

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL
PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

“Simulación basada en agentes con enfoque en sostenibilidad y
reducción de riesgo de desastres”

Tesis para optar el Grado de
MAGÍSTER EN INGENIERÍA CIVIL

Autor:

SAULO GALLO PORTOCARRERO

Asesor:

RAMZY FRANCIS KAHHAT ABEDRABBO, PhD.

Lima, marzo de 2017

DEDICATORIA

“Agradecido a Dios y a la Virgen, por brindarme la oportunidad de aprender cada día y terminar mis estudios de posgrado; a mis padres por creer todo el tiempo en mí y a la formación en valores que me brindaron, a mis hermanos, a mi novia Rocío y a mi linda Anhi. A todos ellos que sin su confianza y generosidad no hubiese posible llegar hasta acá.”

RESUMEN

Se presenta una introducción a la simulación de sistemas complejos por medio de un modelo basado en agentes (**MBA**) para todo aquel interesado en responder preguntas sobre sistemas complejos envueltos en contextos sociales y de ingeniería. Esta investigación se conducirá por medio de aplicaciones en el campo de la ingeniería para ilustrar el potencial de la metodología del **MBA** y así entender cómo usar esta metodología en aplicaciones futuras.

El **Capítulo 1** presenta la introducción, objetivos, esquema del estudio y la contribución del trabajo de investigación como herramienta útil a tener en cuenta durante la toma de decisiones de políticas públicas.

El **Capítulo 2** presenta el primer artículo científico titulado: *Assessing the Use of Recycled Concrete Via Agent-Based Model. A Peruvian Perspective*, que plantea el uso de un modelo basado en agentes para simular el sector de construcción de proyectos públicos para un caso de estudio en la Región Piura.

El **Capítulo 3** presenta el estudio titulado: *Understanding the recycled solid waste collection based on agents*, el cual explora el impacto del nivel de segregación de los residentes en el porcentaje de bolsas recicladas recolectadas.

El **Capítulo 4** muestra el segundo artículo científico titulado: *Human evacuation for tsunamis using agent-based model. A Peruvian case*, cuyo objetivo es mostrar el proceso de evacuación de las personas frente al riesgo de tsunamis tomando como caso de estudio al distrito de Máncora. Tiene como producto final la mejora del mapa de evacuación por medio del análisis del Índice de Capacidad-Demanda (**CDI**).

Finalmente, se lleva a cabo una discusión general sobre la aplicación de modernas tecnologías para el estudio de sistemas complejos; así como su aplicación para futuras investigaciones.

SUMMARY

In this study, we will present an introduction to the simulation of complex systems through an agent-based model (**ABM**) approach for anyone interested in answering questions about the complex systems that are involved in social and engineered contexts. This research will draw on applications in the engineering field to illustrate the power of **ABM** methodology, and thus understanding how to use this methodology on future applications.

Chapter 1 presents the introduction, objectives, outline of the study and finally the contributions of the results as a suitable tool while the policy makers take public decisions.

Chapter 2 shows the first paper titled: *Assessing the Use of Recycled Concrete Via Agent-Based Model. A Peruvian Perspective*, which suggests the use of an agent-based model to simulate the construction sector of public projects applied to Region Piura as a case study.

Chapter 3 presents the study titled: *Understanding the recycled solid waste collection based on agents*, which explores the households segregation level impact on the recycled bags percentage collected in the urban sector.

Chapter 4 shows the second paper titled: *Human evacuation for tsunamis using agent-based model. A Peruvian case*, whose main objective is showing the human evacuation process during a tsunami hazard with a case study in Mancora town. The main product of this research is improving the evacuation maps through the Capacity-Demand Index (**CDI**) analysis.

Finally, was carried out a general discussion about the use of novel technologies to study of complex systems; and this application for future researches.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (**CONCYTEC**) por la beca que me brindaron y poder realizar mis estudios de posgrado. Asimismo agradecer a la Pontificia Universidad Católica del Perú (**PUCP**) por los conocimientos impartidos y grandes experiencias extra curriculares que enriquecieron mi formación como persona y profesional.

Me gustaría expresar mi más profundo aprecio y gratitud a mi asesor de tesis durante todo el tiempo de estudios en la Pontificia Universidad Católica del Perú: Prof. Ramzy Kahhat. Su experiencia, ejemplo y guía fueron de mucha inspiración y contribución de esta investigación.

Quisiera agradecer a los profesores y estudiantes del programa de posgrado en la Pontificia Universidad Católica del Perú, especialmente a los estudiantes de maestría de la beca **CONCYTEC** 2014 y 2015, quienes amablemente me ayudaron a mejorar mis presentaciones durante estos años y me dieron buenas críticas y apoyo.

ÍNDICE GENERAL

Lista de Figuras	1
Lista de Tablas	1
Cap. 1 Introducción	2
1.1 Objetivos	3
1.1.1 Objetivo general	3
1.1.2 Objetivos específicos	3
1.2 Esquema de trabajo	4
1.3 Contribución de la investigación	4
Cap. 2 Caso de Aplicación: Concreto Reciclado	6
2.1 Resumen	6
2.2 Introducción.....	7
2.3 Métodos y Trabajo Relacionado.....	9
2.4 Esquema de Proyectos de Inversión Pública en el Perú.....	12
2.5 Construcción del Modelo.....	13
2.5.1 Propósito del Modelo.....	14
2.5.2 Entidades, variables de estado y escalas	14
2.5.3 Resumen del Proceso de Programación.....	15
2.6 Colección de datos	16
2.7 Implementación del Modelo	19
2.8 Calibración y Validación del Modelo.....	19
2.9 Análisis de Sensibilidad.....	21
2.9.1 Parámetro de Concientización	22
2.9.2 Parámetro de Incentivos Económicos.....	23
2.10 Escenarios y Resultados	24
2.11 Conclusiones	25
Cap. 3 Caso de Aplicación: Recolección de Residuos Sólidos.....	27
3.1 Resumen	27

3.2	Introducción.....	28
3.3	Simulación de la Gestión de Residuos Sólidos	30
3.4	Construcción del Modelo.....	32
3.4.1	Propósito del modelo	32
3.4.2	Agentes y propiedades	32
3.4.3	Proceso de eventos.....	33
3.5	Resultados	35
3.5.1	Influencia de cantidad de segregadores	36
3.6	Conclusiones	37
Cap. 4	Caso de Aplicación: Evacuación Humana en Tsunamis.....	39
4.1	Resumen	39
4.2	Introducción.....	42
4.2.1	Modelos Basados en Agentes y Evacuación de Tsunamis.....	43
4.3	Entorno del Modelo	45
4.3.1	Caso de Estudio y Motivación	45
4.3.2	Población.....	46
4.3.3	Red Vial de Evacuación.....	47
4.3.4	Tipología de Refugios y Casos de Simulación.....	48
4.4	Construcción del Modelo.....	49
4.4.1	Entidades y Descripción General del Proceso de Simulación.....	49
4.4.2	Información de Entrada.....	50
4.4.3	Plataforma de Simulación.....	51
4.4.4	Tiempo de Decisión	52
4.5	Resultados	53
4.5.1	Demanda de Refugios	53
4.5.2	Índice de Capacidad Demanda (CDI)	55
4.6	Conclusiones	55
	Referencias.....	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fases de un Proyecto de Inversión Pública (PIP) en el Perú.....	14
Figura 2: Programación de los eventos y código parcial de los procedimientos importantes.....	16
Figura 3: Resultados de la data colectada por medio de encuestas.....	18
Figura 4: Sector de construcción pública modelado con NetLogo.....	20
Figura 5: Calibración del modelo (periodo desde 2009 hasta 2014) y validación (para el año 2015).....	21
Figura 6: Fracción de concreto reciclado obtenido según concientización de los agentes.....	23
Figura 7: Demanda de concreto reciclado según diferencia de precio entre CR y CC.....	24
Figura 8: Demanda final de concreto reciclado según escenarios simulados.....	25
Figura 9: Recojo de bolsas reciclables según tasa de segregación.....	35
Figura 10: Bolsas recolectadas vs tasa de segregación.....	37
Figura 11: Ubicación del área de estudio: Distrito de Máncora.....	46
Figura 12: Distribución de la población por edades en el distrito de Máncora.....	47
Figura 13: Refugios de evacuación de tsunamis (TES) y rutas de evacuación de agentes.....	48
Figura 14: Proceso de toma de decisión de evacuación para cada agente.....	50
Figura 15: Captura de pantalla de la evacuación humana simulada en NetLogo.....	52
Figura 16: Curvas de partida de tsunamis (TDC) de este estudio.....	53
Figura 17: Cuadro de capacidad y demanda de refugios.....	55
Figura 18: Mapa del CDI para el distrito de Máncora propuesto en este estudio.....	56

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Lista de escenarios combinados para diferentes políticas.....	24
Tabla 2: Lista de agentes que integran el modelo.....	33
Tabla 3: Programación de eventos.....	34
Tabla 4: Tiempo y modos de evacuación en desastres naturales.....	44
Tabla 5: Capas SIG requeridas como información espacial de entrada.....	51
Tabla 6: Lista de TES y resultados de simulación.....	54

CAP. 1 INTRODUCCIÓN

Debido a que el mundo se encuentra cada vez más interconectado y complejo, nuestra habilidad para entenderlo también debe ir por el mismo rumbo. El rápido desarrollo computacional nos ha permitido trabajar con problemas muy complejos por medio de la construcción y análisis de modelos más complejos. Esto ha generado un nuevo campo de conocimiento llamado “sistemas complejos”. Esta investigación es una introducción a una de las primeras metodologías que han surgido de la investigación de sistemas complejos. Esta metodología, llamada modelo basado en agentes (**MBA**), es una nueva forma de hacer ciencia por realizar experimentos usando computadores.

El aumento de uso computacional ha conducido a una explosión de nueva información. La cantidad de este conocimiento y data sobre nuestro mundo está creciendo exponencialmente. Como esta nueva información está siendo captada, podemos comenzar a formular preguntas sobre sistemas complejos que hasta el momento no podían ser contestadas correctamente con metodologías tradicionales. Por ejemplo, “¿Cómo las instituciones afectan las decisiones de los individuos cuando estos individuos

tienen la habilidad de establecer políticas públicas?” o “¿Cómo las personas evacúan o interactúan entre ellas con procesos sociales complejos frente a desastres naturales?” o “¿Cómo mejorar el sistema de recolección de residuos sólidos en nuestra localidad?”.

MBA es una herramienta muy útil y poderosa para examinar y entender sistemas complejos. A través de esta investigación se provee una introducción a **MBA** para todo aquel interesado en responder preguntas sobre sistemas complejos envueltos en contextos naturales, sociales y de ingeniería.

Esta investigación se conducirá por medio de aplicaciones en el campo de la ingeniería sostenible y de la ingeniería de reducción de riesgo de desastres. De esta manera, se ilustra el potencial de la metodología del **MBA** y poder así entender su uso en aplicaciones futuras.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

El objetivo general de la presente investigación es introducir una herramienta computacional, llamada modelo basado en agentes (**MBA**), para analizar sistemas complejos, mediante la aplicación de casos específicos al campo de la ingeniería con enfoque en sostenibilidad y reducción en riesgo de desastres.

1.1.2 Objetivos específicos

- ✓ Estudiar políticas públicas que permitan un mayor incentivo de proyectos de construcción con material sostenible (tal como el concreto reciclado) para un caso de estudio en la Región Piura.
- ✓ Entender la influencia que tiene la segregación en la fuente en el sector residencial en el porcentaje de colección de material reciclable.

- ✓ Mejorar los planos de evacuación frente a riesgo de tsunamis, publicados por la Dirección de Hidrografía y Navegación (**DHN**), para un caso de estudio en Máncora.

1.2 ESQUEMA DE TRABAJO

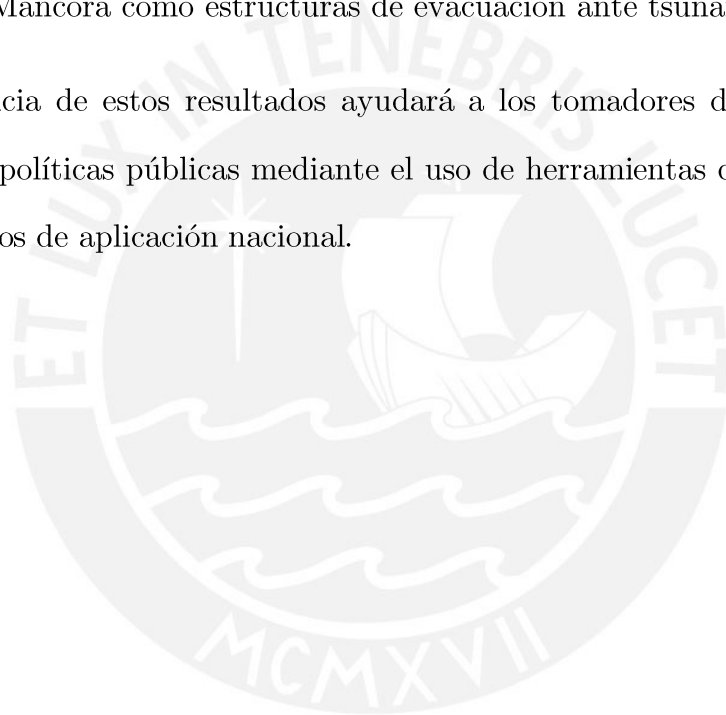
El esquema de trabajo durante los dos años de estudio se realizó de la siguiente manera: el primer año consistió de una revisión extensiva de la literatura con el fin de entender el estado del arte acerca de la simulación con modelos basados en agentes enfocados en los campos de estudio de interés (es decir, ecología, ingeniería civil y mitigación de riesgo de desastres). También durante la mitad de este año se realizaron encuestas de caracterización, con el fin de proponer un primer intento del modelo que responda al primer entregable acerca de la simulación del sector construcción y el uso de concreto reciclado en proyectos de inversión pública. El segundo año de estudio consistió en mejorar el modelo de simulación del sector construcción, al mismo tiempo de plantear otro modelo que simule el proceso de evacuación humana frente a riesgo de tsunamis en la zona del distrito de Máncora, al mismo tiempo de construir un modelo para el tercer entregable que represente el proceso de colección de residuos sólidos urbanos. Finalmente, durante la segunda mitad de este año se prepararon artículos científicos para ser presentados en los siguientes eventos: **i)** el primer estudio sobre concreto reciclado se presentará en el *Journal of Resources, Conservation and Recycling*; **ii)** el segundo estudio sobre simulación de evacuación humana en tsunamis se presentó en el *World Engineering Conference on Disaster Risk Reduction 2016*, celebrado en diciembre del 2016.

1.3 CONTRIBUCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Los resultados de la tesis son:

- Aplicar políticas enfocadas a pequeñas diferencias de precio entre el concreto reciclado y el concreto convencional, en combinación con mejorar la concientización de formuladores de proyectos sería el escenario más viable para impulsar el uso de materiales reciclados en el sector en la Región Piura.
- Segregar adecuadamente los residuos sólidos permitiría recolectar siete veces más la cantidad de bolsas recicladas.
- Existe una latente necesidad de implementar edificaciones verticales en el distrito de Máncora como estructuras de evacuación ante tsunamis.

La relevancia de estos resultados ayudará a los tomadores de decisión al momento de establecer políticas públicas mediante el uso de herramientas computacionales novedosas en contextos de aplicación nacional.



CAP. 2 CASO DE APLICACIÓN: CONCRETO RECICLADO

2.1 RESUMEN

El uso de concreto reciclado (**CR**) como material de construcción no es común en el Perú, no obstante, hay beneficios ambientales relacionados a su uso. Este estudio utiliza un modelo basado en agentes (**MBA**) para explorar futuros escenarios y condiciones límite acerca de la adopción de **CR** proveniente del residuo de la construcción y demolición (**RCD**), y de esta manera proveer información oportuna para los tomadores de decisiones y las partes interesadas envueltas. Para ello, se identificaron y modelaron cinco partes interesadas que intervienen en el contexto de la construcción (es decir, autoridad pública, formuladores, evaluadores, proyectistas y constructores). Estos actores son cruciales en las decisiones relacionadas a la selección del tipo de material a ser utilizado durante la fase de pre-inversión e inversión de proyectos públicos dentro de la Región Piura, Perú. El modelo fue calibrado con información existente de 588 proyectos de construcción del periodo 2009 al 2014, y la validación del modelo se realizó

con información generada a través de encuestas a las partes interesadas realizadas el año 2015. Resultados mostraron que aplicar políticas enfocadas a pequeñas diferencias de precio entre el concreto reciclado y el concreto convencional, en combinación con mejorar la concientización de formuladores de proyectos sería el escenario más viable para impulsar el uso de materiales reciclados en el sector, lo cual induce a reducir las cantidades de **RCD** en botaderos. De esta manera, este modelo puede proveer lineamientos para la ejecución más efectiva de políticas de gestión de **RCD**.

2.2 INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción no sólo es el mayor consumidor de recursos naturales y energía en todo el mundo ([Bergsdal et al., 2007](#)), sino también genera una gran cantidad de residuos, conocidos como residuos de la construcción y demolición (**RCD**). El alto volumen de **RCD** constituye un serio problema hoy en día, con tendencia a aumentar sustancialmente en las próximas décadas debido a rápidos cambios socio-económicos y demográficos en los países. Por ejemplo, en Europa, China y Estados Unidos se generaron 970 mill. ton/año, 200 mill. ton/año, y 140 mill. ton/año de **RCD**, respectivamente ([Sonigo et al., 2010](#); [Ding et al., 2016](#); [Yuan et al., 2012](#)). En Perú, se generó alrededor de 11 mill. ton/año durante el año 2014 ([Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú, 2015](#)), los cuales son lanzados, sin tratamiento previo, al mar y a los cauces de los ríos ([Ministerio del Ambiente, 2014](#)) y sólo el 3% ingresa a la ruta de reciclaje ([Defensoría del Pueblo, 2007](#)).

Programas de reciclaje de **RCD** son una opción de vital importancia para desviar flujos de **RCD** de los botaderos ([Lawson et al., 2001](#)), reduciendo de esta manera la presión ambiental. Por ejemplo, el concreto reciclado (**CR**) es obtenido por reemplazar parte de su agregado natural por agregado reciclado producto del **RCD** ([Peng et al., 2015](#)).

Esto reduce el área necesaria para la disposición de residuos y también brinda una gran oportunidad para conservar recursos minerales no renovables ([Pacheco-Torgal, 2013](#)). Gestionar el **RCD** de una manera adecuada, incluyendo la promoción de prácticas de reciclaje, es un gran reto debido a la gran escala, complejidad y naturaleza dinámica de este tipo de residuos en la industria de la construcción ([Shi et al., 2014](#)). Por lo tanto, los tomadores de política requieren nuevas teorías, herramientas y métodos que mejoren el entendimiento de los flujos de información, de material y económicos que emergen en los sistemas de construcción.

Para responder a este reto, modelos basados en agentes (**MBA**) se presentan como una metodología prometedora, usada desde sus inicios en áreas de ciencias sociales ([Tefatsion and Judd, 2006](#); [Gilbert and Troitzch, 2005](#)), la cual procesa la complejidad, emergencia y no linealidad propia de muchos sistemas sociales (como lo es el sector de la construcción) de una manera muy sencilla ([García-Valdecasas, 2011](#)).

A pesar que el **MBA** fue desarrollado hace varias décadas atrás, en los últimos años ha mostrado su gran potencial para analizar la toma de decisiones dentro de contextos de reciclaje. Por ejemplo, en el campo de la energía renovable, Ringler et al ([2016](#)) desarrolló un **MBA** para estudiar la transición de sistemas de electricidad hacia redes inteligentes producto de las interacciones de los tomadores de decisión. Elia et al ([2016](#)) propone la adopción del enfoque producto-servicio sistema (**PSS**) para diseñar nuevos servicios de recolección de residuos de equipos eléctricos y electrónicos en Italia (*WEEE con sus siglas en inglés*). Por otro lado, Farhadi et al ([2016](#)) estudió una solución sostenible para la gestión de agua subterránea en Irán por medio de un **MBA**, cuya implementación condujo a reducir el 58.3% del agua extraída. Meng et al ([2016](#)) estableció un **MBA** para simular el comportamiento de residentes al momento de generar sus residuos sólidos domiciliarios. Los resultados de su estudio mostraron que

implementar políticas de tarifas específicas mejora el comportamiento de separación de los agentes, aumentando la tasa de recursos domésticos reciclables.

Para analizar el sector construcción desde una perspectiva de sistema complejo, nuestro estudio presenta un **MBA** desarrollado por Knoeri et al (2011a) y adaptado al contexto peruano. Específicamente, nuestro modelo simula las interacciones de los tomadores de decisión (es decir, autoridad pública, formuladores, evaluadores, proyectistas y constructores) respecto al uso de **CR** dentro del sector de la construcción pública en la Región Piura como caso de estudio. Estos tomadores de decisión interactúan mediante la toma de decisiones multi-criterio basadas en su concientización, recomendaciones, normas y factores económicos entre **CR** y el concreto convencional (**CC**).

En las siguientes secciones, primero se introducirá brevemente el estado del arte del **MBA**. Luego, se explica el ciclo de proyectos públicos del contexto peruano. Después, la construcción del modelo se explica a detalle. Posteriormente, la calibración y validación del modelo es presentado, seguido del análisis de sensibilidad y discusión de los escenarios simulados. Finalmente, el estudio concluye con un resumen de los hallazgos principales.

2.3 MÉTODOS Y TRABAJO RELACIONADO

En el campo de la investigación del flujo de material sostenible en proyectos de construcción, simulación con eventos discretos (**SED**) ha sido la metodología de uso extendido (Brodetskaia et al., 2013). Proyectos de construcción con el enfoque **SED** simulan las actividades del sector construcción como un proceso centralmente controlado por insumos de información fijos (Ma and Sacks, 2016); sin embargo, este enfoque no refleja ni explica la emergencia interna y comportamiento no lineal entre cada tomador de decisión del sector de la construcción (Watkins et al., 2009).

Dinámica de sistemas (DS) es una metodología útil para modelar estas limitaciones, debido a que permite entender el comportamiento dinámico de sistemas complejos sobre el tiempo. Los modelos con el enfoque de DS presentan un punto de vista del sistema complejo mediante un enfoque que minimiza su comportamiento (Jo et al., 2015), siendo muy útil para entender la relación entre el comportamiento del sistema en el tiempo y las reglas de decisión de su estructura (Marzouk and Azab, 2014); sin embargo, esta metodología posee la limitación que al ser su estructura de simulación fija y con un alto nivel de agregación de datos, pierde precisión al momento de modelar el comportamiento heterogéneo de componentes individuales (Vincenot et al., 2011), siendo difícil capturar el comportamiento emergente de las partes que integran el sistema complejo.

Para ello, MBA, también conocido como sistema multi agentes (SMA) o modelo basado en individuos (MBI) (Chen, 2012) permite modelar la complejidad de los sistemas sociales (Gilbert and Troitzch, 2005), ya que captura las interacciones entre los tomadores de decisión autónomos (conocidos como *agentes* en el modelo) dentro de un contexto específico (Rahmandad and Sterman, 2008; Wooldridge and Jennings, 1995), permitiendo de esta manera al investigador crear, analizar y experimentar con modelos compuestos de agentes que interactúan dentro de un ambiente y entre ellos mismos (Gilbert, 2008). Al mismo tiempo, MBA ayuda a identificar patrones de comportamiento sociales usando una técnica de *bottom-up* (Natalini and Bravo, 2014), así como salidas inesperadas que representan propiedades emergentes y estructuras no regulares del sistema (Gabbriellini, 2011).

El uso de MBAs tienen un gran potencial en resolver problemas significativos del mundo real (Louie and Carley, 2008; Le, 2005), estos modelos son caracterizados por cuatro elementos principales: (1) un entorno o ambiente; (2) agentes interactivos;

(3) interacciones entre los agentes; y (4) operadores que permiten la interacción entre agentes y objetos (Maggi and Vallino, 2016).

Para simular contextos del sector construcción (entendido como un sistema complejo donde interactúan múltiples agentes con diferentes deseos), **MBA** ha sido la metodología más utilizada en investigación en los últimos años. Ma and Sacks (2016) desarrollaron un **MBA** paramétrico llamado **EPIC 2.0** (*Emergent Production In Construction*) para modelar flujos de trabajo en la construcción. El sistema modela el intercambio de información y percepciones entre agentes de la construcción quienes influyen en sus decisiones durante la selección de tareas de trabajo. Los resultados de esta simulación concluyen que información inadecuada afecta el rendimiento del flujo de trabajo en la construcción. Ding et al (2016) presentó un **MBA** de la gestión de residuos de demolición (**GRD**) de la construcción para explicar las interacciones entre agentes heterogéneos dentro de la industria de la construcción en China y cómo influyen en el rendimiento ambiental de la **GRD**. Los resultados muestran que una mejora en prácticas de demolición durante la etapa de diseño reduce la mitad de los impactos ambientales. Hsu et al (2015) utilizó **MBA** para entender la complejidad que surge durante la selección de los miembros de equipos de proyectos en el sector construcción. Este estudio sugiere que seleccionando grupos de trabajo conformados por empleados heterogéneos aumenta la productividad de su trabajo, incluso en condiciones económicas adversas. Knoeri et al (2011a) desarrolló un **MBA** aplicado al sector de construcción suizo, el cual usa un enfoque de agente operacional combinado con el proceso analítico jerárquico (**AHP con sus siglas en inglés**) para cuantificar el proceso de toma de decisiones de los agentes. Este **MBA** consiste de los siguientes agentes: a) *autoridad pública* conformada por grupos independientes del sector privado, comercial y público, las cuales elaboran proyectos de construcción para diferentes propósitos; b) *ingenieros*

encargados de ejecutar el diseño estructural de las edificaciones; c) *arquitectos* dedicados a supervisar la construcción; y d) *contratistas* quienes implementan los trabajos en concreto. Se desarrollaron 450 proyectos de construcción en el modelo por cada año de simulación, y 5788 agentes fueron implementados, donde cada uno decide en base a variables de decisión multi-criterio. Un año en el modelo suizo es representado por un paso de tiempo (o también llamado '*tick*' en el modelo). Las simulaciones son ejecutadas desde 2010-2050 para el análisis de flujo de materiales, y del 2010-2020 para el análisis de sensibilidad de demanda.

Para entender las implicaciones del uso de **CR** dentro del contexto peruano es importante entender la cadena dinámica de suministro de materiales (desde el diseño hasta la ejecución de proyectos) del sector de la construcción.

En nuestro estudio, la autoridad pública, formuladores, evaluadores, proyectistas y constructores son los agentes cuyas características de comportamiento (tal como concientización, conocimiento de las normas y sensibilidad al precio entre **CR** y **CC**) son la información de entrada en el modelo, y el número de proyectos anuales con **CR** y **CC** es el resultado de salida a analizar en el modelo.

A pesar que el uso de **CR** es una práctica poco común en Perú, el proceso de diseño de proyectos es muy similar a otros contextos donde el uso de **CR** es habitual. Por tal motivo, este estudio es útil para dar luces a los tomadores de decisión locales al momento de diseñar proyectos de construcción pública con uso de **RC**.

2.4 ESQUEMA DE PROYECTOS DE INVERSIÓN PÚBLICA EN EL PERÚ

A pesar que el reciclado de **RCD** es una opción prometedora para evitar la escasez de depósitos, reducir sus impactos ambientales y conservar las fuentes de recursos minerales ([Spoerri et al., 2009](#)), la mayor barrera para el uso del **RCD** es la falta de información y entrenamiento sobre su desempeño por parte de los agentes inmersos en el

ciclo de proyectos del sector construcción ([Rahmanad and Sterman, 2008](#); [Gilbert and Troitzsch, 2005](#)).

Nuestro caso de estudio es la Región Piura, departamento localizado al norte del Perú, donde los proyectos de inversión pública (**PIP**) del sector construcción siguen el ciclo presentado en la [Figura 1](#), el cual se encuentra agrupado en dos fases: fase de pre-inversión y la fase de inversión.

En la *fase de pre-inversión*, la idea o requerimiento del proyecto es claramente definida por la *autoridad pública* (**Paso 1-1**). Este requerimiento del proyecto se convierte en perfil de inversión al momento en que los *formuladores* (trabajadores de la Unidad Formuladora, **UF**) preparan los aspectos técnicos (**Paso 1-2**), y los *evaluadores* (trabajadores de la Oficina de Programación e Inversión, **OPI**) se encargarán de los aspectos económicos (**Paso 1-3**). El perfil de inversión se considerará viable cuando cumpla los aspectos técnicos y económicos dentro del plan anual de contrataciones, pasando así a la *fase de inversión*. En esta fase, los *projectistas* (trabajadores de la Dirección de Estudios y Proyectos, **DEP**) elaboran el expediente técnico del proyecto en base al perfil de inversión (**Paso 2-1**). Finalmente, el expediente técnico del proyecto es ejecutado por los *contratistas* (**Paso 2-2**), encargados de los trabajos en concreto.

2.5 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

Un grupo de experimentados modeladores en **MBA** desarrolló el protocolo estándar llamado *Overview, Design concepts, and Details* (**ODD protocol**), haciendo de esta manera los **MBA**s menos susceptibles a crítica por ser irreproducibles ([Grimm et al., 2010](#)). En este estudio, sólo usaremos la parte de revisión general (*Overview Part*) del protocolo **ODD** para explicar el modelo, debido a que una descripción completa es muy extensa para este manuscrito.

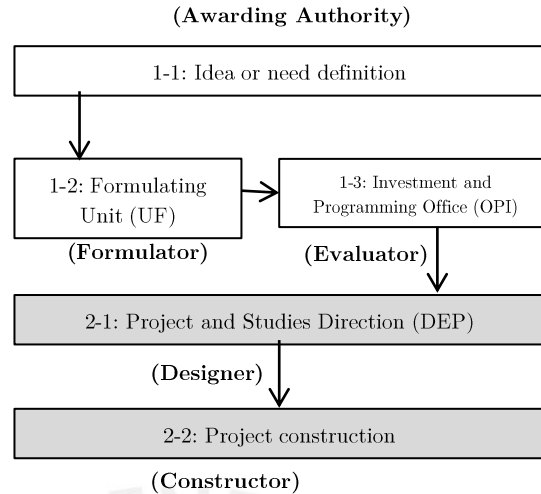


Figura 1: Fases de un Proyecto de Inversión Pública (**PIP**) en el Perú.

2.5.1 Propósito del Modelo

Este estudio presenta un **MBA** del sector de construcción público en la Región Piura, las interacciones de los agentes que lo conforman y la estimación anual de proyectos con material de **CR** y **CC**. Nuestro estudio se basa en la investigación realizada por Knoeri et al (2014) y fue adaptado al contexto peruano para tomar en cuenta el proceso de toma de decisión de los agentes en forma particular, tal como se verá más adelante.

De esta manera, este **MBA** sirve como una herramienta efectiva para entender de manera práctica el comportamiento y relaciones de cada grupo de agentes. Esto es con el fin de explorar políticas públicas (es decir, nivel de concientización de los agentes, diferencia de precio entre **CR** y **CC**) que impulsen el uso de **CR** dentro de la Región Piura como material de construcción.

2.5.2 Entidades, variables de estado y escalas

Los agentes representan a los tomadores de decisión (es decir, la autoridad pública, formuladores, evaluadores, proyectistas y contratistas) y el ambiente global que asignaremos será el sector de construcción público y los **PIPs**.

En total, 198 agentes (es decir, 8 AP, 46 formuladores, 37 evaluadores, 23 proyectistas y 84 contratistas) son implementados en el modelo quienes representan a la cantidad total de tomadores de decisión en el sistema real, y el sector construcción es el ambiente donde los agentes interactúan. Nuestro modelo muestra cuadros de control tal como el año de construcción, suma total de proyectos, y el tipo de material utilizado en cada proyecto. El usuario es quien define los parámetros de decisión de cada agente para explorar el comportamiento emergente del sistema.

La escala temporal en el modelo es en años de acuerdo a la duración de los proyectos. Un paso de tiempo (conocido como “*tick*”) en el **MBA** significa un año, y las simulaciones fueron ejecutadas del periodo 2009 – 2015 para el análisis de sensibilidad y del periodo 2017 – 2037 para el análisis de flujo de material. Los agentes fueron distribuidos aleatoriamente dentro del modelo para una mejor representación de las interrelaciones en el sistema real.

2.5.3 Resumen del Proceso de Programación

Esta sección conduce a la dinámica del modelo, donde cada proceso describe el comportamiento de los agentes y de los proyectos. El objetivo de la simulación es simular escenarios que brinden la mayor cantidad de proyectos con **CR**. Para ello, nuestro modelo computacional consiste de una serie de eventos programados cuyo código principal se muestra en la **Figura 2** formado por los siguientes pasos:

Paso 1. Se calcula la cantidad de proyectos según el año a simular en el modelo.

Paso 2. Se distribuyen y ejecutan los proyectos aleatoriamente a cada **AP**.

Paso 3. Se ejecuta el análisis de decisión multi criterio (ADMC) para cada agente.

Paso 4. Se actualizan los valores de demanda global de material y las propiedades de los agentes.

Paso 5. Se borran los proyectos con una antigüedad mayor a 5 años (5 *ticks*).

Paso 6. Si el año de simulación es mayor al año del periodo objetivo, finaliza la simulación, sino se vuelve a ejecutar el Paso 1.

El ADMC mencionado en el paso 3 consiste en analizar los factores que toma en cuenta cada agente (es decir APs, formuladores, evaluadores, proyectistas y contratistas) al momento de recomendar un cierto tipo de material para cada proyecto de construcción. Estos criterios se mencionan con mayor detalle en la siguiente sección de colección de datos.

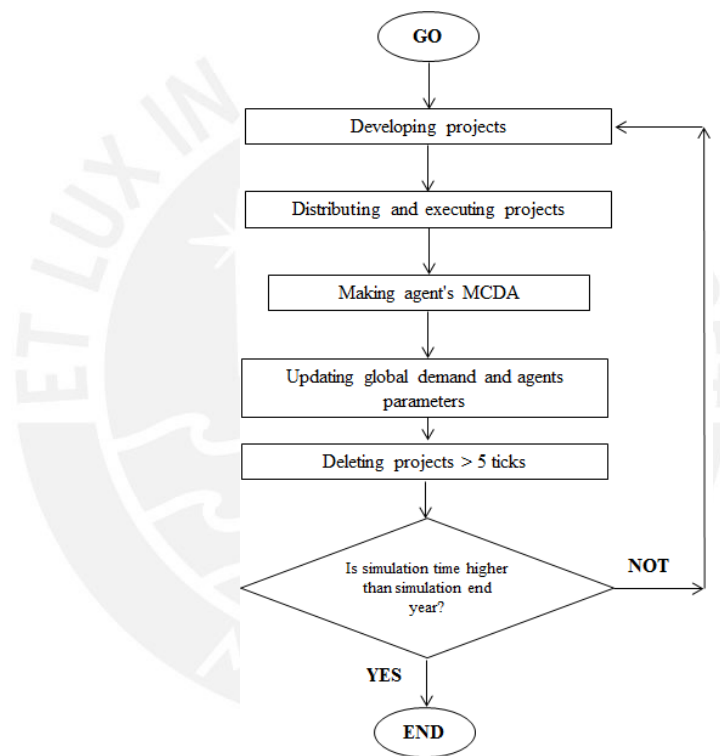


Figura 2: Programación de los eventos y código parcial de los procedimientos importantes.

2.6 COLECCIÓN DE DATOS

Para el caso de estudio, se encuestó a 50 tomadores de decisión (de los 190 en total) quienes participan dentro del proceso de licitación de **PIPs** en la Región Piura, con el fin de adquirir información relevante sobre el comportamiento que tendrán los agentes.

La encuesta fue llevada a cabo entre agosto y octubre de 2015 y consistió de 12 preguntas cuyo principal objetivo fue responder ¿Qué factores deben ser mejorados para

ejercer un mayor uso de **CR** como material de construcción? Para ello, la encuesta se dividió en dos grupos de preguntas para poder entender los factores que influyen en las decisiones de los agentes: el primer grupo de preguntas caracteriza a los tomadores de decisión (perfil académico, edad, experiencia profesional dentro del sector público), y el segundo grupo de preguntas explora los factores a tener en cuenta para adoptar un material específico en proyectos de construcción.

El tamaño de la muestra fue determinada con la fórmula $n = N\sigma^2 Z^2 / ((N-1)e^2 + \sigma^2 Z^2)$, donde N es el número de población, e es el error esperado, σ es la desviación estándar, y Z es la desviación del valor promedio ($Z=1.645$ para un nivel de confianza del 90%). Basados en la metodología de muestreo de datos bola de nieve, los tomadores de decisión fueron entrevistados cada uno personalmente o vía telefónica, siendo los cuestionarios distribuidos manualmente.

Con respecto al primer grupo de preguntas, se observó que el 70% de los tomadores de decisión son jóvenes adultos cuyas edades están en el rango de 30 a 40 años. Al mismo tiempo, sólo el 60% de los encuestados tiene estudios a nivel de posgrado con especialidades relacionadas a gestión pública y administración de proyectos, mientras que el otro 40% de los encuestados sólo tiene estudios a nivel de pregrado.

Figura 3(a) muestra que la mayoría de encuestados en **PIPs** están relacionados a estudios de Ingeniería Civil, Arquitectura y Economía. Asimismo, los economistas tienen una gran influencia en la etapa inicial de proyectos, ejerciendo funciones como *formuladores* o *evaluadores*, mientras que ingenieros civiles y arquitectos están principalmente enfocados a labores como *constructores*.

Con respecto al segundo grupo de preguntas, el modelo desarrollado por Knoeri et al (2014) consideró los siguientes factores de decisión para cada agente: i) concientización sobre beneficio obtenido por el uso de **CR**; ii) probabilidad de recomendación por

trabajadores en cuanto al uso de **CR**; iii) sensibilidad al precio entre **CR** y **CC**; iv) imagen o reputación del agente; v) experiencia profesional en cuanto al uso de **CR**; vi) conocimiento sobre normas o leyes en cuanto a la promoción del **CR**. Estas decisiones fueron adaptadas para proyectos de construcción en Suiza, donde es común el uso de materiales sostenibles (como es el caso de **CR**). Para nuestro caso de estudio del sector construcción en Perú, los encuestados determinaron los siguientes factores que impulsarían el uso de **CR** en proyectos de construcción: i) concientización de los agentes; ii) sensibilidad al precio; y iii) conocimiento sobre normas y leyes.

De acuerdo a la encuesta realizada, el peso de ponderación que cada agente le otorga a cada uno de estos factores mencionados anteriormente fueron 31%, 25% y 18%, respectivamente, mostrados en la **Figura 3(b)**.

De esta manera, los cuestionarios nos dan una mejor idea sobre los factores de decisión más importantes en cada agente a modelar, así como aquellos más influyentes dentro del ciclo de proyectos de construcción peruanos.

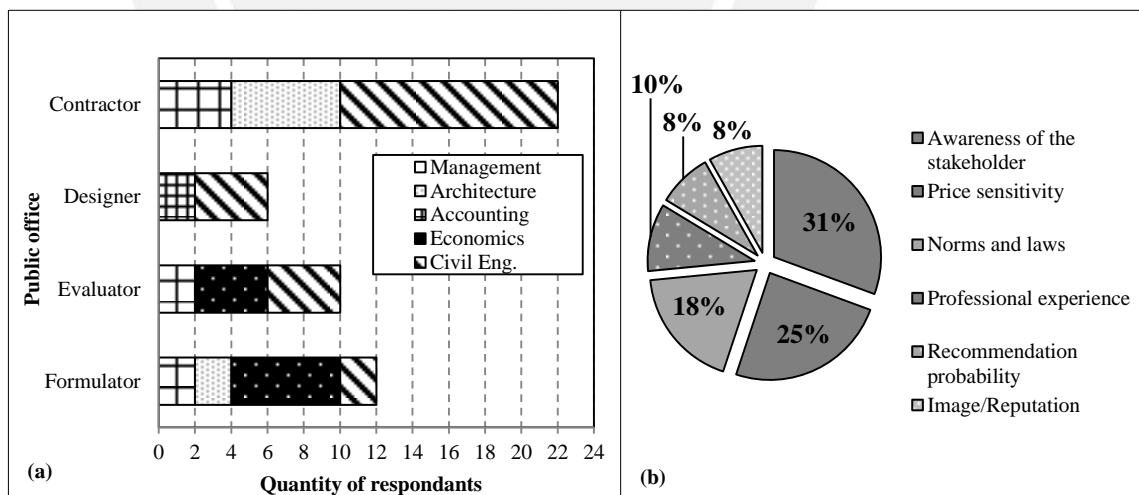


Figura 3: Resultados de la data colectada por medio de encuestas.

2.7 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

Este modelo fue desarrollado a través de la plataforma de simulación **NetLogo**, donde los agentes operan individualmente y son controlados por el investigador.

Figura 4 muestra el modelo dividido en tres secciones: **(A)** variables globales de entrada, **(B)** visualización del modelo; y **(C)** muestra de resultados. La sección **A** muestra los parámetros de decisión iniciales de los agentes, las cuales se agrupan según la categoría del agente y pueden tomar valores de probabilidad desde 0 a 1.

Otra información de entrada son los parámetros iniciales relacionados a la sensibilidad del precio que tienen los agentes y el porcentaje de la diferencia de precio entre **CR** y **CC** dentro del mercado.

La sección **B** muestra el sector de construcción pública virtual creado en el modelo, el cual muestra las interacciones entre los agentes y su entorno. Aquí, los proyectos con material **CR** son los puntos de color blanco y los puntos de color negro son proyectos con material **CC**. También es parte de esta sección los botones de inicio y ejecución (*setup and go buttons*), así como los cuadros con la fecha de inicio y fin de la simulación. Finalmente, la sección **C** muestra los resultados del modelo, incluyendo la experiencia ganada de los agentes con respecto al uso de **RC** en proyectos de construcción.

2.8 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

Este estudio no busca que el modelo pueda predecir con precisión las reglas de decisión o acciones que toman los tomadores de decisión durante el diseño de proyectos; sin embargo, este modelo puede ayudar a identificar patrones emergentes de las interacciones entre los tomadores de decisión y su entorno en futuros escenarios de políticas de gestión de RCD.

De esta manera, el modelo ofrece un mejor entendimiento sobre la dinámica compleja del sector construcción en Perú.

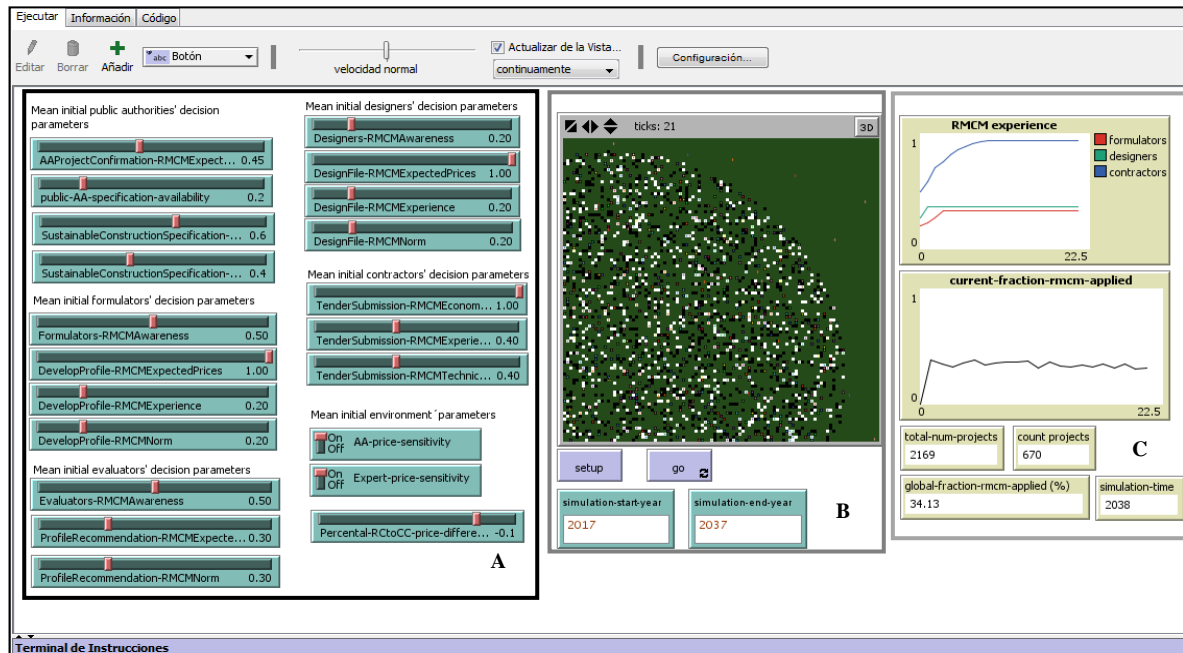


Figura 4: Sector de construcción pública modelado con NetLogo.

Luego de determinar los factores más importantes de los agentes a analizar, sigue la etapa de calibración y validación del modelo. Para la calibración del modelo se utilizó información empírica existente de 588 **PIPs** ejecutados durante los años 2009 al 2014 para el análisis de sensibilidad a la demanda, y para la validación se utilizó información de las encuestas realizadas el año 2015, siendo posible crear reglas empíricas que gobiernan las decisiones de los agentes en el modelo. Para ello, se utilizó la metodología propuesta por Truong et al (2014) llamada Enfoque Combinado de Solución de Inteligencia Artificial y Plataforma Multi-agente (**CFBM** con sus siglas en inglés), la cual integra la información de entrada y salida de las simulaciones una manera automática.

Se generó 1000 repeticiones de escenario, haciendo que el número de proyectos con **CC** y **CR** guarden una correspondencia con información existente. De esta manera, se obtuvo un valor promedio de $R^2 = 0.975$ (tanto para la calibración y validación del

modelo), lo cual indica una correlación positiva entre los resultados del modelo y la información recogida tanto por las encuestas como de proyectos existentes (Figura 5).

De esta manera, este estudio demuestra la validez del modelo para simular el sector de construcción pública del Perú.

Finalmente, la siguiente sección provee una comparación detallada de diferentes escenarios simulados, teniendo en cuenta los factores clave para alcanzar el máximo porcentaje de proyectos con **CR**.

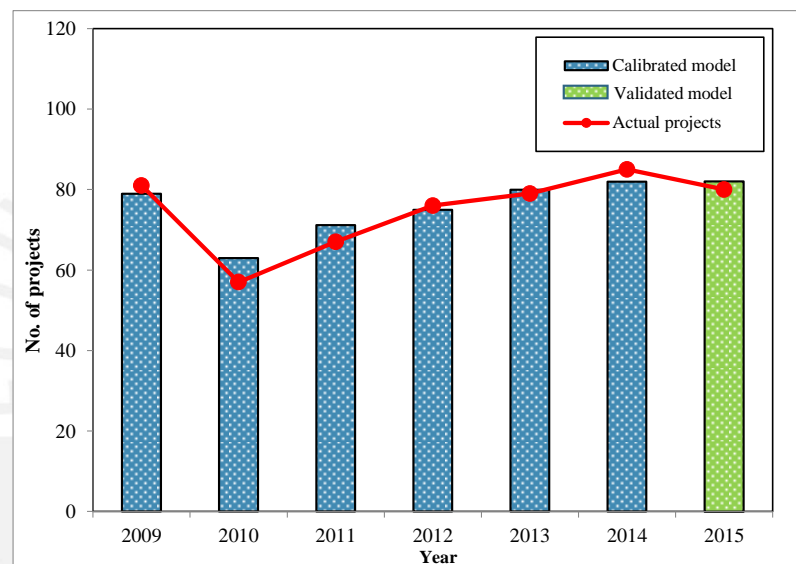


Figura 5: Calibración del modelo (periodo desde 2009 hasta 2014) y validación (para el año 2015).

2.9 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Una vez calibrado y validado el modelo, sigue la etapa de simulación de escenarios, donde se escogió un periodo objetivo del 2017 al 2037 para el análisis de sensibilidad de flujo de materiales, donde cada año es equivalente a un *tick* en el modelo. Se ejecutó 100 corridas del modelo para los siguientes parámetros a analizar: concientización de los agentes y diferencia de precio entre **CR** y **CC**. Estos parámetros fueron seleccionados por tres razones fundamentales: (i) tienen alta incertidumbre en los próximos años, siendo necesario entender cómo afectan los resultados; (ii) el rango de la incertidumbre

de los datos puede ser estimado mediante la información recolectada de las encuestas de caracterización; (iii) tienen influencia directa sobre los resultados.

Finalmente, la información de salida del modelo es el número de proyectos anuales que utilizan **CR** y **CC**.

2.9.1 Parámetro de Concientización

Esta sección presenta la fracción de proyectos de construcción con **CR** según la concientización de los agentes: formuladores, evaluadores y proyectistas.

Valor de concientización igual a 0.0 significa que los agentes no tienen conocimiento sobre el uso de material reciclado en proyectos de construcción, por lo tanto, no recomiendan su uso. Por otro lado, un valor de concientización igual a 1.0 significa que los agentes poseen conocimiento óptimo sobre el uso de material reciclado en proyectos de construcción, y por lo tanto, lo recomiendan.

La **Figura 6(a)** muestra que un valor de concientización igual a 0.0 en todos los agentes no genera proyectos de construcción con **CR**, mostrando una alta influencia de este parámetro. Al mismo tiempo, un valor de concientización igual a 0.0 sólo en los agentes formuladores combinado con valores de concientización igual a 1.0 en evaluadores y proyectistas, generaría un 12% de proyectos de construcción que utilicen como material el **CR**. Este caso es muy similar a la **Figura 6(b)**, donde un valor de concientización igual a 1.0 sólo en los formuladores combinado con valores de concientización igual a 0.0 en evaluadores y proyectistas, generaría un 13% de proyectos de construcción que utilicen como material el **CR**. Por otro lado, un valor de concientización igual a 1.0 a los agentes evaluados generaría un 17% de proyectos de construcción que utilicen **CR**, siendo este resultado ligeramente mayor a las opciones anteriores, representando de esta manera el comportamiento no lineal del sistema.

Por lo tanto, este parámetro demuestra la alta influencia que tiene el nivel de concientización de los agentes (especialmente los formuladores) al momento de decidir un material específico en proyectos de construcción.

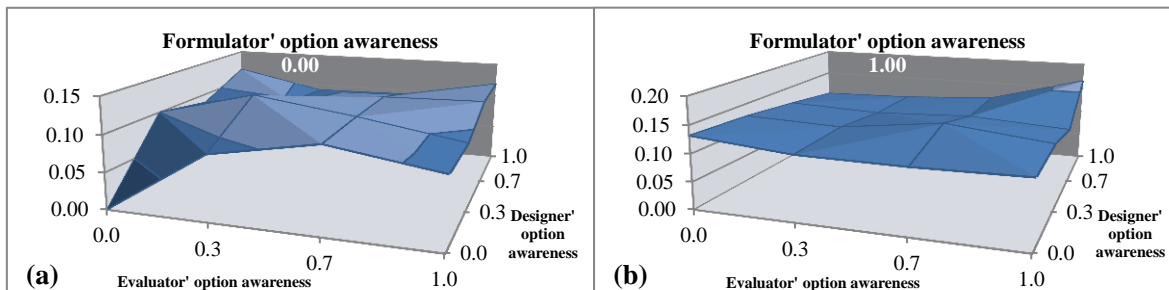


Figura 6: Fracción de concreto reciclado obtenido según concientización de los agentes.

2.9.2 Parámetro de Incentivos Económicos

Incentivos económicos son uno de los parámetros que desencadenarán la demanda de **CR** entre los tomadores de decisión del sector construcción (Knoeri et al., 2011b). Por lo tanto, nuestro **MBA** tiene la capacidad de capturar la demanda de **CR** en base a la pregunta: *¿Cuán económico debería ser el **CR** sobre el **CC** para un mayor uso hoy en día en el sector construcción?* En este estudio, cuando mencionemos a la terminología “diferencias de precio” nos referiremos a los incentivos económicos del **CR** frente al **CC** que existen en el mercado. **Figura 7** muestra la alta demanda de **CR** en proyectos de construcción con sólo pequeñas diferencias de precio entre **CR** y **CC**. Por ejemplo, diferencias de precio del 10% generaría un 33% de proyectos con el uso de material de **CR**. Asimismo, diferencias de precio mayores al 10% no generan mucho impacto en la demanda de **CR** en proyectos de construcción. Se puede observar también que diferencias de precio del 50% generaría un 36% de proyectos con material de **CR**. Por lo tanto, se demuestra la alta demanda de proyectos con material de **CR** usando sólo pequeños incentivos económicos entre los precios de ambos materiales.

2.10 ESCENARIOS Y RESULTADOS

Sabiendo que los factores clave de interés es obtener el máximo porcentaje de **CR** en proyectos de construcción variando sólo los parámetros anteriormente mencionados (i.e. concientización y diferencia de precio), se llevaron a cabo 1000 corridas para cada uno

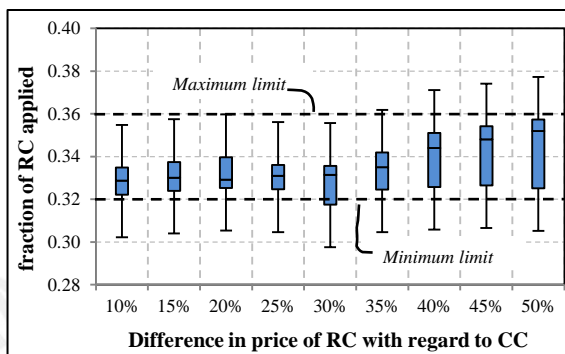


Figura 7: Demanda de concreto reciclado según diferencia de precio entre **CR** y **CC**.

de los escenarios usando la herramienta *BehaviorSpace* de **NetLogo**.

Cuatro escenarios (presentados en la [Tabla 1](#)) fueron considerados:

- Escenario 01 (**SC.01**): combina parámetro de diferencia de precio del 10% con parámetro de concientización de 1.00 sólo para agente formulador.
- Escenario 02 (**SC.02**): combina parámetro de concientización de 1.00 sólo para agente formulador y entidad pública.
- Escenario 03 (**SC.03**): combina parámetro de diferencia de precio del 10% con parámetro de concientización de 1.00 sólo para agente entidad pública.
- Escenario 04 (**SC.04**): combinación de todos los escenarios.

Tabla 1: Lista de escenarios combinados para diferentes políticas.

Escenario	Concientización de formuladores	Iniciativa Pública	Diferencia de precios (10%)
SC.01	o		o
SC.02	o	o	
SC.03		o	o
SC.04	o	o	o

La **Figura 8** muestra los resultados finales al simular los cuatro escenarios. Escenarios **SC.01** y **SC.03** tienen una alta influencia (39% en promedio para ambos escenarios) para impulsar el uso de **CR** en proyectos de construcción en comparación con el escenario **SC.02**, el cual obtuvo un valor de 18%.

También podemos observar el comportamiento no lineal y emergente del sistema completo en el escenario **SC.04**, cuando al combinar todos los escenarios sólo se obtiene pequeños incrementos de proyectos con el uso de **CR** (45% del total de proyectos de construcción) en comparación con los escenarios **SC.01** y **SC.03**.

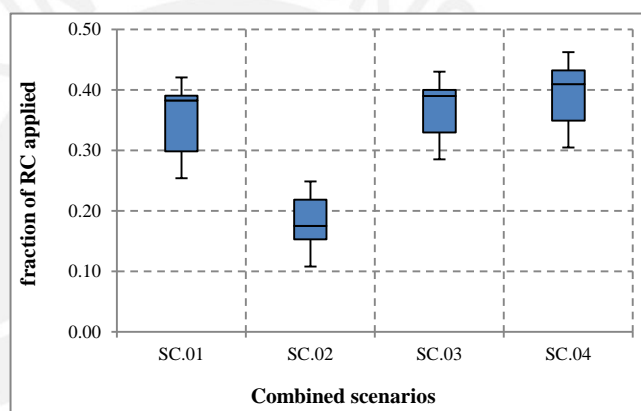


Figura 8: Demanda final de concreto reciclado según escenarios simulados.

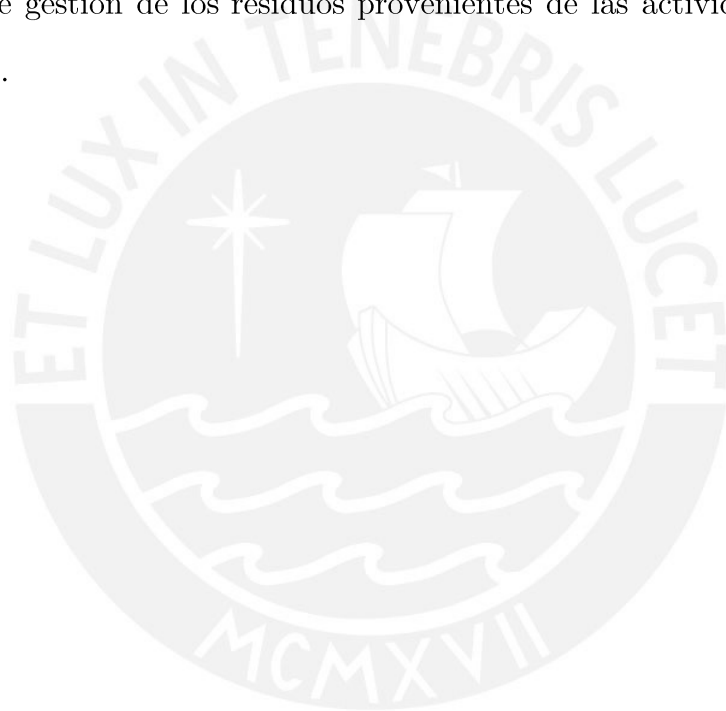
2.11 CONCLUSIONES

Esta investigación revisó el flujo de proyectos de inversión pública en el Perú y analizó los factores clave dentro de la interacción compleja de los tomadores de decisión sobre la sostenibilidad de proyectos usando un enfoque de modelo basado en agentes.

Resultados clave que emergieron de este análisis fue que aplicar campañas de concientización enfocadas sólo a los formuladores de proyectos en combinación con pequeñas diferencias de precio sería suficiente para activar la demanda de **CR** en proyectos de construcción. Por otro lado, la viabilidad ambiental del uso de **CR** sería lograda siempre y cuando las plantas de reciclaje se ubiquen cerca de las plantas de

concreto (Vieira et al., 2016). Esta investigación aún presenta algunas limitaciones de caracterizar mejor a los agentes (por ejemplo, reputación de los tomadores de decisión, condiciones económicas del sector); sin embargo, la relevancia de los resultados en términos de entender el comportamiento al aplicar diferentes políticas públicas demuestra que el enfoque con **MBA** es una herramienta muy útil para analizar sistemas complejos, tal como el sector de construcción.

Finalmente, este modelo busca proveer lineamientos para la ejecución más efectiva de políticas de gestión de los residuos provenientes de las actividades de la construcción y demolición.



CAP. 3 CASO DE APLICACIÓN: RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

3.1 RESUMEN

La gestión de residuos sólidos municipales (**GRSM**) para países en desarrollo cada vez se vuelve más preocupante y alarmante debido al rápido crecimiento poblacional, alta tasa de migración urbana y restricciones técnicas, financieras y sociales, lo que conlleva a altos índices de contaminación que se atribuyen en gran medida al deficiente sistema que se ha implantado para ello. Una forma de definir un sistema más efectivo en la **GRSM** es controlar y monitorear sus costos principalmente durante la etapa de recolección y transporte de residuos, ya que estos intervienen en más del 70% del costo total ([Greco et al., 2015](#)).

El uso de modelos computacionales con enfoque de Dinámica de Sistemas ha permitido simular parte de la **GRSM**; sin embargo, este enfoque no considera la variación dinámica y temporal de los que generan los residuos en el sistema real debido a que es un sistema complejo. Para ello, el uso de enfoques con modelos basados en agentes (**MBA**) alivia estas limitaciones debido a que cada integrante del sistema de la **GRSM** es modelado como un agente inteligente con sus propios objetivos personales y que interactúa con su entorno y con otros agentes.

El presente capítulo plantea el uso de un **MBA** que simula el proceso de recolección de la **GRSM** en una zona urbana hipotética y así explorar la influencia que tiene la tasa de segregación de los residentes en la cantidad de bolsas reciclables recolectadas.

Los resultados del modelo indicaron que cuando los residentes segregan adecuadamente sus residuos en sus respectivos contenedores (es decir, *tasa de segregación* igual a 1.0) la cantidad de bolsas recicladas sería hasta siete veces mayor que el no hacerlo (es decir, *tasa de segregación* igual a 0.0). De esta manera se puede entender la influencia que tiene la segregación en la fuente en el sector residencial en el porcentaje de colección de material reciclable.

3.2 INTRODUCCIÓN

A pesar que muchos países industrializados han desarrollado un buen plan de gestión de residuos sólidos municipales (**GRSM**), aún podemos observar montañas crecientes de desmonte que son señales de inapropiadas técnicas en la recolección y transporte de los mismos ([Ulli-Beer et al., 2006](#)). Como muestra de ello, se afirma que las emisiones de carbono en la **GRSM** es una de las fuentes antropogénicas de cambio climático que comprende del 3-5% de las emisiones de gases de efecto invernadero ([Yang et al 2014](#)). Para ello, se debe tener en cuenta que la **GRSM** es una actividad

multidisciplinaria que incluye la generación, almacenamiento y recolección, transporte, tratamiento y disposición de los residuos sólidos administrados por la municipalidad local.

Para países en vías de desarrollo, la **GRSM** continúa siendo un gran reto para autoridades locales, especialmente en países en desarrollo ([Diaz et al., 2005](#)) debido a la rápida tasa de crecimiento de la población, migración urbana, altos niveles de consumo, y restricciones financieras, técnicas, institucionales y sociales ([Agencia Internacional de Cooperación de Japón, 2005](#); [Mo et al., 2009](#); [Meng et al., 2015](#); [Dong et al., 2016](#)). Por lo tanto, la sostenibilidad financiera en planes de gestión municipal continúan siendo el mayor reto para países en desarrollo ([Lohri et al., 2014](#)).

La responsabilidad para proveer un servicio de **GRSM** generalmente recae en gobiernos locales, y una deficiencia muy común de estos gobiernos es que a pesar de poseer fondos muy limitados suelen adquirir inadecuada flota de recolección. De esta manera, el servicio brindado en la mayoría de países en desarrollo es irregular e ineficiente.

Por otro lado, una positiva imagen ambiental por parte de las municipalidades dentro de una localidad, convertirá a su población más entusiasta en mejorar sus prácticas sostenibles en la **GRSM** ([Sugandi, 2015](#)).

La frecuencia de recolección (en términos del número de veces en una semana o mes en que los residuos son colectados) debe ser mayor en países en desarrollo que en países industrializados, y la frecuencia de recolección debe ser aceptable por los residentes para evitar ser lanzado en las calles ([UN-Habitat, 2010](#)). Fluctuaciones inesperadas en la frecuencia de recolección disminuye la confianza en el servicio de recolección de residuos y en la gestión municipal. Los residentes generalmente son menos conscientes sobre la

frecuencia de recolección de la comunidad, pero si el desmonte es acumulado en la calle en grandes cantidades, la gente local podría quemarlo, causando contaminación al aire e incomodidad local ([UN-Habitat, 2010](#)).

Una de las maneras de reducir el costo de recolección y transporte en la **GRSM** es controlando el peso de los camiones, optimizando el tiempo de carga de los trabajadores y camiones, mejorando las rutas y distancia de camiones, evitar horas pico (horas de tráfico de autos), entre otros ([UN-Habitat, 2010](#)). Es por ello, que el objetivo de esta investigación es mejorar la **GRSM** en la etapa de recolección y transporte haciendo uso de modelos de simulación basados en información local con un enfoque válido para cualquier país en vías de desarrollo.

3.3 SIMULACIÓN DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

El uso de modelos computacionales para simular la **GRSM** ha sido muy utilizado en las últimas dos décadas. Entre estos modelos tenemos el uso de modelo con dinámica de sistemas (**SD** *con sus siglas en inglés*) desarrollado por Sudhir et al. ([1997](#)) para entender el impacto de estos residuos en sectores como salud pública, ambiente y costos actuales y futuros dentro del sector de reciclado informal en la India. El modelo fue dividido en tres partes: sub-sistema de generación de residuos, sub-sistema de reciclado informal y sub-sistema formal. Los autores estudiaron diferentes políticas de gestión y así mejorar el sistema existente.

Kum et al ([2005](#)) usaron un modelo basado en **SD** para estudiar el sector de compostaje a pequeña escala y el sector de reciclaje informal y de esta manera mitigar el problema de la creciente necesidad de botaderos. El estudio utilizó información de la ciudad de Phim Penh y muestra que la recuperación de desmonte actual no será exitosa si es que no se crean otras políticas de soporte a las mismas.

Oyoo et al (2011) presentaron un modelo con **SD** para estudiar futuras tendencias de residuos urbanos y su impacto al ambiente de ciudades Africanas usando diferentes escenarios de mitigación. Este estudio analizó tres escenarios, un escenario típico de negocio, otro escenario más eficiente en el sector de recolección y un último escenario de gestión eficiente. De esta manera, este modelo le muestra a las partes interesadas la manera de aumentar sus esfuerzos para mejorar la calidad ambiental urbana.

Sin embargo, los modelos con un enfoque de **SD** no consideran la variación dinámica y temporal de los que generan los residuos ni de los vehículos que recolectan y transportan los mismos debido a que influyen varios factores tales como el tiempo, comportamiento de los peatones, condiciones ambientales (Das and Bhattacharyya, 2015). Por ello, para aliviar la debilidad de estos modelos, el uso de modelado basado en agentes (**MBA**) es propuesto en este estudio. En un **MBA**, agentes inteligentes son adecuados para simular el entorno del transporte a nivel micro, donde cada participante de la **GRSM** es modelado como un agente inteligente con su propio objetivo personal y que interactúan con otros agentes (Nguyen-Tron et al., 2016).

Entre los estudios realizados para analizar y mejorar la **GRSM** en la etapa de recolección y transporte utilizando un modelo basado en agentes, tenemos el realizado por Karadimas et al (2008). El camión recolector, el agente más importante, tiene tres características de comportamiento muy importantes: capacidad de desmonte, tiempo de recolección y ruta asignada fija. De esta manera, el resultado más importante de esta investigación es calcular el número óptimo de contenedores de residuos y su correcta ubicación.

Nambiar e Idicula (2013) proponen un sistema dinámico Multi-Agente en tiempo real para encontrar la ruta óptima de recolección de residuos. Los agentes recolectan y

envían información en tiempo real de la capacidad utilizada y capacidad restante del vehículo recolector. Basado en el enfoque de colonización de hormigas, este modelo mejora el rendimiento del sistema durante la etapa de colección y transporte de residuos.

Rojas y Sánchez (2013) simularon el sistema de segregación de residuos sólidos domiciliarios usando **MBA**, llamado **SIM-WASTE**, utilizado como herramienta didáctica dirigida a niños de educación primaria en Colombia, mejorando su entendimiento de aprovechar material potencialmente reciclado en los hogares.

Nguyen-Tron et al. (2016) proponen un **MBA** para simular la recolección de desmonte en la Carretera Nacional Nro. 6 de Vietnam. En este modelo hay dos diferentes tipos de vehículo en el modelo: i) vehículos convencionales (autos, camiones y buses); y ii) vehículo de rescate responsable de reparar y limpiar las carreteras donde se encuentra el desmonte. De los resultados optimizados, se encontró que los costos de recolección de residuos sólidos municipales pueden ser reducidos un 11.3%.

3.4 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

3.4.1 Propósito del modelo

El objetivo principal del estudio es construir un modelo virtual que represente el proceso de recolección de residuos sólidos municipales y explorar la influencia que tiene el nivel de segregación por parte de los residentes en el porcentaje de colección de material reciclable.

3.4.2 Agentes y propiedades

La esencia del modelo es representar el proceso de recolección de residuos sólidos municipales; sin embargo, existirán entidades alrededor de todo este proceso que lo afecte de manera directa. Es por ello, que en la **Tabla 2** se muestran los agentes

involucrados con cada una de sus propiedades respectivas necesarias durante el proceso de implementación en la simulación, tal como se verá a continuación:

Tabla 2: Lista de agentes que integran el modelo.

Agente (figura)	Descripción	Propiedad
Segregadores (agente negro)	Encargados de producir los residuos sólidos y colocarlos en su contenedor determinado.	Disponer cantidad de residuos no reciclables y reciclables.
Contenedor de residuos no reciclables (tacho rojo)	Depósito donde se disponen los residuos no reciclables.	Cantidad para almacenar residuos.
Contenedor de residuos reciclables (tacho azul)	Depósito donde se disponen los residuos reciclables.	Cantidad para almacenar residuos.
Equipo recolector azul	Agente encargado de recoger residuos reciclables.	Capacidad máxima a almacenar. Velocidad. Número máximo.
Equipo recolector rojo	Agente encargado de recoger residuos no reciclables.	Capacidad máxima a almacenar. Velocidad. Número máximo.

3.4.3 Proceso de eventos

Habiendo identificado a cada uno de los agentes integrantes de nuestro modelo, se procede a identificar los procesos de cada uno de los eventos que intervienen en la programación de nuestro modelo de simulación, los cuales son mostrados en la [Tabla 3](#). Cabe mencionar que los agentes segregadores generan residuos sólidos, en promedio a nivel nacional, a una tasa per cápita de 0.6 kg/hab/día, cuya cantidad de residuos sólidos reciclables será el 30%, mientras que la cantidad de residuos sólidos no reciclables será del 70%, según datos del [Ministerio del Ambiente, 2014](#).

A la cantidad de agentes que separa sus residuos se le llamó “*tasa de segregación*”, la cual se configuró con valores de 0.0 a 1.0 en rangos de 0.2. Por ejemplo, una *tasa de segregación* de 0.2 indica que sólo el 20% de los agentes separa sus residuos sólidos en sus respectivos contenedores.

Tabla 3: Programación de eventos.

Proceso	Ejecutor	Descripción
Comenzar	Observador	Definir los valores iniciales de cada variable, tal como tiempo de llegada de los camiones recolectores, cantidad de camiones y segregadores.
Disponer residuos	Segregador	Genera los residuos y los dispone en su contenedor de residuos respectivo. Si es un residuo no reciclable, lo colocará en un contenedor rojo, sino, lo colocará en un contenedor azul.
Recoger reciclables	Equipo recolector azul	Recoge los residuos sólidos reciclables que se encuentran en los contenedores azules hasta antes de la llegada de los equipos recolectores rojos.
Recoger residuos	Equipo recolector rojo	Recoge todos los residuos (reciclables y no reciclables) que se encuentren en todos los contenedores rojos y azules.
Imprimir	Gráfico	Se va registrando en tiempo real los residuos recolectados, tanto residuo reciclable como no reciclable.

Cabe mencionar que un valor de 0.0 indica que los agentes no separan sus residuos reciclables, disponiendo todos sus residuos (reciclables y no reciclables) en los contenedores de residuos no reciclables (tacho rojo en el modelo).

Según observación en campo y entrevistas in situ, se procedió a añadir una rutina adicional a la actividad de los pepenadores, tal como se muestra en la **Figura 9**. Si la *tasa de segregación* en el modelo es igual a 0.0, los pepenadores sólo buscarán material en los tachos rojos tomándoles un tiempo de 3 ticks en el modelo (que equivale a 3 minutos en el mundo real). La cantidad a obtener será del orden de 5% al 10% del total de material que se encuentre en ese respectivo contenedor. Por otro lado, si la *tasa de segregación* es mayor a 0.0 y menor a 1.0, los pepenadores extraerán todo el material de los tachos azules de manera inmediata y en los tachos rojos demorarán el tiempo de 1 tick (que equivale a 1 minuto en el mundo real) para obtener material del 1% a 5% del material total que se encuentre en ese contenedor.

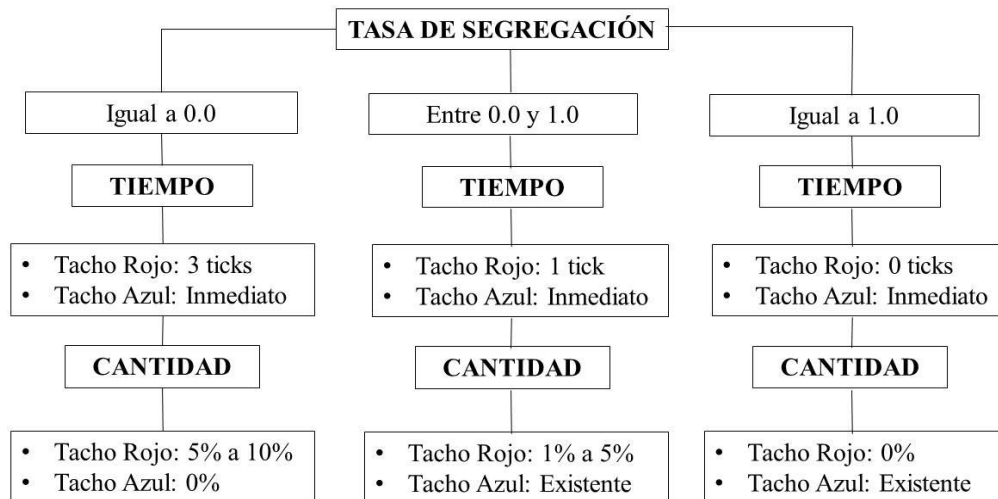


Figura 9: Recojo de bolsas reciclables según tasa de segregación.

Cuando la *tasa de segregación* es igual a 1.0, los pepenadores extraerán material sólo de los tachos azules de manera inmediata. Se entiende que al demorar los pepenadores en obtener material de los tachos rojos pierden la oportunidad de visitar otros puntos de recolección debido a la llegada de los equipos recolectores rojos, la cual será igual a un TS de 1 hora (explicado a detalle en la sección anterior).

De esta manera, este capítulo busca explorar el impacto que tiene determinado nivel de segregación de los residentes en el porcentaje de bolsas recicladas recolectadas por los pepenadores.

3.5 RESULTADOS

El tiempo de sincronización (**TS**) en este estudio lo llamamos al intervalo de tiempo que hay entre la partida de los equipos recolectores de residuos. Por ejemplo, si el **TS** tiene un valor muy pequeño (cuestión de minutos), los equipos recolectores azules (conocidos como “pepenadores” en este estudio) no podrán recoger la mayor cantidad de residuos reciclables debido a que los equipos recolectores rojos ya los recolectaron. Por otro lado, si el **TS** tiene un valor muy elevado (cuestión de 3 a 4 horas), se corre el riesgo que los

residuos sean dañados por animales de la calle, generando así una sensación de desconfianza en la población sobre la gestión de recolección de residuos municipales.

Se debe entender que a una mala gestión en el **TS** de los equipos recolectores resulta en pérdidas de eficiencia en el proceso. Por otro lado, una buena gestión en el **TS** de los equipos recolectores de residuos nos permitirá optimizar recursos y poder utilizarlos para otras gestiones municipales. De esta manera, el **TS** adoptado en este estudio será igual a 1 hora debido a que según entrevistas in situ realizadas a “pepenadores”, éstos pasan recogiendo los residuos una hora antes de la llegada de los camiones municipales (equipos recolectores rojos).

Veremos en la siguiente sección la influencia de la cantidad de residentes que segrega sus residuos en cuanto al número de bolsas recicladas recolectadas.

3.5.1 Influencia de cantidad de segregadores

Para el estudio de este parámetro, se utilizó la misma cantidad de equipos recolectores (5 azules y 5 rojos) para poder analizar sólo la influencia de la cantidad de segregadores. Cabe mencionar que al variar la cantidad de equipos recolectores no se modifica la tendencia de los resultados, por lo cual se optó por asignar la cantidad de 10 equipos recolectores en total.

La **Figura 10** muestra los resultados en cuanto al porcentaje de bolsas recolectadas (tanto reciclables como no reciclables) por los equipos recolectores. Se puede observar que cuando los residentes segregan adecuadamente sus residuos en sus respectivos contenedores (es decir, *tasa de segregación* igual a 1.0) la cantidad de bolsas recicladas sería hasta siete veces mayor que el no hacerlo (es decir, *tasa de segregación* igual a 0.0). De la misma manera, se puede observar también que a diferente *tasa de segregación* (desde 0.2 hasta 0.8), el porcentaje de bolsas reciclables recolectadas es de

tres a cinco veces mayor que cuando la tasa de segregación es nula. Por lo tanto, al analizar este parámetro podemos afirmar la hipótesis en que el porcentaje de bolsas recicladas se ve fuertemente influenciado por la *tasa de segregación* de los residentes.

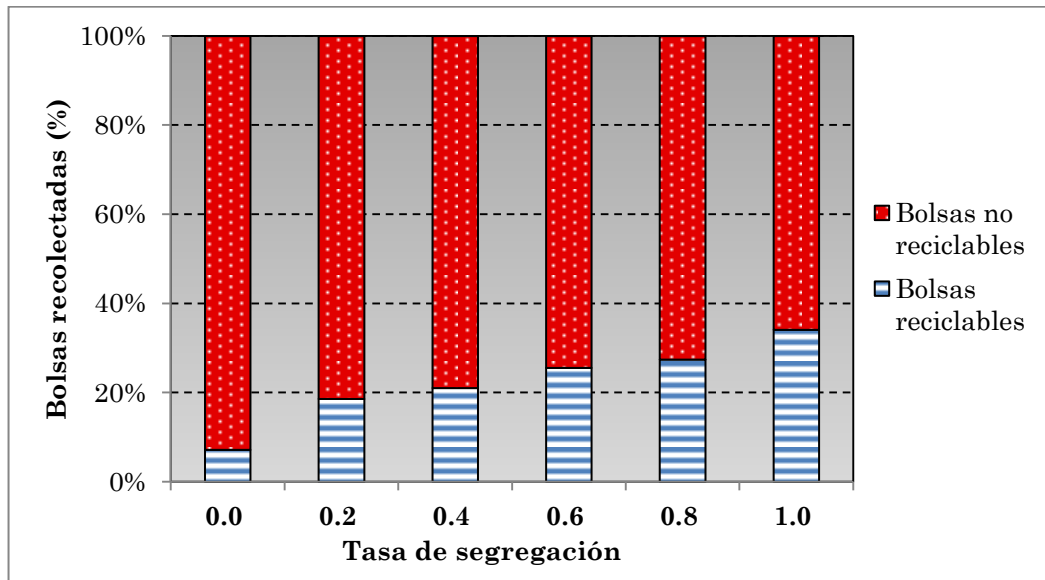


Figura 10: Bolsas recolectadas vs tasa de segregación.

3.6 CONCLUSIONES

Esta investigación propone el uso de un modelo basado en agentes (**MBA**) para optimizar la estrategia de recolección de residuos sólidos municipales. El **MBA** modela diferentes entidades relacionadas al sistema real de la gestión de residuos sólidos municipales: segregadores de residuos, camiones recolectores y depósitos contenedores de residuos. El modelo busca explorar el impacto que tiene determinado nivel de segregación de los residentes en el porcentaje de bolsas recicladas recolectadas por los pepenadores.

A pesar de presentar algunas limitaciones en el modelo (por ejemplo, no tener rutas definidas de los camiones recolectores), la relevancia de los resultados en términos de entender el sistema de recolección de residuos sólidos municipales demuestra que el enfoque con **MBA** es una herramienta muy útil para analizar sistemas complejos, tal

como el sector de gestión de residuos sólidos y proveer lineamientos para la ejecución más efectiva en políticas de gestión de residuos sólidos municipales.



CAP. 4 CASO DE APLICACIÓN: EVACUACIÓN HUMANA EN TSUNAMIS

4.1 RESUMEN

Los tsunamis son uno de los más destructivos fenómenos naturales en el mundo que afectan muchos países costeros alrededor del mundo, especialmente aquellos localizados en el Océano Pacífico. Por ejemplo, en el año 2001, un terremoto de magnitud 8.4 Mw al sur del Perú golpeó las regiones de Arequipa, Moquegua y Tacna. Este evento desencadenó un gran tsunami que dejó 26 muertos y 64 personas desaparecidas cerca de Camana en Arequipa. Adicionalmente, cerca de Concepción – Chile, un terremoto de magnitud Mw 8.8 desencadenó un tsunami el cual causó alturas de inundación sobre los 8m y destruyó muchas ciudades en la región Bio Bio. En ambos casos, había limitaciones en las alertas tempranas y preparación de la comunidad sobre evacuación rápida a zonas elevadas y evitar así las olas.

Para predecir el nivel de uso de los refugios frente a riesgos de tsunamis, gestores de desastres llevan a cabo simulacros de evacuación de tsunamis; sin embargo, realizar esto

es un gran reto debido a que requiere el 100% de la participación ciudadana lo cual implica detener sus actividades diarias y creando una atmósfera de descontento en los residentes para intentos futuros. Por otro lado, representar el proceso de evacuación de un tsunami a través de experimentos en la vida real o por medio de ecuaciones matemáticas es muy difícil de simular debido a la complejidad y emergencia inherente del comportamiento humano.

Si bien es cierto que experimentar con modelos es una forma de entender algunos aspectos del mundo real, el costo de construirlos es mucho menor al costo de experimentar a escala natural. En este contexto, la metodología con modelos basados en agentes (**MBA**) es una herramienta poderosa para evaluar transiciones en sistemas complejos adaptativos (**CAS** *con sus siglas en inglés*) y utilizado recientemente para modelar procesos de evacuación de desastres naturales (por ejemplo huracanes, terremotos y tsunamis) o eventos de origen antropogénico (por ejemplo evacuación en tráfico vehicular, en túneles viales). Esto se debe a la capacidad del **MBA** de capturar los efectos emergentes de las interacciones entre varios agentes a medida que exploramos los comportamientos colectivos.

Por otro lado, el último terremoto de Ecuador ocurrido en abril del año 2016 dejó una señal del peligro latente en el norte del Perú. El actual silencio sísmico de cientos de años en esta zona podría generar un tsunami destructivo. Para ello, planes de prevención deben ser desarrollados para reducir las pérdidas de vidas humanas y económicas.

Para entrenar a la población a realizar evacuación, los gestores de desastres llevan a cabo simulacros de evacuación de tsunamis; sin embargo, es un gran reto obtener un 100% de participación de la comunidad completa. Existe un estigma respecto a simulacros de evacuación los cuales requieren detener actividades diarias y crean una

atmósfera de incomodidad. Por otro lado, representar el proceso de evacuación de tsunamis por medio de ecuaciones matemáticas es una tarea difícil debido a la complejidad del comportamiento humano en estos casos.

En muchos casos, realizar experimentos con simulaciones computacionales es comparativamente menos costoso que conducir simulacros en el mundo real (e.g. simulacros de evacuación). En este contexto, para simular el proceso de evacuación, modelamiento basado en agentes (**MBA**) es un enfoque potente para evaluar transiciones en sistemas complejos adaptativos. **MBA** ha sido usado recientemente para modelar evacuación de desastres naturales (e.g. huracanes, sismos y tsunamis) o eventos de origen antropogénico (e.g. evacuación de tráfico, túnel en carreteras). Su popularidad es debido a la capacidad del **MBA** para capturar los efectos emergentes en sistemas complejos con múltiples interacciones entre agentes.

Esta investigación presenta un **MBA** para simular el proceso de evacuación humana frente a un evento de tsunami desarrollado en la plataforma NetLogo y aplicado al distrito de Máncora, un área expuesta a tsunami localizada al norte del Perú. En el modelo, peatones y vehículos son considerados como agentes quienes desarrollan decisiones múltiples de evacuación. Tres casos de evacuación son simulados: i) El caso actual: la evacuación se realiza hacia los refugios existentes hasta el 2016; ii) Caso de mitigación: la evacuación se realiza a refugios potenciales tal como edificaciones existentes en el área; y iii) Caso de prevención: la evacuación se realiza a futuras edificaciones que podrían ser construidas en el área. El primer caso muestra los retos y limitaciones respecto a la falta de disponibilidad de refugios en caso de tsunami; el segundo caso muestra una alternativa de solución de corto plazo que reduce los damnificados; y el tercer caso es una alternativa propuesta donde la tasa de evacuación es maximizada.

Resultados mostraron: (1) la latente necesidad de implementar edificaciones en el distrito de Máncora como estructuras de evacuación vertical; y (2) 100% de la población evacuó en 26 minutos durante la simulación para el caso actual.

Finalmente, se calculó el mapa de Índice de Capacidad-Demanda (**ICD**) para el distrito de Máncora el cual contribuirá sobre futuros planes de mitigación de desastre y los esfuerzos de reducción de riesgo frente a tsunamis para esta comunidad.

4.2 INTRODUCCIÓN

En Perú, 420 tsunamis ocurrieron en el último siglo, de los cuales, un 20% causó daños en áreas costeras cercanas a su origen y un 15% en áreas costeras alejadas (**Farreras, 1995**) debido a que inundó zonas de baja altitud minutos después que el terremoto local había sido generado (**Wood et al., 2014**). Los desastres naturales continuarán pasando y lo que podemos hacer al respecto es reducir su impacto (**The International Federation's Global Agenda, 2006**), y para que todos respondan de manera segura y efectiva durante los desastres y evacuaciones de emergencia, planes de contingencia debe ser desarrollados y documentados (**Hamel, 2002**) para ayudar a los residentes y turistas a encontrar ubicaciones seguras (**Washington State Department of Natural Resources, 2016**).

Una forma de hacer esto es por medio de experimentos a escala real; sin embargo, el costo en términos de tiempo es muy alto para lidiar con ello. Para ello, modelos de simulación fueron diseñados para asistir a los gestores de desastres durante el planeamiento y puesta en marcha de estrategias efectivas para prevenir situaciones de peligro (**Clerveaux et al., 2008**), también sirve como una contribución debido a que son más baratos, rápidos y seguros que los experimentos en el mundo real. Durante el evento de un tsunami, los residentes de una ciudad buscan rápidamente un refugio de evacuación (*TES con sus siglas en inglés*) de manera de estar seguros. Por ejemplo,

durante el terremoto y tsunami de Tokohu del año 2011, miles de personas encontraron refugio seguro en muchas edificaciones **TES** ([Fraser et al., 2012](#)).

De esta manera, el objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento humano frente al fenómeno de tsunami por medio de simulación computacional y de esta manera mejorar la disposición espacial actual de las **TES**.

4.2.1 Modelos Basados en Agentes y Evacuación de Tsunamis

La evacuación es el método más importante y efectivo para salvar vidas ([Shuto, 2006](#)) y la evacuación frente a tsunamis no es la excepción; sin embargo, el aspecto más difícil de simular en evacuación de tsunamis es el comportamiento humano debido a que es un proceso complejo ([Gwynne et al., 1999](#)) el cual es difícil de capturar en ecuaciones matemáticas y computacionales ([Pan et al., 2007](#)). En este contexto, los gestores de desastres tienen un gran reto que requiere incorporar nuevas teorías y enfoques que mejoren la gestión de la evacuación de tsunamis desde un punto de vista holístico.

En los últimos años, el modelamiento basado en agentes (**MBA**) se está convirtiendo en una herramienta cada vez más utilizada para analizar y modelar las transiciones en sistemas socio-técnicos ([Bergman et al., 2008](#); [Schwarz et al., 2009](#)), y ha ganado popularidad para simular evacuaciones de fenómenos naturales debido a su capacidad para capturar los efectos de las interacciones entre agentes heterogéneos de una manera sencilla y que agregan comportamiento a macro escala ([García, 2005](#)). Por ejemplo, hay modelos de evacuación relacionados al evento de un incendio en un túnel vial de doble sentido ([Caliendo et al., 2012](#)), en edificaciones ([Zheng et al., 2009](#); [Liao Y.J. and Liao G.X., 2014](#)), evacuación vial ([Ma et al., 2013](#); [Wolshon et al., 2015](#); [Cova and Church, 1997](#)), sismos ([Villagra et al., 2014](#); [Bernardini et al., 2016](#); [Bernardini et al., 2014](#)) y huracanes ([Cahyanto et al., 2016](#); [Yin et al., 2014](#); [Cahyanto et al., 2014](#)).

En la **Tabla 4** se muestra cinco grupos cuyo tiempo de evacuación incrementa desde un nivel bajo (es decir, segundos para el caso de sismos) hasta un nivel alto (es decir, horas para el caso de huracanes). Aquí, se puede observar cómo el modo de evacuación cambia según el tiempo de evacuación; sin embargo, fenómenos de tsunami se encuentran en el rango medio en términos de tiempo de evacuación (desde 20 a 40 min) y al modo de evacuación (a pie o en auto) (**Wang et al., 2016**).

Modelos existentes de evacuación de tsunamis típicamente asumen el 100% de peatones caminando con pequeñas consideraciones de otros modos de transporte tal como carros o bicicletas. Varias investigaciones con **MBA** han sido realizadas con relación a fenómenos de tsunami. Por ejemplo, Watanabe and Kondo (**2009**) desarrolló un modelo de evacuación usando simulación multi agente, donde cada evacuado es un agente con varios parámetros de comportamiento (es decir, edad, velocidad y conciencia de la mitigación del desastre). Este estudio encontró que proporcionando una rápida alerta de tsunami fue un factor crítico para la mitigación de desastres.

Por otro lado, Mas et al. (**2013**) usó un nuevo modelo de evacuación integrado con simulación numérica (llamado modelo **TUNAMI-EVAC1**).

Tabla 4: Tiempo y modos de evacuación en desastres naturales.

Peligro natural	Tiempo de evacuación			Modo de evacuación		
	Lento	Mediano	Alto	A pie	En auto	Ambos
Sismo	O			o		
Incendio en edificaciones	O			o		
Tsunami		o				o
Incendio forestal			o		o	
Huracán			o		o	

Entre las contribuciones tenemos la estimación de heridos en un área cerca al fenómeno de tsunami basados en las curvas de inicio de tsunami (**TDC con sus siglas en inglés**), así como el análisis de la distribución espacial en **TES**.

En el estudio desarrollado por Wang et al. (2016) se presentó una simulación multimodal de evacuación para tsunamis de origen cercano, donde la rápida evacuación de los agentes, evacuación a pie y la provisión de **TES** cercanos son estrategias muy efectivas para reducir la tasa de mortalidad.

De esta manera, el objetivo principal de esta investigación es analizar el comportamiento humano frente al riesgo de tsunami a través de simulación computación vía MBA, y de esta manera mejorar la distribución espacial actual de **TES**.

4.3 ENTORNO DEL MODELO

4.3.1 Caso de Estudio y Motivación

El distrito de Máncora es parte de la provincia de Talara, al norte del Perú (Figura 11), y localizada a 187 kilómetros de la ciudad de Piura. El área expuesta al mar está rodeada por el Océano Pacífico, llegando a formar parte del conocido Anillo de Fuego del Pacífico, donde la placa de Nazca se desliza por debajo y empuja a la placa Sudamericana, liberando energía que algunas veces se convierte en terremotos y desencadena tsunamis. A pesar de no tener registros históricos sobre tsunamis locales, se espera un gran terremoto que producirá un tsunami destructivo en un futuro cercano debido a que la subducción de esta zona no es homogénea y hay aparente bloqueo de las placas tectónicas (Pararas-Carayannis, 2013), el cual podría afectar la línea costera del norte Peruano y sur de Ecuador. Tal es el caso del sismo de Ecuador ocurrido el 16 de Abril de 2016 con una magnitud de 7.8 Mw (USGS Earthquake Hazards Program, 2016), donde a pesar que la alerta de tsunami fue activada por el Centro de

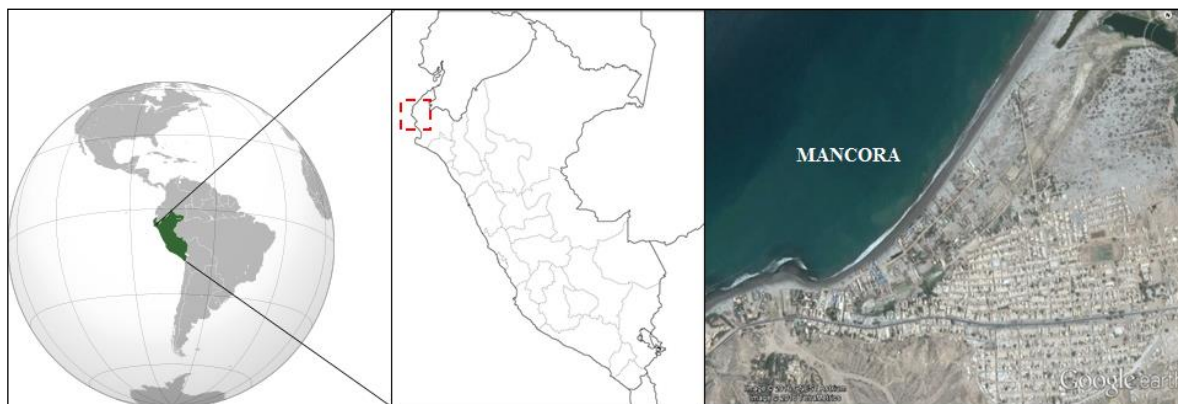


Figura 11: Ubicación del área de estudio: Distrito de Máncora.

Alerta de Tsunamis del Pacífico para todo el norte Peruano, no hubo registro de tsunami potencial. Por otro lado, Máncora se ha convertido en los últimos años en una zona potencialmente turística, la cual es visitada por residentes y extranjeros, especialmente en tiempo de verano, siendo un asunto de interés para desarrollar procedimientos efectivos de evacuación en caso de tsunami para la seguridad de sus habitantes.

4.3.2 Población

Máncora tiene una población de 10,547 habitantes según el censo del 2007 realizado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2007) y un área simulada de 2.43 km²; sin embargo, también es un destino turístico que alberga durante temporada alta a 10,000 visitantes durante el 29 de Diciembre hasta el 01 de Enero (Diario La República, 2011). La tasa de densidad de población (habitantes por km²) en este estudio es de 4340 hab/km² y 8456 hab/km², para la condición normal y de alta demanda respectivamente. Comparando estas tasas de densidad poblacional con estudios similares tal como Padang, La Punta y Oregon con valores de 6957 hab/km², 5827 hab/km² y 250 hab/km², respectivamente (Mas et al., 2015; Mas et al., 2013; Wang et al., 2016) muestran una sobrepoblación en Máncora durante tiempo de verano la cual debe ser considerada por los gestores de desastres al momento de plantear

políticas de reducción de riesgos, razón de importancia del presente estudio. Con respecto al número de autos, según la información brindada por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, la cantidad se encuentra alrededor de 118 vehículos (INEI, 2013); sin embargo, se consideró en este estudio un total de 200 vehículos para considerar la cantidad de autos no reportados en la encuesta. Debido a que la temporada de alta demanda no es muy significativa respecto al resto del año, se modeló sólo para la condición típica con una población de 10,547 habitantes y 200 autos. En la Figura 12 se muestra la población de Máncora por edad, en la cual los adultos y ancianos tienen una alta incidencia del 67% en la población total comparada con las poblaciones de niños y jóvenes del 33%.

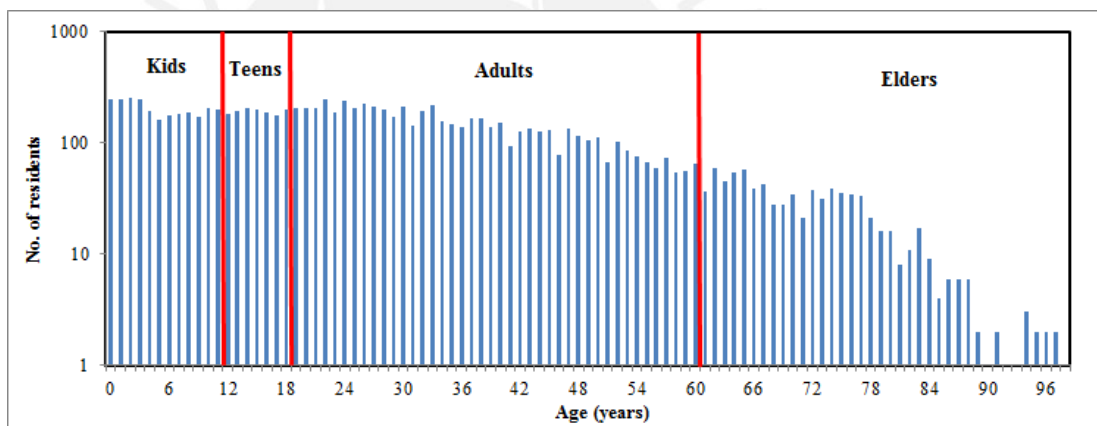


Figura 12: Distribución de la población por edades en el distrito de Máncora.

4.3.3 Red Vial de Evacuación

El distrito de Máncora tiene una topografía bastante plana y la evacuación de la red vial en el modelo se construyó utilizando los planos catastrales provistos por la Municipalidad de Máncora en formato de archivo **DWG**. Luego, estos archivos **DWG** se convierte a archivos de figuras **ESRI** (**SHP** file con sus siglas en inglés) el cual almacena la ubicación de los elementos geográficos. Finalmente, estos archivos **SHP** se importan y cargan a la plataforma de simulación en **NetLogo** (una descripción detallada de esta parte se presenta en la Sección 4.2).

La **Figura 13** muestra el tráfico peatonal como una *línea fina* y el tráfico vehicular como una *línea gruesa*. También se puede observar la existencia de algunas rutas que cruzan transversalmente debido a la separación variable de las viviendas de 1.25 m y 5 m, dificultando su acceso libre. Todas las vías son consideradas como unidireccionales con un límite de velocidad de 8.4 m/s para autos, 1.06 para niños, 1.33 m/s para jóvenes y adultos, y 0.93 m/s para ancianos (**Mas et al., 2013**).

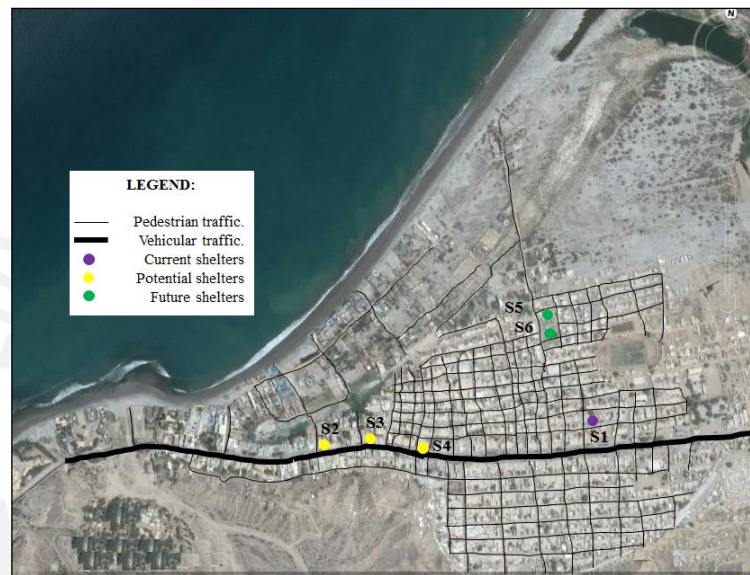


Figura 13: Refugios de evacuación de tsunamis (**TES**) y rutas de evacuación de agentes.

4.3.4 Tipología de Refugios y Casos de Simulación

La tipología estructural más común de las edificaciones de Máncora es de dos pisos. Las construcciones mixtas son pórticos de concreto rellenos con muros de albañilería en el primer nivel y estructura de madera en el segundo nivel, los cuales se ubican cerca de la línea costera. La Dirección de Hidrografía y Navegación (**DHN**) de la Marina de Guerra del Perú, por medio de las Cartas de Inundación del distrito de Máncora, establece refugios para tsunami localizados a más de 1.2 km de la línea costera; sin embargo, un refugio cercano en un área con alta densidad poblacional es más fácil de acceder que un refugio de gran distancia de ubicación. Por esta razón, se identificó algunas edificaciones existentes dentro de la zona de inundación que podrían ser utilizadas como refugios

temporales, e incluso podrían construirse nuevas edificaciones localizadas en lugares estratégicos donde la población de evacuados podrían usarse como refugios.

De esta manera, este modelo simula la evacuación humana para los siguientes casos mostrados en la **Figura 13**:

- Caso actual: evacuación en refugios actuales.
- Caso de mitigación: evacuación en refugios actuales y potenciales, tales como edificios verticales existentes.
- Caso de prevención: evacuación en refugios actuales, potenciales y futuros propuestos en este estudio.

El caso actual muestra la problemática existente debido al déficit de refugios frente al riesgo de tsunamis, el caso de mitigación muestra una solución intermedia a corto plazo, y el caso de prevención muestra una solución ideal propuesta en este estudio.

4.4 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

4.4.1 Entidades y Descripción General del Proceso de Simulación

Las siguientes entidades fueron incluidas en el modelo: agentes que representan a los peatones (es decir, niños, jóvenes, adultos y ancianos) y autos; y celdas (es decir, Sistemas de Información Geográfica (**SIG**) como información de entrada de diferentes capas). Posición aleatoria de la población es una opción disponible en el modelo.

El modelo se llama **TUNAMI-EVAC1** (**Mas et al., 2013**), y el sub código más importante es el procedimiento “go” presentado en la **Figura 14**, la cual contiene varias rutinas que describen la arquitectura de los agentes, reflejando la cadena de interacción de los agentes derivada del enfoque de *abajo hacia arriba* de la siguiente manera: i) Regla 0 (*decide-to-start evacuation*) es el tiempo invertido por cada agente para comenzar la evacuación. Este tiempo está limitado por dos curvas Rayleigh (ver sección 4.4 como Tiempo de Decisión) como se muestra a continuación: i) la primera es elegida

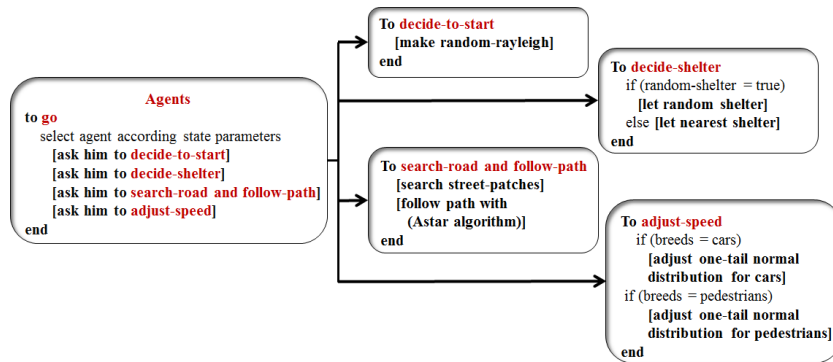


Figura 14: Proceso de toma de decisión de evacuación para cada agente.

por el observador para simular escenarios y la segunda curva es el tiempo de llegada del tsunami obtenido de la simulación numérica; ii) Regla 1 (*decide-shelter*) tiene dos opciones: si el interruptor *random-shelter* del modelo se encuentra activo, cualquier refugio puede ser elegido aleatoriamente, sino el refugio más cercano será elegido; iii) Regla 2 (*search-road y follow-path*), donde los agentes identifican las grillas de calles y usan el algoritmo A estrella (Anguelov, 2011) para encontrar y seguir la ruta más corta; y iv) Regla 3 (*adjust speed*) donde la velocidad varía en función a una distribución de densidad normal y un campo de visión del agente de 60 grados con 5 m de distancia para peatones y 10 m para carros (Meister, 2007).

4.4.2 Información de Entrada

Planos catastrales disponibles en la Municipalidad de Máncora fue adaptado a tipo de archivo en formato *shape* y se utilizó la plataforma de simulación **NetLogo** por medio de su extensión SIG. Esta extensión tiene la habilidad para cargar la información de los vectores en SIG (es decir, puntos, líneas y polígonos), y la información *raster* **SIG** (como grillas de ubicación) dentro del modelo. La extensión **SIG** permite cargar información de vectores en formato de archivo **ERSI** (*.shp file*), el cual es el formato más común para almacenar e intercambiar información de vectores en **SIG**. Las capas requeridas en el modelo se muestran en la **Tabla 5**.

Tabla 5: Capas **SIG** requeridas como información espacial de entrada.

Capas (.shp)	Descripción	Archivo <i>shape</i>		Nivel de importancia	
		Polígono	Punto	Requerido	Opcional
Territorio	Área de tierra	o		o	
Calles	Calles y pistas	o		o	
Exits	Edificaciones fuera de inundación		o	o	
TEB	Refugios verticales		o	o	
Urbanización	Viviendas de Máncora	o			o
Mar	Océano, lagos y canales.	o			o

Edificaciones de evacuación de tsunamis (**TEB** con sus siglas en inglés) son aquellas edificaciones altas (mínimo de tres pisos), conocidas como refugios verticales en este estudio; y las exits son la ubicación de posibles puntos de evacuación, ubicados generalmente fuera del área de inundación o al límite de la extensión de simulación. Cualquier **TEB** o Exits es el destino único para el agente, con preferencia de **TEB** sobre Exits para peatones y Exits sobre **TEB** para autos.

4.4.3 Plataforma de Simulación

El modelo fue desarrollado usando la herramienta computacional de código libre **NetLogo** para así simular fenómenos naturales y sociales ([Wilensky, 2015](#)), cuyos agentes operan individualmente y son controlados por el investigador, también llamado *observador* en el modelo de simulación. La [Figura 15](#) muestra la Interface Gráfica de Usuario (**IGU**) del modelo, la cual es dividida en tres secciones: **(A)** ingreso de variables globales; **(B)** demostración de un ejemplo del modelo; y **(C)** muestra de resultados. La sección **A** recibe los botones *go* y *setup*, el nombre del archivo, el número de agentes (es decir, niños, jóvenes adultos, ancianos, autos y porcentaje de personas discapacitadas), el tiempo de simulación total (parámetro **TS** en el modelo), tiempo estimado de llegada del tsunami (parámetro **ETA** en el modelo), y tiempo de evacuación de los evacuados (parámetro μ).

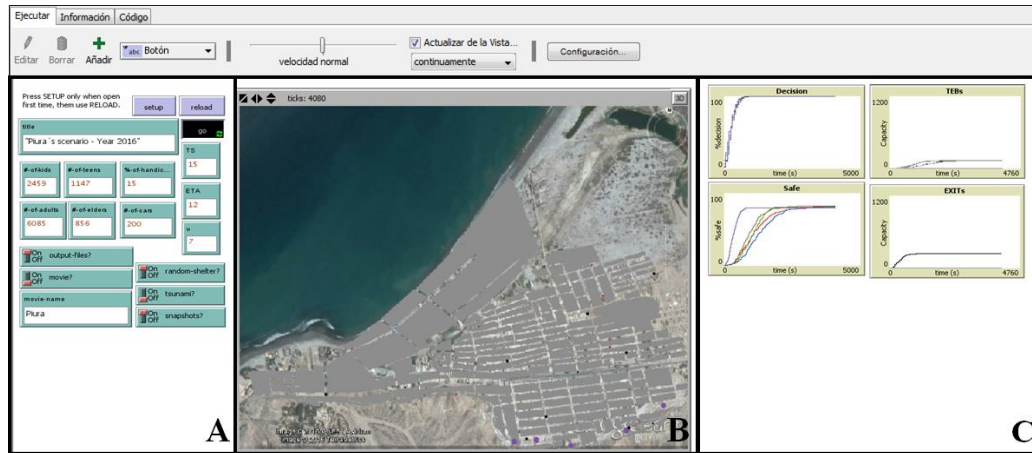


Figura 15: Captura de pantalla de la evacuación humana simulada en NetLogo.

La sección **B** es el ambiente virtual creado el cual muestra las interacciones entre los agentes y en entorno. Los puntos negros son los agentes y los puntos púrpura son los refugios. La sección **C** muestra los resultados en tiempo real tal como número de agentes dentro de los **TEBs** y de los *Exits*, los agentes seguros, y el tiempo de decisión de los agentes para evacuar. Debemos notar que este modelo solamente simula la respuesta humana frente al fenómeno de tsunami asumiendo que no hay consecuencias directas del terremoto sobre la población o algún tipo de daño estructural sobre las estructuras o la superficie vial o edificaciones.

4.4.4 Tiempo de Decisión

El tiempo de partida de la evacuación es la decisión más importante que los evacuados deberían tomar, teniendo un gran efecto sobre la congestión durante la evacuación ([Naser et al., 2010](#)). El tiempo necesario para movilizar es el factor principal para determinar el tiempo de partida de las personas para situaciones de emergencia con grandes periodos de notificación ([Sonrensen and Vogt, 1995](#)). Este estudio simula el tiempo de partida como una evacuación retrasada, donde los evacuados posponen su tiempo de partida. Esta evacuación retrasada sigue una distribución de probabilidad de Rayleigh (también llamada Curva de Partida de Tsunami, **TDC** con sus siglas en

inglés) sugerida por (Mas et al., 2011) mostrada en la Ecuación 1 como sigue a continuación:

$$P(t) = 1 - e^{-\frac{\pi t^2}{4\mu^2}} \quad (1)$$

donde, $P(t)$ es el porcentaje de población evacuada en el tiempo t , y el parámetro μ es el tiempo de evacuación de los evacuados. La TDC representa el tiempo de inicio de evacuación de los residentes, limitada por dos fronteras de comportamiento: i) frontera de rápida evacuación correspondiente a $\mu = 7$ min (Mas et al., 2013); y ii) límite de evacuación lente correspondiente a $\mu = 12$ min (INDECI, 2015) (véase Figura 16).

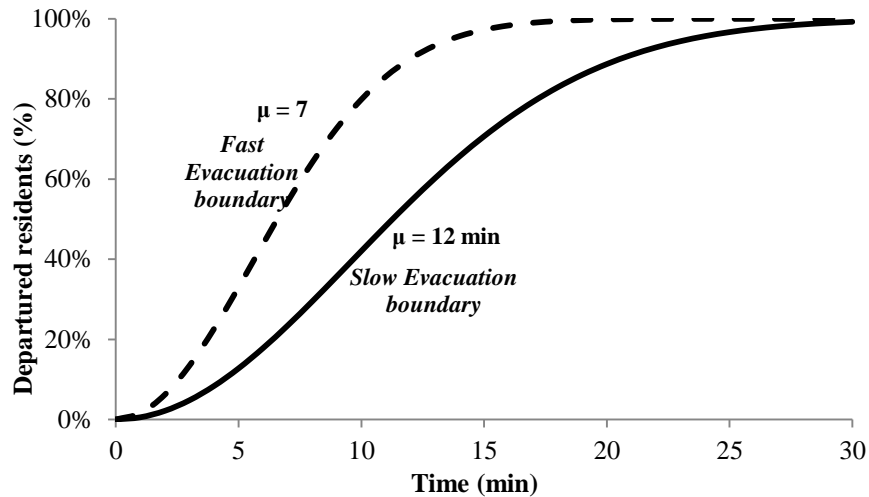


Figura 16: Curvas de partida de tsunamis (TDC) de este estudio.

4.5 RESULTADOS

4.5.1 Demanda de Refugios

Se ejecutó 100 repeticiones por cada caso de simulación para identificar la demanda de refugios y presentar el detalle de los resultados en la Tabla 6, donde se contó a todos los agentes en cada repetición. Otra manera de ver gráficamente la capacidad de los refugios y el número de evacuados es por medio de la Figura 17.

Tabla 6: Lista de TES y resultados de simulación.

Código	Nombre	Caso Actual	Caso de Mitigación	Caso de Prevención	Capacidad
S1	Colegio Alberto Pallette	10,547	7,342	4,540	9,000
S2	Hotel WILLY	-	895	390	504
S3	Hotel Gran Caimán	-	1,580	564	972
S4	Municipalidad de Mancora	-	730	223	288
S5	Av. Los Girasoles (Parque)	-	-	2,505	7,128
S6	Av. Los Girasoles (Parque)	-	-	2,325	5,670
Total (pers.)		10,547			23,562

(*)Unidades: personas en promedio

En la **Figura 17(Current Case)**, los refugios actuales en el caso actual presentan sobre demanda de 1.2 veces su capacidad en promedio. La población en este caso evacuó en 26 minutos al refugio **S1** durante la simulación debido a la lejanía del mismo de la zona donde se concentraba gran parte de la población en la línea costera. El caso de mitigación se muestra en la **Figura 17(Mitigation Case)**, donde algunas edificaciones verticales existentes se proponen en este estudio como **TEB**; sin embargo, aún presentan aún sobre demanda en su capacidad. Por ejemplo, el refugio **S1** tiene una sobre demanda de 1.6 veces su capacidad. En este caso, la población evacuó en 21 minutos a los refugios **S1**, **S2**, **S3** y **S4**; sin embargo, este tiempo de evacuación es aceptable pero no asegura la seguridad completa de los residentes de Máncora. Un caso de prevención propuesto en este estudio se presenta en la **Figura 17(Prevention Case)** como una solución a largo plazo, donde algunos refugios están al límite de su capacidad (como son los casos de los refugios **S2**, **S3** y **S4**); sin embargo, a nivel global los **TEBs** aseguran la seguridad de los residentes de Máncora. En este caso, la población logró evacuar en 12 minutos hacia los refugios durante la simulación debido a su cercanía a los refugios **S5** y **S6** propuestos en este estudio. Este tiempo de evacuación de 12 minutos es aceptable para evitar pérdidas humanas durante la llegada del tsunami.

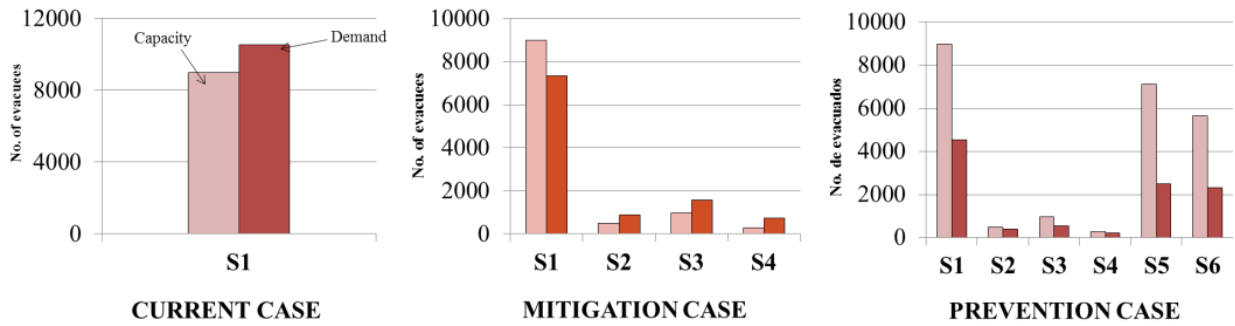


Figura 17: Cuadro de capacidad y demanda de refugios.

4.5.2 Índice de Capacidad Demanda (CDI)

De acuerdo con Mas et al (2013), el índice de capacidad demanda (**CDI** con sus siglas en inglés) se determina según la Ecuación 2 de la siguiente manera:

$$CDI = Demand / Capacity \quad (2)$$

Un valor de **CDI** en el rango de 0.0 a 0.5 indica ocupación media, valores de 0.5 a 1.0 indican que la estructura está próxima a la saturación, y valores mayores a la unidad indican condiciones de sobre demanda.

De esta manera, la Figura 18 muestra un mapa los **CDI**, los cuales indican el nivel de ocupación de los refugios de una manera sencilla y fácil de entender para el uso por parte de los tomadores de políticas. De esta manera, el mapa **CDI** muestra que muchas de las estructuras cerca al área de playas presentarán sobre demanda.

4.6 CONCLUSIONES

Este artículo presenta un estudio de la evacuación de las personas frente al fenómeno de tsunami a través del modelado basado en agente, y utilizando la plataforma de simulación **NetLogo** para el distrito de Máncora como caso de estudio.



Figura 18: Mapa del **CDI** para el distrito de Máncora propuesto en este estudio.

El principal resultado en este estudio fue la latente necesidad para la implementación de edificaciones que sirvan como estructuras de evacuación vertical como medida de prevención debido a que la disposición espacial actual de los refugios es insuficiente, comprometiendo la seguridad de los residentes de Máncora. Para el diseño de estos edificios verticales se debe considerar diferentes criterios, incluyendo que el diseño estructural tenga en cuenta las fuerzas de un sismo y un tsunami. Un ejemplo de guía de diseño estructural para refugios de evacuación de tsunamis es el propuesto por Pimanmas et al (2010), el cual significa que la fundación y los apoyos estructurales tienen que resistir las fuerzas del agua y el desmonte que carga consigo.

Por otro lado, según experiencia internacional, evacuación vehicular se recomienda debido al daño ocurrido luego de un sismo inicial, incrementando la tasa de mortalidad de las personas atrapadas en el tráfico vehicular mientras intentan evacuar. Tenemos el ejemplo que en algunas jurisdicciones tal como Taro, en Japón, se prohibió el uso de

vehículos debido a la posibilidad de congestión vehicular y fallas en las señales de tránsito ([Fraser et al., 2012](#)).

Finalmente, debemos darnos cuenta que es un gran reto para los gestores de desastres el entrenar a las personas sobre pensar en estructuras de evacuación vertical como la primera opción para evacuar debido a su primer instinto hoy en día es huir hacia zonas elevadas.



REFERENCIAS

- Agencia Internacional de Cooperación de Japón, 2005. Supporting Capacity Development in Solid Waste Management in Developing Countries: Towards Improving Solid Waste Management Capacity of Entire Society [Study Report].
- Anguelov, B., 2011. Video Game Pathfinding and Improvements to Discrete Search on Grid-based Maps, Master thesis, University of Pretoria.
- Axtell, R.L., Andrews, C.J., & Small, M.J., 2001. Agent-Based Modeling and Industrial Ecology, *Systems Modeling and the Environment*, 5(4), pp. 10 - 13.
- Bergman, N., Haxeltine, A., Whitmarsh, L., Kohler, J., Schilperoord, M., & Rotmans, J., 2008. Modeling socio-technical transition patterns and pathways, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 11(3), pp. 7.
- Bergsdal, H., Brattebo, H., Bohne, R.A., & Müller, D.B., 2007. Dynamic material flow analysis for Norway's dwelling stock, *International Journal of Building Restoration and Infrastructure*, 35(5), pp. 557 - 570.
- Bernardini, G., Quagliarini, E., & D'Orazio, M., 2016. Towards creating a combined database for earthquake pedestrians' evacuation models, *Safety Science*, 82(1), pp. 77 - 94.
- Bernardini, G., D'Orazio, M., Quagliarini, E., & Spalazzi, L., 2014. An agent-based model for earthquake pedestrians' evacuation simulation in urban scenarios, *Transportation Research Procedia*, 2(1), pp. 255 - 263.
- Bollinger, L.A., Davis, C., Nikolic, I., & Dijkema, G.P.J., 2011. Modeling Metal Flow Systems. Agents vs. Equations, *Journal of Industrial Ecology*, 16(2), pp. 176 - 190.
- Boskovic, G., Jovicic, N., Jovanovic, S., & Simovic, V., 2016. Calculating the costs of waste collection: A methodological proposal, *Waste Management & Research*, 34(8), pp. 775-783.
- Brodetskaia, I., Sacks, R., & Shapira, A., 2013. Stabilizing Production Flow of Interior and Finishing Works with Reentrant Flow in Building Construction, *Journal of Construction Engineering and Management-ASCE*, 139(6), pp. 665 - 674.
- Cahyanto, I., Pennington-Gray, L., Thapa, B., Srinivasan, S., Villegas, J., Matyas, C., & Kioussis, S., 2016. Predicting information seeking regarding hurricane evacuation in the destination, *Tourism Management.*, 52(1), pp. 264 - 275.
- Cahyanto, I., Pennington-Gray, L., Thapa, B., Srinivasan, S., Villegas, J., Matyas, C., & Kioussis, S., 2014. An empirical evaluation of the determinants of tourist's hurricane evacuation decision making, *Journal of Destination Marketing & Management*, 2(1), pp. 253 - 265.
- Caliendo, C., Ciambelli, P., De Guglielmo, M.L., Meo, M.G., & Russo, P., 2012. Simulation of People Evacuation in the Event of a Road Tunnel Fire, *5th Int. Congress on Sustainable of Road Infrastructure*, 53(1), pp. 178 - 188.
- Chen, L., 2012. Agent-based modeling in urban and architectural research: A brief literature review, *Frontiers of Architectural Research*, 1(1), pp. 166 - 177.
- Clerveaux, V., Katada, T., & Hosoi, K., 2008. Information Simulation Model: Effective Risk Communication and Disaster Management in a Mixed Cultural Society, *Journal of Natural Disaster Science*, 30(1), pp. 1 - 11.
- Cova, T.J., & Church, R.L., 1997. Modelling community evacuation vulnerability using GIS, *International Journal of Geographical Information Science*, 11(8), pp. 763 - 784.

- Das, S., & Bhattacharyya, B.K., 2015. Optimization of municipal solid waste collection and transportation routes, *Waste Management*, 43(1), pp. 9–18.
- Diario La República, 2011. Diario La República. [Online] Available at: <http://larepublica.pe/04-01-2011/mancora-recibio-unos-10-mil-turistas-durante-fiestas-de-fin-de-ano> [Accessed 23 Octubre 2016].
- Diaz, L.F., Savage, G.M., Eggerth, L.L., & Rosesnberg, L., 2005. *Solid Waste Management*. United Nations Environment Programme, Paris.
- Ding, Z., Wang, Y., & Zou, P.X.W., 2016. An agent based environmental impact assessment of building demolition waste management: Conventional versus green management, *Journal of Cleaner Production*, 133(1), pp. 1136 - 1153.
- Dong, L., Fujita, T., Dai, M., Geng, Y., Ren, J., Fujii, M., Wang, Y., & Ohnishi, S., 2016. Towards preventative eco-industrial development: an industrial and urban symbiosis case in one typical industrial city in China, *Journal of Cleaner Production*, 114(1), pp. 387–400.
- Elia, V., Gnoni, M.G., & Tornese, F., 2016. Assessing the efficiency of a PSS solution for a waste collection: a simulation based approach, *Procedia CIRP*, 47(1), pp. 252 - 257.
- Farhadi, S., Nikoo, M.R., Rakhshandehroo, G.R., Akhbari, M., & Alizadeh, M.R., 2016. An agent-based-nash modeling framework for sustainable groundwater management: A case study, *Agricultural Water Management*, 177(1), pp. 348 - 358.
- Farreras, S., (1995): *Tsunamis en Mexico*. Departamento de Oceanografía Física, CICESE, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.
- Ferreira, F., Avelino, C., Bentes, I., Matos, C., & Teixeira, C.A., 2016. Assessment strategies for municipal selective waste collection, *Waste Management*. In Press.
- Fraser, S., Leonard, G.S., Murakami, H., & Matsuo, I., 2012. Tsunami vertical evacuation buildings – lessons for international preparedness following the 2011 Great East Japan Tsunami, *Journal of Disaster Research*, 7(1), pp. 446 - 457.
- Gabbriellini, S., 2011. *Social Simulation Mechanism with NetLogo. A Introduction*. Italian: FrancoAngeli. [In Italian].
- Garcia, R., 2005. Uses of Agent-Based Modeling in Innovation/New Product Development Research, *Journal of Product Innovation Management*, 22(1), pp. 380 – 398.
- Garcia, R., Rummel, P., & Hauser, J., 2007. Validating agent-based marketing models using conjoint analysis. Special Issue: Complexities in Markets, *Journal of Business Research*, 60(8), pp. 848 - 857.
- García-Valdecasas, J.I., 2011. Agent-based Modelling: A New Way of Exploring Social Phenomena, *Reis*, 136(1), pp. 91 - 110.
- Gilbert, N., 2008. *Agent-Based Models*. Los Angeles: Sage Publications.
- Gilbert, N. & Troitzsch, K.G., 2005. *Simulation for the social scientist*. 2nd edn. McGraw-Hill: Open University Press.
- Greco G., Allegrini A., & Del Lungo C., 2015. Drivers of solid waste collection. Empirical evidence from Italy. *Journal of Cleaner Production*. 106(1), pp. 364-371.
- Grimm, V., Berger, U., DeAngelis, D.L., Polhill, J.G., Giske, J., & Railsback, S.R., 2010. The ODD protocol: A review and first update, *Ecological Modelling*, 221(23), pp. 2760 - 2768.
- Gwynne, S., Galea, E.R., Owen, M., Lawrence, J. & Filippidis, L., 1999. A Review of the Methodologies Used in Evacuation Modelling, *Fire and Materials*, 23(1), pp. 383 - 388.
- Hamel, K., 2002. *Elements of Effective Evacuation Plans: How to develop the step-by –step plan that will ensure the safety of everyone and everything at your facility in the event of an emergency*, Cleveland, USA.

- Hsu, S-C., Weng, K-W., Cui, Q., & Rand, W., 2016. Understanding the complexity of project team member selection through agent-based modelling, *International Journal of Project Management*, 34(1), pp. 82 - 93.
- Huang YT, Pan TC, & Kao JJ., 2011. Performance assessment for municipal solid waste collection in Taiwan, *Journal of Environmental Management*. 92(1), pp. 1277-1283.
- Instituto Nacional de Defensa Civil, 2015. INDECI. [Online] Available at: <http://www.indeci.gob.pe/> [Accessed 16 October 2016].
- Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2013. Parque Automotor en Circulación a nivel nacional, según departamento, Perú
- Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2007. Censos Nacionales 2007: XI de Población y VI de Vivienda, Perú.
- Jacobsen R., Buysse J., & Gellynck X., 2012. Cost comparison between private and public collection of residual household waste: Multiple case studies in the Flemish region of Belgium, *Waste Management*, 33(1), pp. 3-11.
- Jo, H., Lee, H., Suh, Y., Kim, J., & Park, Y., 2015. A dynamic feasibility analysis of public investments projects: An integrated approach using system dynamics and agent-based modelling, *International Journal of Project Management*, 33(1), pp. 1863 - 1876.
- Karadimas, N. V., & Loumos, V. G., 2008. GIS-based modelling for the estimation of municipal solid waste generation and collection. *Waste Management & Research*, 26(4), 337-346.
- Knoeri, C., Nikolic, I., Althaus, H-J., & Binder, C.R., 2014. Enhancing Recycling of Construction Materials: an Agent Based Model with Empirically Based Decision Parameters, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 17(3), pp. 1 - 10.
- Knoeri, C., Binder, C.R., & Athaus, H.J., 2011b. Decisions on recycling: Construction stakeholders decisions regarding recycled mineral construction materials, *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), pp. 1030 - 1050.
- Knoeri, C., Binder, C.R., & Althaus, H-J., 2011a. An Agent Operationalization Approach for Context Specific Agent-Based Modeling, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 14(2), pp. 1 - 19.
- Kum, V., 2005. System Dynamics Study of Solid Waste Recovery Policies in Phnom Penh City, *Proceedings of the 19th international conference on solid waste technology and management*, 21-24 March 2004, Philadelphia, PA. pp 657-667.
- Lawson, N., Douglas, I., Garvin, S., McGrath, C., Manning, D., & Jonathan, V., 2001. Recycling construction and demolition wastes – a UK perspective, *Environmental Management Health*, 12(1), pp. 146 - 157.
- Le, Q.B., 2005. Multi-agent system for simulation of land-use and land cover change: A theoretical framework and its first implementation for an upland watershed in the Central Coast of Vietnam, *Ecology and Development Series*, 29(1)
- Liao, Y.J., & Liao, G.X., 2014. A Study on People's Attitude to the Use of Elevators for Fire Escape, *Fire Technology*, 50(1), pp. 363 - 378.
- Lohri, C. R., Camenzind, E. J., & Zurbrugg, C., 2014. Financial sustainability in municipal solid waste management – Costs and revenues in Bahir Dar, Ethiopia, *Waste Management*, 34(1), pp. 542-552.
- Louie, M.A. & Carley, K.M., 2008. Balancing the criticisms: Validating multi-agent models of social systems, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 16(1), pp. 242 - 256.
- Ma, L. & Sacks, R., 2016. Agent-based simulation of construction workflows using a relational data model, In: *Proc. 24th Ann. Conf. of the Int'l. Group of Lean Construction*, 5(1), pp. 73 - 82.

- Ma, J., Lo, S.M., Song, W.G., Wang, W.L., Zhang, J., & Liao, G.X., 2013. Modeling pedestrian space in complex building for efficient pedestrian traffic simulation, *Automation in Construction*, 30(1), pp. 25 - 36.
- Maggi, E. & Vallino, E., 2016. Understanding urban mobility and the impact of public policies: The role of the agent-based models, *Research in Transportation Economics*, 55(1), pp. 50 - 59.
- Marzouk, M., & Azab, S., 2014. Environmental and economic impact assessment of construction and demolition waste disposal using system dynamics. *Resources, Conservation and Recycling*, 82(1), pp. 41 - 49.
- Mas, E., Koshimura, S., Imamura, F., Suppasri, A., Muhari, A., & Adriano, B., 2015. Recent Advances in Agent-Based Tsunami Evacuation Simulations: Case Studies in Indonesia, Thailand, Japan and Peru, *Pure and Applied Geophysics*, 172(1), pp. 3409 - 3424.
- Mas, E., Adriano, B., & Koshimura, S., 2013. An Integrated Simulation of Tsunami Hazard and Human Evacuation in La Punta, Peru, *Journal of Disaster Research*, 8(2), pp. 285 - 295.
- Mas, E., Imamura, F., & Koshimura, S., 2011. Modeling the decision of evacuation from tsunami, based on human risk perception. In: *Annual Meeting of the Tohoku Branch Technology Research Conference*. Japan Society of Civil Engineers.
- Meister, J., 2007. Simulation of crowd dynamics with special focus on building evacuation, PhD thesis, University of Applied Sciences.
- Meng, X., Wen, Z., & Qian, Y., 2016. Multi-agent based simulation for households solid waste recycling behaviour, *Resources, Conservation and Recycling*. In press
- Meng, X., Wen, Z., Qian, Y., & Yu, H., 2015. Evaluation of cleaner production technology integration for the Chinese herbal medicine industry using carbon flow analysis, *Journal of Cleaner Production*. In Press.
- Ministry of Housing, Construction and Sanitation, 2015. Construction and Demolition Waste Management, Peru: General Directorate of Environmental Affairs [In Spanish].
- Ministry of Environment, 2014. Solid Waste Environmental Monitoring, Peru: Agency Assessment and Environmental Monitoring [In Spanish].
- Ministerio del Ambiente, 2014. Sexto Informe Nacional de Residuos Sólidos de la Gestión del Ámbito Municipal y no Municipal 2013, Lima – Perú.
- Mo, H., Wen, Z., & Chen, J., 2009. China's recyclable resources recycling system and policy: a case study in Suzhou, *Resources, Conservation and Recycling*, 53(1), pp. 409-419.
- Nambiar, S. K., & Idicula, S. M., 2013. A multi-agent vehicle routing system for garbage collection. In *Advanced Computing (ICoAC), 2013 Fifth International Conference on* (pp. 72-76). IEEE.
- Naser, M., & Birst, S.C., 2010. Mesoscopic Evacuation Modeling for Small-to Medium-Sized Metropolitan Areas. Tech. rep., Advanced Traffic Analysis Center, Upper Great Plains Transportation Institute, North Dakota State University, Fargo, ND 58108.
- Natalini, D. & Bravo, G., 2014. Encouraging Sustainable Transport Choices in American Households: Results from an Empirically Grounded Agent-Based Model, *Sustainability*, 6(1), pp. 50 - 69.
- Nguyen-Trong, K., Nguyen-Thi-Ngoc, A., Nguyen-Ngoc, D., & Dinh-Thi-Hai, V., 2016. Optimization of municipal solid waste transportation by integrating GIS analysis, equation-based, and agent-based model, *Waste Management*. In Press.
- Ombudsman's Office of Peru , 2007. Let's put garbage in its place. Proposals for the municipal solid waste management, Peru: Report N°125 [In Spanish].
- Oyoo, R., Leemans, R., & Mol, A.P.J., 2011. Projections of Urban Waste Flows and their Impacts in African Metropolitan Cities, *International Journal of Environmental Restoration*, 5(3), pp. 705-724.

- Pacheco-Torgal, F., Tam, V.W.Y., Labrincha, J.A., Ding, Y., & de Brito, J., 2013. Handbook of recycled concrete and demolition waste, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, No.47, UK.
- Pan, X., Han, C., Dauber, K. & Law, K., 2007. A Multi-agent Based Framework for the Simulation of Human and Social Behaviors during Emergency Evacuations. *AI & Amp Society*, 22(2), pp. 113 - 132.
- Pararas-Carayannis, G., 2013. DISASTER PAGES. [En línea] Available at: <http://www.drgeorgepc.com/Tsunami1996Peru.html> [Último acceso: 01 November 2016].
- Peng, Y., Wu, H., & Zhuge, Y., 2015. Strenght and drift capacity of squat recycled concrete shear walls under cycling loading, *Journal of Engineering Structures*, 100(1), pp. 356 - 368.
- Pimanmas, A., Joyklad, P., & Warnitchai, P., 2010. Structural design guideline for tsunami evacuation shelter, *Journal of Earthquake and Tsunami*, 4(4), pp. 269 - 284.
- Rahmandad, H. & Sterman, J., 2008. Heterogeneity and Network Structure in the Dynamics of Diffusion: Comparing Agent-Based and Differential Equation Models, *Management Science*, 54(5), pp. 998 - 1014.
- Riddle, M., Macal, C.M., Conzelmann, G., Combs, T.E., Bauer, D., & Fields, F., 2015. Global critical materials markets: An agent-based modeling approach, *Resources Policy*, 45(1), pp. 307 - 321.
- Ringler, P., Keles, D., & Fichtner, W., 2016. Agent-based modelling and simulation of smart electricity grids and markets – A literature review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57(1), pp. 205 - 215.
- Sánchez, S., & Rojas, S.R., 2013. SIMWASTE: Simulador de la Gestión Integral de Residuos Sólidos Domiciliarios, Tesis de grado, Pontificia Universidad Javeriana.
- Schwarz, N., & Ernst, A., 2009. Agent-based modeling of the diffusion of environmental innovations- An empirical approach. *Technological Forecasting and Social Change*, 76(4), pp. 497 - 511.
- Shi, X., Thanos, A.E., & Celik, N., 2014. Multi-objective agent-based modeling of single-stream recycling programs, *Resources, Conservation and Recycling*, 92(1), pp. 190 - 205.
- Shuto, N., 2005. Tsunamis: Their Coastal Effects and Defense Works', *Scientific Forum on Tsunami, Japan*.
- Sonigo, P., Hestin, M., & Mimid, S., 2010, Management of Construction and Demolition Waste in Europe, Brussels, Stakeholders Workshop.
- Sonrensen, J. & Vogt, B., 1995. Interactive Emergency Evacuation Guidebook, prepared for the protective action IPT chemical stockpile emergency preparedness program.
- Spoerri, A., Lang, D.J., Binder, C.R., & Scholz, R.W., 2009. Expert-based scenarios for strategic waste and resource management planning-C&D waste in the Canton of Zurich, Switzerland. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(1), pp. 592 - 600.
- Sudhir, V., Srinivasan, G., & Muraleedharan, V. R., 1997. Planning for sustainable solid waste management in urban India. *System Dynamics Review*, 13(3), 223-246.
- Sugandi, A., Towolioe, S., Abd, N., & Siong, C., 2015. Sustainable solid waste management practices and perceived cleanliness in a low income city. *Habitat International*, 49(1), pp. 197-205.
- Tavares G., Zsigraiova Z., & Semiao V., 2009. Optimization of MSW collection routes for minimum fuel consumption using 3D GISs modelling. *Waste Management*, 29(1), pp. 1176-1185.
- Tesfatsion, L. & Judd, K.L. (2nded.), 2006. Handbook of computational economics: agent-based computational economics.
- The International Federation´s Global Agenda, 2006. Responding to the Asia earthquake and tsunamis. Regional strategy 2 (2006-2010). Handbook of Switzerland.

- Truong, M.T., Amblard, F., Gaudou, B., & Sibertin Blanc, C., 2014. To calibrate & validate an agent-based simulation model – An application of the combination framework of BI solution & multi-agent platform. In: 6th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2014), 6 March 2014 – 8 March 2014 (Angers, France).
- Ulli-Beer, S., Andersen, D.F., & Richardson, G.P., 2006. Financing a competitive recycling initiative in Switzerland, *Ecological Economics*, 62(1), pp. 727-739.
- UN-Habitat, 2010. Collection of Municipal Solid Waste in Developing Countries. London: United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat). Earthscan.
- USGS Earthquake Hazards Program, 2016. USGS Science for a changing world. [En línea] Available at: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20005j32#executive> [Último acceso: 30 October 2016]
- Vieira, D.R., Calmon, J.L., & Coelho, F.Z., 2016. Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review, *Journal of Construction and Building Materials*, 124(1), pp. 656 - 666.
- Villagra, P., Rojas, C., Ohno, R., Xue, M., & Gómez, K., 2014. A GIS-base exploration of the relationships between open space systems and urban form for the adaptive capacity of cities after an earthquake: The cases of two Chilean cities, *Applied Geography*, 48(1), pp. 64 - 78.
- Vincenot, C.E., Giannino, F., Reitkerk, M., Moriya, K., & Mazzoleni, S., 2011. Theoretical considerations on the combined use of system dynamics and individual-based modeling in ecology. *Ecological Modelling*, 222(1), pp. 210 – 218.
- Wang, H., Mostafizi, A., Cramer, L. A., Cox, D., & Park, H., 2016. An agent-based model of a multimodal near-field tsunami evacuation: Decision-making and life safety, *Transportation Research Part C*, 64(1), pp. 86 - 100.
- Washington State Department of Natural Resources, 2016. Tsunamis, Washington.
- Watanabe, K., & Kondo, A., 2009. Development of Tsunami Evacuation Simulation Model to Support Community Planning for Tsunami Disaster Mitigation, *Journal of Architecture and Planning*, 74(637), pp. 627 - 634.
- Watkins, M., Mukherjee, A., Onder, N., & Mattila, K., 2009. Using agent-based modeling to study construction labor productivity as an emergent property of individual and crew interactions, *Journal of Constructin Engineering and Management*, 135(7), pp. 657 - 667.
- Wilensky, U., & Rand, N., 2015. An introduction to agent-based modeling: Modeling natural, social and engineered complex systems with NetLogo. Cambridge, MA: MIT Press.
- Wolshon, B., Zhang, Z., Parr, S., Mitchell, B., & Pardue, J., 2015. Agent-Based Modeling for Evacuation Traffic Analysis in Megaregion Road Networks. *Procedia Computer Science*, 52(1), pp. 908 - 913.
- Wood, N., Jones, J., Schelling, J., & Schmidtlein, M., 2014. Tsunami vertical-evacuation planning in the U.S. Pacific Norhtwest as a geospatial, multi-criteria decision problem, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 9(1), pp. 68 - 93.
- Wooldridge, M., & Jennings, N., 1995. Intelligent Agents: Theory and Practice, *Knowledge Engineering Review*, 10(2), pp. 115 - 152.
- Yang, Z., Zhou, X., & Xu, L., 2014. Eco-efficiency optimization for municipal solid waste management. *Journal of Cleaner Production*. In Press.
- Yin, W., Murray-Tuite, P., Ukkusuri, S.V., & Gladwin, H., 2014. An agent-based modeling system for travel demand simulation for hurricane evacuation, *Transportation Research Part C*, 42(1), pp. 44 - 59.

- Yuan, H., Chini, A., Lu., Y. & Shen, L., 2012. A dynamic model for assessing the effects of management strategies on the reduction of construction and demolition waste. *Waste Management*, 32(1), pp. 521 – 531.
- Zheng, X., Zhong, T., & Liu, M., 2009. Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches. *Building and Environment*, 44(1), pp. 437 - 445.

