo

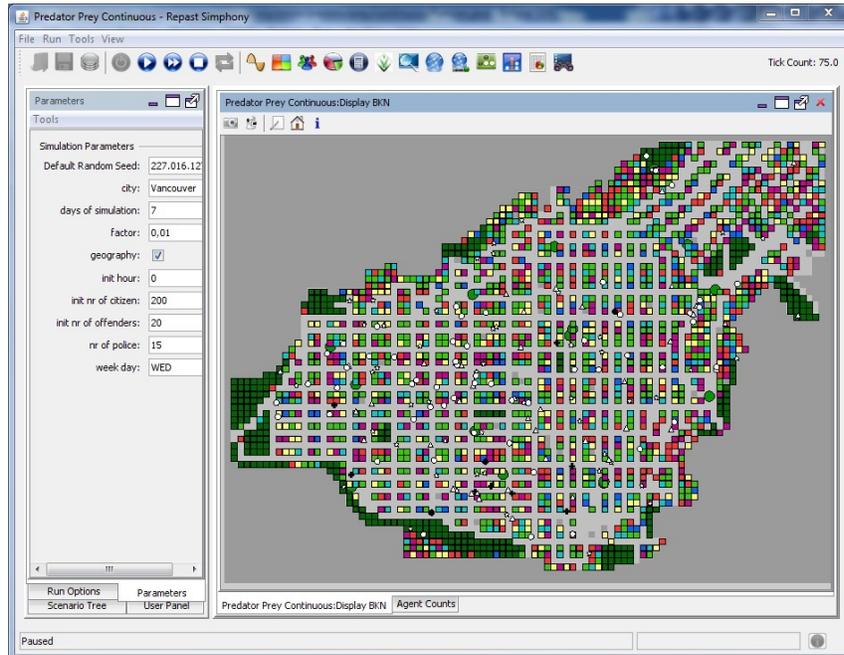


Figura 4.2: Modelo de simulación de delincuencia desarrollado en Repast Simphony.

integrado (IDE<sup>2</sup>), lo cual facilita el desarrollo de un modelo a quienes no tienen una gran experiencia computacional.

La gran ventaja de utilizar una herramienta como Repast Simphony es que ésta permite al modelador enfocarse en el desarrollo de su modelo, en lugar de tener que construir las herramientas computacionales fundamentales necesarias para ejecutarlo. Esto, en la mayoría de los casos, puede no ser su especialidad, por ejemplo, construir una interfaz gráfica para el usuario (GUI<sup>3</sup>), una plataforma de importación o exportación de datos o la visualización del modelo [25]. En la Figura 4.2 se muestra un ejemplo de simulación de delincuencia en Repast Simphony.

Repast puede ser programado en tres lenguajes distintos: Java, Python - RepastPy y Microsoft.NET - Repast.NET [25], Repast Simphony está programado en Java, pero además posee una interfaz que permite programar algunas funciones comunes a través de “clicks”, en lugar de hacerlo escribiendo código, por esta razón, ha ganado fama de ser una herramienta amigable para el usuario.

Al usar Java, un lenguaje orientado a objetos, se facilita la tarea de implementar un modelo basado en agente, ya que un agente puede ser representado por un

<sup>2</sup>IDE: Integrated Development Environment (Ambiente de Desarrollo Integrado).

<sup>3</sup>GUI: Graphical User Interface (Interfaz Gráfica para el Usuario).

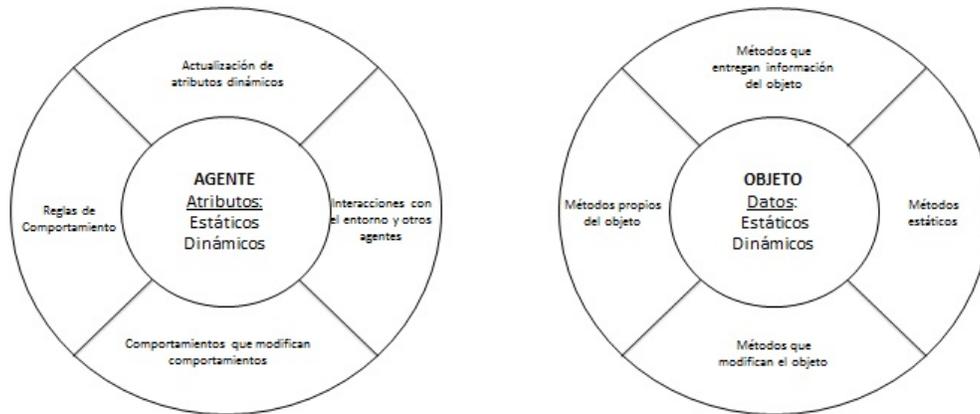


Figura 4.3: Agente versus objeto computacional.

objeto de un modo bastante intuitivo, incorporando tanto sus atributos como sus reglas de comportamiento y manteniendo su independencia del resto de los agentes. La Figura 4.3 muestra una comparación conceptual entre un agente y un objeto computacional.

### 4.3. Visualización

La visualización de datos es de vital importancia para esta tesis, ya que se requiere analizar patrones de comportamiento que tienen una importante componente geográfica, debido a que no sólo interesa la decisión de los delincuentes de cometer o no un delito, sino que también es relevante el lugar en el que esto ocurre, debido a que las características del entorno pueden influir en esta decisión. Harries (1999) considera que los mapas del crimen han sido, durante mucho tiempo una parte integral del proceso conocido como “análisis del crimen” [50].

En este trabajo se utilizan programas de visualización para mostrar los lugares en donde se han cometido los delitos simulados. Por un lado, se muestra el lugar exacto en el que ocurre cada delito, en un mapa de formato vectorial, mientras que por otro, se muestran las zonas más peligrosas, conocidas como hotspots, utilizando mapas en formato raster, en el que cada evento afecta no sólo el lugar donde ocurre, sino que también toda la zona que lo rodea.

Para el primer caso, se utilizó el programa Grass GIS®, el cual permite mostrar

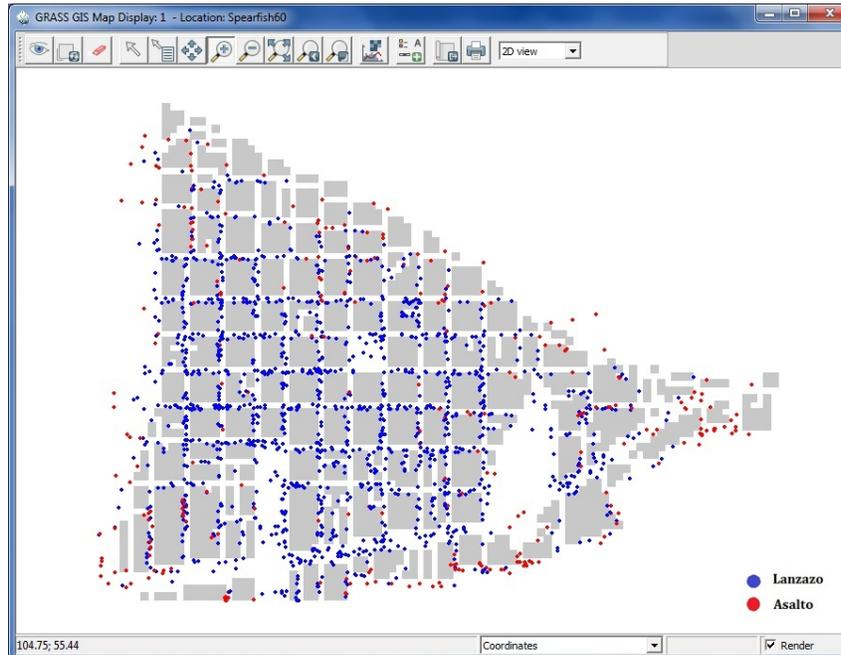


Figura 4.4: Mapa delictual de Santiago Centro en Grass GIS.

estos puntos de una forma interactiva, en la que se puede colorear o dar formas cada uno de acuerdo a los atributos del delito, como por ejemplo, el tipo o la víctima. Un ejemplo de un mapa delictual vectorial se encuentra en la Figura 4.4, donde el color de cada punto representa el tipo de delito que se cometió en ese lugar.

Para generar los mapas raster, se utilizó el programa MatLab®, ya que posee una visualización en dos y tres dimensiones que permiten apreciar claramente qué zonas son más peligrosas que otras, de una forma sencilla. La Figura 4.5 muestra dos ejemplos de la capacidad gráfica de MatLab® para representar las zonas con mayor delincuencia.

#### 4.4. Definición de Escenarios

Una vez implementado el modelo, el siguiente paso es analizar cómo se comporta ante diversas simulaciones. Para ello, se ha definido un conjunto de escenarios para ser simulados, los cuales difieren en cuatro variables: la ciudad, el número de policías, el tipo de policías y la estrategia policial. Estas variables se describen en detalle en esta Sección.

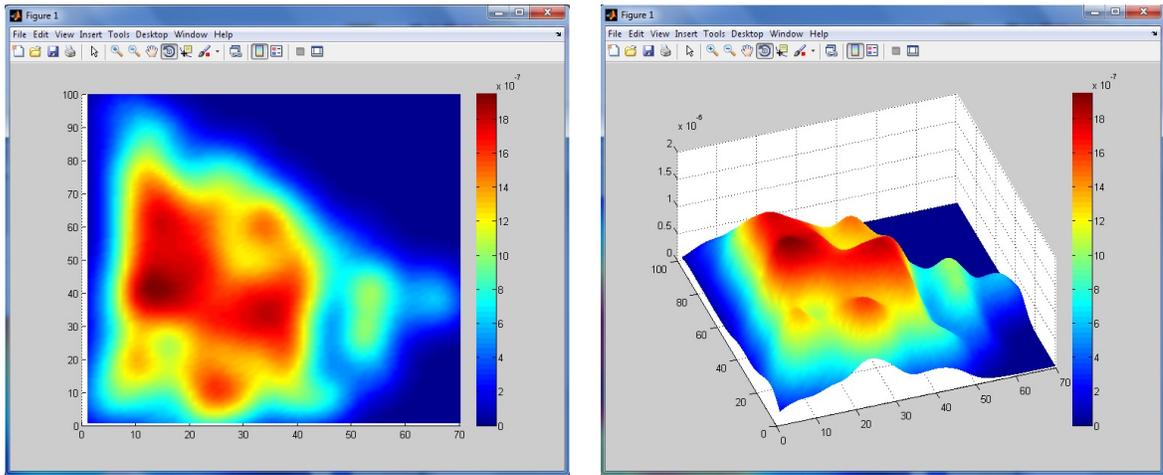


Figura 4.5: Mapas delictuales de Santiago Centro en MatLab.

#### 4.4.1. Ciudades

Uno de los aspectos importantes a analizar durante el desarrollo de esta tesis es la influencia que el entorno geográfico tiene sobre el comportamiento criminal. Por esta razón, el modelo es testeado en varias ciudades con distintas configuraciones y características particulares. Las ciudades utilizadas son Grilla, Santiago Centro y Downtown Vancouver, además de tres variaciones de la Grilla, las cuales se detallan a continuación:

- **Grilla:** Es una ciudad simplificada, en la que todas las calles son paralelas o perpendiculares y equidistantes entre sí. Las calles tienen un ancho de 2 celdas y cada cuadra tiene un área de 9 celdas. Es una ciudad principalmente comercial, la cual cuenta con un barrio residencial en el noroeste, un barrio estudiantil en el sur y un barrio denominado “súper-comercial” hacia el noreste. La configuración de esta ciudad se muestra en la Figura 4.6a.
- **Grilla 2:** Es una ciudad similar a la Grilla, pero con otra distribución de los barrios. En esta ciudad los barrios residenciales se encuentran en la periferia, mientras que los barrios comerciales y súper-comerciales se concentran en el centro. Esta es un ejemplo de una ciudad totalmente centralizada, como se muestra en la Figura 4.6b.
- **Grilla 3:** También es similar a la Grilla, pero en esta ciudad los barrios residenciales y estudiantiles se ubican en un extremo, mientras que los barrios comerciales y súper-comerciales se ubican en el otro extremo.

ciales y súper-comerciales, en el otro. La Figura 4.6c presenta la distribución de los barrios de esta ciudad.

- **Grilla 4:** Corresponde a un caso extremo de la Grilla, donde no existen barrios bien definidos y todos los tipos de edificios pueden encontrarse con igual probabilidad en cualquier lugar de la ciudad, como se muestra en la Figura 4.6d.
- **Santiago Centro:** Esta ciudad es la representación del territorio asignado a la Primera Comisaría de Carabineros de Santiago, delimitado al norte por el río Mapocho, al sur por la Av. Libertador Bernardo O'Higgins, al este por la Plaza Baquedano y al oeste por la Ruta 5. Esta zona corresponde a una de las que tiene mayor tránsito de peatones en la capital de Chile, ya que posee una gran cantidad de actividad comercial, turística y lugares de trabajo. Por esta razón, la mayor parte de la ciudad en el modelo es un barrio comercial, dejando sólo como barrio súper-comercial a los paseos peatonales Ahumada, Estado y Huérfanos. La Figura 4.7a muestra el territorio modelado junto a un plano del territorio real.
- **Downtown Vancouver:** Esta es una zona con una gran actividad turística y comercial de la ciudad de Vancouver, British Columbia, Canadá. Aquí se encuentran lugares como Canada Place, Stanley Park, Gastown, Chinatown, Yaletown, Rogers Arena, Sunset Beach, entre otros. Es una especie de península rodeada por Burrard Inlet, English Bay y False Creek, mientras que hacia el interior limita con Main Street. En esta ciudad sólo se ha considerado como barrio súpercomercial el sector cercano a Canada Place, ubicado hacia el norte de la ciudad modelada. La Figura 4.7b muestra una comparación de la ciudad real junto a la ciudad modelada, donde la segunda está rotada en  $45^\circ$  hacia la derecha para aprovechar el orden de las calles de la ciudad real.

#### 4.4.2. Número de Policías

Otra variable que debe ser analizada es la cantidad de policías que patrullan la ciudad, ya que su presencia influye directamente en la comisión de los delitos. Para el análisis de esta variable, se consideraron distintos valores para la cantidad de efectivos policiales, por un lado, se utilizaron cantidades fijas, mientras que por otro, se permitió una cantidad variable.

- **Cantidades Fijas:** Se simularon escenarios con diversos números de policías, los cuales permanecen en el modelo durante toda la simulación. Los valores que toma esta variable se encuentran entre 0 y 500 efectivos policiales.

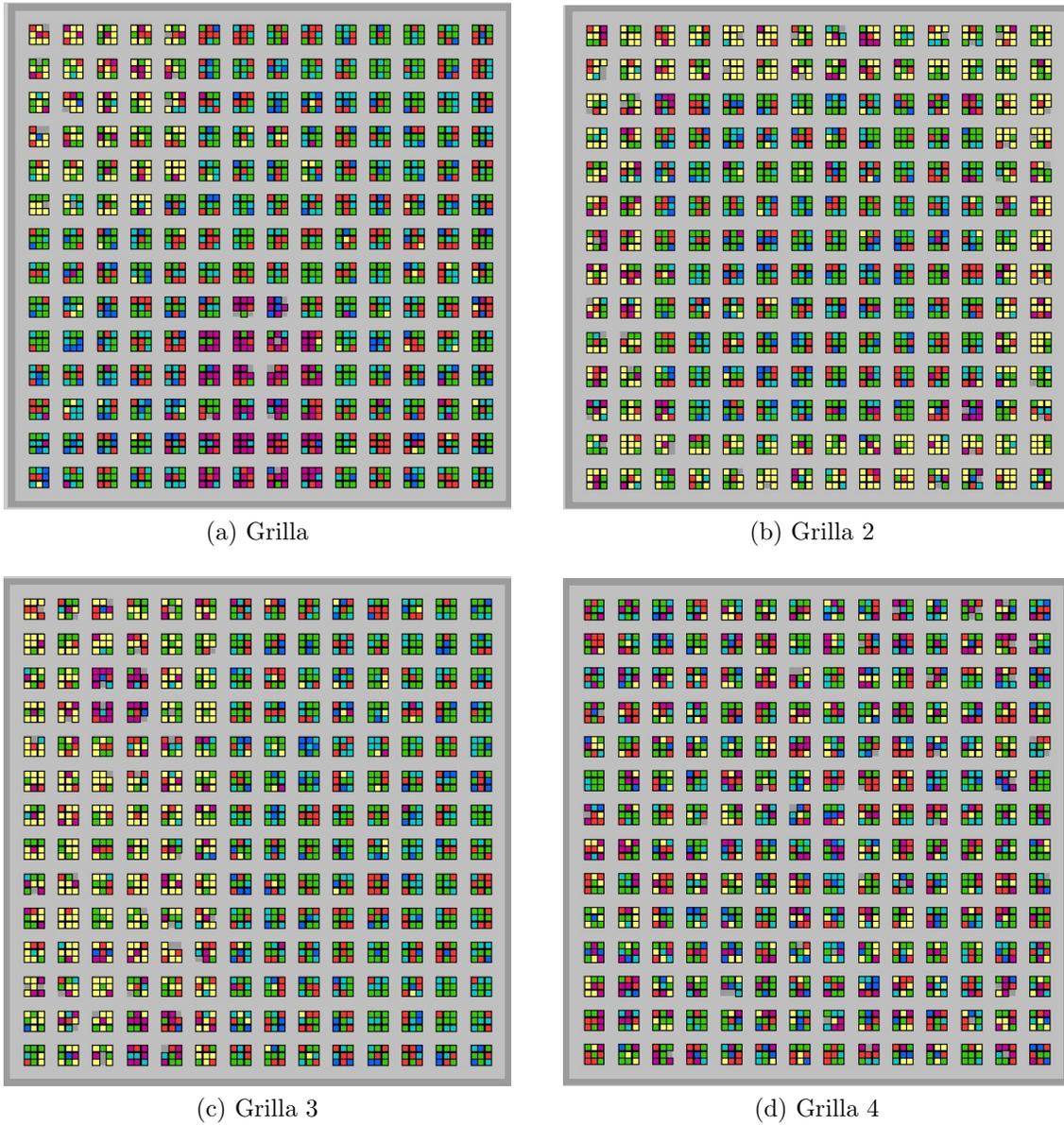
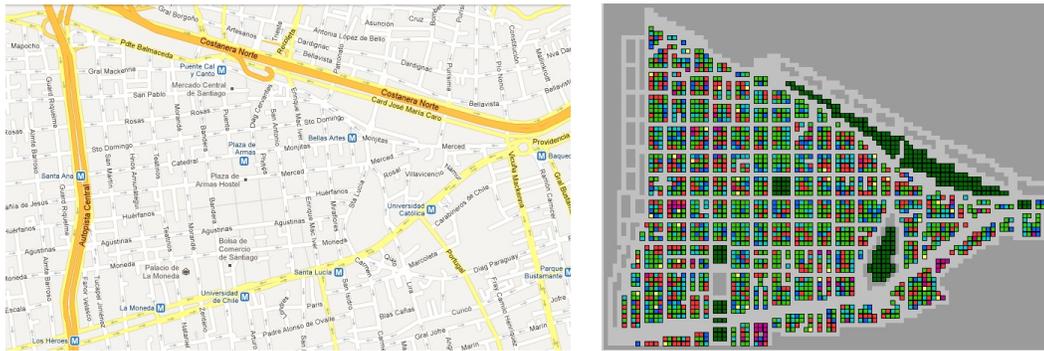
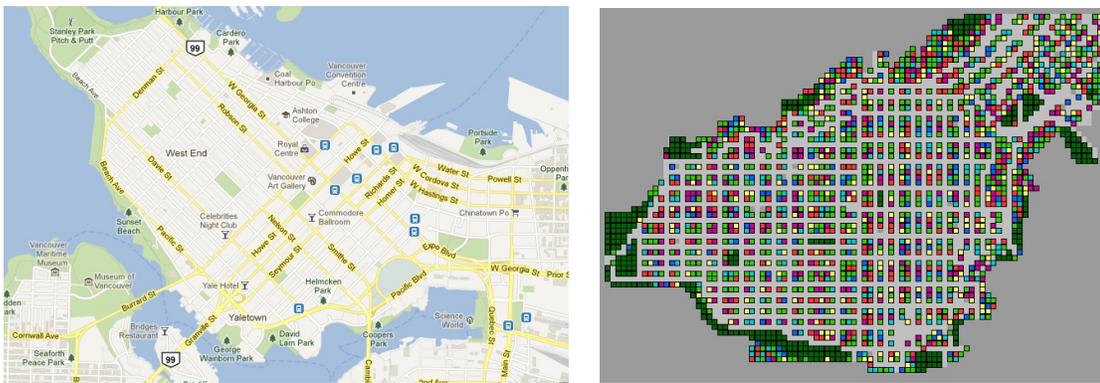


Figura 4.6: Las 4 ciudades en forma de Grilla.



(a) Santiago Centro



(b) Downtown Vancouver

Figura 4.7: Ciudades reales versus ciudades modeladas.

- **Cantidad Variable:** Si bien, el modelo ha sido desarrollado bajo el supuesto que la cantidad de policías es fija, resulta interesante analizar qué sucede si esta cantidad varía según la hora del día, siguiendo una distribución similar a la distribución de ciudadanos en el modelo. Esto significa que la cantidad de policías será pequeña durante la madrugada, pero aumentará en la mañana, manteniéndose alta en la tarde y volviendo a reducirse en la noche. Esto permite realizar una asignación que otorga un mayor patrullaje cuando hay más personas, sacrificando, en cierta medida, los horarios en los que no hay tanto tránsito de ciudadanos.

### 4.4.3. Tipo de Policías

Las distintas características de cada uno de los tipos de policía utilizados en este modelo permiten analizar si alguno de ellos tiene una mayor efectividad en la reduc-

ción del crimen en los escenarios propuestos. Para ello, se han desarrollado diversos experimentos en los que se utiliza exclusivamente un tipo de policía y otros en los que se usa una combinación de ellos, las cuales se describen a continuación:

- **Caminantes:** Los policías son sólo caminantes, por lo que su velocidad de desplazamiento es la misma que la de los demás agentes y su radio de acción es más bien focalizado, evitando recorrer grandes distancias entre un punto de su ruta y el siguiente.
- **Motorizados:** Los policías sólo son motorizados, lo que les permite patrullar sectores más amplios y a una mayor velocidad.
- **Vigilantes:** Los policías sólo son vigilantes y se mantienen inmóviles en su posición, con lo cual se busca brindar una fuerte protección a algunas zonas específicas.
- **Todos:** Se simulan escenarios utilizando los tres tipos de policías a la vez, para evaluar si su combinación tiene un efecto mayor sobre la delincuencia que el utilizar sólo uno de ellos.

#### 4.4.4. Estrategias Policiales

Además del número y el tipo de policías utilizados, es interesante hacer un análisis de las posibles estrategias de distribución de la policía que se pueden aplicar. Para ello, se han definido cuatro estrategias, las que se describen a continuación:

- **Distribución Uniforme:** Los policías son distribuidos uniformemente sobre la ciudad, cuidando que todo lugar tenga una vigilancia pareja y que no queden zonas sin protección.
- **Distribución Aleatoria:** Los policías patrullan en un lugar aleatorio de la ciudad, permitiendo que hayan sectores con una mayor vigilancia, mientras que también es posible que existan zonas desprotegidas.
- **Distribución según Hotspots:** Se asignan todos los policías a los sectores que presentan mayor delincuencia en el modelo sin policías, de esta forma, se brinda una mayor protección a los sectores más conflictivos, conocidos como hotspots.
- **Estrategia Mixta:** Se asigna la mitad de la dotación policial al patrullaje de los hotspots, mientras que la otra mitad patrulla el resto de la ciudad.

#### 4.4.5. Casos Extremos

Además de los escenarios descritos, es importante para la posterior validación del modelo, analizar los resultados que se obtienen en escenarios que contemplan condiciones extremas, en los que éstos debieran ser intuitivos y predecibles. Con esto, si los resultados del modelo se ajustan a los resultados esperados, entonces el modelo gana en credibilidad y validez. Las condiciones extremas planteadas para este análisis son:

- **Sin Policías:** Se ejecuta el modelo utilizando sólo ciudadanos y delincuentes. Se espera que este modelo arroje la tasa de delincuencia más alta entre todos los escenarios, ya que ningún delito se verá disuadido por la presencia policial.
- **Muchos Policías:** En estos escenarios se consideraron 500 policías durante la simulación, la mayor vigilancia entre todos los escenarios. Por esta razón, se espera obtener una muy baja cantidad de delitos en comparación con el resto de los escenarios.
- **Atractividad Constante:** En los escenarios descritos hasta ahora, existe una función de atractividad distribuida sobre la ciudad, en función de los edificios de cada zona. En este escenario se elimina esta función, haciendo que cada lugar tenga la misma atractividad, con lo que se pretende que no hayan sectores con un tránsito de agentes significativamente mayor que otros. Con esto se pretende analizar los patrones de crimen que se producen con una menor influencia del entorno geográfico.
- **Ciudad Uniforme:** Las ciudades consideradas hasta este punto tienen distintos tipos de barrios, con una mayor concentración de cierto tipo de edificios. En este escenario se analiza lo que ocurre cuando los edificios están distribuidos de forma homogénea sobre toda la ciudad.

#### 4.4.6. Sensibilidad de Parámetros

Otros escenarios interesantes para ser testeados corresponden a variaciones sobre algunos parámetros que pueden influir, tanto directa como indirectamente sobre los patrones del crimen. Si bien, estos parámetros están fuera del control de la policía, es interesante conocer su efecto sobre la delincuencia, ya que en base a esto se podrían generar otro tipo de políticas anti-delictivas, que no necesariamente tengan que ver con la policía.

- **Radios de Visión:** Se pretende establecer en qué medida afecta la distancia que los individuos consideran como su entorno cercano. Este radio constituye el rango de acción de los agentes, ya que sólo considerarán lo que está dentro de esta zona al momento de tomar decisiones, ignorando todo lo que sucede más allá. Es de esperar que un radio pequeño produzca que los agentes se sientan más aislados, incentivando los asaltos y desincentivando los lanzazos, mientras que un radio mayor tendría un efecto contrario y, a la vez, aumentaría el alcance de la vigilancia policial.
- **Probabilidad de Cometer Delito:** La probabilidad de que un delincuente cometa un delito es una función que depende del tipo de delincuente y de la cantidad de ciudadanos y policías cercanos a él. Como los parámetros de esta función han sido elegidos arbitrariamente, resulta necesario analizar el efecto que tiene una variación en ellos, haciendo que los delincuentes sean más temerarios, o bien, más recatados a la hora de tomar la decisión de robar o no.
- **Tasa de Generación de Agentes:** El número de agentes en el modelo es otra de las variables que puede afectar los patrones criminales, por lo que la tasa de generación de agentes cobra importancia en ese sentido. Cuando se tiene una tasa muy alta, el modelo resulta más poblado por lo que se producen más encuentros entre los delincuentes y las víctimas, mientras que por otro lado, se hacen más probables los lanzazos y más difíciles los asaltos.

## 4.5. Aspectos Generales de las Simulaciones

A la hora de comparar los resultados de distintas simulaciones, es importante que los elementos que no forman parte del conjunto de variables de comparación se mantengan constantes, o bien, sean generados bajo las mismas distribuciones de probabilidad, ya que sólo de esta manera se pueden obtener conclusiones confiables sobre el efecto que tienen las variables a analizar. Las simulaciones realizadas para el estudio descrito en el Capítulo 5 comparten una serie de características que se detallan y justifican a continuación.

En primer lugar, se utilizó una duración de una semana para cada simulación. Esto se debe a que, por un lado, se pueden capturar los efectos producidos por los cambios de día, reduciendo la distorsión por condiciones iniciales, mientras que por el otro, es posible incluir la variable “día de la semana” en el análisis, haciendo factible el modificar ciertos parámetros para los fines de semana. Por la misma razón, es que se ha simulado desde un miércoles hasta un martes, ya que así la transición entre días de semana y fines de semana y viceversa, no se pierde por el término de la simulación.

<b>Periodo</b>	<b>Código</b>	<b>Horario</b>
Madrugada	MADR	00:00 - 05:59
Punta mañana	PTMA	06:00 - 08:59
Mañana	MAÑA	09:00 - 11:59
Almuerzo	ALMU	12:00 - 14:59
Tarde	TARD	15:00 - 17:59
Punta tarde	PTTA	18:00 - 20:59
Noche	NOCH	21:00 - 23:59

Tabla 4.1: Periodos en los que se divide el día.

Siguiendo con la componente temporal, otro aspecto considerado en el modelo es la división del día en 7 periodos, cuyas diferencias radican en las tasas de generación de agentes, las cuales pretenden replicar el número de personas que están en la vía pública en cada uno de ellos. Los periodos considerados se muestran en la Tabla 4.1, donde los que tienen una mayor tasa de generación de agentes son: “Punta mañana” y “Punta tarde”.

Finalmente, con respecto a las condiciones iniciales de las simulaciones, se ha elegido comenzarlas un día de semana a las 00:00 hrs. con una cantidad de agentes normal para esa hora en la simulación, la cual se obtuvo por experimentos previos que arrojaron una cifra aproximada de 200 ciudadanos y 30 delincuentes, los que se distribuyen equitativamente entre los distintos tipos de cada clase de agente.

# Capítulo 5

## Análisis y Validación de Resultados

### Índice

---

<b>3.1. Introducción</b> . . . . .	<b>28</b>
<b>3.2. Principales Supuestos</b> . . . . .	<b>29</b>
<b>3.3. El Entorno</b> . . . . .	<b>30</b>
<b>3.4. Los Agentes</b> . . . . .	<b>31</b>
<b>3.5. Reglas de Comportamiento</b> . . . . .	<b>35</b>

---

### 5.1. Introducción

La obtención de datos de delincuencia a partir del modelo desarrollado en esta tesis es fundamental para el objetivo de usar el simulador como un sistema de apoyo a la toma de decisiones en políticas anti-delictivas, por esta razón, la validez de estos resultados cobra vital importancia para asegurar la calidad de estas decisiones. En este Capítulo se presenta el análisis de los resultados obtenidos en diversos escenarios, bajo distintos tipos y cantidades de policías y estrategias policiales, para ilustrar la capacidad que tiene el simulador de servir para el objetivo ya mencionado. La lista completa de los 299 resultados generados para este análisis se encuentra en la Tabla B.1 de los anexos.

La Sección 5.2 presenta el primer enfoque aplicado sobre los datos de delincuencia obtenidos a partir del simulador, donde se analizan por separado las cuatro variables descritas en la Sección 4.4 y se presentan los principales resultados, tales como la

frecuencia de cada tipo de delitos, así como también las víctimas más vulneradas, además de su distribución espacial, la que permite identificar las zonas más peligrosas de acuerdo al escenario. La Sección 5.3 corresponde al análisis simultáneo de todas las variables a estudiar, en el cual, mediante regresiones lineales se estima cuáles son las variables que influyen significativamente en la magnitud del crimen. En la Sección 5.4 se somete el modelo a diversas pruebas, las cuales permiten determinar la validez de sus resultados y, con ella, el grado de confianza que tiene el modelo, el cual es un aspecto fundamental a tener en cuenta antes de tomar decisiones basadas en sus resultados.

## 5.2. Análisis por Variable

### 5.2.1. Caso Base

Con el objetivo de que los posteriores análisis tengan un punto de comparación, se simuló una serie de casos base, donde no hay presencia policial, en las distintas ciudades consideradas en este estudio. A partir de estos resultados, se puede obtener información relevante para cada ciudad, como el surgimiento de “hotspots naturales” y la cantidad de delitos de cada tipo que ocurre en cada una. Los resultados de estas simulaciones se resumen en la Tabla 5.1.

Ciudad	Delitos	Tipo de Delito		Víctima		
		Lanzazos	Asaltos	Estudiante	Trabajador	Transeúnte
Santiago	1.732	1.462	270	572	412	748
Vancouver	964	757	206	326	219	419
Grilla	1.026	585	441	354	218	455
Grilla 2	856	510	346	295	183	378
Grilla 3	905	464	441	299	204	405
Grilla 4	896	510	386	298	203	395

Tabla 5.1: Resultados del caso base por ciudad.

Debido a la importancia que tienen estos datos para las posteriores comparaciones, cada una de estas simulaciones se realizó varias veces, de modo que éstos sean datos internamente validados, tal como se explica en la Sección 5.4.3. La distribución espacial de los delitos se presenta en la Figura 5.1 y corresponde a los resultados agregados de las distintas simulaciones de los casos base. Para cada ciudad se muestra, en el extremo superior izquierdo, el mapa vectorial con los delitos agregados de todas las simulaciones, en el superior derecho, el mapa raster correspondiente, mientras que en el inferior izquierdo, los barrios en los que se divide la ciudad y en el

inferior derecho, las zonas identificadas como hotspots (en azul), las que corresponden a las que se encuentran sobre la media más una desviación estándar del nivel de delincuencia utilizado para generar el mapa raster.

### 5.2.2. Número de Policías

La cantidad de efectivos policiales es una de las variables más intuitivas a ser analizada, ya que tiene directa relación con la capacidad de cobertura de la policía sobre la ciudad. Mientras mayor sea el número de policías, mayor es la chance de que cada zona esté vigilada y, por lo tanto, se reduce la probabilidad de que ocurra un delito. Esto, al ser simulado para un periodo largo de tiempo, se debería traducir en una menor cantidad de crímenes, sin embargo, es importante conocer la forma en que comporta el número de delitos en función de la cantidad de policías, ya que es posible que su reducción marginal sea cada vez menor a medida que se aumenta la dotación policial.

Para analizar esta variable se eligieron las cantidades que aparecen en la Tabla 5.2, donde “VAR” representa una cantidad variable de policías de acuerdo a la hora del día, proporcional a la variación de agentes en el modelo.

Número de Policías									
0	5	15	30	50	75	100	250	500	VAR

Tabla 5.2: Cantidades de policías consideradas para el análisis.

En la primera mitad de la Figura 5.2 se observa el comportamiento del número de delitos en función de la cantidad de policías en los escenarios simulados en Santiago con policías vigilantes, para las cuatro estrategias policiales. En estos gráficos se aprecia el decaimiento del número de delitos a medida que aumenta la dotación policial, lo cual es consecuente con la reducción en la probabilidad de los delincuentes de cometer delitos cuando hay más policías cerca. Por otro lado, se observa que este decaimiento se produce en forma convexa y, por lo tanto, el aporte marginal de cada policía es cada vez menor, especialmente bajo la estrategia de distribución en hotspots (Figura 5.2c).

Lo mismo ocurre en los escenarios simulados en Vancouver con la estrategia de distribución aleatoria, para los distintos tipos de policías, como se observa en los últimos cuatro gráficos de la Figura 5.2. En estos casos se observa una leve concavidad al comienzo de las curvas, lo que sugiere que la efectividad de los primeros policías también es baja y que se necesita una cierta cantidad mínima para ser eficientes en la reducción del crimen. La explicación más probable para esto es que, para tener

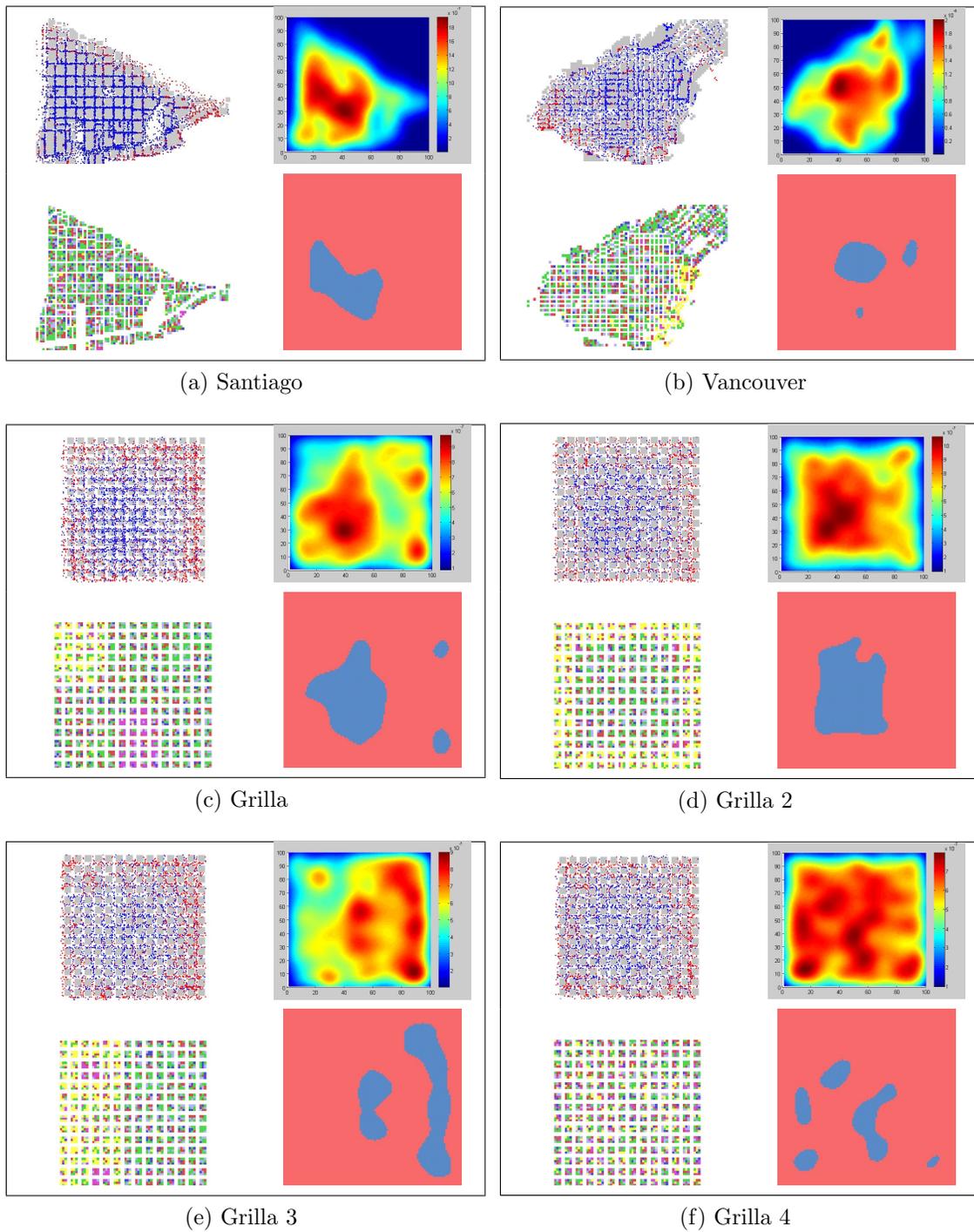


Figura 5.1: Distribución de delitos en los casos base y hotspots identificados.

un impacto real en el número de delitos, se requiere de una dotación policial que al menos alcance para cubrir la ciudad. En otras palabras, debe haber una densidad mínima de policías para que los delincuentes se vean disuadidos de delinquir en un porcentaje importante de las oportunidades que se les presentan.

### 5.2.3. Tipo de Policías

Una segunda variable de interés para este análisis es el tipo de policías que patrullan la ciudad. Para este estudio se han definido tres tipos de policías, descritos en la Sección 4.4.3 y, además, se han utilizado combinaciones de ellos para observar si existen diferencias en el efecto que tienen sobre la delincuencia. Los tipos de policías considerados se muestran en la Tabla 5.3.

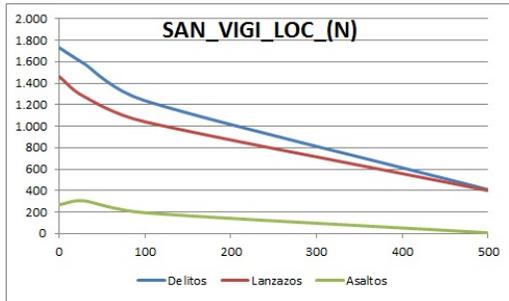
Código	Tipo de Policías
CAMI	Sólo caminantes
MOTO	Sólo motorizados
VIGI	Sólo vigilantes
VGCM	Caminantes y vigilantes
TODOS	Caminantes, motorizados y vigilantes

Tabla 5.3: Tipos de policías considerados para el análisis.

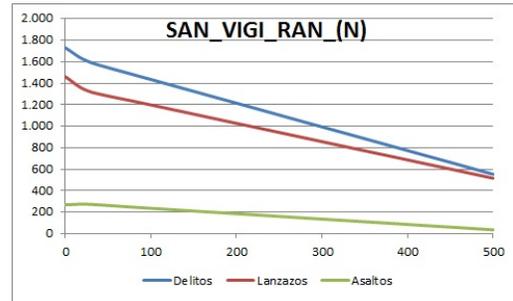
Los resultados de las simulaciones muestran que la efectividad de cada tipo de policía depende tanto de la estrategia utilizada como de la cantidad de efectivos, y que por lo tanto, no existe un tipo de policía mejor que los demás, sino que, más bien, su efectividad depende de la situación en la que se encuentra.

Los primeros cuatro gráficos de la Figura 5.3 muestran los escenarios simulados en Vancouver con la estrategia de distribución uniforme, para diversas cantidades de policías. Además, se grafica el caso base de esta ciudad, en el que no hay policías, para usarlo como referencia. De estos gráficos se desprende que, bajo la estrategia de distribución uniforme en Vancouver, los policías caminantes son levemente menos efectivos que los demás, lo que puede explicarse por dos motivos: primero, son móviles, por lo que abandonan su asignación inicial y pueden dejar zonas desprotegidas por momentos antes de completar su ruta y, segundo, no tienen la velocidad de los policías motorizados quienes también abandonan su ubicación pero pueden volver más rápido.

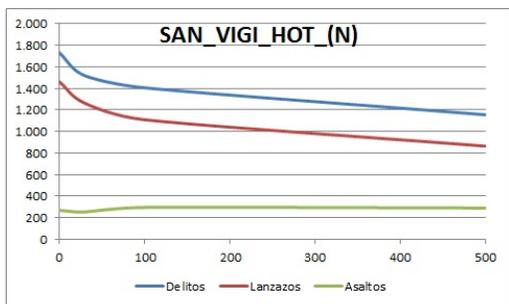
En los escenarios simulados en la Grilla con 30 policías, para las distintas estrategias policiales, que aparecen en la segunda mitad de la Figura 5.3, se aprecia que las



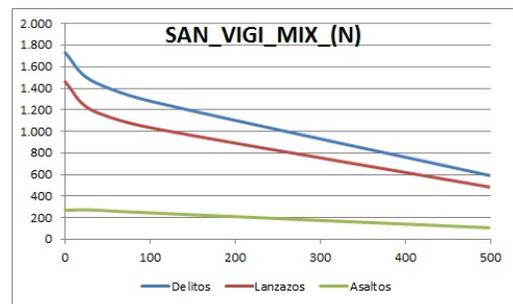
(a) Escenarios SAN\_VIGI.LOC\_(N)



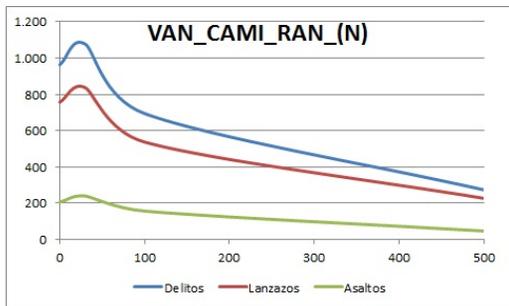
(b) Escenarios SAN\_VIGI.RAN\_(N)



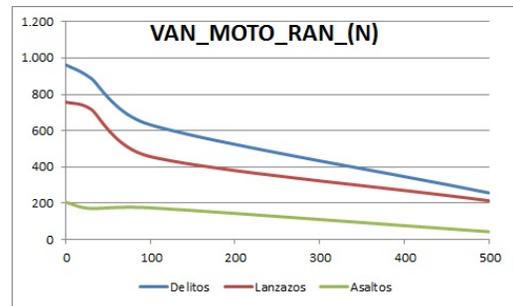
(c) Escenarios SAN\_VIGI.HOT\_(N)



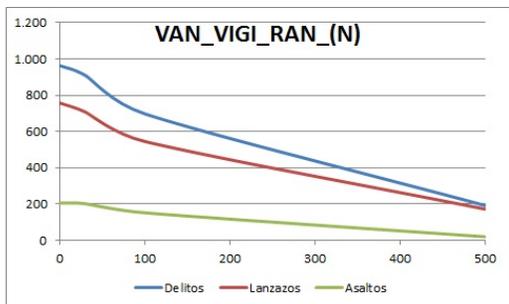
(d) Escenarios SAN\_VIGI.MIX\_(N)



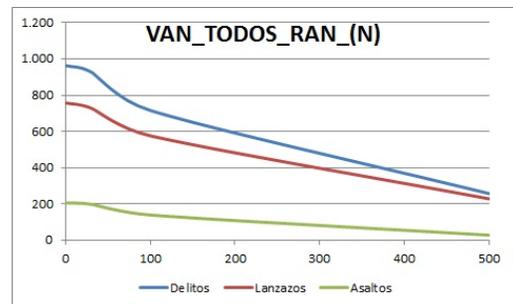
(e) Escenarios VAN\_CAMI.RAN\_(N)



(f) Escenarios VAN\_MOTO.RAN\_(N)



(g) Escenarios VAN\_VIGI.RAN\_(N)



(h) Escenarios VAN\_TODOS.RAN\_(N)

Figura 5.2: Delitos en función del número de policías.

diferencias entre los distintos tipos de policía son relativamente pequeñas, por lo que no es posible obtener conclusiones categóricas al respecto. Sin embargo, existe una leve tendencia que sugiere que los que peor se comportan son los policías vigilantes, ya que, al ser pocos e inmóviles, no pueden cubrir bien toda la ciudad. Por otro lado, al usar todos los tipos de policía, se tiene un mejor resultado debido a que se apoya a los vigilantes con policías capaces de hacer recorridos tanto cortos como largos, por lo que la ciudad queda mejor cubierta.

### 5.2.4. Estrategia Policial

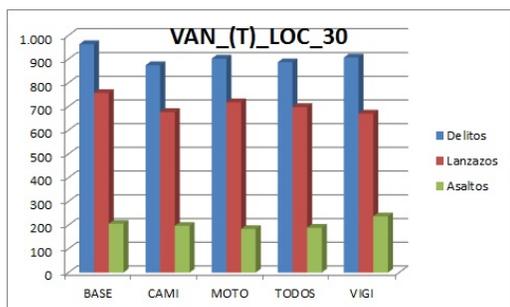
Otro de los aspectos relevantes para ser analizado es la estrategia que utiliza la policía para distribuir a su personal sobre la ciudad. En la Sección 4.4.4 se describen las estrategias de distribución uniforme, aleatoria, según hotspots y mixta, las cuales fueron testeadas para las distintas ciudades. La Tabla 5.4 resume estas estrategias.

<b>Código</b>	<b>Estrategia Policial</b>
LOC	Distribución uniforme sobre toda la ciudad
RAN	Distribución aleatoria en la ciudad
HOT	Distribución aleatoria sólo en hotspots
MIX	Dist. aleatoria 50 % en hotspots y 50 % en el resto de la ciudad

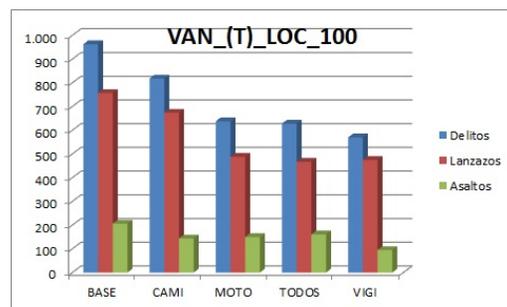
Tabla 5.4: Estrategias de distribución policial consideradas para el análisis.

Al igual como ocurre con los tipos de policía, la efectividad de la estrategia policial depende en gran medida de las otras variables: el número y el tipo de policías. Por ejemplo, en las simulaciones realizadas en la Grilla con 500 policías, bajo las cuatro estrategias que se grafican en la primera mitad de la Figura 5.4, se observa que la estrategia de distribución según hotspots tiene el peor comportamiento en todos los casos, mientras que las distribuciones uniforme y aleatoria son las más eficientes. Esto se debe a que la primera estrategia concentra toda la dotación policial en las zonas más peligrosas, descuidando por completo el resto de la ciudad, lo que permite que se produzca el desplazamiento del crimen hacia estas zonas no vigiladas. La estrategia mixta presenta el mismo problema, pero en menor escala, ya que sólo la mitad de la policía se concentra en los hotspots, mientras que la otra mitad se ocupa de prevenir el crimen desplazado.

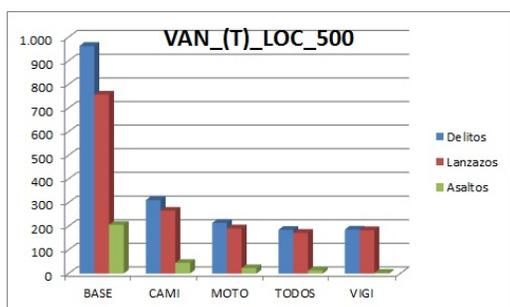
Por otro lado, en la segunda mitad de la Figura 5.4 se presentan los resultados de las simulaciones realizadas sobre Santiago para distintas cantidades de policías caminantes. En este caso, se aprecia un comportamiento más parejo de las cuatro estrategias cuando se tienen pocos policías, e incluso, al contrario del caso anterior,



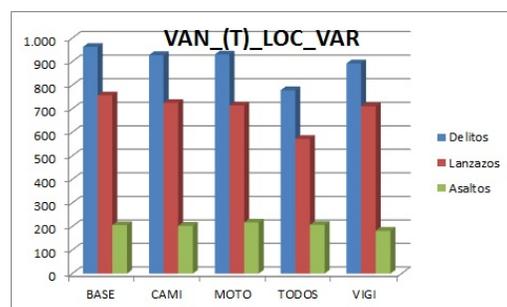
(a) Escenarios VAN\_(T)\_LOC\_30



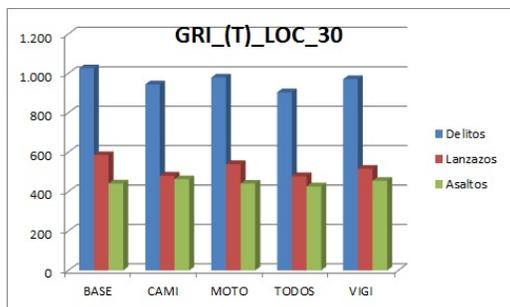
(b) Escenarios VAN\_(T)\_LOC\_100



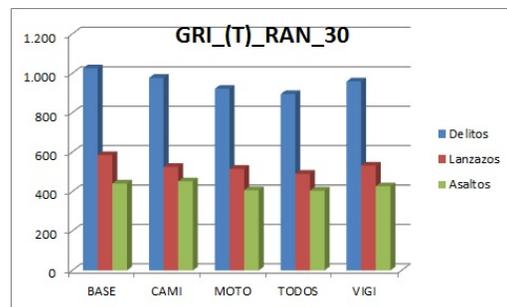
(c) Escenarios VAN\_(T)\_LOC\_500



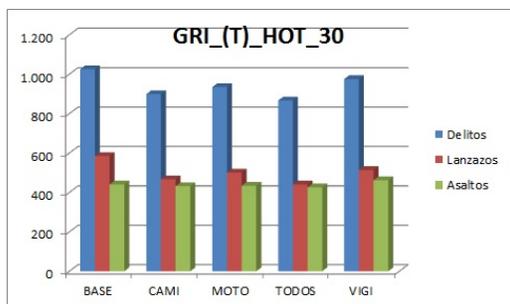
(d) Escenarios VAN\_(T)\_LOC\_VAR



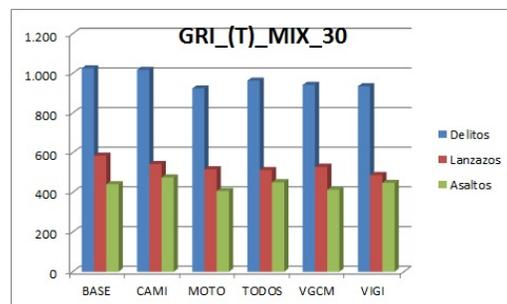
(e) Escenarios GRI\_(T)\_LOC\_30



(f) Escenarios GRI\_(T)\_RAN\_30



(g) Escenarios GRI\_(T)\_HOT\_30



(h) Escenarios GRI\_(T)\_MIX\_30

Figura 5.3: Delitos en función del tipo de policías.

Variable	Tipo	Clase
Núm. de delitos	Numérica	Dep.
Núm. de lanzazos	Numérica	Dep.
Núm. de asaltos	Numérica	Dep.
Víc. estudiantes	Numérica	Dep.
Víc. trabajadores	Numérica	Dep.
Víc. transeúntes	Numérica	Dep.
Ciudad	Categórica	Indep.
Tipo de policía	Categórica	Indep.
Estrategia policial	Categórica	Indep.
Núm. de policías	Categórica	Indep.

Tabla 5.5: Variables que contiene la base de datos de delitos simulados.

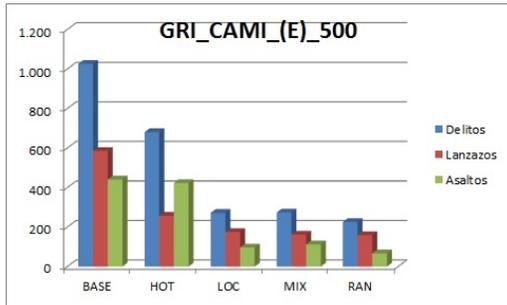
la estrategia de distribución según hotspots y mixta superan levemente a las demás. Esto tiene sentido si se considera que cuando se tienen pocos efectivos policiales, lo más eficiente es localizarlos en los lugares más peligrosos, ya que así evitan una mayor cantidad de potenciales delitos, mientras que, a medida que se dispone de una mayor dotación policial, resulta más conveniente distribuirla sobre toda la ciudad. Otro aspecto a observar en estos escenarios, es que la estrategia de distribución aleatoria mejora su rendimiento, en comparación con las demás, en la medida en que hay más policías, llegando a tener similares resultados que la estrategia de distribución uniforme. Esto se debe a que con un número bajo de efectivos, es muy probable que queden grandes zonas sin cubrir, mientras que cuando hay una mayor cantidad, la distribución aleatoria tiende a parecerse a la uniforme, debido a que el mismo “sorteo” que les asigna su ubicación inicial se realiza a partir de una distribución de probabilidad uniforme sobre toda la ciudad.

## 5.3. Análisis General

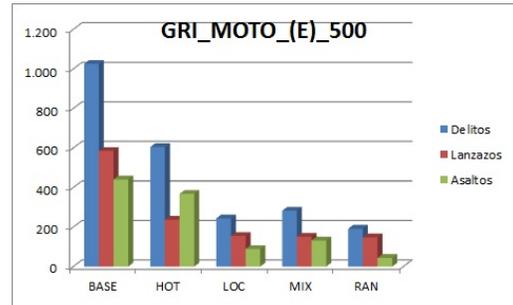
### 5.3.1. Análisis Global

Un enfoque diferente al utilizado en la Sección 5.2 es el análisis simultáneo de todas las variables sobre los datos generados a partir del simulador. Esta base de datos consta de 299 registros y se encuentra en la Tabla B.1 de los anexos. La Tabla 5.5 resume la información con la que se cuenta, mientras que la Tabla 5.6 presenta la transformación que se les aplicó a estas variables previo al análisis.

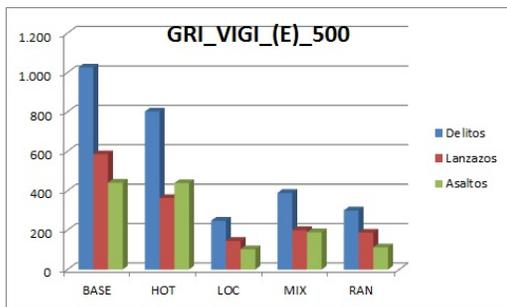
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS



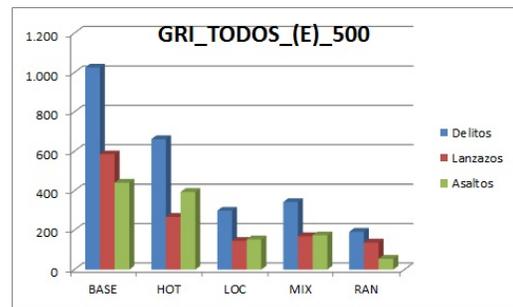
(a) Escenarios GRI\_CAMI\_(E)\_500



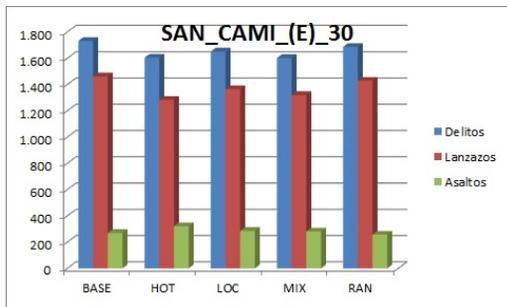
(b) Escenarios GRI\_MOTO\_(E)\_500



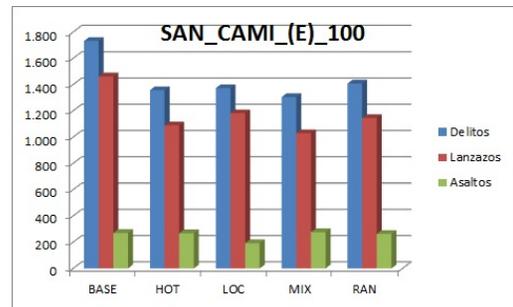
(c) Escenarios GRI\_VIGI\_(E)\_500



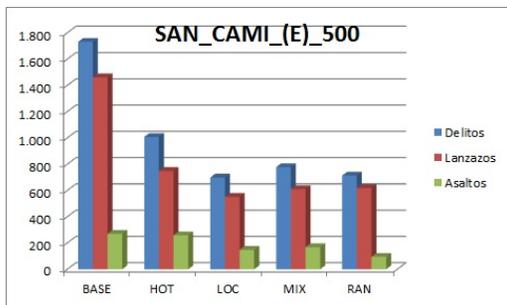
(d) Escenarios GRI\_TODOS\_(E)\_500



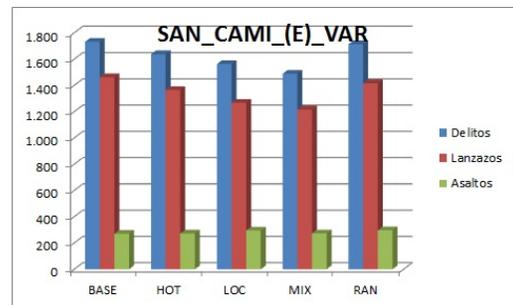
(e) Escenarios SAN\_CAMI\_(T)\_30



(f) Escenarios SAN\_CAMI\_(T)\_100



(g) Escenarios SAN\_CAMI\_(E)\_500



(h) Escenarios SAN\_CAMI\_(E)\_VAR

Figura 5.4: Delitos en función de la estrategia policial.

Variable	Tipo	Clase	Frecuencia	Descripción
Núm. de delitos	Numérica [0, 1]	Dep.	299	Núm. de Delitos (stand.)
Núm. de lanzazos	Numérica [0, 1]	Dep.	299	Núm. de Lanzazos (stand.)
Núm. de asaltos	Numérica [0, 1]	Dep.	299	Núm. de Asaltos (stand.)
SAN	Binaria	Indep.	53	Ciudad Santiago
VAN	Binaria	Indep.	53	Ciudad Vancouver
GRI	Binaria	Indep.	106	Ciudad Grilla
G2	Binaria	Indep.	29	Ciudad Grilla 2
G3	Binaria	Indep.	29	Ciudad Grilla 3
G4	Binaria	Indep.	29	Ciudad Grilla 4
CAMI	Binaria	Indep.	79	Tipo Caminante
MOTO	Binaria	Indep.	60	Tipo Motorizado
VIGI	Binaria	Indep.	82	Tipo Vigilante
TODOS	Binaria	Indep.	54	Tipo Todos
LOC	Binaria	Indep.	92	Est. Dist. Uniforme
RAN	Binaria	Indep.	89	Est. Dist. Aleatoria
HOT	Binaria	Indep.	50	Est. Dist. Hotspots
MIX	Binaria	Indep.	62	Est. Dist. Mixta
P0	Binaria	Indep.	6	Núm. Policías = 0
P5	Binaria	Indep.	8	Núm. Policías = 5
P15	Binaria	Indep.	7	Núm. Policías = 15
P30	Binaria	Indep.	85	Núm. Policías = 30
P50	Binaria	Indep.	8	Núm. Policías = 50
P75	Binaria	Indep.	7	Núm. Policías = 75
P100	Binaria	Indep.	85	Núm. Policías = 100
P250	Binaria	Indep.	7	Núm. Policías = 250
P500	Binaria	Indep.	43	Núm. Policías = 500
NPOL	Numérica [0, 1]	Indep.	299	Núm. de Policías (stand.)

Tabla 5.6: Variables transformadas para el análisis de los delitos simulados.

La cantidad de policías ha sido considerada de dos formas: como variable categórica, ya que sólo se realizaron simulaciones con un conjunto reducido de dotaciones policiales (Tabla 5.2), y como variable numérica (“*NPOL*”) para considerar su magnitud dentro del análisis.

En primer lugar, se realizó una regresión lineal para determinar el efecto de cada variable sobre el número total de delitos acontecidos en la simulación, considerando la dotación policial como variable categórica. La forma de esta regresión se presenta en la Ecuación 5.1 y sus resultados se muestran en la Tabla 5.7, en la que se han omitido las variables *VAN*, *LOC* y *P30* por ser redundantes.

$$\begin{aligned}
 N_{DEL} = & \beta_{SAN} \cdot x_{SAN} + \beta_{VAN} \cdot x_{VAN} + \beta_{GRI} \cdot x_{GRI} + \beta_{G2} \cdot x_{G2} + \beta_{G3} \cdot x_{G3} + \beta_{G4} \cdot x_{G4} \\
 & + \beta_{CAMI} \cdot x_{CAMI} + \beta_{MOTO} \cdot x_{MOTO} + \beta_{VIGI} \cdot x_{VIGI} + \beta_{TODOS} \cdot x_{TODOS} \\
 & + \beta_{LOC} \cdot x_{LOC} + \beta_{RAN} \cdot x_{RAN} + \beta_{HOT} \cdot x_{HOT} + \beta_{MIX} \cdot x_{MIX} \\
 & + \beta_{P0} \cdot x_{P0} + \beta_{P5} \cdot x_{P5} + \beta_{P15} \cdot x_{P15} + \beta_{P30} \cdot x_{P30} + \beta_{P50} \cdot x_{P50} + \beta_{P75} \cdot x_{P75} \\
 & + \beta_{P100} \cdot x_{P100} + \beta_{P250} \cdot x_{P250} + \beta_{P500} \cdot x_{P500} + \beta_0 + \varepsilon_{DEL}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Además, se realizó una regresión similar, pero considerando la cantidad de policías como variable numérica, tal como se muestra en la Ecuación 5.2. Los resultados de esta regresión se presentan en la Tabla 5.8, en la que se omite la variable  $VAN$  por redundancia.

$$\begin{aligned}
 N_{DEL} = & \beta_{SAN} \cdot x_{SAN} + \beta_{VAN} \cdot x_{VAN} + \beta_{GRI} \cdot x_{GRI} + \beta_{G2} \cdot x_{G2} + \beta_{G3} \cdot x_{G3} + \beta_{G4} \cdot x_{G4} \\
 & + \beta_{CAMI} \cdot x_{CAMI} + \beta_{MOTO} \cdot x_{MOTO} + \beta_{VIGI} \cdot x_{VIGI} + \beta_{TODOS} \cdot x_{TODOS} \\
 & + \beta_{LOC} \cdot x_{LOC} + \beta_{RAN} \cdot x_{RAN} + \beta_{HOT} \cdot x_{HOT} + \beta_{MIX} \cdot x_{MIX} \\
 & + \beta_{NPOL} \cdot x_{NPOL} + \beta_0 + \varepsilon_{DEL}
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

Los resultados muestran que las variables que explican significativamente el número de delitos son la ciudad y el número de policías. Sin embargo, este análisis no considera que las variables tienen distintas frecuencias (ver Tabla 5.6), ya que algunas de ellas fueron testeadas sólo en unos pocos escenarios. Además, dado que las ciudades presentan grandes diferencias en el número de delitos ocurridos, resulta más conveniente realizar este análisis para cada ciudad por separado, como se muestra en la Sección 5.3.2.

### 5.3.2. Análisis por Ciudad

Al aislar la variable ciudad del análisis, se hace posible identificar qué variables son más relevantes en cada una de ellas, ignorando el efecto que tenía ésta en las Ecuaciones 5.1 y 5.2. Las regresiones utilizadas bajo este enfoque se muestran en las Ecuaciones 5.3 y 5.4, que consideran la variable número de policías como categórica y numérica, respectivamente, y donde  $c$  representa la ciudad en la que se aplicó.

$$\begin{aligned}
 N_{DEL}^c = & +\beta_{CAMI}^c \cdot x_{CAMI}^c + \beta_{MOTO}^c \cdot x_{MOTO}^c + \beta_{VIGI}^c \cdot x_{VIGI}^c + \beta_{TODOS}^c \cdot x_{TODOS}^c \\
 & +\beta_{LOC}^c \cdot x_{LOC}^c + \beta_{RAN}^c \cdot x_{RAN}^c + \beta_{HOT}^c \cdot x_{HOT}^c + \beta_{MIX}^c \cdot x_{MIX}^c \\
 & +\beta_{P0}^c \cdot x_{P0}^c + \beta_{P5}^c \cdot x_{P5}^c + \beta_{P15}^c \cdot x_{P15}^c + \beta_{P30}^c \cdot x_{P30}^c + \beta_{P50}^c \cdot x_{P50}^c + \beta_{P75}^c \cdot x_{P75}^c \\
 & +\beta_{P100}^c \cdot x_{P100}^c + \beta_{P250}^c \cdot x_{P250}^c + \beta_{P500}^c \cdot x_{P500}^c + \beta_0^c + \varepsilon_{DEL}^c
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

Variable	Coef.	$\beta$	Sig.
<b>Constante</b>	<b>,45</b>	<b>,00</b>	<b>,000 ***</b>
<b>SAN</b>	<b>,39</b>	<b>,71</b>	<b>,000 ***</b>
<b>GRI</b>	<b>,04</b>	<b>,09</b>	<b>,001 ***</b>
<b>G2</b>	<b>-,07</b>	<b>-,10</b>	<b>,000 ***</b>
<b>G3</b>	<b>-,06</b>	<b>-,08</b>	<b>,000 ***</b>
<b>G4</b>	<b>-,04</b>	<b>-,06</b>	<b>,004 ***</b>
CAMI	,00	,00	,915
MOTO	-,02	-,03	,433
VIGI	-,01	-,02	,648
TODOS	-,02	-,04	,331
RAN	,01	,02	,276
<b>HOT</b>	<b>,06</b>	<b>,11</b>	<b>,000 ***</b>
MIX	,01	,02	,507
<b>P0</b>	<b>,07</b>	<b>,05</b>	<b>,032 **</b>
P5	,04	,03	,110
P15	,03	,02	,186
P50	-,03	-,03	,166
<b>P75</b>	<b>-,09</b>	<b>-,06</b>	<b>,001 ***</b>
<b>P100</b>	<b>-,11</b>	<b>-,23</b>	<b>,000 ***</b>
<b>P250</b>	<b>-,28</b>	<b>-,20</b>	<b>,000 ***</b>
<b>P500</b>	<b>-,42</b>	<b>-,71</b>	<b>,000 ***</b>
PVAR	,01	,01	,516
$R^2_{CORR} = 0,912$			
Sig.: * (10%), ** (5%), *** (1%)			

Tabla 5.7: Coeficientes de regresión lineal 5.1.

Variable	Coef.	$\beta$	Sig.
<b>Constante</b>	<b>,53</b>	<b>,00</b>	<b>,000 ***</b>
<b>SAN</b>	<b>,39</b>	<b>,71</b>	<b>,000 ***</b>
<b>GRI</b>	<b>,04</b>	<b>,09</b>	<b>,001 ***</b>
<b>G2</b>	<b>-,07</b>	<b>-,10</b>	<b>,000 ***</b>
<b>G3</b>	<b>-,06</b>	<b>-,09</b>	<b>,000 ***</b>
<b>G4</b>	<b>-,05</b>	<b>-,07</b>	<b>,002 ***</b>
CAMI	,00	,01	,896
MOTO	-,02	-,03	,453
VIGI	-,01	-,02	,659
TODOS	-,02	-,04	,353
LOC	-,06	-,14	,063 *
RAN	-,05	-,11	,124
HOT	,00	,00	,984
MIX	-,05	-,10	,087 *
<b>NPOL</b>	<b>-,45</b>	<b>-,70</b>	<b>,000 ***</b>
$R^2_{CORR} = 0,902$			
Sig.: * (10%), ** (5%), *** (1%)			

Tabla 5.8: Coeficientes de regresión lineal 5.2.

$$\begin{aligned}
 N_{DEL}^c = & +\beta_{CAMI}^c \cdot x_{CAMI}^c + \beta_{MOTO}^c \cdot x_{MOTO}^c + \beta_{VIGI}^c \cdot x_{VIGI}^c + \beta_{TODOS}^c \cdot x_{TODOS}^c \\
 & +\beta_{LOC}^c \cdot x_{LOC}^c + \beta_{RAN}^c \cdot x_{RAN}^c + \beta_{HOT}^c \cdot x_{HOT}^c + \beta_{MIX}^c \cdot x_{MIX}^c \\
 & +\beta_{NPOL}^c \cdot x_{NPOL}^c + \beta_0^c + \varepsilon_{DEL}^c
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

Los resultados para la Grilla se muestran en las Tablas 5.9 y 5.10, mientras que los de Santiago se encuentran en el Anexo C de esta tesis.

Para el caso en que la cantidad de policías se considera una variable numérica (Ecuación 5.4 y Tabla 5.10) se tiene que ésta es la única variable significativa en la regresión, lo que indica que el tamaño de la dotación policial es la variable más importante que explica el número de delitos ocurridos en la Grilla. Por otro lado, si se considera esta variable como categórica, se obtiene otra variable estadísticamente significativa: la estrategia de distribución según hotspots, la cual tiene un coeficiente de valor positivo por lo que su uso tiende a generar peores resultados que las demás estrategias.

De igual forma que en la Sección 5.2, al hacer un análisis general de las variables se obtiene que la dotación policial tiene un efecto negativo muy claro en el número total de delitos, ya sea como variable numérica o como variable categórica (si se consideran las variables  $P0$ ,  $P5$  y  $P15$  como “pocos policías” y  $P75$ ,  $P100$ ,  $P250$  y  $P500$  como “muchos policías”). Además, los coeficientes de las variables relacionadas a los tipos de policías son cercanos a cero y no tienen significancia estadística, por lo

Variable	Coef.	$\beta$	Sig.
<b>Constante</b>	<b>,83</b>	<b>,00</b>	<b>,000 ***</b>
CAMI	-,01	-,02	,813
MOTO	-,03	-,05	,533
VIGI	-,01	-,02	,839
TODOS	-,04	-,07	,418
RAN	,00	-,01	,865
<b>HOT</b>	<b>,14</b>	<b>,18</b>	<b>,000 ***</b>
MIX	,01	,02	,677
P0	,11	,04	,324
<b>P5</b>	<b>,11</b>	<b>,11</b>	<b>,010 ***</b>
<b>P15</b>	<b>,10</b>	<b>,09</b>	<b>,027 **</b>
P50	-,02	-,02	,597
<b>P75</b>	<b>-,11</b>	<b>-,11</b>	<b>,008 ***</b>
<b>P100</b>	<b>-,18</b>	<b>-,24</b>	<b>,000 ***</b>
<b>P250</b>	<b>-,45</b>	<b>-,42</b>	<b>,000 ***</b>
<b>P500</b>	<b>-,64</b>	<b>-,89</b>	<b>,000 ***</b>
PVAR	,01	,02	,653
$R^2_{CORR} = 0,886$			
Sig.: * (10%), ** (5%), *** (1%)			

Tabla 5.9: Coeficientes de regresión lineal 5.3 para la Grilla.

Variable	Coef.	$\beta$	Sig.
<b>Constante</b>	<b>,94</b>	<b>,00</b>	<b>,000 ***</b>
CAMI	-,01	-,02	,872
MOTO	-,03	-,05	,581
VIGI	-,01	-,02	,850
TODOS	-,04	-,07	,477
LOC	-,08	-,14	,525
RAN	-,08	-,14	,519
HOT	,05	,07	,687
MIX	-,07	-,11	,538
<b>NPOL</b>	<b>-,71</b>	<b>-,92</b>	<b>,000 ***</b>
$R^2_{CORR} = 0,846$			
Sig.: * (10%), ** (5%), *** (1%)			

Tabla 5.10: Coeficientes de regresión lineal 5.4 para la Grilla.

que no se puede afirmar que uno sea más efectivo que otro en la reducción del crimen. Por último, sólo la estrategia de distribución según hotspots resultó ser significativa y con signo positivo, lo que se explica por el desplazamiento del crimen que esta estrategia induce y no controla.

## 5.4. Validación del Modelo

Si bien los modelos de simulación son capaces de generar una inmensa cantidad de resultados, es fundamental tener presente que los datos obtenidos a partir de ellos no provienen del “mundo real” y se debe tener cuidado al usarlos como si fuesen reales, ya que es posible que no representen fielmente el fenómeno que se desea estudiar.

La validación de un modelo se define como la “*comprobación de que un modelo computarizado posee un rango satisfactorio de precisión, consistente con el propósito del modelo, dentro de su dominio de aplicación*” [53], en otras palabras, consiste en el proceso de demostración de que los resultados obtenidos a partir del modelo son válidos. Esto puede ser realizado mediante una serie de pruebas a los datos obtenidos para determinar su grado de precisión y decidir si el modelo es o no válido.

Sargent (1996) describe tres enfoques utilizados para validar un modelo [52]:

- Los desarrolladores del modelo deciden si es o no válido, basados en los resultados de diversas pruebas sobre los datos obtenidos.
- Se le pide a una “tercera parte” que decida si el modelo es o no válido. La “tercera parte” es independiente de los desarrolladores y de los usuarios del modelo. Este enfoque se conoce como “Verificación y Validación Independiente” (IV&V<sup>1</sup>)
- Se utiliza un modelo de puntuaciones, donde se le asignan pesos subjetivos a varios aspectos del proceso de validación y luego se obtiene un puntaje total, el cual determinará que el modelo es válido si es mayor a un cierto umbral.

Para el modelo desarrollado en esta tesis, los dos primeros enfoques son fundamentales a la hora de decidir si el modelo es o no válido, ya que, por un lado, los datos obtenidos deben ser testeados y comparados con datos reales de delincuencia para determinar si son fieles a la realidad, y por el otro, es importante contar con el punto de vista de una persona familiarizada con los datos de delincuencia, que avale los resultados.

---

<sup>1</sup>IV&V: Independent Verification and Validation.

Sargent (1996) describe una gran cantidad de técnicas para la validación de modelos de simulación [52]. A continuación se describen las que son aplicables para el modelo desarrollado en este trabajo.

**Validación de Eventos** Se comparan los “eventos” generados por el modelo de simulación con los eventos que ocurren en el mundo real y se determina si son parecidos. Para este caso, los eventos son los delitos cometidos en el modelo, los que pueden compararse con los datos reales, tanto en cantidad como en distribución (ver Sección 5.4.1).

**Validación por Datos Históricos** Si se cuenta con una base de datos histórica, ésta puede utilizarse, en parte, para construir el modelo, dejando una porción de los datos para testear su poder predictivo. Para el caso del crimen, existen datos históricos suficientes para realizar este proceso, sin embargo, en la mayoría de los casos, éstos son difíciles de recolectar y consolidar (ver Sección 5.4.1).

**Animación del Modelo** Se utiliza una interfaz gráfica que muestre al usuario, paso a paso, lo que el modelo está haciendo a lo largo de su ejecución. Con esto se logra que el usuario observe el proceso simulado y pueda decidir si lo que está ocurriendo es una representación fidedigna del sistema simulado. En este trabajo, se utilizó la herramienta de simulación Repast Symphony, la cual cuenta con su propia interfaz gráfica que permitió observar el desarrollo de las distintas instancias del modelo (ver Sección 5.4.2).

**Gráficos Operacionales** Consiste en hacer que el modelo muestre gráficamente algunos indicadores relevantes durante la simulación, en función del tiempo. Esta técnica tiene el mismo objetivo que la Animación del Modelo, ya que ambas consiguen que el usuario visualice lo que ocurre durante la simulación, estando ésta más enfocada en los indicadores numéricos. En la simulación del crimen, es relevante graficar la cantidad de agentes de cada tipo durante el día, ya que existen patrones conocidos para el número de personas en las calles en función de la hora del día (ver Sección 5.4.2).

**Validación Interna** El modelo es ejecutado varias veces, bajo las mismas condiciones, para determinar su variabilidad. En caso de que esta variabilidad sea demasiado alta, el modelo se puede considerar inconsistente, mientras que una variabilidad baja permite tener una mayor certeza de que los resultados son confiables (ver Sección 5.4.3).

**Pruebas de Condiciones Extremas** Consiste en proveer al modelo de condiciones extremas o improbables para chequear si los resultados corresponden a los

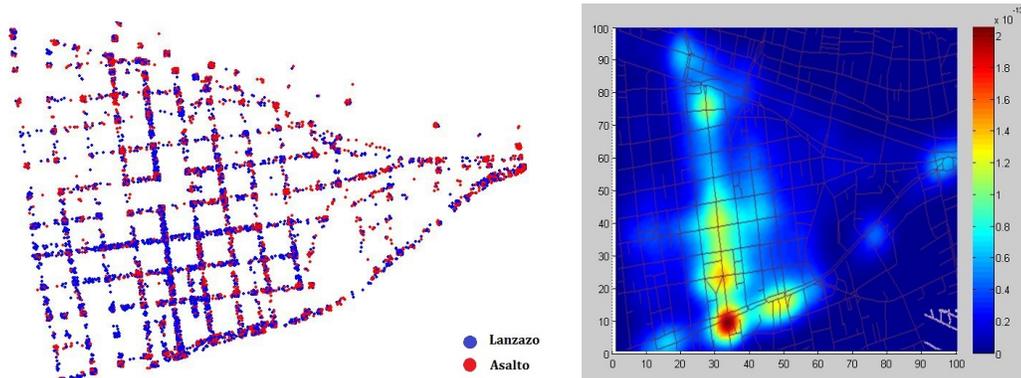


Figura 5.5: Delitos denunciados en Santiago Centro 2001-2004.

esperados bajo esas mismas condiciones en la realidad. Para el modelo de delincuencia se simularon instancias con ausencia de policías, exceso de policías, atractividad constante y ciudad monótona (ver Sección 5.4.5).

**Análisis de Sensibilidad de Parámetros** Se varían los valores de algunos parámetros del modelo para determinar el efecto que tienen algunas variables sobre el comportamiento y las salidas del modelo. Estos efectos deberían ser predecibles, ya que deben ser los mismos que ocurren en el sistema real (ver Sección 5.4.4).

### 5.4.1. Validación de Eventos y por Datos Históricos

Para realizar esta validación, se cuenta con la base de datos de las denuncias de delitos cometidos en el sector correspondiente a la Primera Comisaría de Santiago entre los años 2001 y 2004, facilitada por Carabineros de Chile. Éste corresponde al mismo territorio utilizado al modelar la ciudad Santiago Centro, descrita en la Sección 4.4.1, lo cual permite comparar los datos reales con los simulados. Sin embargo, aún así, esta comparación se hace complicada debido a que los datos consideran sólo los delitos que han sido denunciados, ignorando la cifra negra, la cual no es despreciable para los hurtos y robos en la vía pública.

Un resumen de estos datos se encuentra en el Anexo A, donde se muestra un análisis estadístico de las denuncias en Santiago. La distribución espacial de estos datos se presenta en la Figura 5.5, tanto en un mapa vectorial (izquierda) como en un mapa raster (derecha).

Para realizar esta comparación se han considerado algunos de los escenarios simu-

lados en Santiago con diversos tipos y cantidades de policías y también estrategias policiales distintas. Estos escenarios se resumen en la Tabla 5.11

<b>Escenarios</b>	
S_BASE_0	S_CAMI_LOC_30
S_MOTO_RAN_500	S_TODOS_RAN_30
S_VIGL_HOT_100	S_VIGL_MIX_30

Tabla 5.11: Escenarios de comparación con datos reales para Santiago.

La comparación directa en este caso no tiene sentido debido a que se tienen datos de cuatro años de denuncias versus simulaciones de una semana de delitos cada una. Es por esta razón que, por ejemplo, el número total de delitos cometidos no será parecido al de los datos reales, ni su distribución anual y mensual pueden ser usadas en la comparación. Sin embargo, existen patrones agregados que aún pueden ser comparados, ya que responden a tendencias presentes tanto en el modelo como en el mundo real.

Uno de estos patrones es la distribución horaria de los delitos, que se muestra en la Figura 5.6. La Figura 5.6a presenta la distribución horaria de las denuncias durante el periodo 2001-2004, mientras que los demás gráficos muestran este patrón para los escenarios de comparación propuestos en la Tabla 5.11. Es claro, en cada uno de los gráficos, que la cantidad de delitos es baja durante las horas de la madrugada y aumenta considerablemente con la luz de día, con dos periodos peak, correspondientes a las horas de almuerzo y punta tarde, siendo la segunda de menor magnitud que la primera. Los escenarios simulados son consistentes con los reales, salvo en esta última característica, ya que tienden a concentrar la mayor cantidad de delitos en el horario en que las personas regresan a sus hogares más que durante el medio día.

Otra comparación relevante es la distribución semanal de los delitos que se encuentra también en la Figura 5.6. Aquí se observa que en los datos reales (Figura 5.6b) los días de semana tienen un número significativamente más alto de delitos que los fines de semana, siendo el viernes el día con más denuncias recibidas. Una posible explicación de este fenómeno es que durante los fines de semana circula un número menor de personas por el centro de Santiago y, por lo tanto, las oportunidades de robo se reducen en gran medida. Otro factor que podría influir en esto es que los delincuentes también descansan durante los fines de semana, en particular los domingos. Las simulaciones realizadas, que asumen como supuesto que existe una menor cantidad de personas durante los fines de semana, entregan también una cantidad de delitos menor en ese periodo, sin embargo, el efecto no es tan marcado como en la realidad. Esto puede deberse a que no se usó el supuesto del descanso de los delincuentes al realizar las simulaciones.

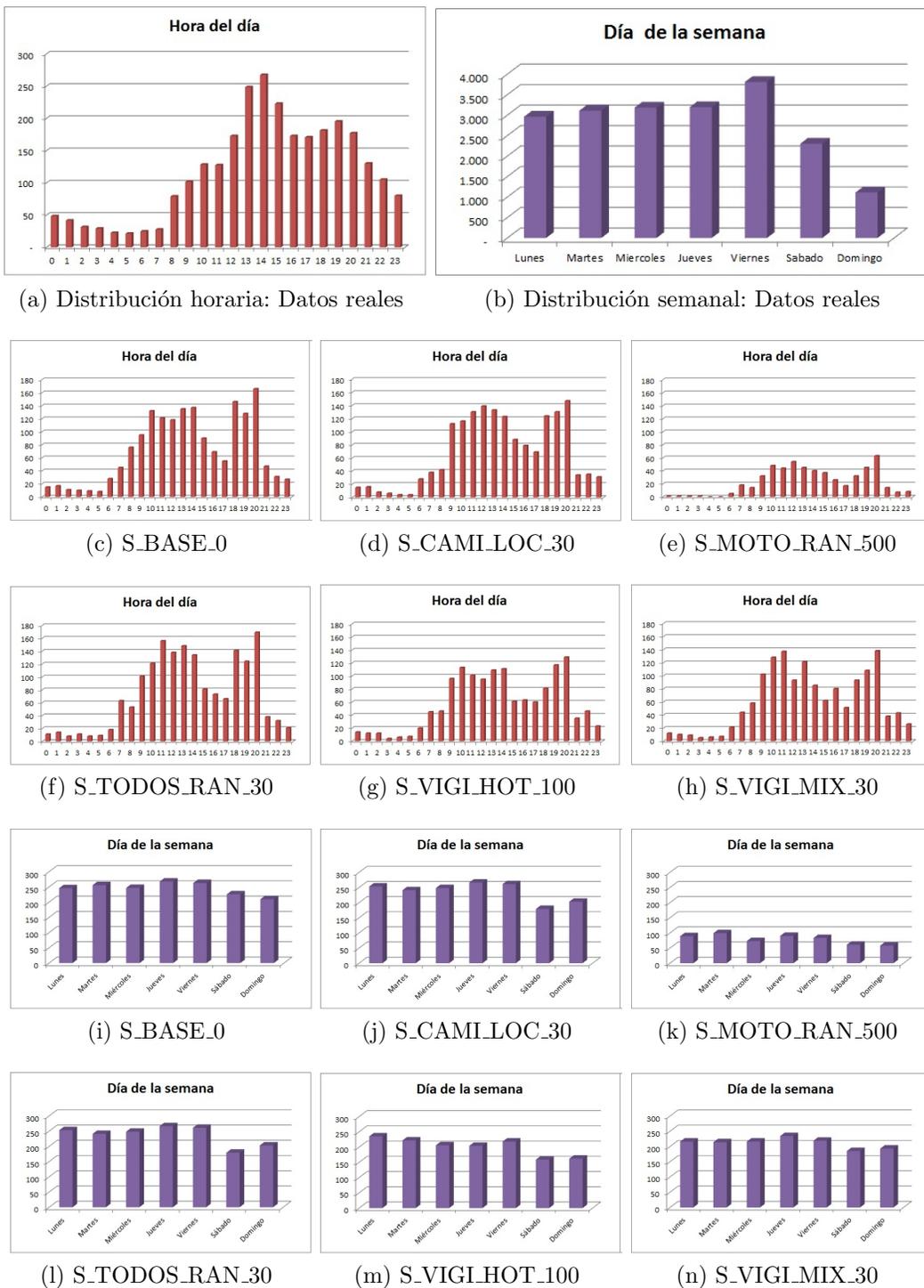


Figura 5.6: Comparación por distribución temporal.

La distribución geográfica también es un aspecto importante a comparar, ya que hay zonas que tienden a ser más peligrosas que otras, especialmente en Santiago Centro, donde estas zonas son bien conocidas. La Figura 5.7a muestra un mapa raster que representa todos los delitos que se han cometido en el periodo 2001-2004, y en ésta se ve que las zonas más conflictivas están ubicadas sobre el Paseo Ahumada, siendo hotspots secundarios las esquinas de Alameda con San Francisco, Puente con Rosas y Huérfanos con Ahumada. En las simulaciones realizadas en Santiago se observa una distribución bastante menos concentrada de los delitos, lo que sugiere que no se está capturando por completo el fenómeno que ocurre sobre el Paseo Ahumada, por ejemplo. Esto puede ocurrir debido a que no se consideró explícitamente una diferencia entre esta calle y las demás, sino que sólo se le otorgó un mayor tránsito de agentes indirectamente a través de una atractividad considerablemente más alta, tanto para ciudadanos como para delincuentes. A pesar de esto, los resultados de las simulaciones con una cantidad baja de policías son consistentes con la concentración de delitos en la esquina de Huérfanos con Ahumada (Figuras 5.7c, 5.7e y 5.7h). Por otro lado, se genera también una concentración de delitos en la zona norponiente del mapa, la cual no se advierte en los datos reales, sin embargo, esta región escapa parcialmente del territorio cubierto por la Primera Comisaría de Santiago, por lo que los datos de denuncias de este sector no están contenidos en la base de datos.

Un fenómeno interesante que puede apreciarse en la Figura 5.7g es el desplazamiento del crimen debido a la ubicación de cien policías vigilantes sobre los hotspots del caso base (Figura 5.7c). En este caso, los delitos se desplazan hacia la zona surponiente del mapa, eliminando prácticamente el peligro de los antiguos hotspots. Algo similar ocurre en la Figura 5.7h, pero en este caso existen treinta policías y sólo la mitad de ellos se ubican en los hotspots, por lo que el desplazamiento ocurre desde uno de los hotspots hacia el otro.

### 5.4.2. Animación y Gráficos Operacionales

Una de las ventajas de utilizar el software Repast Simphony® es que éste provee la posibilidad de visualizar las simulaciones mientras se ejecutan, con lo que se pueden apreciar tanto los movimientos de cada uno de los agentes como los eventos que ocurren, por ejemplo los delitos. Esto permite tener la certeza de que se está simulando lo que se pretende realmente, reduciendo en gran medida la posibilidad de que existan errores de código graves no detectados. La Figura 5.8a muestra un instante de la simulación del modelo en la ciudad Grilla 3.

Utilizando esta visualización es fácil notar que existe una tendencia de los ciudadanos a desplazarse desde las zonas residenciales a las comerciales y estudiantiles. También se observa que la concentración de agentes tiende a producirse entre el centro de la

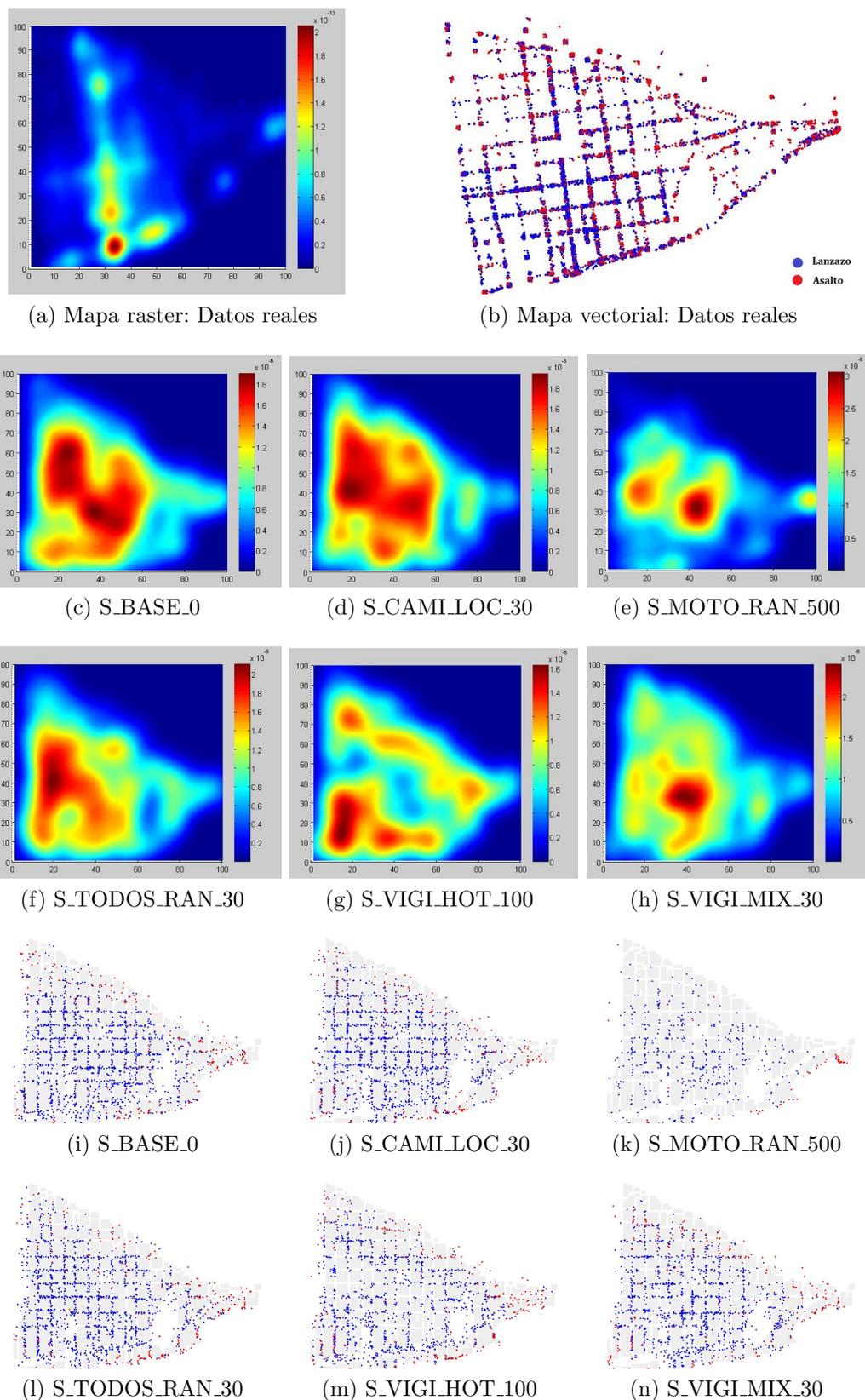
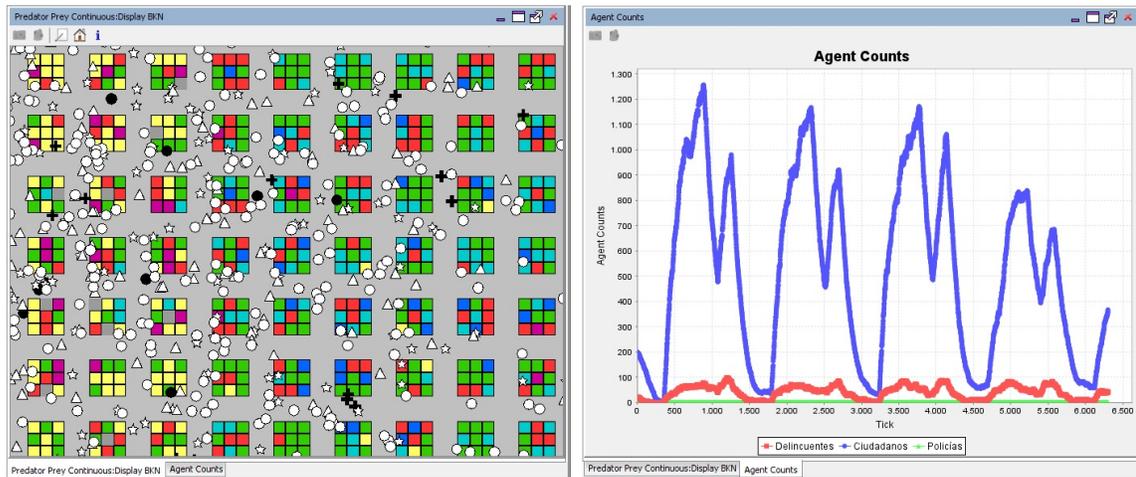


Figura 5.7: Comparación por distribución espacial.



(a) Animación del modelo

(b) Gráfico operacional

Figura 5.8: Animación y gráfico operacional en Repast Simphony.

ciudad y la zona comercial y que la periferia suele ser la región menos poblada de cada ciudad. La estrategia policial es otra de las características de cada escenario que se puede apreciar perfectamente durante la animación, ya que se observa su asignación inicial y su desplazamiento, el que es consecuente con la estrategia planteada en todos los casos.

Por otro lado, este software también posee la capacidad de mostrar, en tiempo real, un gráfico con los indicadores relevantes sobre los agentes, sus atributos y/o variables globales durante la simulación. En este trabajo se consideró relevante la visualización de la cantidad de agentes de cada tipo en función del tiempo, tal como se observa en la Figura 5.8b, donde se muestran los indicadores de un escenario en el que no se utilizan policías, entre los días miércoles y sábado de la semana simulada. La cantidad de ciudadanos (en azul) y la cantidad de delincuentes (en rojo) varían de acuerdo a la hora del día, siendo la hora de almuerzo la que alcanza un mayor número de agentes, mientras que la hora punta tarde constituye un peak secundario.

### 5.4.3. Validación Interna

Como se realizó un número muy alto de simulaciones distintas, resulta poco eficiente ejecutar cada una de ellas varias veces. Por esta razón, se han seleccionado algunos escenarios representativos, en el sentido de que poseen las diversas características consideradas en el resto de las simulaciones, y se han ejecutado 5 veces cada uno, para

tener una estimación de su variabilidad y consistencia. Además, se han seleccionado todos los escenarios base, descritos en la Sección 5.2.1, debido a la importancia de que sean consistentes para cumplir su fin comparativo. La Tabla 5.12 muestra los escenarios elegidos para la validación interna, el promedio de delitos ( $\bar{x}$ ), la desviación estándar ( $\sigma$ ) y el porcentaje que representa ésta con respecto al promedio ( $\frac{\sigma}{\bar{x}}$ ).

Se puede apreciar que la variabilidad de las simulaciones, en cuanto a la cantidad de delitos cometidos, es relativamente baja, por lo que el modelo no tiene grandes problemas de inconsistencia, aunque para afirmar esto con certeza se requiere un número mayor de replicaciones.

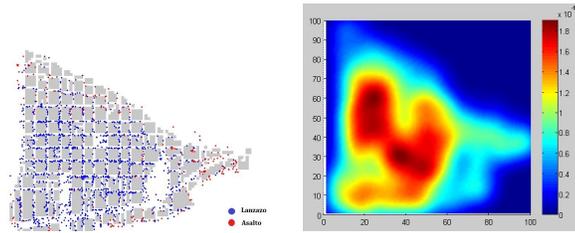
Modelo	Prom. Delitos	Desv. Est.	%
SAN_BASE_0	1.732	46	3 %
VAN_BASE_0	964	30	3 %
GRI_BASE_0	1026	26	3 %
G2_BASE_0	856	44	5 %
G3_BASE_0	905	36	4 %
G4_BASE_0	896	37	4 %
GRI_CAML_LOC_100	748	32	4 %
GRI_MOTO_RAN_5	1015	51	5 %
GRI_TODOS_LOC_500	299	12	4 %
GRI_TODOS_RAN_50	884	19	2 %
GRI_VIGL_RAN_30	959	29	3 %
G2_VGCM_MIX_100	656	31	5 %
G3_VIGL_HOT_30	796	30	4 %
G4_VIGL_LOC_100	557	39	7 %

Tabla 5.12: Modelos usados para la validación interna.

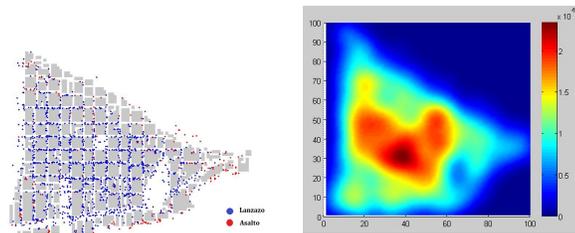
En la Figura 5.9 se observa la distribución espacial de los delitos cometidos en el escenario SAN\_BASE\_0 en cada una de sus 5 replicaciones. Si bien los mapas raster muestran algunas ligeras diferencias en la distribución de los delitos, se puede apreciar que los puntos de mayor acumulación son los mismos en cada uno, lo que se aprecia también en la Figura 5.10, que corresponde a los mapas agregados de estas mismas replicaciones.

#### 5.4.4. Sensibilidad de Parámetros

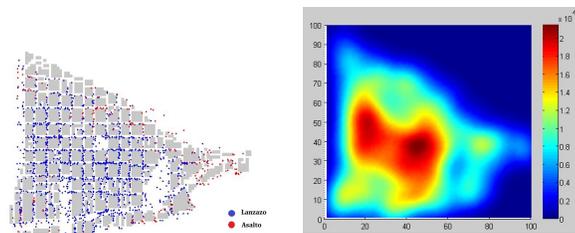
En el modelo implementado en esta tesis existen algunos parámetros globales que podrían tener una fuerte influencia en los resultados de las simulaciones, como lo son la probabilidad de cometer un delito, para un delincuente que se encuentra con una potencial víctima, las tasas de generación de agentes que tienen los edificios en cada



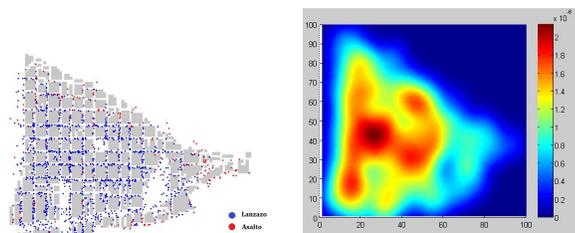
(a) Simulación 1



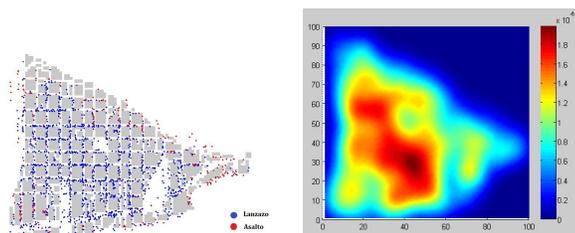
(b) Simulación 2



(c) Simulación 3



(d) Simulación 4



(e) Simulación 5

Figura 5.9: Validación interna de Santiago sin policías.

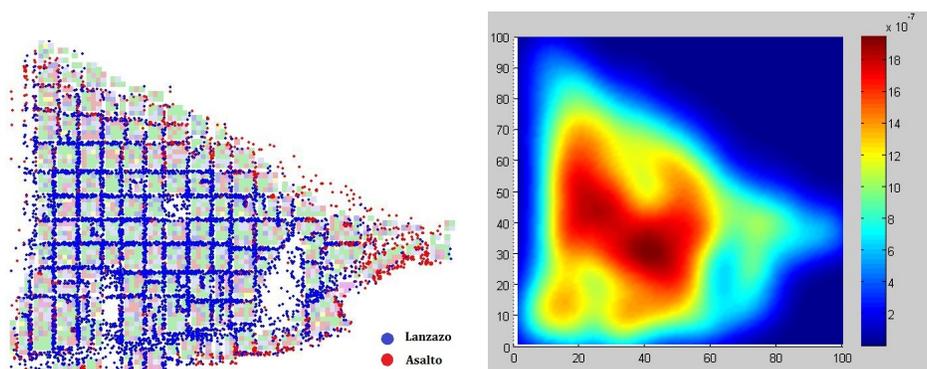


Figura 5.10: Validación interna de Santiago sin policías (mapas agregados).

periodo del día y el radio de visión de los agentes, que indica hasta qué distancia perciben la presencia de los demás. La Tabla 5.13 resume las categorías utilizadas para analizar la sensibilidad de estos parámetros.

Parámetro	Valores		
Radio de visión	corto	medio	largo
Probabilidad de delinquir	recatado	normal	temerario
Tasa de generación de agentes	baja	normal	alta

Tabla 5.13: Categorías de los parámetros analizados.

### 1. Radio de Visión

El radio de visión de los agentes representa la distancia a la que ellos son capaces de detectar a los demás, lo que lo hace importante a la hora de estimar la conveniencia de cometer o no un delito, para el caso de los delincuentes. Por un lado, un radio de visión corto, hará que los agentes se sientan más solos y con menos vigilancia, lo que resulta muy propicio para los asaltos, mientras que un radio de visión largo, tendrá el efecto contrario, y facilitará los lanzazos.

Para los escenarios analizados en este trabajo, se utilizó un radio de visión medio de 3 celdas, lo que equivale exactamente a una cuadra para las ciudades en forma de grilla. La Figura 5.11 presenta las cantidades de delitos obtenidas con un radio de visión corto (1 celda), medio y largo (5 celdas).

En todos los escenarios donde se testeó este parámetro, se obtuvo que la cantidad de asaltos se reduce drásticamente en la medida que el radio de visión es mayor, ya que los agentes se sienten menos aislados y por lo tanto las oportunidades de encontrar a una persona sola y sin la cercanía de un policía se ven

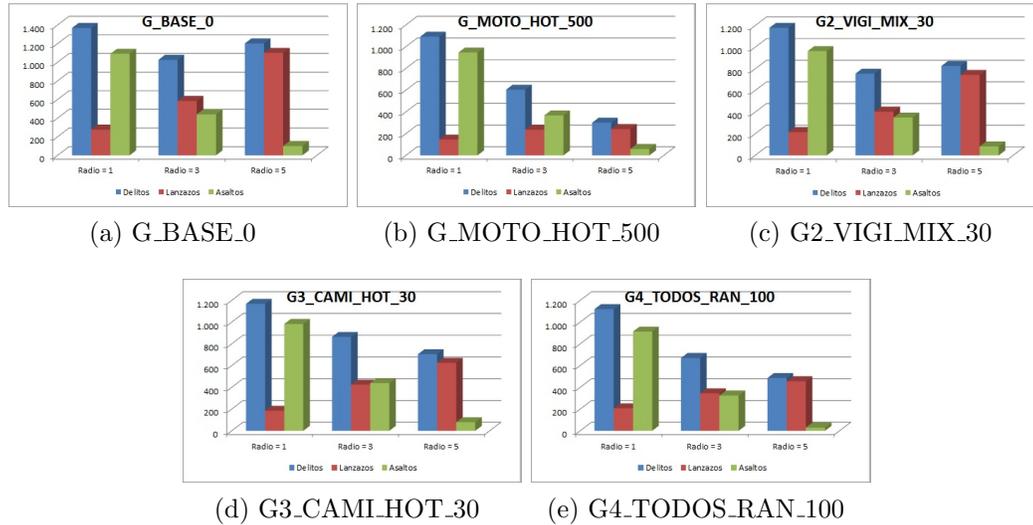


Figura 5.11: Resultados para los distintos radios de visión.

reducidas. Esto es comparable a lo que ocurre cuando se mejora la iluminación de la vía pública, ya que tiene un efecto similar que hace que los delincuentes se sientan más expuestos. La cantidad de lanzazos, por otra parte, se vio aumentada, lo que se explica debido a que el efecto de una mayor multitud entre la cual el lanza puede robar y escabullirse es mayor al efecto disuasor de la cercanía de un policía. Por último, el efecto sobre el número total de delitos no es tan claro y depende de la magnitud en que aumentan los asaltos y disminuyen los lanzazos en cada escenario.

## 2. Probabilidad de Cometer un Delito

El modelo asume que los delincuentes responden a una función de probabilidad al momento de decidir si cometer o no un delito, cuando se presenta la oportunidad. Esta función depende de la cantidad de ciudadanos y policías cercanos y tiene distintas formas para lanzas y asaltantes. Para el análisis de sensibilidad se incorporan dos tipos de funciones de probabilidad: la recatada y la temeraria. La primera considera que los delincuentes toman más precauciones a la hora de tomar la decisión, es decir, en promedio sólo cometen delitos cuando se presentan oportunidades inmejorables, lo que se debe traducir en una menor tasa de delincuencia. Por otro lado, la función de probabilidad temeraria asume que los delincuentes toman decisiones de forma más osada y corren más riesgos, por lo que se espera que en este caso ocurra una mayor cantidad de delitos.

La Tabla 5.14 muestra las probabilidades de cometer un lanzazo y un asalto para cada uno de los casos, donde  $p$  representa el número de policías y  $c$ ,

la cantidad de ciudadanos cercanos al delincuente. A estas probabilidades se les agrega un factor aleatorio para dar variabilidad al comportamiento de los delincuentes y, así, no asumir que todos actúan igual. La Figura 5.12 presenta estas funciones de probabilidad para los casos recatado, normal y temerario.

Función	Prob. de Lanzazo	Prob. de Asalto
Recatada	$prob_L = \begin{cases} \frac{c}{30} & \text{si } p = 0 \\ \left[ \frac{c}{30 \cdot (p+1)} \right]^{\frac{3}{2}} & \text{si } p \geq 1 \end{cases}$	$prob_A = \frac{0,1}{(p+1)^3 \cdot c^3}$
Normal	$prob_L = \begin{cases} \frac{c}{20} & \text{si } p = 0 \\ \left[ \frac{c}{20 \cdot (p+1)} \right]^{\frac{3}{2}} & \text{si } p \geq 1 \end{cases}$	$prob_A = \frac{0,1}{(p+1)^3 \cdot c^2}$
Temeraria	$prob_L = \begin{cases} \frac{c}{10} & \text{si } p = 0 \\ \left[ \frac{c}{10 \cdot (p+1)} \right]^{\frac{3}{2}} & \text{si } p \geq 1 \end{cases}$	$prob_A = \frac{0,1}{(p+1)^2 \cdot c}$
Factor	$f_L \sim U [0,9; 1,1]$	$f_A \sim U [0,8; 1,2]$

Tabla 5.14: Funciones de probabilidad de los delincuentes.

Los resultados muestran que, tanto el número de lanzazos como el de asaltos crecen en la medida que los delincuentes son más temerarios, manteniéndose esta relación también para el número total de crímenes. Sin embargo, cuando los delincuentes son temerarios, se tiene una cantidad considerablemente mayor al caso normal, diferencia que es mayor a la que existe entre el caso normal y el recatado.

### 3. Tasa de Generación de Agentes

El análisis de la tasa de agentes generados durante el modelo se realiza con el objetivo de verificar si el número de agentes que participan en él tiene influencia en la cantidad de delitos. Por un lado, un número mayor de agentes hace más probable los encuentros de los delincuentes con las potenciales víctimas, además de facilitar el trabajo de los lanzas, mientras que por el otro, los asaltos podrían verse reducidos, ya que disminuye la probabilidad de encontrar agentes solitarios.

Se han considerado dos casos de comparación con respecto a las tasas utilizadas en las simulaciones originales: el primero reduce las tasas al 50% (baja) y el segundo las aumenta en un 50% (alta). La Figura 5.14 muestra la variación en las cantidades de delitos obtenidas para cinco de los escenarios testeados.

Los resultados evidencian que sí existe una cierta proporción entre el número

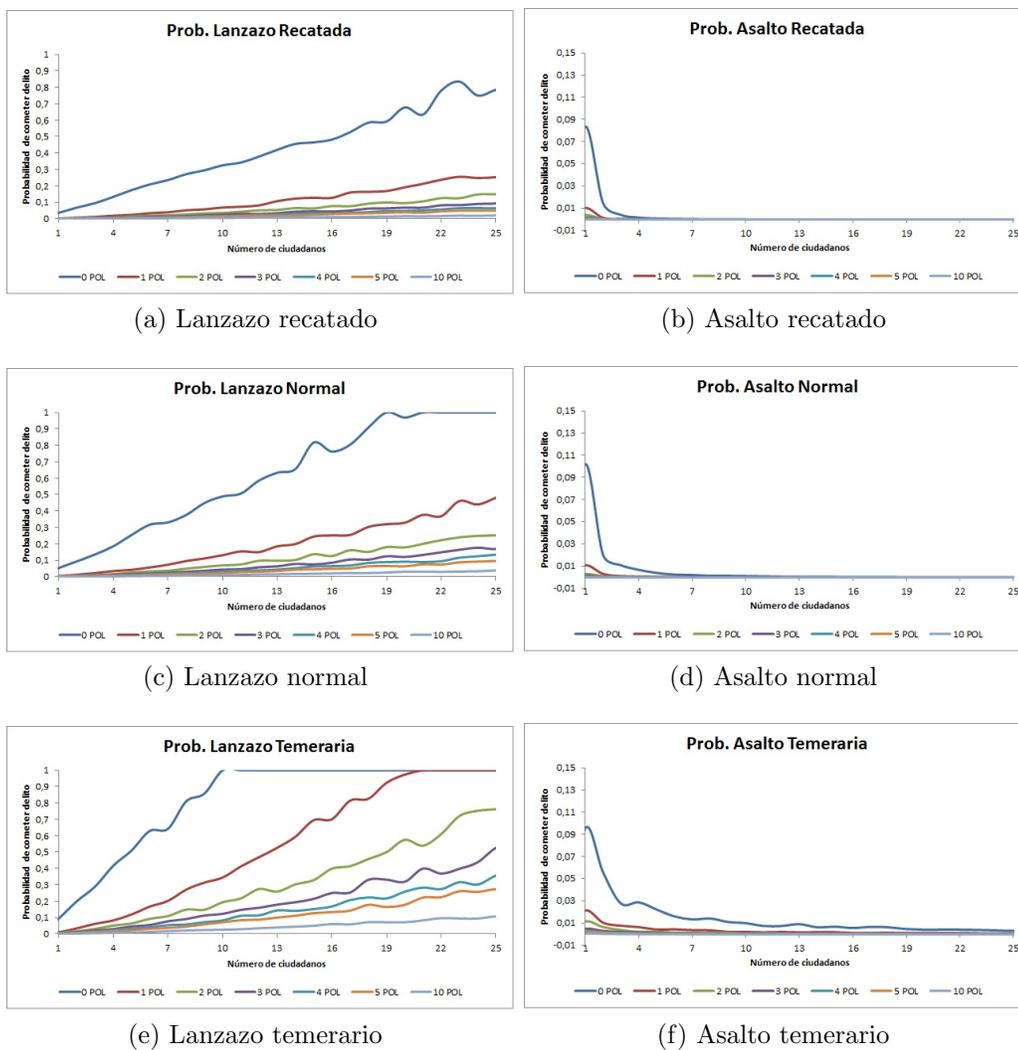


Figura 5.12: Funciones de probabilidad de los delincuentes.

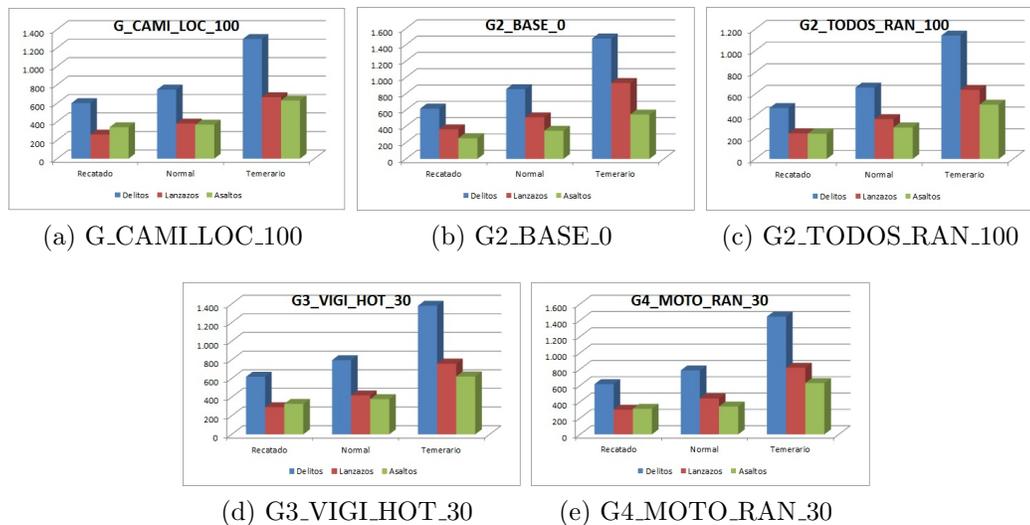


Figura 5.13: Resultados para las distintas funciones de probabilidad.

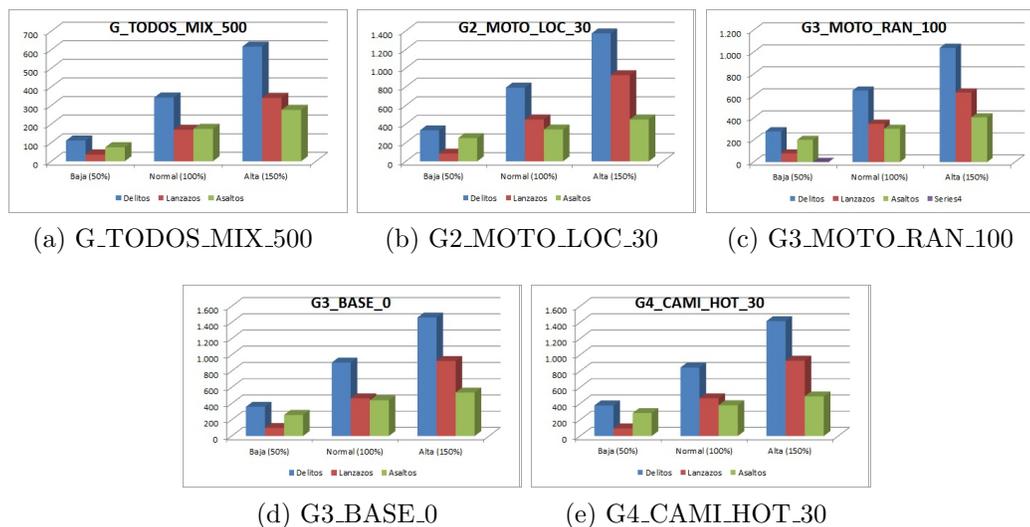


Figura 5.14: Resultados para las distintas tasas de generación de agentes.

de delitos y la cantidad de agentes en el modelo, siendo esta relación muy pronunciada para el caso de los lanzazos, mientras que para los asaltos se atenúa. Esto se puede explicar ya que se reduce la probabilidad de encontrar víctimas aisladas cuando se tiene una mayor población, lo que hace pensar que los asaltos debiesen reducirse, sin embargo, el hecho de que hayan más potenciales víctimas hace posible que estos encuentros se produzcan con mayor frecuencia, efecto que se impone a la reducción en la probabilidad de asalto cuando hay varios ciudadanos cercanos al delincuente.

### 5.4.5. Condiciones Extremas

Para este análisis se consideraron cuatro condiciones extremas, las cuales son altamente improbables en la realidad, sin embargo, si se llegaran a dar, tendrían implicancias fáciles de predecir, por lo que se espera que el modelo logre capturarlas. Estas condiciones son: sin policías, exceso de policías, atraktividad constante y ciudad uniforme, las cuales se describen a continuación.

#### 1. Sin Policías

Para analizar este caso, se utilizó la simulación base de cada una de las ciudades, ya que estos casos no consideran policías con el objetivo de identificar los hotspots naturales de cada ciudad. Como era de esperarse, en estas simulaciones base, el número de delitos obtenido fue uno de los más altos en sus respectivas ciudades, sin embargo, no siempre fue el mayor de todos, lo que ocurrió sólo en Grilla 3 y Grilla 4. La Tabla 5.15 muestra los cinco escenarios con más delitos en Santiago, donde el caso sin policías ocupa el segundo lugar, mientras que en la Tabla 5.16 se observa que el escenario base es el que tiene más delitos en la Grilla 3.

El hecho de que el caso base no sea el que tiene el mayor número de delitos puede deberse a la variabilidad de las simulaciones (ver Sección 5.4.3), sin embargo, esto sugiere que es posible que, cuando se tienen pocos policías, existan asignaciones con eficacia nula o muy baja, con lo que se obtienen resultados similares a cuando no hay policías.

#### 2. Muchos Policías

Se simularon diversos escenarios que consideran 500 policías en distintas ciudades, para todos los tipos de policías y estrategias policiales. Los resultados muestran que en todas las ciudades, los mejores resultados se obtienen al usar 500 policías, sin embargo, incluso con este número de efectivos, el crimen no es erradicado. Esto es el reflejo de que aún existen oportunidades de come-

Pos.	Escenario	Delitos	Lanzazos	Asaltos
1°	SAN.TODOS_RAN_30	1.738	1.453	285
2°	<b>SAN_BASE_0</b>	<b>1.732</b>	<b>1.462</b>	<b>270</b>
3°	SAN_CAMI_RAN_VAR	1.713	1.416	297
4°	SAN_VIGI_HOT_VAR	1.691	1.380	311
5°	SAN_CAMI_RAN_30	1.686	1.429	257

Tabla 5.15: Escenarios con más delitos en Santiago.

Pos.	Escenario	Delitos	Lanzazos	Asaltos
1°	<b>G3_BASE_0</b>	<b>905</b>	<b>464</b>	<b>441</b>
2°	G3.CAMI_HOT_30	864	425	439
3°	G3.TODOS_RAN_30	860	435	425
4°	G3.MOTO_RAN_30	858	453	405
5°	G3.CAMI_LOC_30	829	382	447

Tabla 5.16: Escenarios con más delitos en la Grilla 3.

ter delitos, ya que no toda la ciudad queda suficientemente protegida en todo momento.

La Tabla 5.17 presenta los diez escenarios con menos delitos en Vancouver, todos los cuales tienen 500 policías. Lo mismo ocurre con la Grilla, tal como se muestra en la Tabla 5.18.

Pos.	Escenario	Delitos	Lanzazos	Asaltos
1°	VAN.TODOS_LOC_500	185	172	13
2°	VAN.VIGI_LOC_500	186	183	3
3°	VAN.VIGI_RAN_500	192	172	20
4°	VAN.MOTO_LOC_500	214	191	23
5°	VAN.MOTO_RAN_500	257	214	43
6°	VAN.TODOS_RAN_500	258	229	29
7°	VAN.CAMI_RAN_500	274	227	47
8°	VAN.CAMI_MIX_500	280	208	72
9°	VAN.CAMI_LOC_500	311	266	45
10°	VAN.VGCM_MIX_500	350	259	91

Tabla 5.17: Escenarios con menos delitos en Vancouver.

### 3. Atractividad Constante

Para este análisis, la variable atractividad se fijó en cero en todos los lugares de la ciudad, tanto para ciudadanos como para delincuentes. Esto no significa que los lugares no sean atractivos para ellos, ya que la magnitud de este valor no

Pos.	Escenario	Delitos	Lanzazos	Asaltos
1º	GRI.MOTO.RAN.500	192	148	44
2º	GRI.TODOS.RAN.500	192	137	55
3º	GRI.CAMI.RAN.500	226	159	67
4º	GRI.MOTO.LOC.500	244	155	89
5º	GRI.VIGI.LOC.500	248	145	103
6º	GRI.CAMI.LOC.500	272	175	97
7º	GRI.CAMI.MIX.500	274	162	112
8º	GRI.MOTO.MIX.500	283	151	132
9º	GRI.TODOS.LOC.500	299	146	153
10º	GRI.VGCM.MIX.500	300	172	128

Tabla 5.18: Escenarios con menos delitos en la Grilla.

es relevante y sólo importa la comparación relativa entre los distintos puntos a visitar, por lo que se logra el mismo efecto con cualquier valor constante. Con esto, se pretende observar la influencia que tiene esta variable en la aparición de hotspots, ya que sin ella, la circulación de agentes por la ciudad debería ser más pareja, por lo que no habría razón por la que ciertas zonas sean mucho más peligrosas que otras.

La Figura 5.15 muestra la comparación de la distribución espacial de los delitos obtenidos a partir de las simulaciones con atractividad constante y las obtenidas en condiciones normales, tanto en Santiago como en Vancouver y sin presencia policial (casos base). La Figura 5.15a muestra un leve suavizamiento de los hotspots encontrados en el caso base de Santiago (Figura 5.15b), lo que evidencia una distribución menos localizada de los delitos, sin embargo, en este caso, los hotspots aún se mantienen en su lugar. En Vancouver, en cambio, se produce el fenómeno esperado para el caso con atractividad constante (Figura 5.15c), ya que desaparecen los principales hotspots del centro del mapa (Figura 5.15d), obteniéndose una distribución bastante más homogénea sobre la ciudad, quedando sólo dos pequeñas agrupaciones de delitos hacia la orilla surponiente de la ciudad.

#### 4. Ciudad Uniforme

La Grilla 4 es una ciudad en la que no se considera la existencia de barrios residenciales, estudiantiles ni comerciales, sino que se trata de una ciudad completamente uniforme, donde la probabilidad de que haya un edificio de cada tipo es constante sobre toda la ciudad. Este análisis pretende mostrar si los barrios tienen alguna influencia en la generación de hotspots o no.

Los resultados evidencian que hay un efecto importante de la distribución de los barrios sobre los hotspots naturales que se generan en cada ciudad.

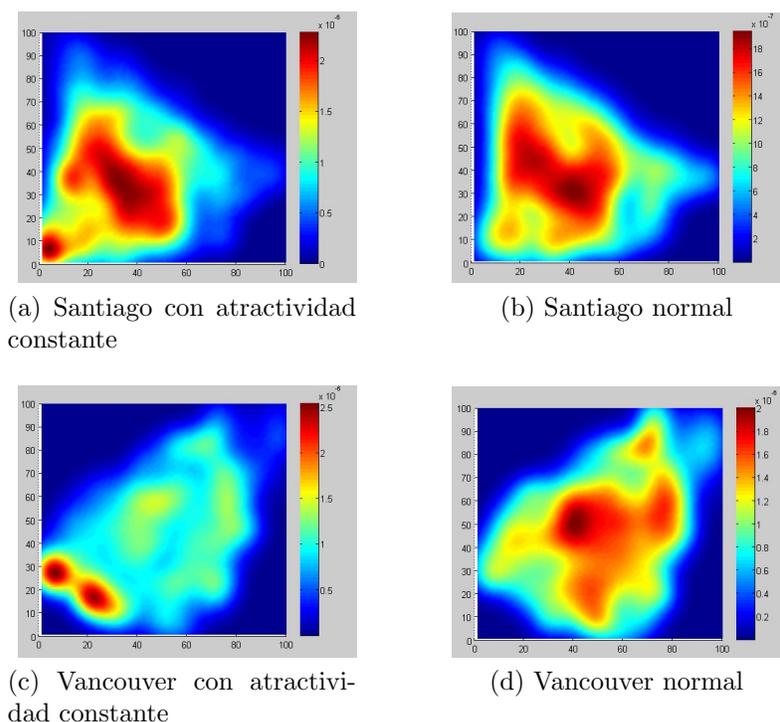
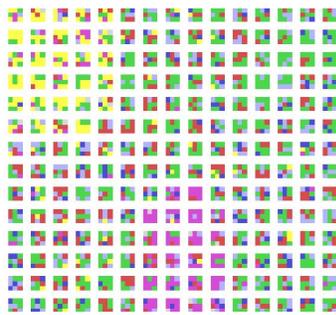


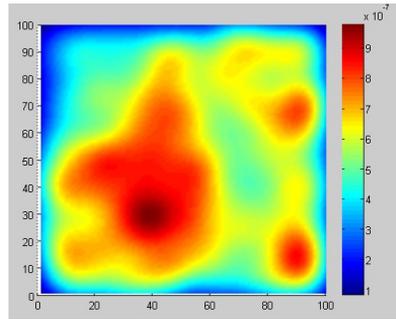
Figura 5.15: Atractividad constante versus caso normal para Santiago y Vancouver.

La Figura 5.16 es un cuadro comparativo entre estas dos distribuciones en las cuatro grillas utilizadas en este trabajo, donde la Grilla 4 se encuentra representada en las Figuras 5.16g y 5.16h.

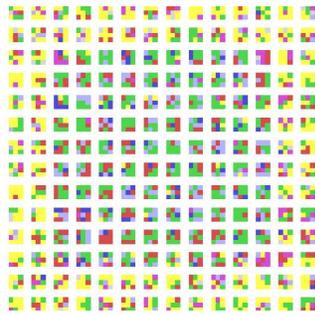
En primer lugar, se observa que en la Grilla 4 no existen zonas con una concentración de delitos considerablemente mayor que las demás, mientras que en las ciudades que consideran la existencia de barrios sí las hay. En estas ciudades existe una clara tendencia a que los delitos ocurran en los barrios comerciales y supercomerciales (en verde), dejando bastante más despejadas las zonas residenciales (en amarillo). Además, los barrios estudiantiles (en morado) también concentran una cantidad de delitos importante, lo que se ve claramente reflejado en la Figura 5.16f, ya que los dos pequeños barrios estudiantiles de la Grilla 3 aparecen como hotspots leves en el mapa raster correspondiente (Figura 5.16h).



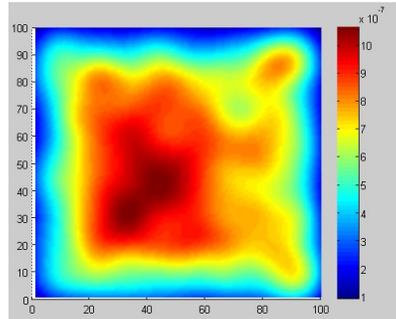
(a) Barrios en Grilla



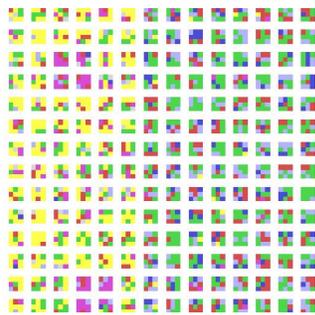
(b) Hotspots en Grilla



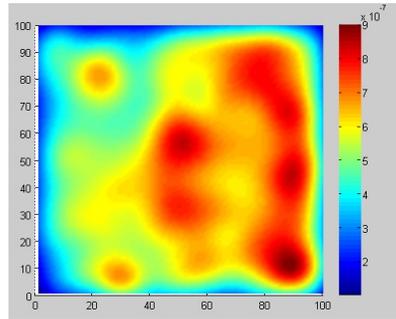
(c) Barrios en Grilla 2



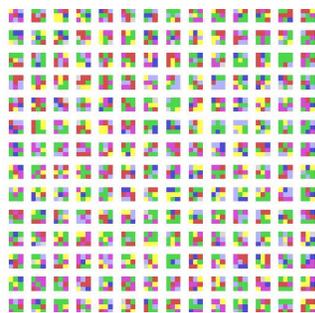
(d) Hotspots en Grilla 2



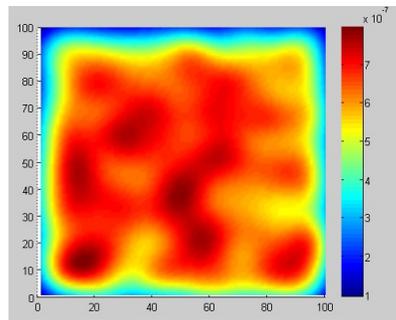
(e) Barrios en Grilla 3



(f) Hotspots en Grilla 3



(g) Barrios en Grilla 4



(h) Hotspots en Grilla 4

Figura 5.16: Distribución de barrios y hotspots en las Grillas.

# Capítulo 6

## Aplicaciones del Modelo

### Índice

---

4.1. Introducción . . . . .	38
4.2. Repast Simphony . . . . .	39
4.3. Visualización . . . . .	41
4.4. Definición de Escenarios . . . . .	42
4.5. Aspectos Generales de las Simulaciones . . . . .	49

---

### 6.1. Introducción

En los Capítulos 3 y 4 se describió el modelo con el que realizó este trabajo y se dieron a conocer los detalles de su implementación computacional, mientras que en el Capítulo 5 se presentaron los principales resultados obtenidos y la validación de éstos. En este Capítulo se darán a conocer otros 2 ejemplos de aplicaciones del simulador desarrollado en esta tesis, las cuales, incorporan aspectos que el modelo principal no considera, lo que demuestra que se trata de una herramienta versátil, capaz de adaptarse a distintos requerimientos sin perder su potencial en el apoyo a la toma de decisiones anti-delictivas.

La primera aplicación incorpora el comportamiento estratégico de los agentes en su proceso de toma de decisiones, mediante el uso de la teoría de juegos. Bajo este enfoque se logra que cada uno intente obtener el mayor beneficio en base a sus acciones y las de los demás. En este modelo no se consideran las víctimas de los delitos, ya que éstas se asumen como parte del atractivo de cada lugar, por lo que

sólo participan policías y delincuentes. La segunda aplicación incorpora un nuevo tipo de delito y un entorno distinto, ya que se trata del robo en tiendas dentro de un mall, la principal diferencia con respecto al modelo original radica en que los delitos ya no son cometidos sobre las personas, sino que sobre las tiendas, por lo que las oportunidades surgen en cualquier lugar que no esté vigilado y la prevención de estos robos depende de las medidas de seguridad que tomen los administradores de las tiendas y del mall.

En la Sección 6.2 se describe la aplicación del simulador sobre el modelo de asignación de recursos policiales basado en la teoría de juegos, en el cual se buscan estrategias de distribución para la policía que minimicen el beneficio que obtienen los delincuentes al robar en la ciudad. Además, se muestra la implementación, los resultados y las conclusiones de una instancia en particular de este modelo. La Sección 6.3 presenta una aplicación dinámica del modelo anterior, en la cual se incluye el tiempo para modelar el efecto que tiene el cambio en la distribución policial en el beneficio percibido por los delincuentes. En la Sección 6.4 se presenta el modelo de robo en tiendas, en el que se simula el tránsito de los visitantes de un mall y el robo ocurrido dentro de él, mediante funciones de probabilidad que capturan la oportunidad, que se les presenta a los individuos, de llevarse un ítem sin ser detectados.

## **6.2. Modelo Estático de Teoría de Juegos para el Control del Crimen**

### **6.2.1. Introducción**

La asignación de recursos es un problema complejo que deben enfrentar muchas organizaciones, particularmente la policía. La dificultad de decidir dónde localizar los recursos está explicada en el problema fundamental de la economía: “¿Cómo satisfacer necesidades ilimitadas con recursos limitados?”. Para el caso de la policía, esto se traduce en que se cuenta con un número limitado de efectivos policiales y de vehículos, mientras que la delincuencia puede aparecer en cualquier sector de la ciudad y en cualquier momento, haciendo imposible una completa vigilancia y una prevención total del crimen.

El objetivo de este modelo es representar las interacciones que ocurren entre la policía y los delincuentes, donde los primeros buscan reducir al mínimo la delincuencia y los últimos pretenden maximizar su utilidad personal obtenida a través de los delitos. Para ello, se utiliza un enfoque de teoría de juegos de suma cero, en el que las estrategias consisten en la ubicación de los jugadores y los pagos representan

indirectamente el número de delitos cometidos, que unos buscan maximizar y los otros minimizar.

Esta aplicación corresponde sólo a una instancia del modelo de distribución policial basado en teoría de juegos creado y desarrollado en extenso por Espejo (2011) [28] y se utiliza como un ejemplo para mostrar la versatilidad del simulador, que le permite ser utilizado en distintas aplicaciones y con diversos fines, como en este caso lo es la investigación.

### 6.2.2. Descripción del Modelo

Este modelo simplifica la geografía de la ciudad, traduciéndola en una grilla, donde cada celda representa una zona relevante para el análisis criminal. Estas zonas pueden ser, por ejemplo, intersecciones de calles, barrios, comunas, hotspots, entre otros.

Se asume que los delincuentes son completamente homogéneos, es decir, son indistinguibles entre sí. Esto trae consigo varias implicancias, una de las cuales es que todos los delincuentes cometen el mismo tipo de delito, siendo la única diferencia, el lugar donde lo cometen. Otra consecuencia de lo anterior es que cada delincuente recibe la misma utilidad si delinque en el mismo lugar.

La utilidad que recibe un delincuente depende de tres factores:

1. **Atractividad:** La riqueza intrínseca del lugar en el que delinque. Representa y resume todas las características del lugar que influyen en la decisión del delincuente de dónde robar, como la cantidad de potenciales víctimas, iluminación, vías de escape, etc.
2. **Congestión:** El número de delincuentes que roba en el mismo lugar. Un mayor número de delincuentes operando en el mismo sector reduce el valor esperado del beneficio de delinquir en ese lugar, ya que es más probable que otro delincuente se adelante ante una oportunidad de robo.
3. **Vigilancia:** El número de policías que vigila esa zona. La vigilancia reduce la posibilidad de cometer un delito, por lo que un mayor número de policías reduce la utilidad de los delincuentes.

La policía actúa de forma coordinada, distribuyendo a sus efectivos sobre el territorio para dar vigilancia a las celdas, buscando reducir la utilidad de los delincuentes, lo que equivale, bajo los supuestos de este modelo, a reducir el número de delitos. Su estrategia se basa, entonces, en la proporción de sus fuerzas que se ubicará en cada celda.

### 6.2.3. Aplicación del Simulador

El modelo descrito anteriormente admite una serie de estrategias de cada uno de los jugadores, sin embargo, para efectos de esta simulación se utilizó la instancia que se describe a continuación.

Los delincuentes compiten entre ellos por el beneficio de los delitos, siguiendo un juego de tipo Nash, donde se llega a un equilibrio en el que ninguno tiene incentivos a cambiar de lugar y todos obtienen la misma utilidad. De esta forma, se ubican en la celda con mayor valor intrínseco hasta que la congestión haga esta celda menos atractiva que la segunda. Luego, los siguientes delincuentes se ubican, tanto en la primera como en la segunda celda con mayor valor, hasta que éste sea menor a la tercera en ambas celdas. Este procedimiento se repite hasta que se haya ubicado el último delincuente, lo que dará como resultado que todos tendrán la misma utilidad y las celdas más atractivas tendrán una gran cantidad de delincuentes, mientras que las menos atractivas podrían terminar sin delincuencia.

La interacción entre la policía y los delincuentes se modela como un juego del tipo Stackelberg, donde existe un líder que es la policía y los seguidores que son los delincuentes. Primero, el líder elige su estrategia, distribuyéndose en la grilla y luego, cuando los seguidores observan esto, se ubican según el equilibrio de Nash encontrado sobre ese escenario. La policía debe escoger la distribución que minimice la ganancia de los delincuentes, anticipando la respuesta que ellos tengan a su estrategia.

El rol del simulador en este modelo es el de replicar muchas veces las estrategias mixtas<sup>1</sup> utilizadas por la policía, ya que el uso de estrategias puras<sup>2</sup> se considera sub-óptimo, debido a que son un subconjunto de las estrategias mixtas, el cual no cambia en el tiempo.

Este modelo se implementó para una instancia de 64 celdas, distribuidas como tablero de ajedrez, tal como lo muestra la Figura 6.1. Se utilizó una cantidad de 2 mil delincuentes y 40 policías.

Asumiendo que los delincuentes siempre actúan de forma independiente y, por lo tanto, su comportamiento se puede modelar siempre como un juego de tipo Nash, la policía establece cuatro estrategias distintas para afrontar el problema de la delincuencia:

- **Distribución Uniforme** La policía se distribuye de manera uniforme sobre el territorio en cada periodo, es decir, la probabilidad de que cada policía vigile una celda  $k$  es:

---

<sup>1</sup>Estrategias Mixtas: consideran una componente probabilística en la opción a elegir.

<sup>2</sup>Estrategias Puras: consideran las opciones disponibles de una forma determinística.

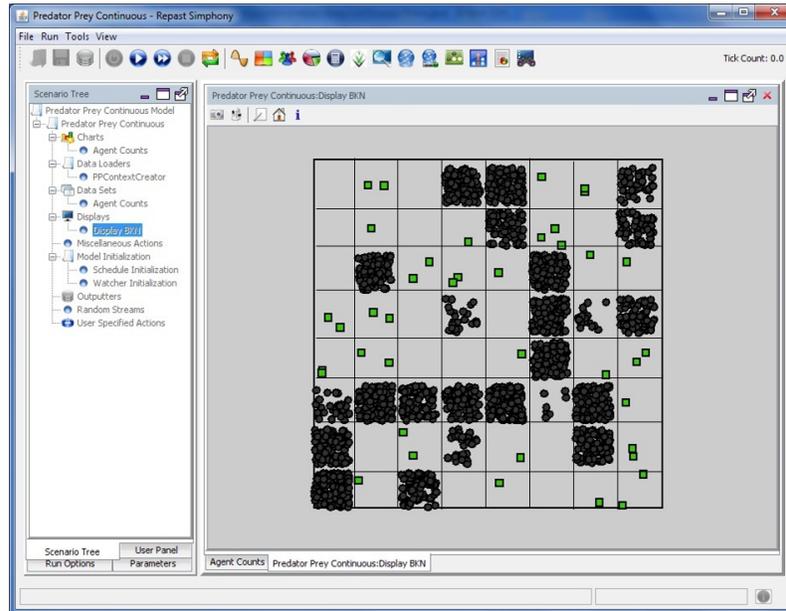


Figura 6.1: Grilla de 8x8 celdas utilizada en el modelo de teoría de juegos.

$$p_k = \frac{1}{K}$$

- **Distribución con Desfase** La policía observa la distribución de los delincuentes en el periodo anterior y utiliza la misma distribución para sus fuerzas en el periodo actual. Formalmente:

$$p_k^t = d_k^{t-1}$$

- **Distribución según Atractividad** Se le asigna una mayor dotación policial a las celdas con mayor atractividad de forma proporcional. En otras palabras, la distribución policial está dada por:

$$p_k = \frac{a_k}{\sum_i a_i}$$

- **Distribución Óptima de Stackelberg** Se resuelve el problema de optimización que busca la distribución policial cuya respuesta por parte de los delincuentes tenga el menor pago para ellos. Luego, se utiliza esta distribución para vigilar la ciudad, es decir, la que se obtiene del problema de optimización:

$$\min_{p_k} \sum_{k=1}^K V_k(p_k, d_k^*(p_k))$$

Las variables utilizadas en la descripción anterior se explican en la Tabla 6.1.

Variable	Descripción
$K$	Número total de celdas
$p_k$	Probabilidad de que un policía se ubique en la celda k
$a_k$	Atractividad intrínseca de la celda k
$d_k^t$	Proporción de los delincuentes que se ubican en la celda k en el periodo t
$d_k^*(p_k)$	Distribución de los delincuentes que maximiza su beneficio individual, dado que la policía se distribuye según $p_k$
$V_k(p_k, d_k)$	Beneficio obtenido por los delincuentes dado que se distribuyen según $d_k$ y la policía según $p_k$

Tabla 6.1: Variables y su explicación.

### 6.2.4. Resultados y Análisis

El modelo fue ejecutado mil veces para cada estrategia policial, obteniéndose los resultados que muestra la Tabla 6.2 y que se grafican en la Figura 6.2.

	Stackelberg	Uniforme	Desfase	Atractividad	Sin Policías
Máximo	81.379	88.742	86.857	85.275	94.869
Promedio	71.524	77.199	77.824	72.530	94.859
Mínimo	62.383	65.102	70.397	61.885	94.847
Desv. Est.	3.066	3.838	2.600	3.732	7

Tabla 6.2: Resultados de mil simulaciones según estrategia policial.

De la Figura 6.2 se desprende rápidamente que las estrategias que mejor funcionaron en promedio fueron la basada en la atractividad y la estrategia óptima de Stackelberg, ya que el pago obtenido por los delincuentes bajo esas estrategias se reduce entre un 24 % y un 25 % con respecto al escenario sin policías, mientras que las estrategias de desfase y uniforme sólo lo reducen entre un 18 % y un 19 %. Esto se explica, en primer lugar, ya que la estrategia de Stackelberg es un óptimo en probabilidad y al ser repetido el experimento un número grande de veces, el promedio de los resultados tiende hacia el óptimo. Por otro lado, el buen funcionamiento de la estrategia basada en la atractividad se explica debido a que la policía se anticipa al comportamiento de los delincuentes, y busca reducir mediante vigilancia la

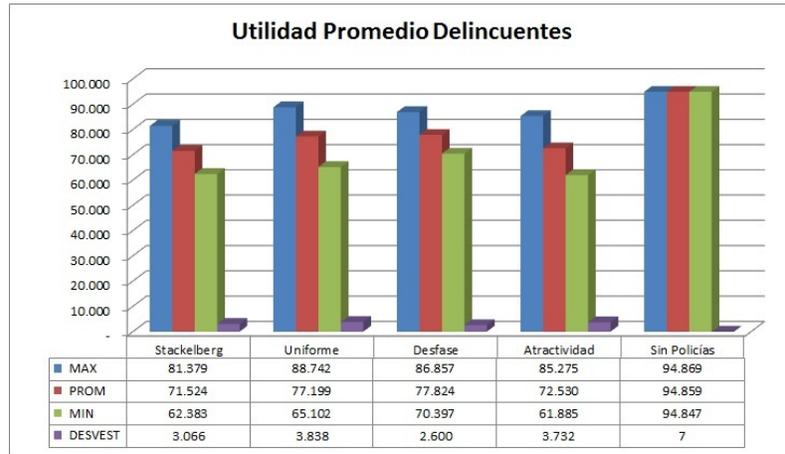


Figura 6.2: Resultados de mil simulaciones según estrategia policial.

atractividad de las celdas favoritas para ellos, con lo que el pago que reciben los delincuentes se ve afectado drásticamente desde un comienzo y no pueden obtener un mejor resultado.

Si se hace un análisis del peor caso, el cual se define como la iteración en la que los delincuentes obtuvieron la máxima utilidad, se puede apreciar que la mejor estrategia sigue siendo la de Stackelberg, la que mantiene una diferencia no despreciable con el resto. Por otro lado, no es sorprendente que el peor caso de todos lo tenga la estrategia de distribución uniforme, ya que no se basa en ningún criterio relacionado con el actuar de los delincuentes, sino que más bien corresponde a la estrategia menos costosa de utilizar por parte de la policía, ya que no necesita hacer ningún análisis previo.

El mejor caso se produce bajo la estrategia de distribución según atractividad, manteniendo una leve diferencia con el óptimo de Stackelberg, lo que se explica debido a que es una distribución que muy probablemente será usada también por los delincuentes y, por lo tanto, en alguna de las iteraciones la acción de la policía debería contrarrestar en gran medida a los delincuentes. Por otra parte, el mejor caso de la estrategia del desfase es el peor de todos, ya que el actuar rezagado de la policía con respecto a la distribución de los delincuentes no tiene una base sólida que garantice un buen resultado en el combate del crimen.

Observando las desviaciones estándar obtenidas en la ganancia percibida por los delincuentes en las mil iteraciones, se puede apreciar que están entre un 3% y un 5% de sus valores para las cuatro estrategias testeadas, mientras que es prácticamente nula para el caso sin policías. Con esto se puede decir que los promedios obtenidos

en las simulaciones son valores bastante confiables para evaluar la eficiencia de cada una de las estrategias en este escenario en particular, bajo los supuestos adoptados. Por esta razón, se concluye que la estrategia de Stackelberg es la mejor opción para la policía, sin embargo, en caso de ser muy costoso resolver el problema de optimización relacionado, se recomienda usar la distribución según atractividad, ya que sus resultados sólo difieren en un 1% de los obtenidos bajo Stackelberg y su aplicación no involucra más allá de un simple cálculo.

## 6.3. Modelo Dinámico de Teoría de Juegos para el Control del Crimen

### 6.3.1. Introducción

Este modelo es el mismo que se describió en la Sección 6.2.2, al cual se le ha añadido una componente temporal que busca evaluar el comportamiento del beneficio que obtienen los delincuentes al robar, en función del cambio en la estrategia de los policías en cada periodo.

Para esto se ha considerado que un delincuente obtiene un beneficio de acuerdo a la función de utilidad de la Ecuación 6.1, en la que  $C_k$  es el beneficio obtenido por robar en la celda  $k$ ,  $x_k$  es la proporción de delincuentes que se ubica en esa celda,  $s_k$  es la proporción de policías que la vigilan y  $\beta_k$  es su atractivo intrínseco.

$$C_k = \beta_k \left[ 1 - \frac{x_k(1 + s_k)}{2} \right] \quad (6.1)$$

Dado que los delincuentes se distribuyen de acuerdo a un equilibrio de Nash, las celdas en las que se produce crimen deben tener todas la misma atractividad, de lo contrario, habrían incentivos para cambiar de lugar. Por otra parte, las celdas en las que no hay delitos deberían tener una atractividad estrictamente menor a las demás, debido a que no están siendo elegidas por los delincuentes. De esta forma, en el equilibrio se tiene que el beneficio de los delincuentes por robar en la celda  $k$ , viene dado por la Ecuación 6.2, donde  $C$  es el beneficio de equilibrio y está dado por la Ecuación 6.3.

$$C_k = \begin{cases} C & x_k > 0 \\ \beta_k < C & x_k = 0 \end{cases} \quad (6.2)$$

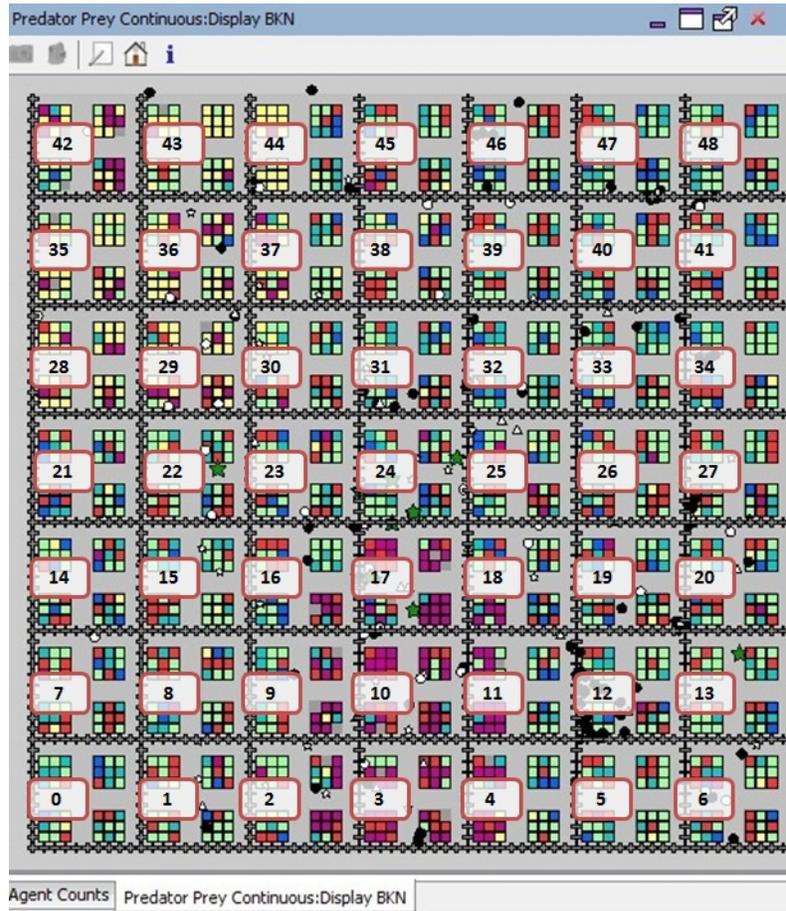


Figura 6.3: Simulación del modelo dinámico de teoría de juegos para el control del crimen.

$$C = \max_{k/x_k > 0} \left\{ \beta_k \left[ 1 - \frac{x_k(1 + s_k)}{2} \right] \right\} \quad (6.3)$$

### 6.3.2. Aplicación del Simulador

En este modelo, se utiliza el simulador para re-estimar las atractividades intrínsecas de cada celda, una vez que ha transcurrido un periodo. Esto se debe a que los delincuentes incorporan en su proceso de decisión del lugar donde robar, la vigilancia de la policía y la cantidad de delitos en el periodo anterior.

En cada periodo  $t$ , las celdas tienen una atractividad intrínseca  $\beta_k^t$ , la cual se utiliza

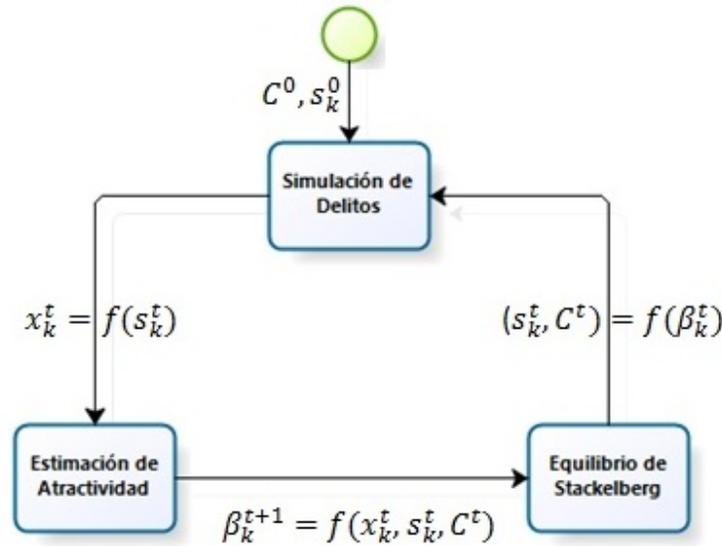


Figura 6.4: Esquema de la aplicación del simulador para el modelo dinámico de teoría de juegos para el control del crimen.

para obtener la estrategia óptima de la policía  $s_k^t$  en el juego de Stackelberg, en el cual es el líder y los delincuentes son los seguidores. Además, se obtiene el beneficio de equilibrio de los delincuentes bajo ese escenario  $C^t$ . Una vez que se tiene esta información, se realiza una simulación de  $D$  días en los cuales se distribuyen  $NP$  policías “vigilantes” en las celdas, según la distribución  $s_k^t$  y se consideran  $ND$  delincuentes “lanzas”. El promedio de los delitos que ocurren en una celda en los  $D$  días de simulación se utiliza para estimar la distribución de los delincuentes en ese periodo  $x_k^t$ , la que finalmente, sirve para re-estimar las atractividades  $\beta_k^{t+1}$  para el periodo siguiente y volver a comenzar el ciclo. La Figura 6.4 ilustra el proceso descrito, el cual se reitera durante los  $T$  periodos que se desee.

A modo de ejemplo, se implementó un modelo sencillo que considera sólo  $K = 49$  celdas,  $NP = 10$  policías y  $ND = 100$  delincuentes, en el que se realizan simulaciones de  $D = 10$  días, cada una. Este proceso se iteró por  $T = 7$  periodos, considerando como condiciones iniciales,  $C^0 = 100,000$  y  $S_k^0 = 0$ , es decir, no hay presencia policial.

### 6.3.3. Resultados y Análisis

La Figura 6.5 muestra una gráfica de los resultados de las iteraciones de este modelo. En la figura 6.5a se muestra un descenso en el beneficio que obtienen los delincuen-

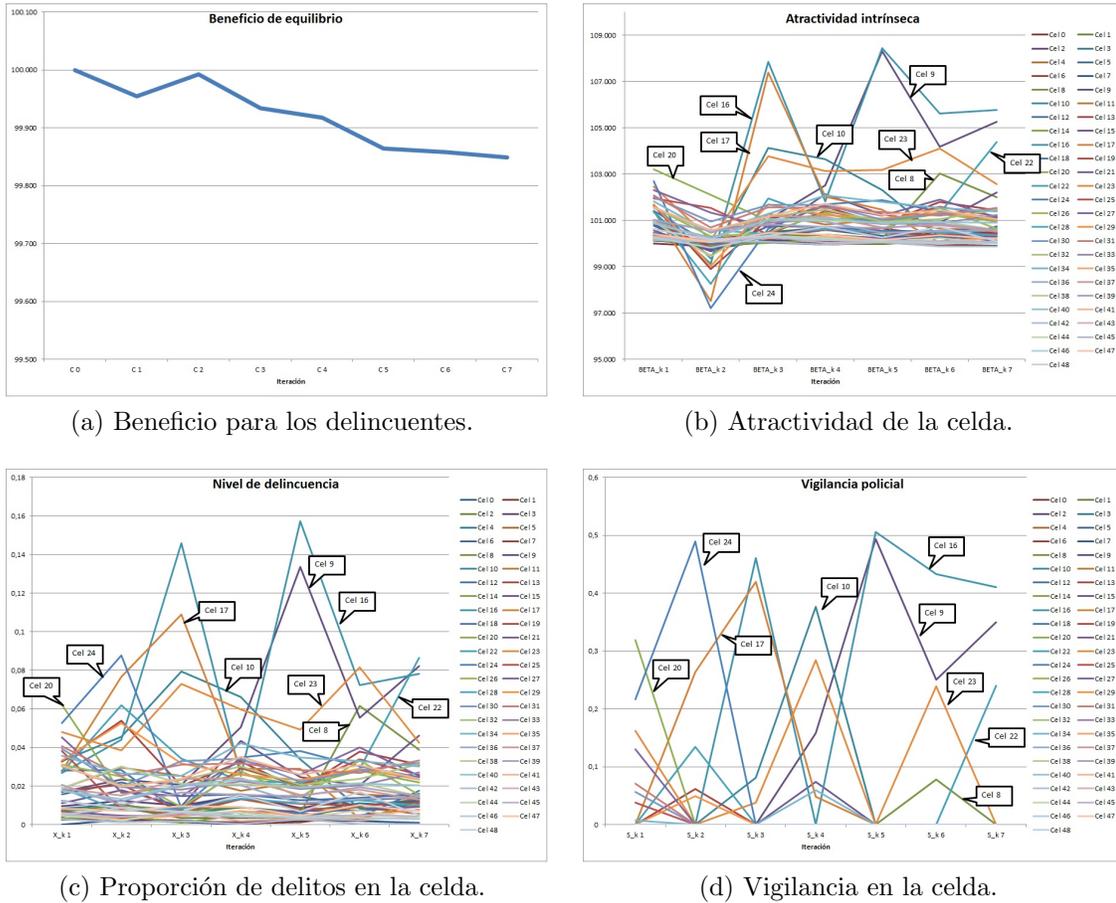


Figura 6.5: Gráfica de los resultados de la aplicación del simulador al modelo dinámico de teoría de juegos para 7 iteraciones.

tes a medida que avanzan las iteraciones, lo que refleja el hecho de que cada vez les resulta menos atractivo delinquir en los lugares donde acostumbran. Por otro lado, la atractividad de las celdas (Figura 6.5b) a las que se les asigna vigilancia policial varía notoriamente de acuerdo a ella (Figura 6.5d), lo cual es consecuente con el efecto esperado de asignar policías en ellas. Por último, la proporción de los delitos (Figura 6.5c) que ocurren en las celdas menos atractivas, no presenta mayor variación, sin embargo, las celdas con mayor atractivo presentan una proporción de delitos muy variable, ya que éstos se ven fuertemente afectados por la presencia policial en esos lugares.

La reducción del beneficio de los delincuentes puede atribuirse, principalmente, a que en cada iteración de este modelo se obtiene una estimación más precisa de la atractividad de cada celda, ya que se están considerando, tanto la vigilancia policial

como los delitos ocurridos en la iteración anterior. Esto permite que el equilibrio de Stackelberg se aproxime cada vez más a una asignación óptima de los recursos policiales, lo que se ve reflejado en la tendencia a converger del beneficio de los delincuentes. Sin embargo, existen celdas cuyas atractividades no convergen rápidamente, debido a que en algunas iteraciones cuentan con vigilancia policial y en otras no. Este problema puede deberse al reducido número de iteraciones realizadas o a la oscilación natural de este valor, producida por la “persecución” de los delincuentes a lo largo del tiempo, lo que se produce al estimar la atractividad en función de las variables del periodo anterior. En otras palabras, se tiene un “juego del gato y el ratón”: si la policía vigila la celda  $A$ , el delincuente se traslada a la celda  $B$  hasta que la policía llegue a ese lugar, luego de lo cual el delincuente regresa a la celda  $A$  y así sucesivamente.

Esta última teoría es la que mejor explica las oscilaciones en la atractividad, la vigilancia y la proporción de delitos en cada celda, sin embargo, se necesita un número mayor de iteraciones para confirmar este fenómeno, en caso de que estos valores no converjan, lo cual requiere una automatización de los tres procesos de la Figura 6.4, lo que actualmente se realizan en programas distintos que no tienen comunicación automática.

Las Secciones 6.2 y 6.3 han presentado dos aplicaciones importantes del simulador desarrollado en esta tesis, en el modelo de asignación de recursos policiales basado en teoría de juegos. En el modelo estático se reflejó su capacidad de analizar distintas estrategias a ser aplicadas en un mismo periodo de tiempo, para evaluar la mejor opción sobre una base estadísticamente robusta, mientras que en modelo dinámico, se pudo apreciar su utilidad para el mejoramiento de la eficiencia policial a través del tiempo. Finalmente, cabe destacar que la finalidad de estas aplicaciones es la de mostrar la capacidad que tiene este modelo de simulación de entregar información útil para la toma de decisiones en cuanto a políticas anti-delictivas.

## 6.4. Modelo de Simulación de Robo en Tiendas en un Mall

### 6.4.1. Introducción

El modelo descrito a continuación simula el comportamiento de las personas en el mall Metrotown, ubicado en Burnaby, Vancouver, Canadá, el cual se muestra en la Figura 6.6. El objetivo de este modelo es replicar los robos cometidos en las tiendas, fenómeno conocido como “robo hormiga” (o *Shoplifting*, en inglés), usando

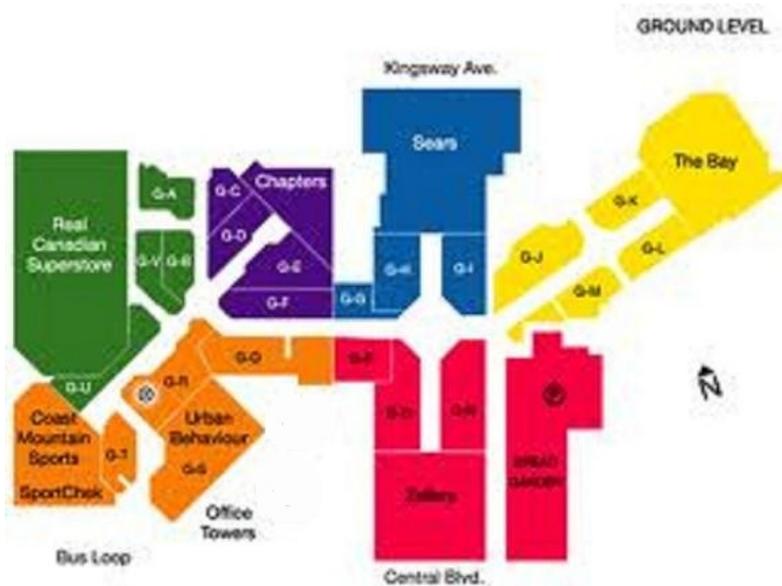


Figura 6.6: Esquema del primer piso del mall Metrotown.

un modelo de simulación basado en agente.

Los robos han sido divididos en dos categorías: “oportunistas” y “deliberados”, dependiendo de la intención de los ladrones. Esta clasificación se relaciona con la caracterización que Brantingham y Brantingham le dan a este mall, como un “generador de crimen” y un “atractor de crimen” [12]. La gran cantidad de personas que visitan a diario Metrotown genera las oportunidades propicias para robar en las tiendas, debido a la imposibilidad de vigilar a cada persona que compra en ellas, por parte de los administradores del mall, y al mismo tiempo, atrae a los ladrones que tienen la intención de robar en las tiendas, porque saben que en ese lugar tendrán las oportunidades para hacerlo.

### 6.4.2. Descripción del Modelo

En esta adaptación del modelo existen cuatro tipos de agente: Trabajadores, Compradores, Ladrones “Oportunistas” y Ladrones “Deliberados”.

- **Trabajadores:** Los trabajadores son las personas que trabajan en el mall y su presencia puede desalentar un robo. Se mueven siempre dentro de sus respectivas tiendas.

- **Visitantes:** Son las personas honestas que visitan el mall. Caminan a lo largo del pasillo buscando una tienda a la cual entrar, y se mueven dentro de las tiendas, buscando algo que comprar. Los compradores nunca roban, pero su presencia puede desalentar a otros agentes de hacerlo.
- **Ladrones Oportunistas:** Los oportunistas son similares a los visitantes, excepto porque ellos pueden robar algún producto si se presenta la oportunidad. En otras palabras, ellos se mueven dentro de las tiendas e incluso compran productos, pero cuando nadie los vigila pueden robar algún item de la tienda.
- **Ladrones Deliberados:** Los deliberados, a diferencia de los oportunistas, acuden al mall con la intención de robar productos, y por esta razón, esperan a que se presenten las condiciones apropiadas para ello, cuando se encuentran dentro de una tienda. La presencia de cualquier otro agente pueden desalentarlos de robar, incluso otros ladrones, porque ellos no se reconocen entre sí.

Todos los agentes tienen asociada su edad y una ruta compuesta de tiendas a ser visitadas, aunque siempre pueden verse tentados a entrar a una tienda cercana en el camino a su próximo destino. Además, tienen un “periodo de vida” durante el cual permanecerán en el mall.

Las tiendas tienen como atributos su tamaño, y su nivel de seguridad, el cual representa y mide las distintas estrategias que tienen los dueños para prevenir el robo en sus tiendas (cámaras de vigilancia, alarmas en la entradas, espejos, guardias de seguridad, etc.) [19]. El número de trabajadores no fue incluido dentro del nivel de seguridad porque será una variable a ser estudiada por separado. Este modelo también fue ejecutado usando la herramienta Repast Symphony® [48], como se muestra en la Figura 6.7.

### 6.4.3. Escenario Estándar

Al igual que en el modelo original, en este caso también se desarrolló un escenario estándar con algunas características y supuestos básicos para utilizarlo en el posterior análisis, en el cual algunos parámetros son modificados para comparar los resultados y determinar qué configuración de parámetros entrega resultados más parecidos a la realidad. Los principales supuestos se describen a continuación:

#### Sobre el Mall

- El mall abre a las 9:00 a.m. y cierra a las 23:59 p.m. Cuando cierra, todos los agentes abandonan el mall.

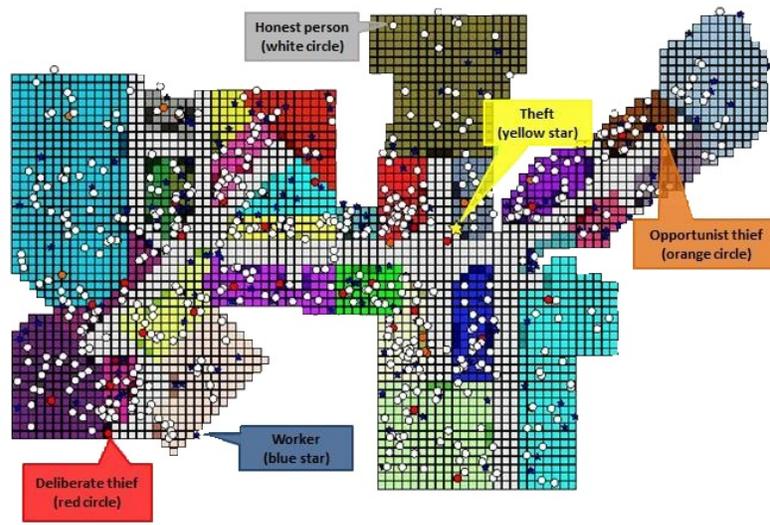


Figura 6.7: Modelo de simulación de robo en tiendas en Repast Simphony.

- Existen 30 tiendas con distintos tamaños, niveles de seguridad y cantidad de trabajadores. Se consideró sólo el primer piso del mall.
- Los agentes sólo pueden entrar y salir de las tiendas a través de sus respectivas entradas. No pueden ir de una tienda a otra sin pasar antes por el pasillo.

### Sobre el Tiempo

- El día se divide en 4 periodos, los cuales determinan las tasas de llegada de los agentes, que dependen de la hora del día. Estos periodos se llaman: mañana, almuerzo, post-almuerzo y noche.
- Los fines de semana tienen los mismos periodos, pero con distintas tasas de llegada, por ejemplo, en los fines de semana, las mañanas tienen una mayor tasa de llegada que en los días de semana, ya que hay más personas disponibles para ir al mall, mientras que en la semana, la mayoría de ellas debe trabajar.

### Sobre las Tiendas

- Cada tienda tiene al menos 2 trabajadores todo el tiempo.
- El mínimo nivel de seguridad es 0 (sin seguridad) y el máximo es 10.

- Cada tienda tiene la misma probabilidad de aparecer en las rutas de los agentes, lo cual se traduce en que todas tienen la misma atractividad.

### Sobre los Agentes

- Los agentes aparecen en el mall de acuerdo a la tasa de llegada en un lugar al azar.
- Tienen asociada una edad aleatoria, que depende del periodo del día en el que aparecen, un "tiempo en mall" durante el cual permanecen en el modelo, un "tiempo en tienda" para permanecer dentro de una tienda y una ruta aleatoria de tiendas a visitar.
- Si se encuentra en el pasillo, el agente se mueve en la dirección a la próxima tienda en su ruta. Si hay una entrada a otra tienda cerca del agente, existe una probabilidad de que entre en la tienda antes de proseguir con su ruta original.
- Si está en una tienda, a veces se queda quieto y a veces se mueve aleatoriamente hasta que se cumple su "tiempo en tienda", luego comienzan a caminar hacia la salida más cercana.
- Los ladrones tienen una probabilidad de robar que depende del número de agentes que lo rodea y del nivel de seguridad de la tienda. Esta probabilidad nunca es cero.
- Cuando los ladrones deliberados están dentro de una tienda, tienen una probabilidad de esperar en lugar de moverse. Esto representa el proceso de búsqueda de una oportunidad de robar, la cual aparece cuando hay pocas personas alrededor.

#### 6.4.4. Modelos Modificados

Para comparar resultados, se escogieron las variables que se muestran en la Tabla 6.3, junto a sus posibles valores, para realizar un análisis comparativo. En esta Tabla, el valor " $f(tam)$ " representa un valor proporcional al tamaño de la tienda, medido en sus unidades de área, mientras que el valor "Estándar" se refiere a la misma proporción de ladrones utilizada en el escenario estándar.

Mientras el escenario estándar usa un valor fijo de cada una de estas variables, los modelos modificados alteran una variable a la vez, con respecto a él. El valor de las variables en cada modelo se encuentra en la Tabla 6.4.

Variable	Opciones			
Niv. de Seguridad	2	5	8	$f(tam)$
Nro. de Trabajadores	2	5	7	$f(tam)$
Tipo de Ladrón	Oportunistas	Deliberados	Ambos	-
Prop. de Ladrones	Estándar	2×Oport.	2×Delib.	2×Visit.

Tabla 6.3: Distintos valores para las variables de análisis.

Modelo	Niv. Seg.	Nro. Trab.	Tipo Ladrones	Prop. Ladrones
Estándar	$f(tam)$	5	Ambos	Estándar
Niv. Seg. Bajo	2	5	Ambos	Estándar
Niv. Seg. Medio	5	5	Ambos	Estándar
Niv. Seg. Alto	8	5	Ambos	Estándar
Trab. Prop. Tam.	$f(tam)$	$f(tam)$	Ambos	Estándar
Pocos Trab.	$f(tam)$	2	Ambos	Estándar
Muchos Trab.	$f(tam)$	7	Ambos	Estándar
Sólo Oportunistas	$f(tam)$	5	Oportunistas	Estándar
Sólo Deliberados	$f(tam)$	5	Deliberados	Estándar
Más Oportunistas	$f(tam)$	5	Ambos	2×Oport.
Más Deliberados	$f(tam)$	5	Ambos	2×Delib.
Más Visitantes	$f(tam)$	5	Ambos	2×Visit.

Tabla 6.4: Valores de las variables en cada modelo.

### 6.4.5. Resultados

Para cada modelo se simuló un periodo de 100 días, cada uno de los cuales tiene 15 horas (09:00 a.m. a 23:59 pm) y se consideraron distintas tasas de llegada de los agentes, tanto en los días de semana como en los fines de semana, para representar el mayor número de personas en el mall durante estos últimos, especialmente en las mañanas. Los principales resultados de cada modelo se muestran a continuación.

#### - Escenario Estándar

La distribución de los robos en la simulación del escenario estándar se presenta en la Tabla 6.5 y en la Figura 6.8.

#### - Según Nivel de Seguridad

Como el nivel de seguridad de una tienda influye directamente en el proceso de decisión de los ladrones, en cuanto a si robar o no, no extraña que mientras más grande es este valor, más pequeño es el número total de robos. Sin embargo,

Modelo	Robos	Oportunistas	Deliberados
Estándar	4.692	1.424 (30,4%)	3.268 (69,6%)

Tabla 6.5: Resultados del escenario estándar.

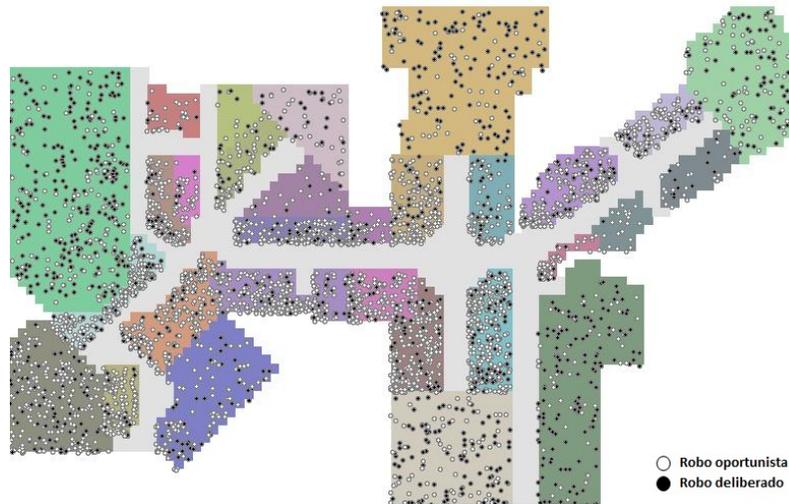


Figura 6.8: Distribución espacial de los robos en el escenario estándar.

este efecto es más fuerte en los ladrones deliberados, quienes buscan explotar las tiendas con un bajo nivel de seguridad, mientras que los oportunistas no planean robar hasta que se encuentran con una buena oportunidad.

El escenario estándar tiene un nivel de seguridad que depende del tamaño de la tienda, pero su promedio es cercano a 3, mientras que los modelos con bajo, medio y alto nivel de seguridad tienen un nivel de 2, 5 y 8, respectivamente. Sin embargo, las tiendas más grandes tienen más espacio, el cual facilita que los ladrones encuentren una oportunidad, lo que explica que el escenario estándar no tenga más robos que el modelo con Nivel de seguridad medio. La Figura 6.9 muestra los resultados para los distintos niveles de seguridad y para el escenario estándar.

#### - Según Número de Trabajadores

Además del nivel de seguridad de una tienda, la probabilidad de robar depende del número de personas cercanas al ladrón, pero en este modelo, la presencia de un trabajador es cinco veces más efectiva para desincentivar un robo. Esto es porque un trabajador está obligado a defender los productos en la tienda, mientras que una persona común puede actuar como si nada pasara, a pesar

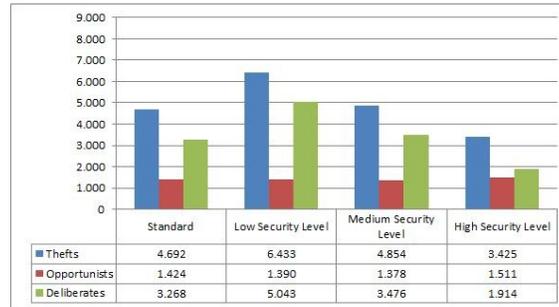


Figura 6.9: Cantidad de robos según nivel de seguridad.

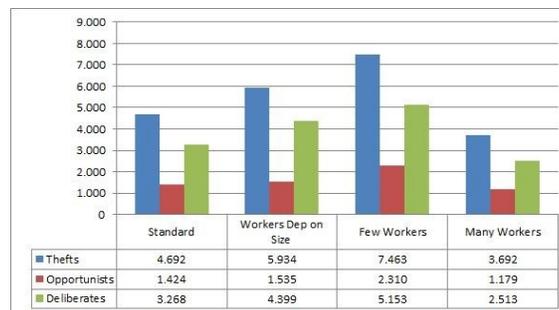


Figura 6.10: Cantidad de robos según número de trabajadores.

de haber presenciado un ilícito.

Mientras mayor sea el número de trabajadores que tiene la tienda, mayor es el “área cubierta”. Los resultados de la simulación, que se presentan en la Figura 6.10, muestran una clara relación entre el número de trabajadores y el número de robos, recordando que pocos trabajadores, muchos trabajadores y el escenario estándar tienen 2, 7 y 5 trabajadores, respectivamente. El modelo “trabajadores según el tamaño de la tienda” tiene, en promedio, 4 trabajadores por tienda y es un buen parámetro de comparación, porque cada trabajador cubre, aproximadamente, la misma área, ya que las tiendas más grandes poseen más de ellos.

#### - Según Tipo de Ladrones

El análisis del “tipo de ladrones” determina si existe un efecto de congestión entre ellos o no. Este efecto es posible debido a que los ladrones no se reconocen entre ellos, ya que todos lucen como gente normal, por lo que también pueden ser inhibidos de robar en la presencia de otros ladrones. Los resultados muestran que este efecto es mínimo, ya que la suma de los robos obtenidos en los modelos “sólo oportunistas” y “sólo deliberados” difiere sólo en un 4 % del

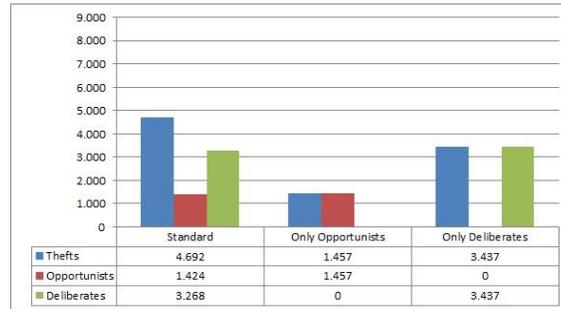


Figura 6.11: Cantidad de robos según tipo de ladrones.

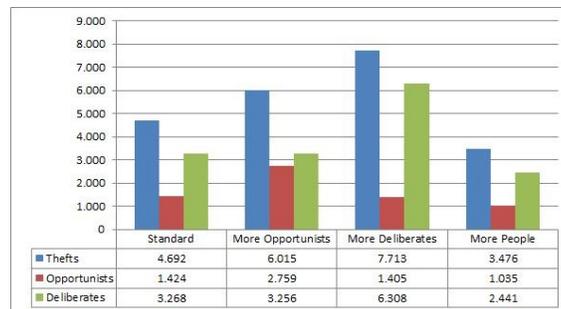


Figura 6.12: Cantidad de robos según proporción de ladrones.

escenario estándar, en el cual ambos tipos de ladrones están presentes. En la Figura 6.11 se observa este fenómeno.

**- Según Proporción de Ladrones**

Es claro que mientras más alto sea el número de ladrones, mayor será el número de robos obtenidos, pero es interesante que en todos los escenarios se obtienen más robos del tipo deliberado que del oportunista. Además, el número de robos aumenta sólo un 22% cuando existe el doble de ladrones oportunistas y un 39% cuando existe el doble de ladrones deliberados, lo que significa que los ladrones deliberados tienen un mayor impacto en el número total de robos en tiendas.

Los resultados, presentados en la Figura 6.12, también muestran que, si existe el doble de personas honestas, el número de robos se reduce en un 26%, debido a la “vigilancia extra” que proveen. Esto significa que mientras más poblada está una tienda, más robos son evitados.

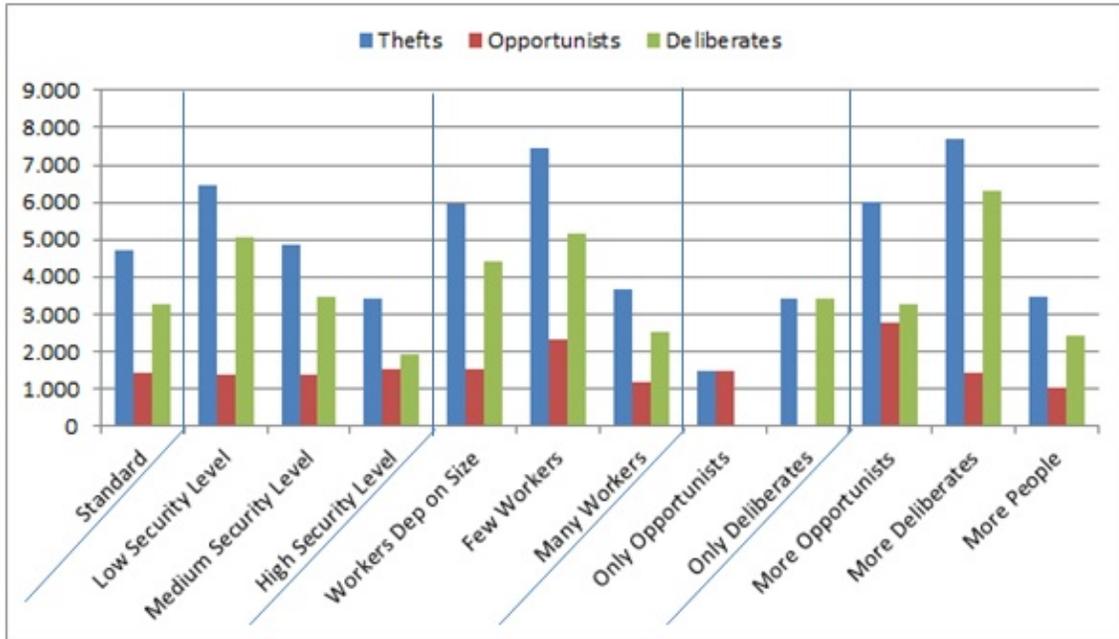


Figura 6.13: Resultados de todos los escenarios.

### 6.4.6. Conclusiones

Observando los resultados, es claro que en todos los escenarios, el número de robos deliberados tiende a ser mayor que el de oportunistas, como se observa en la Figura 6.13. Esto se puede explicar por el proceso búsqueda de la oportunidad que el ladrón deliberado realiza, a diferencia del oportunista. Como los robos son cometidos cuando la oportunidad aparece, será más frecuente que esto le suceda a los ladrones que esperan por su oportunidad de robar. Estos resultados muestran que el robo oportunista es un fenómeno pequeño en comparación con el deliberado, lo que significa que las acciones preventivas deberían ser enfocadas en este último.

El efecto de los trabajadores y del nivel de seguridad es claro, pero ninguno de los dos es absoluto, siendo un trabajador extra más eficiente que el incremento en una unidad del nivel de seguridad, lo cual no puede interpretarse sin antes definir las categorías correspondientes a cada valor de esta última variable. Los resultados muestran que un mínimo número de trabajadores es necesario, pero el hecho de tener muchos de ellos no es muy efectivo, ya que los robos no desaparecen por completo.

El número total de crímenes en el escenario estándar es 4.692, lo que significa que hubo 1,5 robos por tienda por día, donde aproximadamente 1,0 fue deliberado y 0,5, oportunista. Estos números pueden ser razonables dependiendo de la severidad del

problema de robo en tiendas en este mall. Si este no es el caso, el modelo deberá ser calibrado, utilizando datos reales, para representar la tasa real de robos en ese mall.

# Capítulo 7

## Conclusiones

### Índice

---

5.1. Introducción . . . . .	51
5.2. Análisis por Variable . . . . .	52
5.3. Análisis General . . . . .	59
5.4. Validación del Modelo . . . . .	66

---

### 7.1. Introducción

La simulación a partir de modelos basados en agente ha demostrado tener un enorme potencial para la replicación del fenómeno criminal. A partir de este tipo de modelos, es posible estudiar el crimen desde una perspectiva individualista, en lugar de hacerlo de forma agregada, lo que permite incorporar factores del comportamiento humano, tales como el proceso de toma de decisiones en base a las condiciones del entorno. Debido a la enorme influencia que tienen estas decisiones y el comportamiento de las personas en el fenómeno criminal, el enfoque de simulación se hace necesario para comprender la manera en que estas formas de actuar individuales se traducen en los patrones agregados de crimen, que se observan a través de los datos de delincuencia.

El simulador desarrollado en esta tesis, además de generar datos a partir de una sólida base enfocada en el individuo, es flexible para adaptarse a diversos tipos de crimen, pues sólo necesita recibir como entrada un nuevo escenario y las instrucciones del comportamiento de los agentes, para representar otros tipos de crimen, tales como robo en tiendas, robo de vehículos, tráfico de drogas, entre otros.

Quizás, el aporte más importante de este modelo es que, a partir de él, se pueden tomar decisiones sobre políticas anti-delictivas basadas en los datos que genera. Esto es muy importante, ya que permite que las autoridades puedan ensayar sus estrategias antes de aplicarlas en la realidad, teniendo la posibilidad de observar los efectos que tendrían sus medidas, tanto los deseados como los no deseados, como el desplazamiento de un hotspot, por ejemplo. Además, hace posible estimar cualitativamente los beneficios obtenidos con sus acciones, de modo que se puede decidir si estas políticas son o no convenientes, considerando también el costo de aplicarlas.

## 7.2. Resultados del Estudio

Durante el desarrollo de este trabajo se simularon 335 escenarios distintos, de los cuales 36 fueron utilizados para análisis de casos extremos y de sensibilidad de parámetros, mientras que los 299 restantes corresponden a los escenarios originales, detallados en el Anexo B. Estas simulaciones corresponden a distintas combinaciones de cuatro variables: ciudad, tipo de policías, estrategia policial y número de policías.

Los resultados obtenidos entregan una primera visión del potencial que tiene este simulador, por un lado, para generar datos bien fundamentados y de calidad, y por otro, para establecer con facilidad una serie de escenarios distintos, diseñados para el análisis de variables.

En primer lugar, en el análisis de la variable número de policías, el simulador demostró consistencia con los resultados esperados, obteniéndose una reducción de los delitos a medida que aumenta la dotación policial. Además, la efectividad marginal de los policías presentó tasas decrecientes, con la excepción de algunos escenarios en los que la efectividad aumentó con los primeros policías. Todo esto es consecuente con la realidad, en el sentido de que cuando se tiene un número reducido de policías, su efectividad marginal es mayor, pues un policía extra ayuda a cubrir de mejor manera la ciudad, mientras que cuando ya existen suficientes policías para hacerlo, se hace más probable que algunos de ellos estén vigilando el mismo sector al mismo tiempo, y por lo tanto, su aporte marginal se vea reducido.

Por otro lado, se ha constatado que la variable tipo de policía no tiene un efecto significativo en la magnitud del crimen. Sólo se presentan diferencias en el desempeño de los distintos tipos de policías bajo ciertas combinaciones de estrategias y dotación policial, sin embargo, resulta imposible afirmar con certeza que un tipo de policía, de los considerados en este trabajo, es más efectivo que otro, incluyendo el tipo “*TODOS*” que considera la presencia de los tres tipos. Esto tiene sentido, ya que las únicas diferencias entre los tipos de policías, en este modelo, son su forma de moverse y su velocidad y no el grado de disuación de delitos, por lo que un delincuente no

distingue el tipo de policía a la hora de decidir si robar o no.

Las cuatro estrategias policiales testeadas resultaron ser bastante similares en su desempeño cuando se tiene una dotación policial baja, sin embargo, cuando el número de policías aumenta, la estrategia de distribución según hotspots tiene una efectividad significativamente peor que las demás. Este efecto se acentúa cuando el tipo de policía utilizado es el vigilante, ya que en este escenario se ubican policías estáticos sólo en los lugares considerados como hotspots, dejando sin protección a todo el resto de la ciudad. La estrategia mixta también presenta este problema, aunque a menor escala, ya que sólo ubica a la mitad de los policías en los hotspots, dejando a los demás para la protección del resto de la ciudad. Este fenómeno se explica por el desplazamiento espacial del crimen debido a la vigilancia, ya que, una vez que los delincuentes notan que no pueden robar con facilidad en sus sectores favoritos, buscan un lugar alternativo con menor vigilancia para delinquir. Las estrategias de distribución aleatoria y uniforme no presentan este problema cuando se tienen un número grande de policías, pues logran cubrir la ciudad por completo, sin embargo, cuando la dotación policial es escasa, no pueden hacerlo bien y se obtienen peores resultados que con las estrategias mixta y según hotspots.

En cuanto a la validez de estos resultados, luego de aplicar los métodos de validación descritos en la Sección 5.4, es posible afirmar que, en general, es satisfactoria. Por un lado, la comparación con los datos históricos de la ciudad de Santiago entregó una fuerte similitud en los patrones temporales del crimen, tanto a nivel diario como semanal. Sin embargo, los patrones espaciales presentan diferencias importantes en la mayoría de los escenarios simulados, ya que los datos reales muestran una importante concentración de delitos sobre un solo paseo peatonal, mientras que las simulaciones entregan hotspots más amplios y esparcidos por la ciudad. Esto se debe a que en el modelo no se consideró explícitamente el factor “paseo peatonal”, sino que sólo se le asignó una atractividad considerablemente mayor a esa zona y los edificios en ella. Esto sugiere que la atractividad, y su consiguiente aglomeración de personas, no son los únicos factores que caracterizan el crimen dentro de una ciudad.

La animación de las simulaciones y la generación de gráficos que muestran los indicadores importantes en tiempo real, permitieron tener la certeza de que el modelo hace exactamente lo que se le pide, en cuanto al comportamiento de los agentes y los escenarios solicitados. Gracias a esto, se pueden obtener conclusiones con la confianza de que sus resultados son consecuencia de las entradas que se le dio al modelo. Por otro lado, al analizar la variabilidad del modelo, se encontró que para un mismo escenario, la desviación estándar del número de delitos ocurridos es relativamente baja, del orden del 5% de la media en cada caso, lo que permite afirmar que el modelo es consistente en este sentido, mientras que la distribución de los delitos también presenta cierta variabilidad, aunque siempre se mantienen los lugares de

alta peligrosidad.

El análisis de sensibilidad realizado contempló tres parámetros: radio de visión de los agentes, probabilidad de cometer un delito y tasa de generación de agentes, en todos los cuales el modelo respondió como se esperaba. Un mayor radio de visión redujo los asaltos por dos motivos: primero, porque los agentes se encuentran “más expuestos” y, segundo, porque es más probable que haya un policía cerca, cuando el “radio de cercanía” es mayor. Por otra parte, los lanzazos aumentan con un radio de visión mayor debido a que el efecto de una mayor aglomeración de agentes es más fuerte que el aumento de la probabilidad de ser visto por la policía. La probabilidad de cometer delitos también tiene un efecto claro en el número de delitos cometidos en cada escenario, y este efecto también es capturado por el modelo de simulación, ya que los escenarios que consideran delincuentes temerarios tienen las tasas de crimen más altas, mientras que los delincuentes recatados terminan cometiendo un número inferior de delitos, quedando estrictamente entre ambos casos los escenarios que usan la probabilidad normal. Por último, la tasa de generación de agentes también tuvo un buen comportamiento, ya que el simulador arrojó un número de delitos bajo en los escenarios con un 50 % de la tasa normal y un número alto, en los que se consideró un 150 % de esta tasa, siendo este efecto provocado principalmente por los lanzazos.

Finalmente, el análisis de las condiciones extremas también fue satisfactorio, ya que se obtuvieron los resultados que se esperan bajo esos supuestos. Los escenarios simulados sin policías fueron, en general, salvo algunas excepciones, los que presentaron la mayor cantidad de delitos, mientras que los escenarios con muchos policías resultaron ser los que tuvieron la menor tasa de crimen. Por su parte, los escenarios con atractividad constante fueron consecuentes con sus resultados al suavizar los hotspots identificados en cada ciudad, aunque esto ocurrió en distinta medida en las ciudades de Santiago y Vancouver. Por último, la ciudad uniforme resultó ser la que tiene la menor concentración de delitos, ya que éstos se distribuyen por toda la ciudad, por lo que se puede sostener que sí existe una influencia de los barrios sobre los lugares donde se forman los hotspots.

### 7.3. Críticas a la Metodología

En este trabajo se desarrolló un modelo basado en agente para simular el robo en la vía pública, debido a que es uno de los enfoques más apropiados para el estudio de los fenómenos sociales, como lo es el crimen. Esto se debe a que es capaz de modelar el comportamiento individual de cada uno de los agentes y, por lo tanto, representar el fenómeno desde un nivel “micro” para generar patrones de nivel “macro”, tal como

ocurre en la vida real. Otro factor que influyó en esta decisión es la flexibilidad que ofrecen los modelos basados en agente, ya que se pueden establecer reglas de comportamiento según el nivel de complejidad deseado, lo que permite comenzar desarrollando un modelo simple y aumentar gradualmente su complejidad.

A pesar de las ventajas que tiene el uso de los modelos basados en agente para este tipo de investigación, como en todo modelo, es necesario tener presentes sus limitaciones, ya que sólo de esta forma es posible obtener conclusiones cautas que sean útiles en la vida real. Entre las principales limitaciones se encuentra la necesidad de supuestos válidos que sirvan como entrada del modelo, en el caso específico de esta tesis, se requirió asumir los tipos de agentes, la forma en que se comporta cada uno de ellos, sus tasas de generación, los edificios relevantes, las formas y los límites de las ciudades, etc. Precisamente, los bordes de las ciudades resultaron ser zonas con una alta tasa de asaltos, sin embargo, los bordes de la ciudad Santiago Centro del modelo, no son bordes en la ciudad real, por lo que este resultado no debe ser considerado en la toma de decisiones.

Otro supuesto fuerte es el hecho de separar a los agentes por clases y tipos, ya que en la vida real, un delincuente podría decidir un día, eventualmente, no cometer ningún delito y, por lo tanto, tendría el comportamiento de un ciudadano, sin embargo, cuando se crea un agente delincuente, éste intentará robar durante toda su participación en el modelo. Además, este problema aparece también entre los agentes de la misma clase, por ejemplo, en este modelo se diferenciaron totalmente a los ciudadanos trabajadores y transeúntes, donde los primeros viajan prácticamente directo de sus hogares al trabajo y viceversa, mientras que los últimos realizan varias paradas intermedias. En la realidad, una persona que sale de su trabajo puede detenerse varias veces antes de ir a su casa, por motivos de entretención, compras o trámites, por ejemplo.

El hecho de asumir un comportamiento racional de todos los agentes también limita este modelo, ya que las personas pueden tomar decisiones en base a factores que no fueron modelados, por ejemplo, su percepción de zonas peligrosas en ciertos horarios, lo que las puede llevar a elegir un camino más largo que el normal para trasladarse. El modelo asume que cuando un agente quiere viajar hacia su próximo destino, utilizará el camino más directo que encuentre para llegar a él, lo cual es racional en el sentido de que minimiza distancia y tiempo de viaje. Otro ejemplo es el hecho de que los lanzas, cuando se encuentran con una potencial víctima, aún en presencia policial tienen una probabilidad no nula de cometer el delito, por lo que de todas formas “realizan el sorteo”, mientras que en la realidad este comportamiento es irracional, ya que la situación presenta un potencial beneficio relativamente bajo, frente a un potencial castigo bastante alto, lo cual debería tener un retorno esperado negativo para el delincuente.

Una crítica algo más técnica a la metodología utilizada en esta tesis tiene relación con el tiempo computacional que toma cada simulación. Si bien, las simulaciones realizadas para las ciudades en forma de Grilla toman un tiempo de 20 a 30 minutos, las realizadas en Santiago y Vancouver tardan entre 3 y 4 horas, ya que consideran un mayor número de agentes. Esto se debe a que se requiere realizar una gran cantidad de cálculos para llevar a cabo el comportamiento de cada individuo, especialmente durante las horas en las que hay más agentes en el modelo. Este problema complica la posibilidad de analizar una gama más amplia de escenarios, como por ejemplo, todas las combinaciones posibles de las cuatro variables de análisis descritas en la Sección 5.2, así como también se complica la replicación de un mismo escenario un número importante de veces para realizar una buena validación interna (Sección 5.4.3) y de mayor confianza. Además de lo anterior, se hace difícil agregar complejidad al modelo, con el objetivo de obtener conclusiones más precisas, obligando a priorizar su simplicidad por sobre su grado de realismo.

## 7.4. Trabajo Futuro

Esta tesis es uno de los primeros trabajos que incluye, en un modelo de simulación basado en agente, a los tres actores principales de la delincuencia en la vía pública: el delincuente, la víctima y la policía. Es por esta razón que se ha priorizado la simplicidad del modelo para hacer posible la exploración de las interacciones entre los agentes y los patrones delictuales subyacentes.

En este sentido resulta natural, como primera línea de trabajo futuro, el agregar comportamientos más complejos al modelo, que vayan más allá de sólo desplazarse y robar según una función de probabilidad, sino que también incluyan, por ejemplo, alguna componente estratégica en la interacción delincuente-víctima y/o delincuente-policía, o bien, comportamientos dinámicos que se modifiquen de acuerdo a lo ocurrido en el pasado.

Otra dirección de trabajo, que no requiere tanto tiempo computacional como la anterior, es la de incluir otros tipos de agentes en el modelo. Por ejemplo, los comerciantes que trabajan en la vía pública y que también corren el riesgo de convertirse en víctimas de delitos, los ladrones de vehículos, traficantes de droga, guardias privados, etc. El hecho de incorporar otros tipos de delincuentes trae consigo la inclusión de nuevos tipos de delitos al modelo, lo que haría posible replicar la coexistencia de todo el crimen en la vía pública, tal como ocurre en la realidad.

También es posible mejorar el modelo actual, añadiendo variables no consideradas y que podrían explicar efectos que no fueron capturados en esta tesis, tales como la presencia de paseos peatonales, los cuales tienen un efecto positivo y significativo en

el número de delitos, según Jofré (2011) [37]. Otro aspecto interesante a incluir es la atractividad que tiene una víctima para el delincuente, la cual puede ser representada a través del atributo “dinero” de los agentes, el que además, puede ser usado para establecer cuándo el delincuente siente la necesidad de robar.

Una línea de trabajo más bien computacional tiene relación con la automatización del análisis de los datos generados. Esto incluye tanto el análisis estadístico como espacial de los delitos, realizados en softwares especializados en ello y que sean capaces de “conversar” con el simulador. Otra automatización relevante consiste en estandarizar las ciudades donde ocurren las simulaciones, usando archivos de formas, más conocidos como *shapefiles*. Estos archivos tienen la ventaja de ser una forma estandarizada de representar lugares geográficos, por lo que existe una gran cantidad de ciudades ya diseñadas en este formato y, además, son capaces de almacenar información geográfica relevante, como por ejemplo, los lugares donde hay más delincuencia.

Para finalizar, se debe destacar la necesidad de estandarizar los requerimientos para aplicar este modelo y el simulador en una determinada ciudad, en otras palabras, conocer la información necesaria para que el modelo pueda ser implementado. Por ejemplo, en el modelo de esta tesis se requiere conocer los patrones de desplazamiento de las personas en cada periodo del día, el cual hace que los agentes se muevan de una manera parecida a la realidad. Esta información puede no estar disponible o no existir en algunos lugares, por lo que el modelo no podría aplicarse, a menos que se utilicen supuestos razonables. Del mismo modo, es necesario conocer la distribución de las actividades de la ciudad para implementar el modelo, lo cual es más factible de encontrar que lo anterior, ya que se trata de información estática y existen modelos de uso de suelo en muchos lugares. Vale la pena mencionar también que se necesita información sobre la efectividad de la vigilancia policial según el tipo de policía, datos que sirven para modelar el efecto que tiene la cercanía de un policía sobre un potencial delito, y que tienen como fuente las instituciones policiales, como Carabineros de Chile. Tal como en estos ejemplos, es posible que algunos supuestos utilizados durante el desarrollo de esta tesis no sean aplicables en cualquier otra ciudad o cultura, por lo que se debe tener la precaución de adaptar este tipo de aspectos según sea el caso.

# Referencias

- [1] Axelrod, R. (1997). Advancing the art of simulation in the social science. En *Simulating Social Phenomena*. Springer-Verlag. Berlín.
- [2] Axelrod, R. (2003). Advancing the art of simulation in the social sciences. *Japanese Journal for Management Information System*, Special Issue on Agent-Based Modeling. vol. 12, No 3.
- [3] Anderson, P. W. (1972). More is different. *Science*, 177(4047):393-396.
- [4] Bak, P., Chen, K., Creutz, M. (1989). Self-organized criticality in the Game of Life. *Nature*. vol 342.
- [5] Baldwin, J. and Bottoms, A. E. (1976a). *The Urban Criminal: A Study in Sheffield*. Tavistock Publications, London.
- [6] Beavon, D. J. K., Brantingham, P. L., and Brantingham, P. J. (1994). The influence of street networks on the patterning of property offenses. In Clarke, R. V., editor, *Crime Prevention Studies*, volume 2. Criminal Justice Press, New York.
- [7] Beirne, P. (1987) Adolphe Quetelet and the Origins of Positivist Criminology. *American Journal of Sociology* 92(5): pp. 1140-1169.
- [8] Haemig P.D. (2011). Leyes de la Ecología Poblacional. *ECOLOGIA.INFO* 23. Revisión en línea disponible en <http://www.ecologia.info/leyes-1.htm>.
- [9] Brantingham, P.L., Brantingham P. (1981). *Environmental Criminology*, National Criminal Justice Reference Service, U.S. Department of Justice.
- [10] Brantingham, P. L. and Brantingham, P. (1981a). Notes of the geometry of crime. In Brantingham, P. and Brantingham, P., editors,

- Environmental Criminology, pages 27-54. Waveland Press, Prospect Heights, IL.
- [11] Brantingham, P.L., Brantingham P. (1993). Environment, routine, and situation: Towards a pattern theory of crime. En Routine Activity and Rational Choice, volume 5 de Advances in Criminological Theory. New Brunswick, NJ.
  - [12] Brantingham, Patricia and Brantingham, Paul (1995). Criminality of Place, Crime generators and crime attractors. European Journal on Criminal Policy and Research Volume:3 Issue:3 Dated:(1995) Pages:1-26.
  - [13] Brantingham, P.L., Brantingham, P.J. (2003). Anticipating the Displacement of Crime Using the Principles of Environmental Criminology. Crime Prevention Studies 16, 119-148.
  - [14] Bonabeau, Eric (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, vol. 99, suppl.3.
  - [15] Bratley, P., Fox, B. and Schrage, L. (1987). A Guide to Simulation. Second Edition. New York: Springer-Verlag.
  - [16] Brown, M. J., Mcculloch, J. W., and Hiscox, J. (1972). Criminal offences in an urban area and their associated social variables. The British Journal of Criminology, 12, 250-268.
  - [17] Chainey, S., Austin, B., and Holland, F. (2004). Insights into the analysis and patterns of offender journeys to crime. Paper presented at the Seventh Annual International Crime Mapping Research Conference, Boston, USA.
  - [18] Chopard, B., Droz, M. (1998). Cellular Automata Modeling of Physical Systems. Cambridge University Press. United Kingdom.
  - [19] Clarke, Ronald (2002). Shoplifting. Community Oriented Policing Services (COPS).
  - [20] Clarke, R.V., Cornish, D.B. (1985) Modeling offender's decisions: A framework for research and policy. Crime and Justice: A review of Research, 6, 147-185.

- 
- [21] Cornish, D.B., Clarke, R.V. (1987). Understanding Crime Displacement: An Application of Rational Choice Theory. *Criminology*, 25, 933-947.
- [22] Código Penal de la República de Chile, Libro Segundo (1874).
- [23] Cohen, L., Felson, M. (1979). Social Change and Crime Rate Trends: A Routine Activity Approach. *American Sociological Review* vol. 44, No. 4 pp. 588-608.
- [24] Constitución Política de la República de Chile (1980).
- [25] Crooks, A. (2007). The Repast Simulation/Modelling System for Geospatial Simulation. Agent-Based Models for Spatial Systems in Social Science & Economic Science with Heterogeneous Interacting Agents Workshop. Agelonde, La Londe les Maures, France.
- [26] Crooks, Andrew, Hudson-Smith, Andrew and Dearden, Joel (2009). Agent Street: An Environment for Exploring Agent-Based Models in Second Life. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 12 (4) 10.
- [27] Deakin, J., Smithson, H., Spencer, J., and Medina-Ariza, J. (2007). Taxing on the streets: Understanding the methods and process of street robbery. *Crime Prevention and Community Safety*, 9, 52-67.
- [28] Espejo, Gabriel (2011). Modelo de Distribución de Efectivos Policiales para el Control de la Delincuencia Utilizando Teoría de Juegos. Tesis de Magíster. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Industrial.
- [29] Flake, G. W. (1998). *The Computational Beauty of Nature. Computer Explorations of Fractals, Chaos, Complex Systems, and Adaptation.* MIT Press, London.
- [30] Furtado, V., Melo, A., Coelho, A., Menezes, R., Perrone, R. A bio-inspired crime simulation model. *ELSEVIER, Decision Support Systems*. 2009, vol 48, p.282-292.
- [31] Giggs, J. A. (1970). The socially disorganised areas of barry: A multivariate analysis. In Carter, H. and Davies, W. K. D., editors, *Urban Essays*, pages 101-143. Longman, London.
- [32] Grubestic, T., Mack, E. (2008). Spatio-Temporal Interaction of Urban Crime. *Springer, J Quant Criminol*, vol. 24, 285-306.

- [33] Guerry, A. (1833). *Essai sur la Statistique Morale de la France*.
- [34] Gutowitz, H. (1991). *Cellular automata, Theory and Experiment*. Elsevier Science Publishers, B.V. Amsterdam, Netherlands.
- [35] K.A. Hawick, H.A. James and C.J. Scogings (2006). *A Zoology of Emergent Patterns in a Predator-Prey Simulation Model*. Institute of Information & Mathematical Sciences. Massey University, Albany
- [36] Jeffery, C.R. (1976). Criminal behavior and the physical environment: A perspective. *American Behavioral Scientist*, 20, 149-174.
- [37] Jofré, María Paz (2011). *Análisis del Fenómeno Delictual en Santiago utilizando un Modelo de Regresión Logística en Base a Atributos*. Tesis de Magíster. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Industrial.
- [38] Lobato, José Luis (2009). *Modelo Aplicado de Teoría de Juegos para el Estudio del Crimen en la Vía Pública*. Tesis de Magíster. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Industrial.
- [39] Macal, C., North, M. (2009). Agent-based modeling and simulation. *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*.
- [40] Macal, C., North M. (2010). Toward teaching agent-based simulation. *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*.
- [41] Macal, C., North M. (2010). Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Operational Research Society Ltd., Journal of Simulation*, vol 4, 2010, 151-162.
- [42] Malleson, N., Heppenstall, A., See, L. (2009). Crime reduction through simulation: An agent-based model of burglary. *ELSEVIER, Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 34, 236-250.
- [43] Malleson, Nicolas (2010). *Agent-Based Modelling of Burglary*. Ph.D. Thesis. The University of Leeds, School of Geography.
- [44] Marris, R. (2001). *Survey of the research literature on the criminological and economic factors influencing crime trends*. Home Office. Producido con Volterra Consulting.
- [45] Richard D. McKelvey and Thomas R. Palfrey (1992). An Experimental Study of the Centipede Game. *Econometrica*. Vol. 60, No. 4 (Jul., 1992), pp. 803-836.

- 
- [46] Melo, A., Belchior, M., and Furtado, V. (2005). Analyzing police patrol routes by simulating the physical reorganization of agents. In Sichman, J. S. and Antunes, L., editors, MABS, volume 3891 of Lecture Notes in Computer Science, pages 99-114. Springer.
- [47] Messner, S. F., Anselin, L., Baller, R. D., Hawkins, D. F., Deane, G., and Tolnay, S. E. (1999). The spatial patterning of county homicide rates: An application of exploratory spatial data analysis. *Journal of Quantitative Criminology*, 15(4):423-450.
- [48] North, M.J., Tatara, E., Collier, N.T., Ozik, J. (2007). Visual agent-based model development with Repast Symphony. Agent 2007 Conference: Complex Interaction and Social Emergence.
- [49] Fundación Paz Ciudadana (2011). Balance de la delincuencia 2010.
- [50] Harries, K. (1999). Mapping Crime, Principle and Practice. Crime Mapping Research Center. U.S. Department of Justice. Washington DC.
- [51] Ratcliffe, J. (2004). The Hotspot Matrix: A Framework for the Spatio-Temporal Targeting of Crime Reduction. *Police Practice and Research*, vol. 5, Nro 1, pp. 05-23.
- [52] Sargent, Robert (1996). Verification and validation of simulation models. New York.
- [53] Schlesinger, S. (1979). Terminology for Model Credibility, *Simulation*, vol. 32, 3, pp. 103-104.
- [54] Schelling, T.C. (1971) Dynamic Models of Segregation. *Journal of Mathematical Sociology*, 1(1): 143-186.
- [55] Short, M., D'Orsogna, M., Pasour, V., Tita, G., Brantingham, P.J., Bertozzi, A., Chayes, L. (2008). A Statistical Model of Criminal Behavior. *Mathematical Models and Methods in Applied Science*, vol. 18, 1249-1267.
- [56] Wilson, J., Kelling, G. (1982). Broken windows and police and neighborhood safety, *Atlantic Mon.* 249, 29-38.
- [57] Winoto, P. (2003). A simulation of the market for offenses in multiagent systems: Is zero crime rates attainable? In Sichman, J. S., Bousquet, F., and Davidsson, P., editors, MABS, volume 2581 of Lecture Notes in Computer Science, pages 181-193. Springer.

# Anexos

# Anexo A

## Datos de Denuncias en Santiago Centro 2001-2004

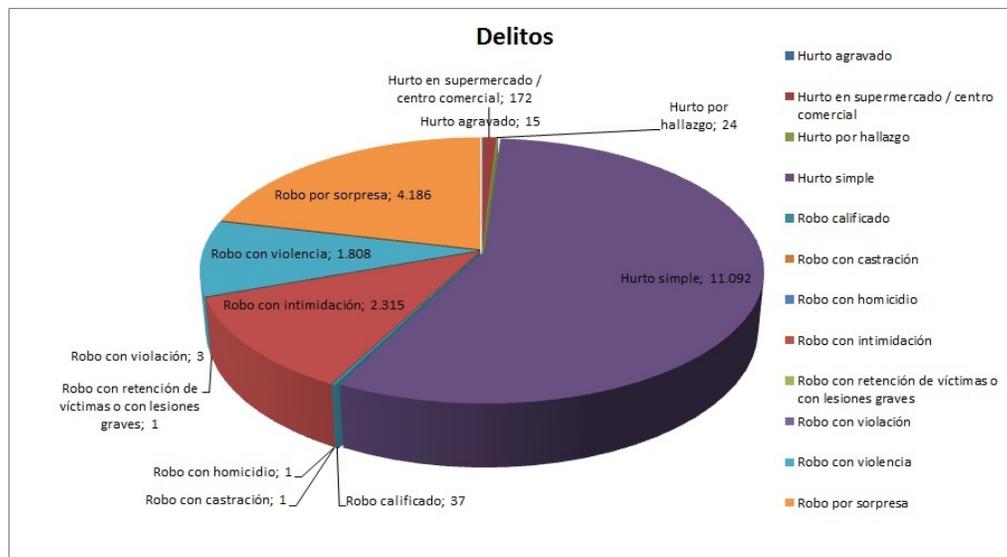


Figura A.1: Robos y hurtos denunciados en Santiago Centro 2001-2004.

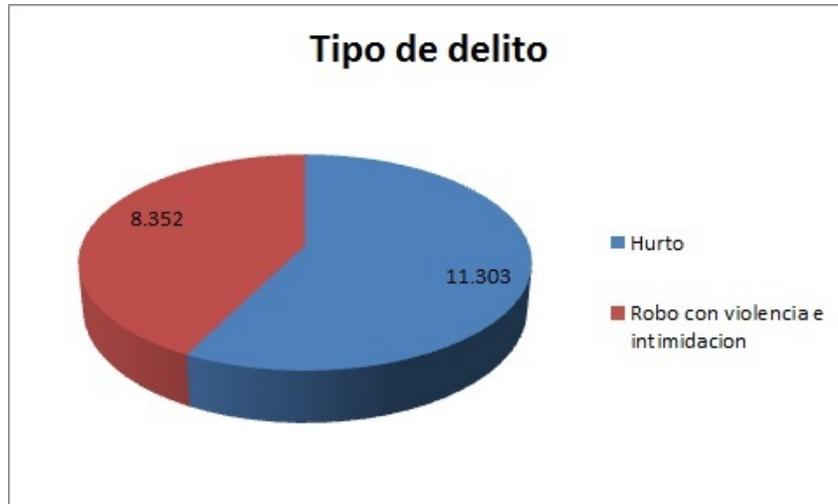


Figura A.2: Clasificación general de los delitos denunciados en Santiago Centro 2001-2004.

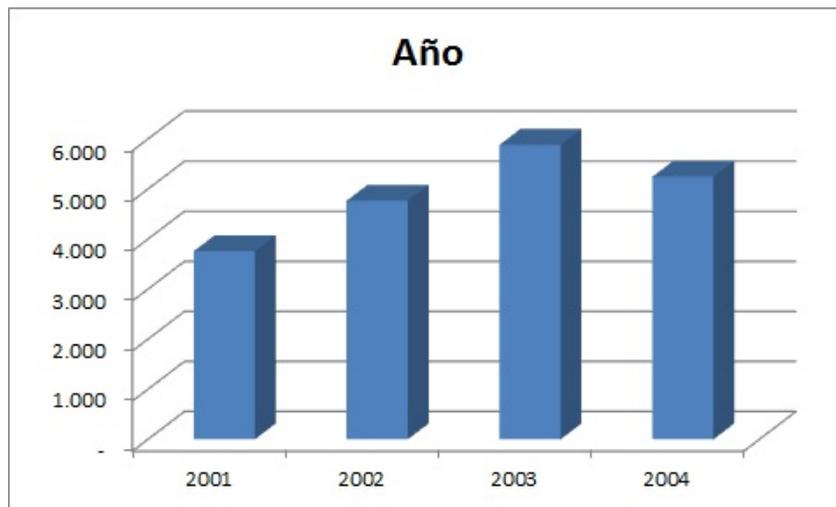


Figura A.3: Distribución anual de los delitos.

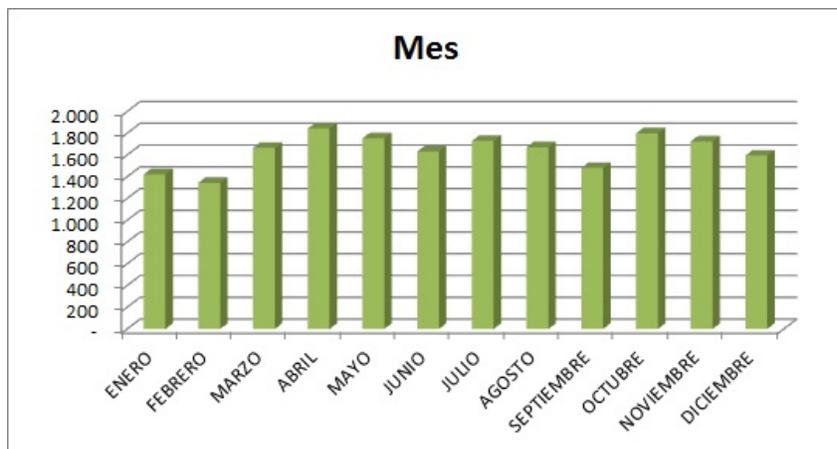


Figura A.4: Distribución mensual de los delitos.



Figura A.5: Distribución diaria de los delitos en un mes.



Figura A.6: Distribución semanal de los delitos.

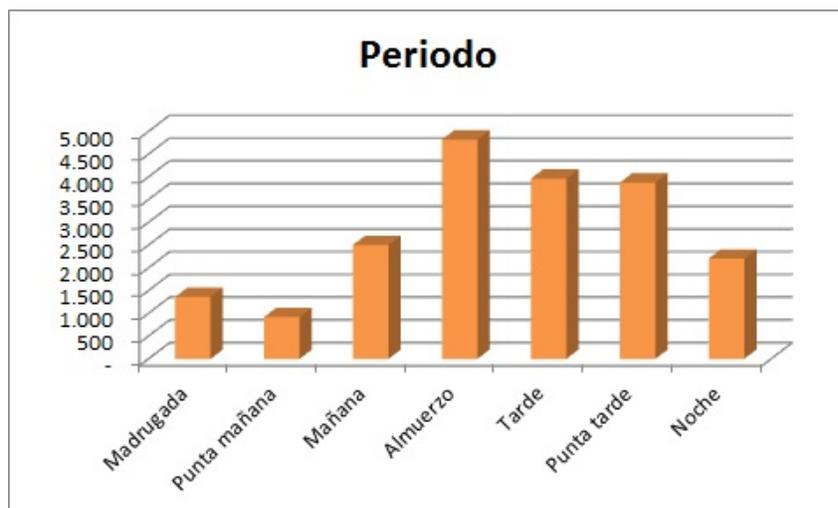


Figura A.7: Distribución de los delitos por periodos del día.



Figura A.8: Distribución horaria de los delitos.

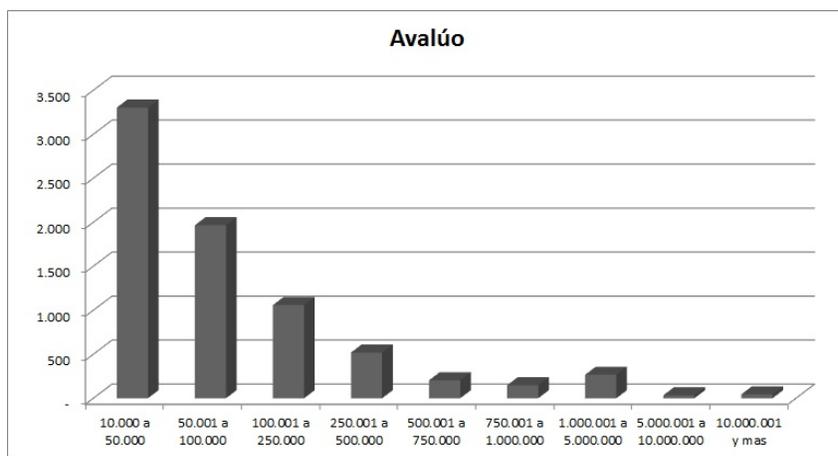


Figura A.9: Avalúo del monto robado.

# Anexo B

## Resultados de las Simulaciones

ID	Escenario	Delitos	Lanzazos	Asaltos	Estudiantes	Trabajadores	Transeúntes
1	SAN_BASE_0	1.732	1.462	270	572	412	748
2	SAN_CAMLHOT_30	1.604	1.283	321	506	407	691
3	SAN_CAMLHOT_100	1.357	1.089	268	425	321	611
4	SAN_CAMLHOT_500	1.008	749	259	318	245	445
5	SAN_CAMLHOT_VAR	1.637	1.365	272	581	354	702
6	SAN_CAMLLOC_30	1.651	1.365	286	519	392	740
7	SAN_CAMLLOC_100	1.373	1.181	192	435	328	610
8	SAN_CAMLLOC_500	699	551	148	223	161	315
9	SAN_CAMLLOC_VAR	1.562	1.267	295	513	368	681
10	SAN_CAMLMIX_30	1.601	1.320	281	510	381	710
11	SAN_CAMLMIX_100	1.305	1.029	276	426	310	569
12	SAN_CAMLMIX_500	778	610	168	241	167	370
13	SAN_CAMLMIX_VAR	1.489	1.216	273	461	373	655
14	SAN_CAMLRAN_30	1.686	1.429	257	538	420	728
15	SAN_CAMLRAN_100	1.408	1.145	263	447	352	609
16	SAN_CAMLRAN_500	714	619	95	236	181	297
17	SAN_CAMLRAN_VAR	1.713	1.416	297	545	416	752
18	SAN_MOTO_LOC_30	1.656	1.395	261	491	413	752
19	SAN_MOTO_LOC_100	1.313	1.062	251	392	303	618
20	SAN_MOTO_LOC_500	523	441	82	161	126	236
21	SAN_MOTO_LOC_VAR	1.476	1.226	250	488	347	641
22	SAN_MOTO_RAN_30	1.517	1.285	232	502	376	639
23	SAN_MOTO_RAN_100	1.398	1.217	181	447	334	617
24	SAN_MOTO_RAN_500	553	484	69	165	137	251
25	SAN_MOTO_RAN_VAR	1.633	1.361	272	499	392	742
26	SAN_TODOS_LOC_30	1.570	1.303	267	493	368	709
27	SAN_TODOS_LOC_100	1.358	1.111	247	448	317	593
28	SAN_TODOS_LOC_500	536	499	37	175	130	231
29	SAN_TODOS_LOC_VAR	1.485	1.209	276	490	333	662
30	SAN_TODOS_RAN_30	1.738	1.453	285	561	413	764

*ANEXO B. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES*

<b>ID</b>	<b>Escenario</b>	<b>Delitos</b>	<b>Lanzazos</b>	<b>Asaltos</b>	<b>Estudiantes</b>	<b>Trabajadores</b>	<b>Transeúntes</b>
31	SAN_TODOS_RAN_100	1.349	1.146	203	453	318	578
32	SAN_TODOS_RAN_500	530	500	30	173	141	216
33	SAN_TODOS_RAN_VAR	1.320	1.077	243	387	339	594
34	SAN_VGCM_MIX_30	1.535	1.289	246	514	386	635
35	SAN_VGCM_MIX_100	1.316	1.035	281	402	310	604
36	SAN_VGCM_MIX_500	759	575	184	236	194	329
37	SAN_VGCM_MIX_VAR	1.502	1.239	263	503	333	666
38	SAN_VIGLHOT_30	1.518	1.263	255	487	375	656
39	SAN_VIGLHOT_100	1.406	1.110	296	465	356	585
40	SAN_VIGLHOT_500	1.156	865	291	379	284	493
41	SAN_VIGLHOT_VAR	1.691	1.380	311	529	437	725
42	SAN_VIGLLOC_30	1.579	1.273	306	519	373	687
43	SAN_VIGLLOC_100	1.238	1.042	196	386	292	560
44	SAN_VIGLLOC_500	411	402	9	152	93	166
45	SAN_VIGLLOC_VAR	1.585	1.307	278	496	365	724
46	SAN_VIGLMIX_30	1.477	1.204	273	465	373	639
47	SAN_VIGLMIX_100	1.282	1.036	246	439	292	551
48	SAN_VIGLMIX_500	591	484	107	177	153	261
49	SAN_VIGLMIX_VAR	1.615	1.302	313	529	382	704
50	SAN_VIGLRAN_30	1.594	1.320	274	537	363	694
51	SAN_VIGLRAN_100	1.436	1.199	237	445	343	648
52	SAN_VIGLRAN_500	554	517	37	173	127	254
53	SAN_VIGLRAN_VAR	1.595	1.338	257	500	409	686
54	VAN_BASE_0	963	757	206	326	219	419
55	VAN_CAMLHOT_30	866	669	197	290	202	374
56	VAN_CAMLHOT_100	719	518	201	231	171	317
57	VAN_CAMLHOT_500	590	373	217	196	139	255
58	VAN_CAMLHOT_VAR	849	657	192	291	187	371
59	VAN_CAMLLOC_30	874	677	197	298	199	377
60	VAN_CAMLLOC_100	818	674	144	247	220	351
61	VAN_CAMLLOC_500	311	266	45	112	64	135
62	VAN_CAMLLOC_VAR	928	725	203	342	207	379
63	VAN_CAMLMIX_30	877	677	200	294	209	374
64	VAN_CAMLMIX_100	703	532	171	230	171	302
65	VAN_CAMLMIX_500	280	208	72	93	67	120
66	VAN_CAMLMIX_VAR	917	716	201	278	218	421
67	VAN_CAMLRAN_30	835	657	178	308	189	338
68	VAN_CAMLRAN_100	694	537	157	232	171	291
69	VAN_CAMLRAN_500	274	227	47	89	62	123
70	VAN_CAMLRAN_VAR	902	665	237	314	205	383
71	VAN_MOTO_LOC_30	902	718	184	296	203	403
72	VAN_MOTO_LOC_100	638	488	150	217	141	280
73	VAN_MOTO_LOC_500	214	191	23	74	53	87
74	VAN_MOTO_LOC_VAR	931	714	217	307	201	423
75	VAN_MOTO_RAN_30	889	718	171	338	183	368
76	VAN_MOTO_RAN_100	632	457	175	188	157	287
77	VAN_MOTO_RAN_500	257	214	43	83	56	118
78	VAN_MOTO_RAN_VAR	1.070	867	203	360	260	450
79	VAN_TODOS_LOC_30	887	698	189	303	216	368
80	VAN_TODOS_LOC_100	628	467	161	194	157	277
81	VAN_TODOS_LOC_500	185	172	13	61	39	85
82	VAN_TODOS_LOC_VAR	779	572	207	243	177	359
83	VAN_TODOS_RAN_30	928	729	199	313	218	397
84	VAN_TODOS_RAN_100	716	576	140	248	148	320
85	VAN_TODOS_RAN_500	258	229	29	83	65	110
86	VAN_TODOS_RAN_VAR	778	625	153	253	189	336
87	VAN_VGCM_MIX_30	867	663	204	267	185	415
88	VAN_VGCM_MIX_100	683	488	195	194	169	320
89	VAN_VGCM_MIX_500	350	259	91	109	84	157
90	VAN_VGCM_MIX_VAR	819	603	216	275	175	369

*ANEXO B. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES*

ID	Escenario	Delitos	Lanzazos	Asaltos	Estudiantes	Trabajadores	Transeúntes
91	VAN_VIGLHOT_30	802	580	222	305	192	305
92	VAN_VIGLHOT_100	850	630	220	272	194	384
93	VAN_VIGLHOT_500	718	507	211	229	177	312
94	VAN_VIGLHOT_VAR	851	651	200	288	193	370
95	VAN_VIGLLOC_30	907	670	237	267	224	416
96	VAN_VIGLLOC_100	570	475	95	210	108	252
97	VAN_VIGLLOC_500	186	183	3	70	46	70
98	VAN_VIGLLOC_VAR	893	711	182	303	200	390
99	VAN_VIGLMIX_30	863	659	204	320	191	352
100	VAN_VIGLMIX_100	746	564	182	261	159	326
101	VAN_VIGLMIX_500	430	348	82	148	102	180
102	VAN_VIGLMIX_VAR	883	706	177	296	179	408
103	VAN_VIGLRAN_30	909	707	202	297	207	405
104	VAN_VIGLRAN_100	697	545	152	210	163	324
105	VAN_VIGLRAN_500	192	172	20	62	47	83
106	VAN_VIGLRAN_VAR	1.026	818	208	346	253	427
107	GRI_BASE_0	1.026	585	441	354	218	455
108	GRI_CAMLHOT_30	899	467	432	295	203	401
109	GRI_CAMLHOT_100	809	366	443	244	205	360
110	GRI_CAMLHOT_500	680	257	423	216	144	320
111	GRI_CAMLHOT_VAR	971	534	437	302	200	469
112	GRI_CAMLLOC_5	984	563	421	328	248	408
113	GRI_CAMLLOC_15	1.079	578	501	343	257	479
114	GRI_CAMLLOC_30	944	481	463	306	207	431
115	GRI_CAMLLOC_50	895	477	418	278	220	397
116	GRI_CAMLLOC_75	802	375	427	250	185	367
117	GRI_CAMLLOC_100	748	380	368	243	165	340
118	GRI_CAMLLOC_250	581	298	283	190	132	259
119	GRI_CAMLLOC_500	272	175	97	97	77	98
120	GRI_CAMLLOC_VAR	983	547	436	348	218	417
121	GRI_CAMLMIX_30	1.018	543	475	329	218	471
122	GRI_CAMLMIX_100	785	384	401	236	184	365
123	GRI_CAMLMIX_500	274	162	112	85	68	121
124	GRI_CAMLMIX_VAR	976	520	456	324	234	418
125	GRI_CAMLRAN_5	1.002	576	426	331	214	457
126	GRI_CAMLRAN_30	977	525	452	292	226	459
127	GRI_CAMLRAN_50	957	530	427	307	221	429
128	GRI_CAMLRAN_100	747	409	338	257	145	345
129	GRI_CAMLRAN_500	226	159	67	78	44	104
130	GRI_CAMLRAN_VAR	947	509	438	294	236	417
131	GRI_MOTO_HOT_30	935	501	434	296	229	410
132	GRI_MOTO_HOT_100	834	405	429	234	202	398
133	GRI_MOTO_HOT_500	605	237	368	193	136	276
134	GRI_MOTO_HOT_VAR	968	503	465	335	224	409
135	GRI_MOTO_LOC_5	938	495	443	282	202	454
136	GRI_MOTO_LOC_15	1.012	575	437	315	240	457
137	GRI_MOTO_LOC_30	979	539	440	316	233	430
138	GRI_MOTO_LOC_50	873	478	395	304	181	388
139	GRI_MOTO_LOC_75	818	417	401	256	184	378
140	GRI_MOTO_LOC_100	815	405	410	263	180	372
141	GRI_MOTO_LOC_250	511	224	287	138	116	257
142	GRI_MOTO_LOC_500	244	155	89	92	66	86
143	GRI_MOTO_LOC_VAR	1.008	538	470	336	222	450
144	GRI_MOTO_MIX_30	924	517	407	288	216	420
145	GRI_MOTO_MIX_100	734	369	365	212	163	359
146	GRI_MOTO_MIX_500	283	151	132	91	71	121
147	GRI_MOTO_MIX_VAR	969	521	448	333	216	420
148	GRI_MOTO_RAN_5	1.015	568	447	330	230	455
149	GRI_MOTO_RAN_15	992	552	440	318	230	444
150	GRI_MOTO_RAN_30	922	515	407	318	200	404

*ANEXO B. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES*

<b>ID</b>	<b>Escenario</b>	<b>Delitos</b>	<b>Lanzazos</b>	<b>Asaltos</b>	<b>Estudiantes</b>	<b>Trabajadores</b>	<b>Transeúntes</b>
151	GRI.MOTO_RAN_50	864	474	390	283	198	383
152	GRI.MOTO_RAN_75	844	487	357	292	184	368
153	GRI.MOTO_RAN_100	752	449	303	241	166	345
154	GRI.MOTO_RAN_250	476	310	166	137	117	222
155	GRI.MOTO_RAN_500	192	148	44	54	48	90
156	GRI.MOTO_RAN_VAR	911	493	418	292	205	414
157	GRI.TODOS_HOT_30	867	441	426	258	225	384
158	GRI.TODOS_HOT_100	849	420	429	257	219	373
159	GRI.TODOS_HOT_500	662	268	394	206	140	316
160	GRI.TODOS_HOT_VAR	905	418	487	261	257	387
161	GRI.TODOS_LOC_5	1.005	539	466	317	238	450
162	GRI.TODOS_LOC_15	1.008	563	445	348	232	428
163	GRI.TODOS_LOC_30	904	478	426	272	218	414
164	GRI.TODOS_LOC_50	898	451	447	288	194	416
165	GRI.TODOS_LOC_75	839	423	416	285	162	392
166	GRI.TODOS_LOC_100	723	387	336	230	155	338
167	GRI.TODOS_LOC_250	518	257	261	168	127	223
168	GRI.TODOS_LOC_500	299	146	153	94	76	129
169	GRI.TODOS_LOC_VAR	864	422	442	254	192	418
170	GRI.TODOS_MIX_30	964	513	451	317	214	433
171	GRI.TODOS_MIX_100	706	352	354	209	169	328
172	GRI.TODOS_MIX_500	343	169	174	105	83	155
173	GRI.TODOS_MIX_VAR	833	427	406	279	184	208
174	GRI.TODOS_RAN_5	1.031	568	463	355	218	458
175	GRI.TODOS_RAN_15	983	521	462	360	198	425
176	GRI.TODOS_RAN_30	895	490	405	303	199	393
177	GRI.TODOS_RAN_50	884	501	383	298	197	389
178	GRI.TODOS_RAN_75	843	456	387	273	207	363
179	GRI.TODOS_RAN_100	772	459	313	244	184	344
180	GRI.TODOS_RAN_250	445	252	193	137	108	200
181	GRI.TODOS_RAN_500	192	137	55	65	54	73
182	GRI.TODOS_RAN_VAR	958	482	476	309	211	438
183	GRI.VGCM_MIX_30	942	529	413	324	222	396
184	GRI.VGCM_MIX_100	874	441	433	291	206	377
185	GRI.VGCM_MIX_500	300	172	128	95	64	141
186	GRI.VGCM_MIX_VAR	941	503	438	288	227	426
187	GRI.VIGL_HOT_30	976	514	462	330	214	432
188	GRI.VIGL_HOT_100	874	413	461	277	200	397
189	GRI.VIGL_HOT_500	802	363	439	253	156	393
190	GRI.VIGL_HOT_VAR	982	531	451	339	213	430
191	GRI.VIGL_LOC_5	995	547	448	328	210	457
192	GRI.VIGL_LOC_15	938	510	428	314	199	425
193	GRI.VIGL_LOC_30	971	516	455	325	200	446
194	GRI.VIGL_LOC_50	851	436	415	272	185	394
195	GRI.VIGL_LOC_75	687	342	345	198	171	318
196	GRI.VIGL_LOC_100	726	364	362	225	170	331
197	GRI.VIGL_LOC_250	500	200	300	147	120	233
198	GRI.VIGL_LOC_500	248	145	103	90	45	113
199	GRI.VIGL_LOC_VAR	1.069	616	453	371	237	461
200	GRI.VIGL_MIX_30	935	487	448	300	212	423
201	GRI.VIGL_MIX_100	790	394	396	268	169	353
202	GRI.VIGL_MIX_500	389	200	189	117	89	183
203	GRI.VIGL_MIX_VAR	952	515	437	292	207	453
204	GRI.VIGL_RAN_5	1.054	580	474	336	244	474
205	GRI.VIGL_RAN_15	928	515	413	296	211	421
206	GRI.VIGL_RAN_30	959	532	427	313	220	426
207	GRI.VIGL_RAN_50	891	492	399	293	207	391
208	GRI.VIGL_RAN_75	805	406	399	243	188	374
209	GRI.VIGL_RAN_100	812	417	395	252	193	367
210	GRI.VIGL_RAN_250	514	294	220	185	124	205

**ANEXO B. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES**

<b>ID</b>	<b>Escenario</b>	<b>Delitos</b>	<b>Lanzazos</b>	<b>Asaltos</b>	<b>Estudiantes</b>	<b>Trabajadores</b>	<b>Transeúntes</b>
211	GRI.VIGLRAN_500	300	187	113	107	73	120
212	GRI.VIGLRAN_VAR	985	524	461	315	221	449
213	G2.BASE_0	856	510	346	295	183	378
214	G2.CAMILHOT_30	834	465	369	285	191	358
215	G2.CAMILHOT_100	737	371	366	237	168	332
216	G2.CAMILLOC_30	743	404	339	264	156	323
217	G2.CAMILLOC_100	667	360	307	228	155	284
218	G2.CAMILMIX_30	772	436	336	272	154	346
219	G2.CAMILMIX_100	689	364	325	224	145	320
220	G2.CAMILRAN_30	772	461	311	234	183	355
221	G2.CAMILRAN_100	664	361	303	211	143	310
222	G2.MOTOHOT_30	765	422	343	256	177	332
223	G2.MOTOHOT_100	702	345	357	215	170	317
224	G2.MOTOLOC_30	791	449	342	291	170	330
225	G2.MOTOLOC_100	589	306	283	198	117	274
226	G2.MOTORAN_30	755	433	322	243	146	366
227	G2.MOTORAN_100	618	356	262	228	128	262
228	G2.TODOSLOC_30	870	469	401	280	200	390
229	G2.TODOSLOC_100	589	329	260	184	143	262
230	G2.TODOSRAN_30	806	461	345	276	178	352
231	G2.TODOSRAN_100	660	369	291	223	133	304
232	G2.VGCM.MIX_30	823	459	364	262	185	376
233	G2.VGCM.MIX_100	656	346	310	212	148	296
234	G2.VIGLHOT_30	756	415	341	234	163	359
235	G2.VIGLHOT_100	724	389	335	245	153	326
236	G2.VIGLLOC_30	754	407	347	244	165	345
237	G2.VIGLLOC_100	511	310	201	154	102	255
238	G2.VIGLMIX_30	756	405	351	261	159	336
239	G2.VIGLMIX_100	645	349	296	197	140	308
240	G2.VIGLRAN_30	793	481	312	254	174	365
241	G2.VIGLRAN_100	685	379	306	225	156	304
242	G3.BASE_0	905	464	441	299	204	405
243	G3.CAMILHOT_30	864	425	439	272	185	407
244	G3.CAMILHOT_100	688	360	328	218	183	287
245	G3.CAMILLOC_30	829	382	447	267	194	368
246	G3.CAMILLOC_100	633	308	325	191	157	285
247	G3.CAMILMIX_30	826	440	386	258	185	383
248	G3.CAMILMIX_100	683	359	324	231	170	282
249	G3.CAMILRAN_30	797	388	409	258	170	369
250	G3.CAMILRAN_100	660	335	325	204	152	304
251	G3.MOTOHOT_30	773	421	352	255	169	349
252	G3.MOTOHOT_100	640	366	274	211	162	267
253	G3.MOTOLOC_30	795	364	431	246	155	394
254	G3.MOTOLOC_100	680	321	359	206	158	316
255	G3.MOTORAN_30	858	453	405	283	179	396
256	G3.MOTORAN_100	650	348	302	210	147	293
257	G3.TODOSLOC_30	823	437	386	274	177	372
258	G3.TODOSLOC_100	620	309	311	211	143	266
259	G3.TODOSRAN_30	860	435	425	276	190	394
260	G3.TODOSRAN_100	652	326	326	197	155	300
261	G3.VGCM.MIX_30	799	397	402	251	180	368
262	G3.VGCM.MIX_100	651	336	315	215	148	288
263	G3.VIGLHOT_30	796	418	378	255	174	368
264	G3.VIGLHOT_100	714	390	324	226	182	306
265	G3.VIGLLOC_30	798	385	413	249	178	371
266	G3.VIGLLOC_100	539	283	256	148	138	253
267	G3.VIGLMIX_30	789	415	374	270	179	340
268	G3.VIGLMIX_100	655	351	304	207	140	308
269	G3.VIGLRAN_30	810	437	373	279	170	361
270	G3.VIGLRAN_100	633	302	331	217	130	286

ANEXO B. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

---

ID	Escenario	Delitos	Lanzazos	Asaltos	Estudiantes	Trabajadores	Transeúntes
271	G4.BASE_0	896	510	386	298	203	395
272	G4.CAMILHOT_30	844	465	379	262	178	404
273	G4.CAMILHOT_100	693	353	340	235	142	316
274	G4.CAMILLOC_30	862	441	421	260	199	403
275	G4.CAMILLOC_100	708	334	374	196	167	345
276	G4.CAMILMIX_30	797	424	373	247	185	365
277	G4.CAMILMIX_100	740	358	382	211	159	370
278	G4.CAMILRAN_30	784	431	353	261	170	353
279	G4.CAMILRAN_100	619	328	291	188	137	294
280	G4.MOTOHOT_30	804	413	391	269	185	350
281	G4.MOTOHOT_100	732	318	414	228	178	326
282	G4.MOTOLOC_30	813	418	395	272	171	370
283	G4.MOTOLOC_100	712	355	357	215	168	329
284	G4.MOTORAN_30	784	442	342	281	164	339
285	G4.MOTORAN_100	678	384	294	207	158	313
286	G4.TODOSLOC_30	812	407	405	264	178	370
287	G4.TODOSLOC_100	719	375	344	221	155	343
288	G4.TODOSRAN_30	772	420	352	246	167	359
289	G4.TODOSRAN_100	670	345	325	238	151	281
290	G4.VGCM.MIX_30	856	453	403	269	211	376
291	G4.VGCM.MIX_100	766	377	389	255	159	352
292	G4.VIGLHOT_30	803	427	376	259	170	374
293	G4.VIGLHOT_100	791	420	371	238	173	380
294	G4.VIGLLOC_30	786	401	385	226	181	379
295	G4.VIGLLOC_100	557	297	260	179	131	247
296	G4.VIGLMIX_30	808	410	398	267	182	359
297	G4.VIGLMIX_100	699	367	332	210	173	316
298	G4.VIGLRAN_30	847	462	385	250	205	392
299	G4.VIGLRAN_100	743	373	370	229	174	340

Tabla B.1: Resultados de todos los escenarios.

# Anexo C

## Regresiones Lineales por Ciudad

Variable	Coef.	$\beta$	Sig.
<b>Constante</b>	<b>,89</b>	<b>,00</b>	<b>,000 ***</b>
CAMI	,01	,02	,830
MOTO	-,04	-,05	,555
VIGI	-,03	-,04	,616
TODOS	-,06	-,07	,397
RAN	,03	,05	,279
<b>HOT</b>	<b>,11</b>	<b>,13</b>	<b>,011 **</b>
MIX	-,01	-,01	,855
P0	,11	,05	,318
<b>P100</b>	<b>-,18</b>	<b>-,27</b>	<b>,000 ***</b>
<b>P500</b>	<b>-,69</b>	<b>-1,01</b>	<b>,000 ***</b>
PVAR	-,02	-,04	,481
$R^2_{CORR} = 0,912$			
Sig.: * (10%), ** (5%), *** (1%)			

Tabla C.1: Coeficientes de regresión lineal 5.3 para Santiago.

ANEXO C. REGRESIONES LINEALES POR CIUDAD

Variable	Coef.	$\beta$	Sig.
<b>Constante</b>	<b>1,00</b>	<b>,00</b>	<b>,000 ***</b>
CAMI	,01	,02	,839
MOTO	-,04	-,05	,577
VIGI	-,03	-,04	,636
TODOS	-,06	-,07	,423
LOC	-,12	-,18	,302
RAN	-,08	-,13	,461
HOT	-,01	-,01	,937
MIX	-,13	-,18	,235
<b>NPOL</b>	<b>-,69</b>	<b>-,94</b>	<b>,000 ***</b>
$R^2_{CORR} = 0,902$			
Sig.: * (10%), ** (5%), *** (1%)			

Tabla C.2: Coeficientes de regresión lineal 5.4 para Santiago.

Variable	Coef.	$\beta$	Sig.
<b>Constante</b>	<b>,72</b>	<b>,00</b>	<b>,000 ***</b>
CAMI	,03	,06	,638
MOTO	,04	,05	,633
VIGI	,04	,07	,579
TODOS	-,01	-,02	,883
RAN	,03	,05	,473
<b>HOT</b>	<b>,12</b>	<b>,15</b>	<b>,029 **</b>
MIX	,04	,06	,435
P0	,16	,08	,253
<b>P100</b>	<b>-,20</b>	<b>-,31</b>	<b>,000 ***</b>
<b>P500</b>	<b>-,62</b>	<b>-,95</b>	<b>,000 ***</b>
PVAR	,02	,03	,666
$R^2_{CORR} = 0,844$			
Sig.: * (10%), ** (5%), *** (1%)			

Tabla C.3: Coeficientes de regresión lineal 5.3 para Vancouver.

ANEXO C. REGRESIONES LINEALES POR CIUDAD

---

Variable	Coef.	$\beta$	Sig.
<b>Constante</b>	<b>,88</b>	<b>,00</b>	<b>,000 ***</b>
CAMI	,03	,06	,658
MOTO	,04	,05	,654
VIGI	,04	,07	,602
TODOS	-,01	-,02	,890
LOC	-,16	-,26	,270
RAN	-,13	-,22	,363
HOT	-,04	-,06	,768
MIX	-,12	-,18	,372
<b>NPOL</b>	<b>-,63</b>	<b>-,90</b>	<b>,000 ***</b>
$R^2_{CORR} = 0,823$			
Sig.: * (10%), ** (5%), *** (1%)			

Tabla C.4: Coeficientes de regresión lineal 5.4 para Vancouver.

Variable	Coef.	$\beta$	Sig.
<b>Constante</b>	<b>,74</b>	<b>,00</b>	<b>,000 ***</b>
CAMI	-,02	-,04	,847
MOTO	-,11	-,20	,390
VIGI	-,11	-,21	,350
TODOS	,02	,03	,895
RAN	,08	,16	,211
<b>HOT</b>	<b>,20</b>	<b>,35</b>	<b>,011 **</b>
MIX	,08	,14	,335
P0	,22	,17	,231
<b>P100</b>	<b>-,37</b>	<b>-,79</b>	<b>,000 ***</b>
$R^2_{CORR} = 0,709$			
Sig.: * (10%), ** (5%), *** (1%)			

Tabla C.5: Coeficientes de regresión lineal 5.3 para Grilla 2.

ANEXO C. REGRESIONES LINEALES POR CIUDAD

---

Variable	Coef.	$\beta$	Sig.
<b>Constante</b>	<b>,96</b>	<b>,00</b>	<b>,000 ***</b>
CAMI	-,02	-,04	,847
MOTO	-,11	-,20	,390
VIGI	-,11	-,21	,350
TODOS	,02	,03	,895
LOC	-,06	-,12	,729
RAN	,02	,04	,921
HOT	,14	,24	,465
MIX	,02	,03	,914
<b>NPOL</b>	<b>-,53</b>	<b>-,82</b>	<b>,000 ***</b>
$R^2_{CORR} = 0,709$			
Sig.: * (10%), ** (5%), *** (1%)			

Tabla C.6: Coeficientes de regresión lineal 5.4 para Grilla 2.

Variable	Coef.	$\beta$	Sig.
<b>Constante</b>	<b>,67</b>	<b>,00</b>	<b>,000 ***</b>
CAMI	,08	,16	,379
MOTO	,05	,08	,657
VIGI	,08	,10	,503
TODOS	,07	,11	,520
RAN	,05	,09	,336
HOT	,05	,09	,384
MIX	,06	,09	,469
<b>P0</b>	<b>,33</b>	<b>,28</b>	<b>,026 **</b>
<b>P100</b>	<b>-,43</b>	<b>-,90</b>	<b>,000 ***</b>
$R^2_{CORR} = 0,869$			
Sig.: * (10%), ** (5%), *** (1%)			

Tabla C.7: Coeficientes de regresión lineal 5.3 para Grilla 3.

ANEXO C. REGRESIONES LINEALES POR CIUDAD

---

Variable	Coef.	$\beta$	Sig.
<b>Constante</b>	<b>1,00</b>	<b>,00</b>	<b>,000 ***</b>
CAMI	,08	,16	,379
MOTO	,05	,08	,657
VIGI	,08	,10	,503
TODOS	,07	,11	,520
LOC	-,15	-,28	,297
RAN	-,10	-,18	,485
HOT	-,10	-,18	,478
MIX	-,09	-,14	,437
<b>NPOL</b>	<b>-,62</b>	<b>-,94</b>	<b>,000 ***</b>
$R^2_{CORR} = 0,869$			
Sig.: * (10%), ** (5%), *** (1%)			

Tabla C.8: Coeficientes de regresión lineal 5.4 para Grilla 3.

Variable	Coef.	$\beta$	Sig.
<b>Constante</b>	<b>,88</b>	<b>,00</b>	<b>,000 ***</b>
CAMI	-,13	-,30	,196
MOTO	-,12	-,27	,283
VIGI	-,11	-,18	,361
TODOS	-,12	-,22	,316
<b>RAN</b>	<b>-,14</b>	<b>-,31</b>	<b>,017 **</b>
HOT	,03	,08	,549
MIX	,01	,03	,866
P0	,12	,12	,402
<b>P100</b>	<b>-,29</b>	<b>-,74</b>	<b>,000 ***</b>
$R^2_{CORR} = 0,784$			
Sig.: * (10%), ** (5%), *** (1%)			

Tabla C.9: Coeficientes de regresión lineal 5.3 para Grilla 4.

ANEXO C. REGRESIONES LINEALES POR CIUDAD

---

Variable	Coef.	$\beta$	Sig.
<b>Constante</b>	<b>1,00</b>	<b>,00</b>	<b>,000 ***</b>
CAMI	-,13	-,30	,196
MOTO	-,12	-,27	,283
VIGI	-,11	-,18	,361
TODOS	-,12	-,22	,316
LOC	,00	,00	,989
RAN	-,14	-,31	,351
HOT	,04	,08	,809
MIX	,02	,03	,895
<b>NPOL</b>	<b>-,41</b>	<b>-,77</b>	<b>,000 ***</b>
$R^2_{CORR} = 0,784$			
Sig.: * (10%), ** (5%), *** (1%)			

Tabla C.10: Coeficientes de regresión lineal 5.4 para Grilla 4.

