



**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA**

**DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES**

**GESTIÓN INTEGRADA DE SISTEMAS URBANOS  
DE INFRAESTRUCTURA: EVALUACIÓN DE  
CRITERIOS DE INTEGRACIÓN CONSIDERANDO  
A LAS COMUNIDADES POR MEDIO DE UNA  
MODELACIÓN BASADA EN AGENTES**

**Sebastián Alexis Vásquez Ávila**

Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil

Mayo de 2023



**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA**

**DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES**

**GESTIÓN INTEGRADA DE SISTEMAS URBANOS  
DE INFRAESTRUCTURA: EVALUACIÓN DE  
CRITERIOS DE INTEGRACIÓN CONSIDERANDO  
A LAS COMUNIDADES POR MEDIO DE UNA  
MODELACIÓN BASADA EN AGENTES**

Tesis de Grado presentada por

**Sebastián Alexis Vásquez Ávila**

como requisito parcial para optar al grado de

**Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil**

Profesor Guía  
Felipe Andrés Araya Araya

Mayo de 2023

TÍTULO DE LA TESIS:

**GESTIÓN INTEGRADA DE SISTEMAS URBANOS DE INFRAESTRUCTURA: EVALUACIÓN DE CRITERIOS DE INTEGRACIÓN CONSIDERANDO A LAS COMUNIDADES POR MEDIO DE UNA MODELACIÓN BASADA EN AGENTES**

AUTOR:

**SEBASTIÁN ALEXIS VÁSQUEZ ÁVILA**

TRABAJO DE TESIS, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el **Grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil** de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Felipe Araya Araya .....

Alelí Osorio Lird .....

Leonardo Sierra Varela .....

Valparaíso, Chile, Mayo de 2023

## **Agradecimientos**

Al momento de entrar a la universidad no imaginé todo lo que iba a vivir, tenía miedo y pensaba que podía fracasar. Al día de hoy me siento conforme y contento con lo que he logrado: terminé la carrera de ingeniería civil, hice buenos amigos y desarrolle mi identidad como individuo que forma parte de una sociedad. Aunque antes de terminar el pregrado no pensaba volver a estudiar, la pandemia y mi gusto por la gestión de infraestructuras me motivaron a continuar con el Magíster.

Hoy ya estoy a un paso de finalizar mi trayecto por la Universidad Santa María, al menos como estudiante, y pienso que esto no hubiera sido posible sin tener la bendición de tener en primer lugar a los mejores padres del mundo, que aunque reconozco que no son perfectos, sin duda me permitieron elegir y trazar mi propio destino y sé que me quieren sin importar los errores que a veces haya cometido, así como yo los quiero de forma incondicional. Agradezco a mis padres Clara y Javier, que se esforzaron para permitirme estudiar en una de las mejores Universidades de Chile, incluso cuando ni el Estado ni la misma Universidad me otorgaron becas en el pregrado, por lo cual ahora sé que es momento de devolverles la mano como corresponde.

También quiero agradecer enormemente a mis amigos: Gianina, Sebastián, Paula, Daniel, Camila, Jorge, Andrea, José y muchos otros más, por acompañarme en todo mi paso por la U, dado que a veces la motivación escaseaba y eran necesarias algunas palabras de aliento. Y también les agradezco por darme motivos para el ocio, que tan necesario es.

Por último agradezco al profesor Felipe, por ser un buen apoyo y guía en este proceso y a la Dirección de Postgrado de la UTFSM, por otorgarme la beca de financiamiento, la cual me permitió recibir algunos ingresos en mi paso por el Magister.

## Resumen

La gestión integrada es una forma de gestión que considera las interdependencias entre los sistemas de infraestructuras y se hace cada vez más necesaria debido al aumento de la infraestructura construida y a las ciudades densamente pobladas. Es por ello que la presente tesis lleva a cabo una modelación basada en agentes para estudiar algunos de los criterios que han sido usados para integrar proyectos de intervención de diferentes sistemas de infraestructura, y junto con ello identificar el impacto y la postura de las comunidades en dicha integración. Para el desarrollo del modelo basado en agentes se lleva a cabo una revisión del estado del arte y consultas a expertos, además de un trabajo iterativo, con tal de obtener un modelo que sea verificado en su funcionamiento y validado por expertos. De este estudio es posible simular y evaluar criterios de integración para proyectos de infraestructura urbana de agua potable, aguas servidas y transporte.

Se obtiene como resultado que mientras mayor sea el intervalo temporal de integración y la distancia entre proyectos, más proyectos podrán ser integrados. Junto con ello, es posible estimar los beneficios económicos, los que pueden ser significativos. Dado que se definen métricas para el análisis del impacto a las comunidades, se obtiene que mientras mayor sea el porcentaje de integración, mayor serán los beneficios percibidos por las comunidades cercanas a los proyectos ejecutados y por ende mejor sería la postura de las comunidades hacia la gestión urbana.

Esta tesis contribuye al estado del arte de la gestión integrada, realizando uno de los primeros análisis globales del problema, usando una herramienta poco usada en esta área, como es, la modelación basada en agentes. Otro aporte, es la consideración de las limitaciones temporales de la planificación de proyectos de intervención urbana y la inclusión de las comunidades como un actor relevante, lo que ayuda a que la gestión integrada pudiera ser implementada de forma práctica.

Se propone como trabajo a futuro, determinar de forma estándar los costos y beneficios de la gestión integrada en diferentes contextos y extender el estudio de las métricas de análisis del impacto a las comunidades, de tal forma de que sean calibradas y puedan ser aplicadas para la evaluación de la factibilidad de la gestión integrada en diferentes contextos.

**Palabras claves:** Gestión Integrada, Modelación Basada en Agentes, Inclusión de la comunidad.

# Índice General

<b>Índice de Figuras</b> .....	VII
<b>Índice de Tablas</b> .....	IX
1 Introducción.....	1
2 Revisión Bibliográfica.....	3
2.1 Gestión de Sistemas de Infraestructura .....	3
2.2 Gestión Integrada.....	4
2.3 Sistemas de Infraestructura y la comunidad .....	8
2.4 Modelación de sistemas de infraestructura.....	10
3 Objetivos.....	15
3.1 Objetivo General.....	15
3.2 Objetivos Específicos .....	15
4 Metodología.....	16
4.1 Enfoque de modelación .....	17
4.2 Formulación del modelo.....	17
4.2.1 Proyectos de Intervención .....	19
4.2.2 Agencia Central.....	21
4.2.3 Comunidad .....	22
4.2.4 Fuente de información.....	25
4.3 Implementación del Modelo.....	26
4.3.1 Criterios de Integración.....	27
4.3.2 Supuestos del Modelo .....	28
4.3.3 Métricas .....	31
4.3.4 Caso Estudio.....	34
4.3.5 Escenarios de análisis.....	37
4.4 Verificación y Validación.....	38
4.5 Limitaciones del Modelo .....	39
5 Resultados.....	40
5.1 Simulación de los criterios de integración.....	40
5.1.1 Criterios primarios.....	41

5.1.2	Criterios secundarios .....	42
5.1.3	Beneficios económicos de criterios primarios .....	43
5.1.4	Análisis de sensibilidad .....	45
5.2	Simulación de la percepción de las comunidades .....	48
5.2.1	Métricas de impacto a las comunidades .....	49
5.2.2	Métricas a lo largo del tiempo.....	51
5.2.3	Postura de la comunidad .....	52
5.2.4	Análisis de sensibilidad distancia de proximidad .....	53
6	Discusión .....	56
6.1	Criterios de integración .....	56
6.1.1	Importancia y utilidad de considerar los criterios .....	56
6.1.2	Criterios que no pudieron ser incorporados en el estudio .....	56
6.1.3	Utilización de criterios nuevos .....	57
6.1.4	Criterios espacio-temporales .....	58
6.1.5	Porcentaje de proyectos integrados .....	59
6.1.6	Disminución de proyectos totales .....	60
6.2	Beneficios para las agencias .....	62
6.2.1	Formas de obtener el ahorro.....	62
6.2.2	Ahorro entre escenarios.....	62
6.2.3	Comparación de resultados con la literatura .....	63
6.2.4	Análisis de sensibilidad.....	64
6.3	Beneficios para las comunidades.....	64
6.3.1	Escenarios utilizados para el análisis .....	64
6.3.2	Métricas de análisis .....	65
6.3.3	Soluciones para reducir el impacto de los proyectos de infraestructura .....	66
6.3.4	Comparación al final .....	67
6.3.5	Comparación temporal .....	68
6.3.6	Análisis de sensibilidad.....	69
6.4	Percepción de las comunidades .....	70
6.4.1	Forma de obtener la percepción .....	70
6.4.2	Comparación entre los escenarios .....	71
7	Recomendaciones .....	73
7.1	Intervalo temporal.....	73

7.2 Cercanía entre proyectos .....73  
7.3 Beneficios .....74  
7.4 Inclusión de las comunidades .....75  
8 Conclusión .....76

## Índice de Figuras

Figura 1. Niveles de la gestión de activos de infraestructura. Adaptado de Haas & Hudson (2015)	4
Figura 2. Tipos de Interdependencias	5
Figura 3. Avances y vacío en el campo de la gestión integrada.	8
Figura 4. Vacío en la literatura relacionada a la inclusión de la comunidad en la gestión de infraestructura.	10
Figura 5. Características de sistemas complejos que tienen los sistemas de sistemas de infraestructura. Adaptado de Oughton et al. (2018).	11
Figura 6. Enfoques de modelación usados para modelar sistemas de interdependientes de infraestructura.	12
Figura 7. Resumen metodología.	16
Figura 8. Abstracción del modelo.	19
Figura 9. Diagrama de estado de un agente tipo proyecto	20
Figura 10. Diagrama de estado agente tipo agencia central	22
Figura 11. Diagrama de estado agentes tipo comunidad.	24
Figura 12. Esquema ilustrativo distancia de proximidad	25
Figura 13. Esquema ilustrativo del traslape entre proyectos.	29
Figura 14. Esquema ilustrativo D1 y D2.	29
Figura 15. Agentes en ambiente SIG de modelación en AnyLogic 8.8.1	37
Figura 16. Agentes tipo proyecto en la simulación.	40
Figura 17. Porcentaje de proyectos integrados por agencia – criterios primarios.	41
Figura 18. Porcentaje de disminución de proyectos totales - criterios primarios	42
Figura 19. Porcentaje de proyectos integrados por agencia escenarios A – criterios secundarios	42
Figura 20. Porcentaje de proyectos integrados por agencia escenarios Q – criterios secundarios	43
Figura 21. Porcentaje de disminución de proyectos totales - criterios secundarios	43
Figura 22. Porcentaje de ahorro total al final de la simulación.	44
Figura 23. Ahorro anuales escenario AT	45
Figura 24. Ahorros anuales escenario QT	45
Figura 25. Variación del porcentaje de ahorro según escenario para la Municipalidad	46

Figura 26. Variación del porcentaje de ahorro según escenario para la Empresa Sanitaria .....	47
Figura 27. Agentes tipo comunidad junto a los agentes tipo proyecto dentro de la simulación ....	48
Figura 28. Distribución de agentes según el promedio del número de proyectos por año.....	49
Figura 29. Distribución de agentes según el promedio de días al año con proyectos. ....	50
Figura 30. Distribución de agentes según la máxima cantidad de días seguidos sin proyectos.....	50
Figura 31. Número promedio de proyectos por año dentro del último .....	51
Figura 32. Número promedio de días con proyectos al año dentro del último año .....	52
Figura 33. Número promedio de días continuos sin proyectos .....	52
Figura 34. Porcentaje de la comunidad que apoya la gestión. ....	53
Figura 35. Variación del N° de proyectos según distancia de proximidad .....	54
Figura 36. Variación de los días con proyectos según distancia de proximidad.....	55
Figura 37. Variación de los días con proyectos según distancia de proximidad.....	55
Figura 38. Comparación del porcentaje de integración entre escenarios .....	59
Figura 39. Criterios secundarios según factibilidad de integración para escenarios “A” cuando hay traslape (a) y cuando no hay traslape necesariamente (b) .....	60
Figura 40. Comparación del ahorro entre escenarios .....	63
Figura 41. Comparación del ahorro con la literatura .....	64
Figura 42. Opciones para disminuir el impacto de los proyectos de intervención.....	67
Figura 43. Diferencias entre escenarios al final de la simulación .....	68
Figura 44. Formas de representar la percepción de las comunidades .....	71

## Índice de Tablas

Tabla 1. Criterios de integración generalmente utilizados en la literatura.....	7
Tabla 2. Comparación entre métodos de modelación de sistemas complejos empleados para modelar sistemas interdependientes de infraestructura.....	14
Tabla 3. Parámetros y variables de los agentes tipo proyecto.....	21
Tabla 4. Parámetros y variables de los agentes tipo comunidad.....	24
Tabla 5. Criterios de integración de proyectos.....	30
Tabla 6. Supuestos de análisis.....	31
Tabla 7. Métricas de análisis.....	34
Tabla 8. Características de los proyectos.....	35
Tabla 9. Proyectos y sus costos según tipo de proyecto e intervención realizada.....	36
Tabla 10. Matriz de escenarios de análisis por criterio.....	38
Tabla 11. Presupuesto al final de cada escenario de simulación.....	44
Tabla 12. Presupuesto ejecutado al final de la simulación por escenario (USD).....	46
Tabla 13. Valores promedio de las métricas de impacto a la comunidad.....	50
Tabla 14. Resumen de métricas analizadas al final de cada escenario.....	54

# 1 Introducción

La población urbana mundial ya sobrepasa más de la mitad de la población total y continúa aumentando (World Bank Group, 2021), tal es el caso de Chile, país cuya población urbana también va en aumento (World Bank Group, 2021). Esto ha generado entre otras cosas un aumento en la cantidad de infraestructura, la cual debe ser construida para suplir las necesidades de la creciente población (Timilsina et al., 2020). Los sistemas de infraestructura constituyen gran parte de las ciudades y son los que proveen a la población de distintos servicios básicos, tales como agua, energía y transporte (Uddin et al., 2013). Luego, para cumplir su labor, los sistemas de infraestructura necesitan de otros, dado que el funcionamiento de cada uno de ellos no es aislado y tanto la operación como la falla de uno, impacta en cierta medida el servicio que ofrece otro, es decir, son sistemas interdependientes (Rinaldi et al., 2001).

Una ciudad no está constituida solo de sistemas físicos de infraestructura, pues también existen otros sistemas que la componen, tales como el sistema social y cívico, donde se encuentran por ejemplo las agencias y organizaciones sociales (Sanusi et al., 2020). Estos sistemas interactúan entre ellos y con los sistemas físicos, generando relaciones complejas, debido principalmente al alto componente humano presente en ellos, por lo que en resumen se puede decir que la ciudad y sus sistemas de infraestructura son sistemas socio-técnicos (Wu et al., 2015). Dado que, las ciudades están compuestas de diversos elementos sociales y físicos; los que poseen múltiples relaciones e interdependencias; es posible asumir también que estas corresponden a sistemas complejos (McPhearson et al., 2016; Osman, 2012), lo que presenta un mayor desafío tanto para su entendimiento, como para su gestión.

Para garantizar la gestión y el funcionamiento de las ciudades, existen organismos públicos y privados que se encargan de ello, lo que se lleva a cabo a través de diferentes procesos cíclicos plasmados en diversas normativas de gestión de sistemas de infraestructuras (Alhazmi, 2016). A menudo se ha hecho énfasis en la gestión de cada sistema de infraestructura por separado, lo que es más sencillo en términos prácticos y legales; como en el caso de Chile (Vasquez & Araya, 2022); pero resulta en una serie de ineficiencias en comparación con una metodología integrada de gestión (Halfawy, 2008). Dado lo anterior, se ha hecho presente que la gestión de activos de infraestructura debe ser llevada a cabo de forma integrada, lo que garantizaría mejoras en la operación y la sustentabilidad de las ciudades (Yang et al., 2018).

En la literatura se observa un gran avance en el ámbito de la gestión integrada de sistemas urbanos de infraestructura, principalmente relacionada a la interacción de activos físicos de los sistemas urbanos de transporte y redes de agua potable, aguas servidas y aguas lluvias (Abu-Samra et al., 2020; Osman, 2016; Shahata et al., 2022). El énfasis en los estudios ha estado en optimizar los esquemas de intervención integrada entre estos sistemas (Abu-Samra et al., 2020; Metayer et al., 2020) o bien, en determinar herramientas para la toma de decisiones basadas en el riesgo y el desempeño de los activos (Shahata & Zayed, 2016; Tscheikner-Gratl et al., 2016). Cada uno de estos estudios no considera el contexto local, por tanto son desarrollados en situaciones ideales, es

decir, en un escenario en el cual las intervenciones son realizadas en el momento óptimo técnico y no habiendo intromisión política o participación de la comunidad en la toma de decisiones. Junto a lo anterior, los estudios tampoco han profundizado en los criterios de integración que podrían existir y su influencia en la integración de los proyectos, dado que estos criterios son definidos como supuestos (e.g. una determinada cercanía temporal y espacial).

Ahora bien, las agencias además de gestionar los activos físicos de los sistemas de infraestructura, también deben velar por la correcta interacción entre estos y su entorno, tales como el medio ambiente y la comunidad (Sanford Bernhardt, 2004; Yang et al., 2018). A menudo estos factores no son lo suficientemente considerados en la gestión de sistemas de infraestructura interdependientes, no obstante, en la literatura reciente esto ha empezado a ser cada vez más importante (Araya et al., 2020; Sanusi et al., 2020; Spearing & Faust, 2020). No obstante, en el campo de la gestión integrada, aún los modelos y estudios existentes se enfocan mayormente en los activos, dejando de lado del análisis a las comunidades.

Resumiendo, las ciudades están compuestas de sistemas físicos de infraestructura interdependientes, entre ellos y con los sistemas sociales. Dada esta interacción se hace necesario impulsar una metodología integrada de gestión que considere a las comunidades. Por su parte los estudios en la literatura se han enfocado principalmente en la integración con énfasis en los activos de infraestructura, sin considerar mayormente los impactos en las comunidades y dejando de lado los distintos criterios de integración para escenarios diferentes. Debido a lo anterior, es que en este estudio se analiza la gestión integrada considerando distintos criterios para la integración de proyectos de intervención de los sistemas urbanos de infraestructura de transporte, agua potable y aguas servidas. Además, este estudio propone un método con el que se puede cuantificar los impactos que la gestión integrada tiene en las comunidades. Todo esto con el objetivo de generar un aporte al conocimiento relacionado a la gestión integrada y para que pueda ser usado por los tomadores de decisiones como argumento para implementar esta modalidad de gestión en diferentes contextos.

## **2 Revisión Bibliográfica**

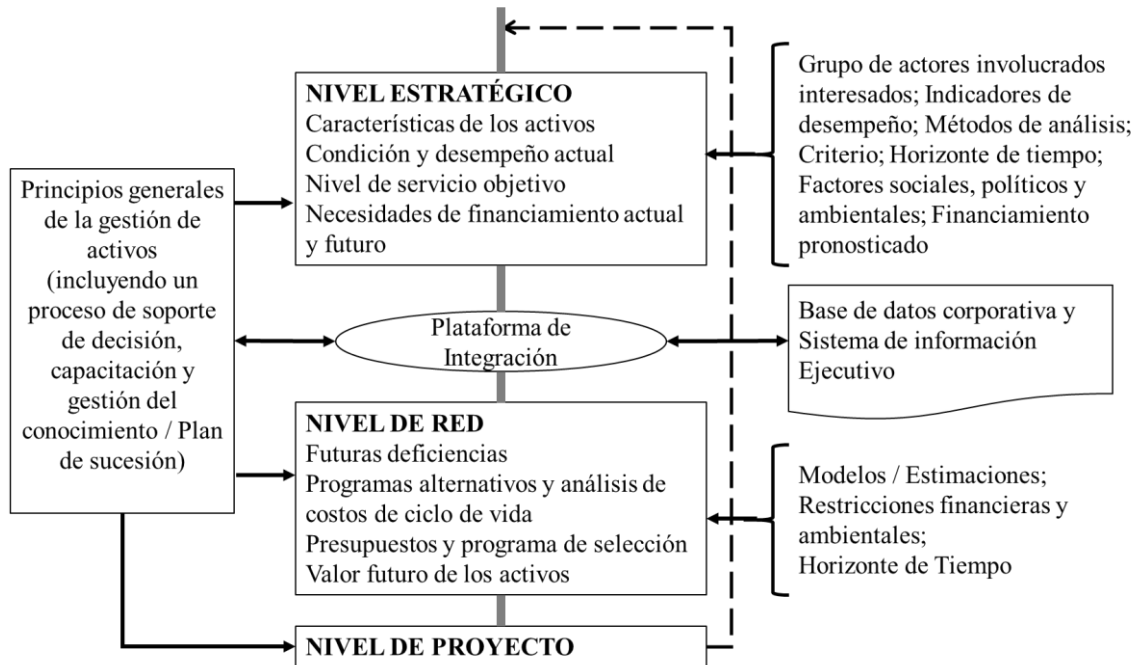
### **2.1 Gestión de Sistemas de Infraestructura**

Los sistemas de infraestructura son sistemas físicos contruidos por el hombre cuyo fin es proveer a la población de distintos servicios básicos, tales como agua potable, transporte, energía e incluso entretenimiento (Uddin et al., 2013). Dentro de los sistemas de infraestructura se encuentran los sistemas de agua potable, alcantarillado, aguas lluvias y de transporte, los que en su conjunto funcionan en las ciudades, siendo pilares fundamentales para el desarrollo económico y social de las sociedades (Timilsina et al., 2020), dado que al mismo tiempo que entregan un servicio, también proveen calidad de vida (Fischer & Amekudzi, 2011). Debido a que los sistemas de infraestructura existen para brindar servicios a la comunidad, es necesario que se supervise el correcto funcionamiento de estos, de tal forma que mantengan un cierto nivel de desempeño. Lo que lleva a que su administración y operación esté a cargo de instituciones públicas o privadas, las que comúnmente se denominan agencias.

La gestión de sistemas de infraestructura es el conjunto de actividades que tienen como objetivo lograr un buen funcionamiento del sistema, es decir, se debe cumplir con un nivel de servicio determinado teniendo presente los recursos disponibles, todo esto también considerando aspectos económicos, sociales y ambientales (Coffelt & Hendrickson, 2019; Uddin et al., 2013). Se denomina también como gestión de activos de infraestructura, porque se considera que los sistemas de infraestructura están compuestos de múltiples activos o elementos individuales, los cuales poseen valor según el punto de vista de los actores involucrados, tales como para la agencia o los usuarios (Almeida et al., 2022; Grigg, 2003). Entonces, la gestión se encarga no solo de elementos aislados, sino que considera cada activo como un componente de un gran sistema, con sus características, costos y usuarios beneficiados. Actualmente y dado el avance de la visión del desarrollo sustentable, se ha hecho énfasis en la gestión teniendo presente el análisis de ciclo de vida, considerando los costos y beneficios durante toda la vida útil del activo, lo que extiende el alcance de la gestión en el tiempo y también incluye a usuarios futuros en las políticas de gestión que puedan ser implementadas (Coffelt & Hendrickson, 2019; Haas & Hudson, 2015).

Tal como ocurre con la gestión de un proyecto de construcción, la gestión de un sistema de infraestructura está compuesta de varias etapas y actividades. A grandes rasgos estas etapas se pueden agrupar en tres niveles según el alcance temporal: estratégico, táctico o de red y operativo o de proyecto (Haas & Hudson, 2015; IPWEA, 2006). Tal como lo dice su nombre, el nivel estratégico de la gestión está relacionado con la creación de políticas y estrategias que servirán para cumplir los objetivos y lineamientos de la gestión. Dichos objetivos dependen de la normativa, de los usuarios y de los tomadores de decisión. Luego en el nivel táctico de la gestión o nivel de red, se realiza la planificación a mediano plazo, la cual depende de los recursos disponibles y de las políticas establecidas anteriormente. Por último, en el nivel operativo o de proyecto, se llevan a cabo las actividades planificadas en el corto plazo, las que dependen del presupuesto anual. Dentro

de esta fase se llevan a cabo labores de mantenimiento, reparación, reconstrucción y construcción de nuevos activos, lo que implica una mejora en los niveles de servicios y el estado físico del sistema de infraestructura. En la **Figura 1** se muestra un esquema con los niveles de la gestión de activos de infraestructura y sus actividades involucradas.



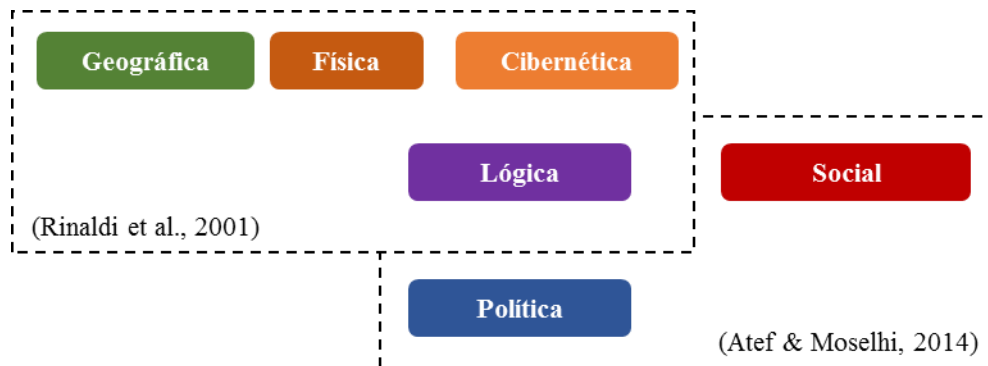
**Figura 1. Niveles de la gestión de activos de infraestructura. Adaptado de Haas & Hudson (2015)**

La mayoría de los estudios que abordan la gestión de sistemas de infraestructura han tenido como supuesto principal, que todos los niveles de gestión son posibles y que existe una correcta conexión entre las políticas y lo que se ejecuta a nivel de proyecto, no obstante, la realidad puede ser muy distinta, debido a que muchas veces las agencias no disponen de los recursos tecnológicos y humanos, ni del financiamiento suficiente para que esto ocurra (Halfawy, 2008; Yazdani et al., 2014). Por otro lado, países en vías de desarrollo como Chile presentan además otras limitantes como, el marco legal y la excesiva intervención política en decisiones técnicas (Araya & Vasquez, 2022). Esta brecha entre la literatura y la realidad pocas veces ha sido considerada en los modelos desarrollados. Es por ello, que este trabajo busca llevar a cabo una modelación que incluya estas limitantes, como una escala de planificación reducida, lo cual entregue resultados más cercanos a la realidad.

## 2.2 Gestión Integrada

La forma de considerar las relaciones entre los sistemas de infraestructura consiste en el estudio de las interdependencias, las cuales son relaciones tanto unidireccionales como bidireccionales de

dependencia de un sistema de infraestructura frente a otro, y pueden ser agrupadas en interdependencias físicas, geográficas, cibernéticas y lógicas (Rinaldi et al., 2001). Las físicas consisten en que el estado de un sistema depende del resultado físico de otro sistema, tal como las plantas de agua potable dependen de la energía eléctrica y suministro de combustibles fósiles para funcionar; las geográficas ocurren cuando los sistemas de infraestructura están ubicados cerca o en el mismo espacio, lo que genera que la falla o intervención de un sistema pueda afectar el funcionamiento de otro; las interdependencias cibernéticas consisten en la dependencia de información, lo que en una ciudad ocurre cuando es necesaria la información de la ubicación y dimensión de una red para reparar una red contigua; y por último, la interdependencia lógica es aquella que no se considera dentro de los otros tipos de interdependencias (Rinaldi et al., 2001). No obstante, en la literatura también se han considerado otros tipos de interdependencias, tal como, la social (Atef & Moselhi, 2014), que se refiere al comportamiento de la población producto del estado de un sistema de infraestructura y la interdependencia política (Atef & Moselhi, 2014), que menciona que el estado de un sistema puede verse afectado por las políticas o procesos gubernamentales relacionados a otro sistema de infraestructura. Si bien, se han diferenciado como otro tipo de interdependencias, las dos últimas habitualmente son consideradas como interdependencias lógicas, tal como se muestra en la **Figura 2**.



**Figura 2. Tipos de Interdependencias**

Dada la relación de interdependencia entre los sistemas urbanos de infraestructura, surge la necesidad de incorporar esto en los procesos y niveles de gestión de activos de infraestructura. Como respuesta, se ha planteado la gestión integrada, la cual propone llevar a cabo distintas actividades, como el monitoreo de los activos, y la planificación y ejecución de proyectos de intervención de manera integrada entre más de un sistema de infraestructura (InfraGuide, 2003; Shahata & Zayed, 2010). De forma concreta, se podrían integrar proyectos de reparación o reemplazo entre dos o más sistemas de infraestructura ubicados en un mismo lugar (interdependencia geográfica), como un colector y el tramo de calle ubicado inmediatamente arriba, lo que permitiría reducir costos por evitar el doble trabajo de romper y reponer el pavimento (Amador & Magnuson, 2011; Metayer et al., 2020), permitiría reducir el tiempo total que se está ocupando el espacio público (Abu-Samra et al., 2020), lo que impactaría en menor medida al libre

tránsito de la comunidad e inclusive mejoraría la percepción de la comunidad frente a las agencias encargadas de las labores (Araya & Vasquez, 2022). Junto a lo anterior, también existen otros beneficios menos evidentes, como un mejor manejo de información entre agencias y ahorro de costos de monitoreo (Halfawy, 2008, 2010). Aunque muchos de los beneficios anteriores no estén comprobados en la práctica, lo cierto es que considerar las interdependencias en la gestión de activos de infraestructura puede ser visto como un aspecto positivo del cual se puede obtener beneficios (Grafius et al., 2020).

Cómo forma de establecer los lineamientos de la gestión integrada en Canadá surge la InfraGuide (InfraGuide, 2003), la cual contiene una serie de pasos o tareas asociadas a la gestión de activos de infraestructura considerando la interdependencia geográfica y cibernética entre los sistemas, teniendo en cuenta que todos o la mayoría de los sistemas urbanos de infraestructura dependen del municipio (FCM & NRC, 2003). Por otro lado, en la literatura se han desarrollado metodologías para mejorar el desempeño de la gestión integrada, las que consisten en, la optimización para la planificación conjunta de la intervención de activos de más de un sistema de infraestructura (Abu-Samra et al., 2020; Abu Samra et al., 2018; Amador & Magnuson, 2011; Kielhauser et al., 2017; Metayer et al., 2020). Esto se ha considerado bajo el supuesto de que los activos son intervenidos en el momento óptimo técnico, según distintos criterios ponderados. También se han desarrollado metodologías de toma de decisiones para precisar y priorizar la intervención conjunta de activos de más de un sistema de infraestructura, las cuales se han basado en factores que dependen de la importancia y la condición de los activos (Tscheikner-Gratl et al., 2016) y criterios asociados al riesgo de los activos, que dependen de la probabilidad y consecuencias de la falla de los mismos (Elsawah et al., 2016; Shahata & Zayed, 2016). Como nota, se debe indicar que tanto en las guías de gestión, como en los estudios antes mostrados, los sistemas urbanos que son analizados son las redes de agua potable, alcantarillado y aguas lluvias, junto con la infraestructura vial urbana o de transporte (calles y aceras).

Junto a las mejoras al desempeño de la gestión, también se contemplan trabajos que han profundizado en los desafíos para implementar la gestión integrada, tal como la falta de la consideración de las interdependencias en la gestión de las ciudades (Yang et al., 2018), la falta de recursos tecnológicos para realizar el monitoreo y compartir la información entre las agencias (Halfawy, 2008, 2010) y la excesiva intervención política en las decisiones técnicas, además de la fragmentación de responsabilidades en la gestión urbana (Araya & Vasquez, 2022).

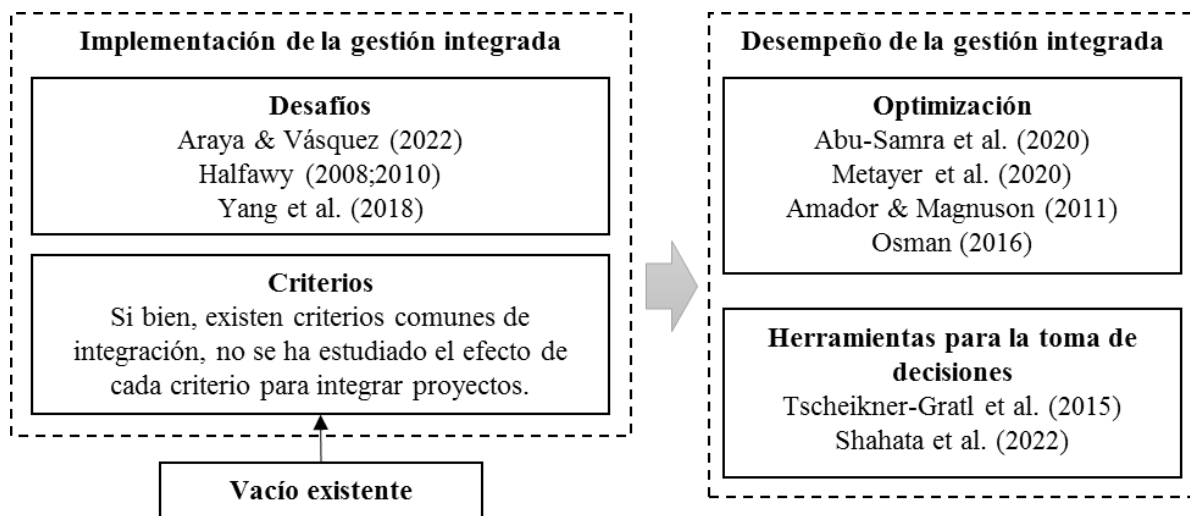
Por otro lado, se debe tener presente que los criterios de integración considerados dentro de cada estudio generalmente son la cercanía espacial y temporal, y los procesos de integración ocurren generalmente en etapas tempranas de la gestión, como en el nivel estratégico. Estos criterios de integración no han sido cuestionados y tampoco se ha hablado del impacto que ellos tendrían en la cantidad de proyectos integrados ni en los beneficios, además de considerar que no siempre se podría llevar a cabo la integración en el nivel estratégico e incluso táctico. A continuación, en la **Tabla 1** se describen los criterios típicos que han sido usados por los distintos autores. Se debe notar que aunque muchas veces sean criterios similares, estos pueden ser usados teniendo en cuenta diferentes rangos o umbrales.

**Tabla 1. Criterios de integración generalmente utilizados en la literatura**

<b>Criterio</b>	<b>Detalle</b>	<b>Rango</b>	<b>Referencias</b>
Cercanía espacial	Pueden integrarse proyectos ubicados en el mismo lugar o vecindad en la que se encuentra cada activo.	Los proyectos deben estar traslapados total o parcialmente.	Abu-Samra et al. (2018), Abu-Samra et al. (2020), Kielhauser et al. (2017), Metayer et al. (2020), Osman (2016).
	Pueden integrarse proyectos ubicados entre sí a menos de cierta distancia.	Pueden estar a una cercanía de 250 metros o estar a continuación un proyecto del otro.	Amador & Magnuson (2011), Kielhauser et al. (2017), Shahata et al. (2022).
Cercanía temporal	Pueden integrarse proyectos que estén cercanos temporalmente.	Desde la misma fecha de ejecución hasta un intervalo de 5 años.	Abu-Samra et al. (2018), Abu-Samra et al. (2020), Amador & Magnuson (2011), Osman (2016).
Actividades comunes	Pueden integrarse proyectos de intervención que tengan actividades en común.	Con traslape total o parcial, deben tener una actividad en común (e.g. rotura del pavimento)	Abu-Samra et al. (2018), Abu-Samra et al. (2020), Amador & Magnuson (2011).
Importancia del activo	Pueden integrarse proyectos en función de la prioridad para intervenir algún activo, debido a un análisis de riesgo, cercanía a edificios importantes u otros criterios.	Depende de los umbrales de riesgo con los que se trabaje.	Kielhauser et al. (2017), Osman (2016), Shahata et al. (2022).
Tipos de intervenciones	Pueden integrarse proyectos solo de un tipo (e.g. reemplazo)	El proyecto tiene el mismo objetivo pero en activos diferentes.	Metayer et al. (2020), Osman (2016).
	Pueden integrarse proyectos de más de un tipo (e.g. reemplazo, reparación y mantenimiento, entre otros)	El proyecto puede tener diferente objetivo en activos diferentes.	Abu-Samra et al. (2018), Abu-Samra et al. (2020), Amador & Magnuson (2011), Shahata et al. (2022).

Si bien existen varios estudios que abordan la gestión integrada, el foco principal ha estado puesto en el desarrollo de herramientas para la gestión, dejando de lado el análisis y el estudio de las diferentes formas en que la gestión integrada se podría implementar, dado que para emplear muchos de los criterios descritos en la **Tabla 1** se debe tener en cuenta que, muchas veces será necesario disponer de una planificación de largo plazo, información actualizada del inventario, de la condición y del desempeño de los activos. Lo anterior parte de la base que las agencias tienen

los recursos tecnológicos y monetarios para llevar a cabo un debido monitoreo de la infraestructura, lo que muchas veces en la práctica no ocurre. Si bien, se han explorado los desafíos asociados a lo anterior, ahora es necesario ir más allá y profundizar en el problema de la implementación, logrando obtener recomendaciones y lineamientos que permitan a los tomadores de decisiones optar por la gestión integrada dentro de escenarios que no siempre son ideales. La forma que propone este estudio de llenar el vacío existente (ver **Figura 3**), es por medio del análisis de los diferentes criterios de integración de proyectos; los que serán explicados más adelante; que dependiendo de cada escenario pueden variar y resultar en diferentes niveles de integración.



**Figura 3. Avances y vacío en el campo de la gestión integrada.**

## 2.3 Sistemas de Infraestructura y la comunidad

Siendo evidente la necesidad de considerar las interdependencias en la gestión de los sistemas de infraestructura, también resulta necesario considerar componentes adicionales a los sistemas físicos, tales como los sistemas sociales, tal como, las comunidades, normas, leyes y el marco político en el cual se encuentran inmersos los sistemas de infraestructura (Saidi et al., 2018). Esto ocurre porque así como existen las interdependencias entre los sistemas físicos de infraestructura, también se han descubierto interdependencias socio-técnicas entre los sistemas de infraestructura y los sistemas sociales (Manny, 2023). Estas interdependencias también pueden ser analizadas como impactos, los que pueden afectar tanto en una dirección, como en otra.

El estudio de los impactos de la continua operación de los sistemas hacia las comunidades es generalmente relacionado a un incremento de ruido y contaminación ambiental (Abu Dabous et al., 2020), entre otras cosas. Aunque los impactos relacionados a los proyectos de mantenimiento, reparación y renovación de la infraestructura también pueden ser vistos como parte de los impactos de proyectos de construcción (Budayan & Celik, 2021). Pero la diferencia con los proyectos de construcción, es que los proyectos de intervención de los sistemas de infraestructura no afectan

solo la zona donde se realiza el proyecto, sino que generan un impacto en las zonas aledañas (Macharis et al., 2016), e incluso un impacto mayor, dependiendo de la envergadura del proyecto. En el caso del sistema social de las comunidades, su interacción con los sistemas de infraestructura ha sido ampliamente estudiada en situaciones de catástrofes, tal como en incendios forestales, huracanes e incluso en migraciones (Araya et al., 2020; Sanusi et al., 2020; Spearing & Faust, 2020). Por otro lado, también hay investigaciones que han estudiado la interacción entre los sistemas de infraestructura y las comunidades en situaciones normales (Adekola et al., 2021; Rashid & Pandit, 2020). En estos estudios se ha considerado a las comunidades como un actor involucrado más, por lo que se reconoce su influencia en la toma de decisiones de la gestión y el consiguiente efecto sobre el estado y desempeño final de la infraestructura.

Considerando la influencia que los sistemas sociales tienen sobre los sistemas de infraestructura, es posible asumir que los sistemas de infraestructura son sistemas socio-técnicos (Chappin & van der Lei, 2014; Wu et al., 2015). Dado que, además de estar compuestos de activos físicos, se puede decir que también están compuestos de comunidades, tomadores de decisiones y marcos legales y políticos que finalmente afectan en su estado. Si bien, en la práctica los sistemas sociales influyen de forma directa o indirecta cuando se lleva a cabo la gestión de la infraestructura, la mayoría de los análisis realizados en la literatura muchas veces los omiten por simpleza (Saidi et al., 2018). No obstante, resulta necesario considerarlos para lograr obtener métodos estándares que permitan incluir el impacto que los sistemas sociales tienen perciben de los sistemas interdependientes de infraestructura (Hasan & Foliente, 2015; Saidi et al., 2018).

En el último tiempo, la participación de las comunidades en la gestión de los sistemas de infraestructura ha sido cada vez más considerada. No obstante, aún queda una gran brecha si se compara la gestión de sistemas urbanos de infraestructura, versus proyectos de infraestructura de relevancia medioambiental y social, dado que en estos últimos, se ha logrado implementar distintas metodologías de participación de las comunidades (Canadian Environmental Assessment Agency, 2008; EPA, 2012; Ministerio de Desarrollo Social, 2017). La participación puede dividirse en cuatro niveles según el grado de consideración en la toma de decisiones (Canadian Environmental Assessment Agency, 2008), estos niveles corresponden a: información, consulta, involucramiento y colaboración. Hasta el momento en la gestión urbana de infraestructura, se han desarrollado estudios considerando hasta el nivel de consulta, es decir, donde la opinión y percepción de las comunidades sirve de información de entrada para la toma de decisiones, aunque esta no sea vinculante. Adekola et al. (2021), estudió la percepción y conciencia de la comunidad en relación a la gestión de la basura. Araya et al. (2020) por medio de un análisis estadístico, identificó las tendencias de la comunidad alemana en relación a la construcción de nueva infraestructura de agua potable y aguas servidas. Rashid & Pandit (2020) por su parte, estudiaron la disposición de comunidades a pagar por servicios de agua potable y saneamiento. Por último, Jahanshahi et al. (2022), también en base a una encuesta, identifica la percepción de la comunidad en relación a la provisión de nueva infraestructura de ciclovías. Si bien, cada estudio se aplica a diferentes sistemas de infraestructura, hay un punto en común, que es, la consideración de la percepción de la comunidad. Esta última puede estar sujeta a diferentes factores y finalmente es una opinión que se

basa en hechos subjetivos, no obstante, tener el conocimiento de la postura de la comunidad es importante para poder emprender nuevos cambios en la infraestructura (Kirkman & Voulvoulis, 2017).

Hasta el momento, la inclusión de las comunidades en la gestión integrada se ha visto bajo el concepto del costo a los usuarios, el cual hace referencia al costo que perciben las comunidades aledañas a cada proyecto por efectos de los atrasos en el traslado hacia sus destinos y el mayor gasto de combustible (Abu Samra et al., 2018). Estos costos son indicados como costos indirectos y se le atribuyen a cada proyecto individualmente. Estos mismos costos indirectos son usados para la evaluación de proyectos de gestión de infraestructura de forma tradicional, es decir, cuando se gestiona cada sistema de infraestructura por separado. No obstante, tal como se identifica en Araya & Vasquez (2022), dentro de los beneficios que tendría la gestión integrada, también se identifica que podría mejorar la percepción de las comunidades frente a la gestión de las agencias. Dado lo anterior, este estudio propone desarrollar un análisis de la gestión integrada considerando el impacto y percepción de las comunidades (ver **Figura 4**). Esto permitirá ofrecer un primer acercamiento hacia una gestión integrada que considere a las comunidades.

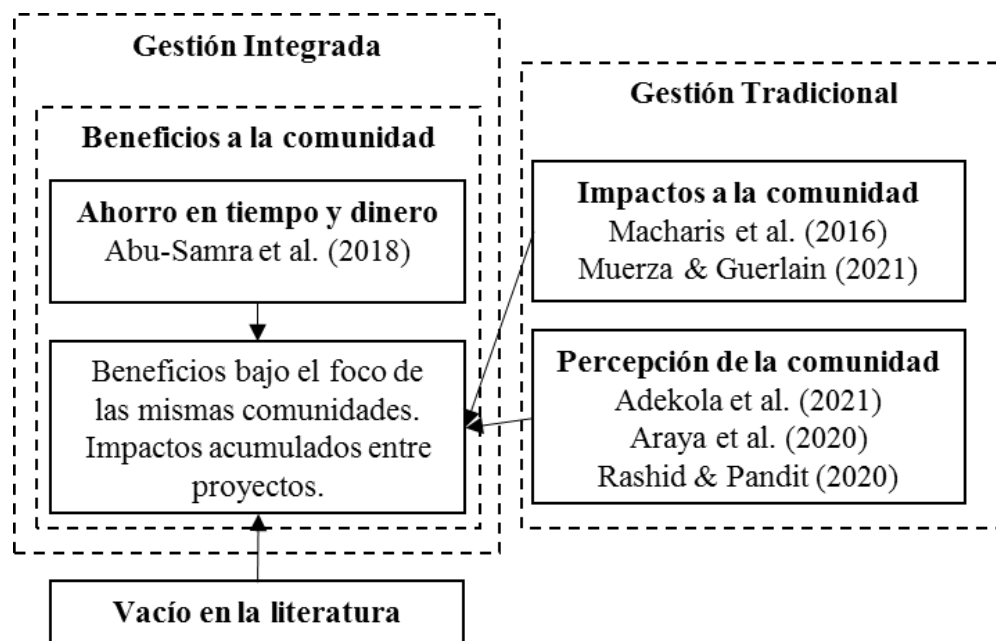


Figura 4. Vacío en la literatura relacionada a la inclusión de la comunidad en la gestión de infraestructura

## 2.4 Modelación de sistemas de infraestructura

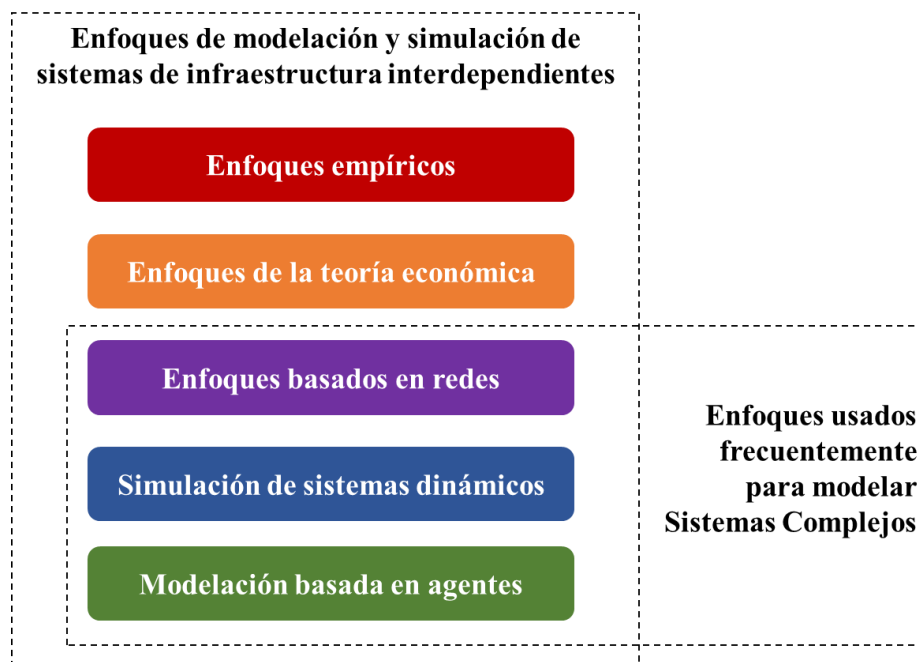
Al considerar que los sistemas de infraestructura poseen relaciones entre ellos y entre los sistemas sociales, el análisis que se debe realizar para estudiarlos es cada vez más complejo, dado que los sistemas sociales están sujetos a una gran incertidumbre (Batty & Torrens, 2005). Junto con la incertidumbre, los sistemas de infraestructura en conjunto con los sistemas sociales poseen

características como: la gran cantidad de actores involucrados con un control disperso, muchos niveles organizacionales, la interdependencia entre ellos, capacidad de adaptación y comportamiento emergente, entre otros atributos (Oughton et al., 2018). Dado lo anterior, es que en la literatura se ha optado por analizar este conjunto de sistemas como sistemas complejos (Batty & Torrens, 2005; Osman, 2012; Rinaldi et al., 2001; Sanford Bernhardt, 2004; Sanford Bernhardt & McNeil, 2008; Volchenkov, 2008). En la **Figura 5** es posible apreciar las características de los sistemas complejos aplicadas a los sistemas de infraestructura vistos como sistemas socio-técnicos.



**Figura 5. Características de sistemas complejos que tienen los sistemas de sistemas de infraestructura. Adaptado de Oughton et al. (2018).**

En la literatura se ha presentado una serie de enfoques de análisis para la modelación de sistemas complejos, que a diferencia de los métodos tradicionales; basados en el enfoque de la teoría general de sistemas (Johansen Bertoglio, 1997); son capaces de incluir la incertidumbre dentro de los modelos planteados (Rinaldi et al., 2001; Sanford Bernhardt, 2004). Los enfoques de modelación y simulación que han sido usados para modelar sistemas de infraestructura interdependientes han sido: el enfoque empírico, enfoque basado en la teoría económica, teoría de redes, simulación de sistemas dinámicos y modelación basada en agentes (Hasan & Foliente, 2015; Ouyang, 2014; Saidi et al., 2018). De los enfoques de modelación usados (ver **Figura 6**), solo algunos se utilizan con mayor frecuencia para la modelación de sistemas complejos, tal como, el enfoque basado en la teoría de redes, simulación de sistemas dinámicos y modelación basada en agentes. Los últimos métodos de modelación serán explicados a continuación.



**Figura 6. Enfoques de modelación usados para modelar sistemas de interdependientes de infraestructura**

Según el enfoque de redes, los sistemas de infraestructura o sus activos, así como los actores involucrados son representados por nodos, y las relaciones que existen entre ellos son representadas mediante las líneas que los conectan (Hasan & Foliente, 2015; Ouyang, 2014). Generalmente las relaciones entre nodos son representadas por reglas y probabilidades (Saidi et al., 2018). Un ejemplo del uso de este enfoque en la gestión de sistemas de infraestructura se muestra en Holden et al. (2013) y en Fu et al. (2016), donde se analizan las interdependencias en la operación y evolución de múltiples sistemas de infraestructura respectivamente.

La modelación de sistemas dinámicos, es un enfoque de arriba hacia abajo, es decir, que aborda el análisis de los sistemas desde lo general, siendo útil para analizar las relaciones de causa efecto entre los estados de diferentes sistemas o elementos de sistemas por medio de flujos de personas, dinero o materias primas, las que recrean situaciones reales a escala global (Hasan & Foliente, 2015; Saidi et al., 2018). Un ejemplo del uso de sistemas dinámicos en el análisis de sistemas de infraestructura se muestra en Rashedi & Hegazy (2016), donde este tipo de enfoque permite establecer relaciones de causa efecto entre los procesos de rehabilitación y deterioro de activos de infraestructura, incluyendo en el análisis factores como el presupuesto y la condición de los elementos. Otra área común donde son aplicados los sistemas dinámicos son los sistemas de infraestructura ligados al agua, donde es posible estudiar, entre otras cosas, diversos factores que afectan el financiamiento de la infraestructura (Abebe et al., 2021).

Por su parte la modelación basada en agentes, tiene la particularidad de permitir un análisis a partir del detalle de cada elemento o individuo involucrado en el problema, es decir, plantea un análisis de abajo hacia arriba, lo que permite obtener comportamientos emergentes debido a los atributos e interacciones entre los agentes (Hasan & Foliente, 2015; Ouyang, 2014; Saidi et al., 2018). Este

tipo de enfoque es ampliamente utilizado para estudiar el comportamiento de los usuarios y distintos actores involucrados en la gestión de sistemas de infraestructura (Osman, 2012; Sanford Bernhardt & McNeil, 2008), y desde un punto de vista más ligado a la gestión, presenta un análisis de cómo influyen las interdependencias organizacionales entre múltiples sistemas de infraestructura (North, 2001).

Los enfoques presentados anteriormente tienen en común que han sido ampliamente empleados para el estudio de sistemas interdependientes de infraestructura. A continuación, en la **Tabla 2** se muestran las características de cada enfoque de modelación previamente mencionado, lo que permite visualizar de mejor manera cada enfoque de forma comparativa.

Por medio de la **Tabla 2**, es posible notar que los atributos de cada enfoque, al ser diferentes, los hacen idóneos en distintos campos del estudio de las interdependencias. Por un lado, el enfoque de la teoría de redes tiene como elemento principal el ordenamiento de la red, por tanto la conectividad entre elementos y la relevancia de los mismos, permite estudiar de mejor manera las situaciones de riesgo y disrupciones de sistemas. El enfoque de sistemas dinámicos por su parte, permite representar de mejor manera las relaciones de causalidad entre sistemas, pero desde una escala global, con lo cual es una herramienta potente para analizar el efecto de un sistema sobre otro en el tiempo. Y aunque pueda ser utilizado para los mismos fines, la modelación basada en agentes además de permitir un análisis global, permite modelar los sistemas con mayor granularidad y detalle, semejante a cómo funcionan en la realidad, en donde existen distintos actores involucrados que influyen en el funcionamiento del sistema de infraestructura. Esto permite modelar los sistemas considerando la autonomía de cada elemento, pudiendo representar de mejor manera el componente humano o socio-técnico de los sistemas de infraestructura. Por su parte, diversos estudios refuerzan la idea de que la modelación basada en agentes es ideal para representar la interacción entre la infraestructura y las personas (Echaveguren et al., 2017; Sanford Bernhardt & McNeil, 2008). Tomando en cuenta el análisis comparativo de los distintos enfoques de modelación realizado en estudios previos y las recomendaciones de distintos autores, el presente estudio propone el uso de la modelación basada en agentes como herramienta de modelación.

Si bien la modelación basada en agentes es una herramienta que se ha usado para simular sistemas de infraestructura incluyendo el aspecto sistemas socio-técnico, existen pocos estudios ligados a la gestión integrada que hayan usado esta herramienta de modelación. No obstante algunos autores se han aventurado a aplicar la modelación basada en agentes en la integración de tipo vertical, es decir, aquella que solo considera la integración de actividades de intervención de un mismo sistema de infraestructura (Asgarpour et al., 2022), siendo necesario aún, desarrollar modelos para analizar la gestión integrada entre varios sistemas de infraestructura y que además incluyan el factor humano (e.g. las comunidades). Debido a lo anterior, este estudio plantea desarrollar una modelación basada en agentes para el estudio de los sistemas urbanos de transporte, de agua potable y aguas servidas. Esto permitirá aportar a la literatura y a la discusión del uso de esta herramienta en el campo de la gestión de sistemas de infraestructura.

**Tabla 2. Comparación entre métodos de modelación de sistemas complejos empleados para modelar sistemas interdependientes de infraestructura.**

<b>Característica</b>	<b>Teoría de redes</b>	<b>Sistemas dinámicos</b>	<b>Modelación basada en agentes</b>
Principal cualidad	Nodos representan un sistema y las líneas las relaciones entre ellos (Hasan & Foliente, 2015; Ouyang, 2014).	Compuesto de puntos de almacenamiento y flujos, los que representan las relaciones de causalidad entre sistemas.	Los sistemas son representados por elementos individuales e independientes, pero que se relacionan por medio de reglas.
Nivel de abstracción	Generalmente bajo, debido a que se modela al detalle (Hasan & Foliente, 2015).	Generalmente alto, dado que se modelan flujos entre sistemas a nivel general (Grigorvey, 2016)	Bajo porque se modela desde los componentes más básicos, pero alto por los supuestos en el comportamiento y relaciones entre agentes (Hasan & Foliente, 2015).
Nivel de gestión	Estratégico, porque puede servir para implementar políticas de gestión (e.g. riesgo y desastres).	Estratégico, dado que no es posible entender la dinámica a nivel de componente (Grigorvey, 2016)	Estratégico, de red y de proyecto, ya que posee mayor flexibilidad (Grigorvey, 2016).
Recurso computacional	Alto, cuando se quiere modelar relaciones no lineales o redes muy grandes (Ouyang, 2014).	Permite usar relaciones no lineales (Ouyang, 2014).	A mayor cantidad de agentes, mayor recurso computacional.
Relaciones entre elementos	Estáticas, dado que se determinan de un comienzo (Ouyang, 2014).	Existen relaciones de causalidad entre cantidades o estados de sistemas (Ouyang, 2014).	Las relaciones pueden ser estáticas o variables en el tiempo (Grigorvey, 2016).
Requerimientos de información	Elevado (Hasan & Foliente, 2015; Ouyang, 2014).	Elevado (Hasan & Foliente, 2015; Ouyang, 2014).	Puede haber información sensible difícil de obtener (Hasan & Foliente, 2015; Ouyang, 2014).
Usos frecuentes	Medición del riesgo y vulnerabilidad (Saidi et al., 2018). Esto debido a que la forma de la red y la interconexión entre elementos es lo importante.	Modelar los efectos en cascada entre sistemas producto de una disrupción o una nuevo comportamiento (e.g. política) (Ouyang, 2014).	Usado para representar interdependencias físicas y financieras, además del análisis de disrupciones (Hasan & Foliente, 2015; Saidi et al., 2018)

## **3 Objetivos**

### **3.1 Objetivo General**

El principal objetivo de este trabajo es evaluar criterios para implementar la gestión integrada entre sistemas urbanos de infraestructura de transporte, agua potable y aguas servidas, tomando en cuenta a la comunidad. Dado lo anterior, los objetivos específicos son:

### **3.2 Objetivos Específicos**

Analizar las características de proyectos de sistemas urbanos de infraestructura de transporte, agua potable y aguas servidas, para lograr una gestión integrada, considerando en el análisis a la comunidad local a través de múltiples métricas.

Desarrollar un modelo basado en agentes donde convivan los proyectos, la agencia administradora y la comunidad local, para evaluar los criterios y el impacto a la comunidad de la gestión integrada de los sistemas urbanos de transporte, agua potable y aguas servidas.

Evaluar la implementación de la gestión integrada entre los sistemas urbanos de transporte, agua potable y aguas servidas, incluyendo el rol de las comunidades locales.

## 4 Metodología

Para el logro de los objetivos de investigación, ha sido necesario elaborar una modelación basada en agentes. El proceso de elaboración del modelo, junto con la verificación y validación son detallados en la secciones siguientes. Antes y como forma de resumir la información, en la **Figura 7** se observa un esquema que resume la metodología utilizada en este estudio, desde la formulación, hasta la validación de resultados. En esta figura se ilustra también la relación de los métodos utilizados con las tareas de investigación y los objetivos específicos detallados en la sección 3.

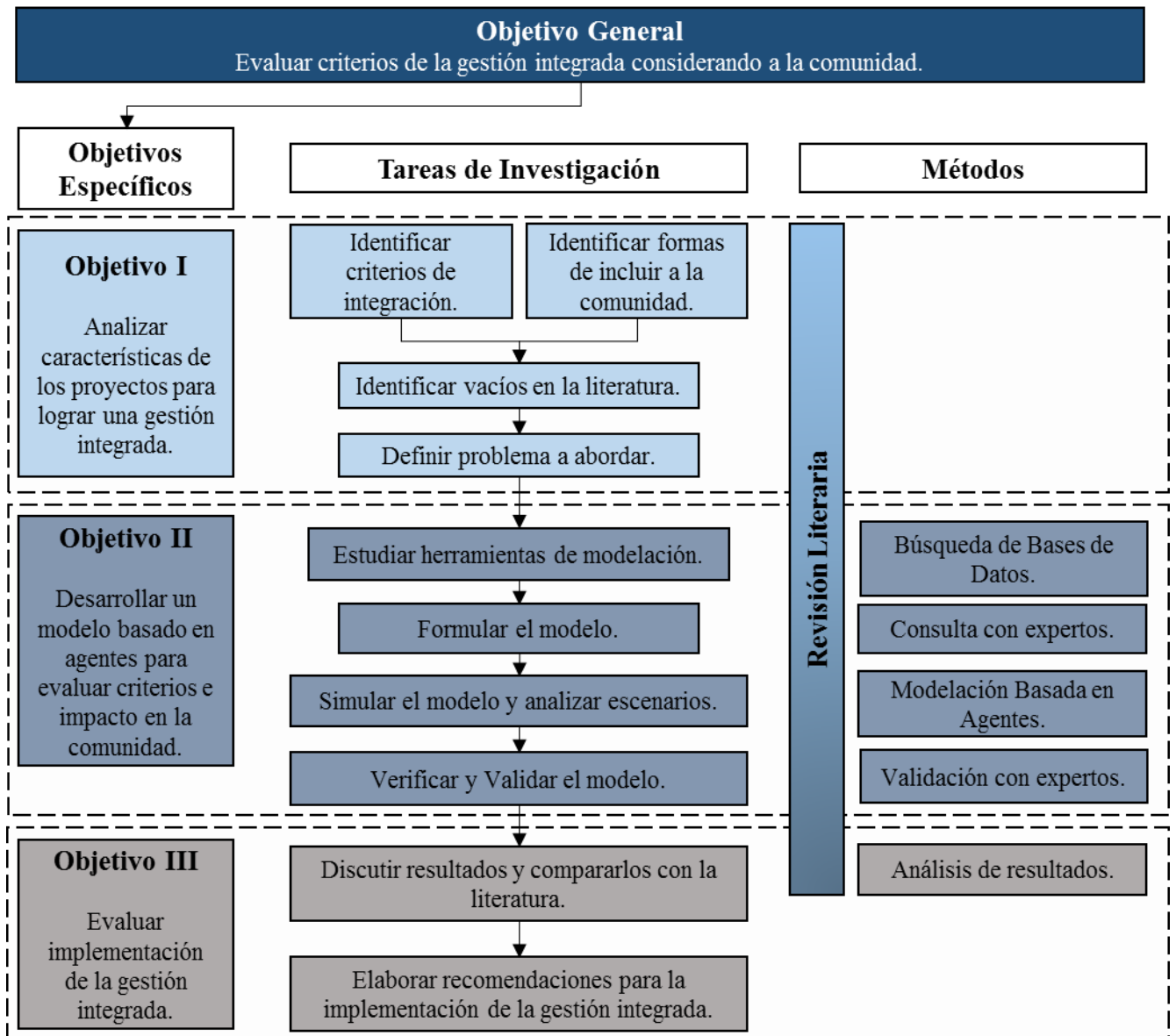


Figura 7. Resumen metodología.

## **4.1 Enfoque de modelación**

La modelación basada en agentes constituye uno de los métodos de modelación más recientes, debido entre otras cosas a, la necesidad de realizar modelos más detallados y a los avances en materia de las tecnologías de la información (Grigorvey, 2016). Este tipo de modelos se compone principalmente de elementos autónomos e independientes llamados agentes, los cuales poseen atributos y formas de relacionarse con otros agentes las cuales son determinadas por reglas estáticas o dinámicas (Macal & North, 2010). Los agentes pueden ser de diferentes tipos, tales como, personas, organizaciones, elementos físicos (activos de infraestructura) y no físicos (proyectos) (Grigorvey, 2016). Luego, el comportamiento de cada agente se modela por medio de diagramas de estado y eventos, los cuales pueden ser gatillados por el tiempo, condiciones específicas y por la interacción con otros agentes (Grigorvey, 2016; Macal & North, 2010).

Además de los agentes y sus interacciones, los modelos están compuestos por el entorno en el que los agentes interactúan. Este medio ambiente generalmente es continuo y puede corresponder a un entorno de dos dimensiones de un determinado tamaño, o a mapas del Sistemas de Información Geográfica (SIG). Dentro de este entorno los agentes pueden moverse, estar estáticos o incluso no pertenecer a él, pero si influir dentro de él y los otros agentes. Por otro lado, en lo que concierne a la simulación, los modelos basados en agentes generalmente son simulados en intervalos de tiempo continuos, los que pueden ir desde los segundos hasta los años (Macal & North, 2010). Además de lo anterior, dentro de la simulación pueden existir eventos que sean gatillados de forma discreta, los que representan acciones puntuales que son de interés para estudiar.

Dado lo anterior, en este trabajo de título se decide escoger la herramienta de Modelación Basada en Agentes, dado que al ser capaz de capturar tanto el detalle como la generalidad del problema, permite representar lo que ocurre en la realidad con la gestión integrada, en donde existe una gran dispersión de responsabilidades y donde los sistemas influyen en otros. Otro motivo, es que dentro del modelo que se realiza en este estudio, se incluye a las comunidades, situación en la cual la misma literatura aconseja emplear este tipo de herramientas (Sanford Bernhardt & McNeil, 2008). Por medio de la modelación, se espera representar escenarios más realistas, donde la gestión integrada pueda ser o no posible, identificando aquellos escenarios más favorables y analizando el efecto que la integración de la gestión podría tener en la comunidad que vive cerca de los proyectos de intervención. Todo lo anterior se llevará a cabo mediante el software AnyLogic 8.8.1, versión de estudiante, donde se modelarán distintos tipos de agentes dentro de un entorno de un mapa SIG.

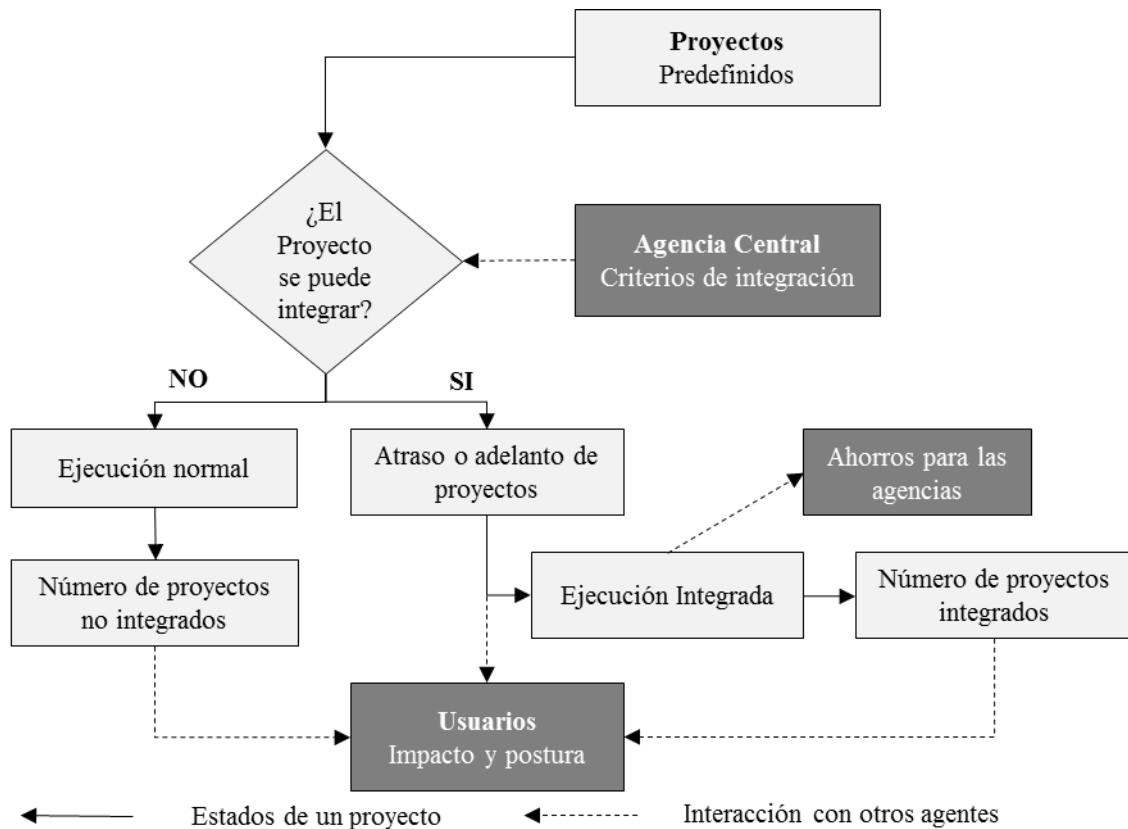
## **4.2 Formulación del modelo**

Antes de definir el problema de modelación, fue necesario definir el contexto dentro del cual se encontraría. En la literatura se ha definido la gestión integrada y se han trazado lineamientos relacionados a su operación y utilidad, no obstante, el sistema complejo o sistema de sistemas dentro del cual se encuentra el problema de modelación considera además, la necesidad de

incorporar las limitaciones típicas de escenarios no ideales dentro del cual se lleva a cabo la gestión, ya que además se acerca a los escenarios reales. La definición del sistema analizado fue realizada previamente por Araya & Vasquez (2022), donde son identificados los actores involucrados, limitaciones y desafíos propios de la realidad de un país en vías de desarrollo, mencionándose entre otros aspectos, los plazos acotados de planificación, los cuales muchas veces no superan los periodos políticos y por otro lado, identificando la fragmentación en la gestión de los sistemas de infraestructura, lo que se traduce en una gran dispersión del control del sistema analizado.

En la **Figura 8**, es posible ver la abstracción del modelo realizado. Los tipos de agentes que serán modelados son tres: proyectos de intervención, la agencia central y las comunidades. Los proyectos de intervención corresponden a proyectos de diferentes sistemas urbanos de infraestructura: el sistema de transporte, sistema de agua potable y aguas servidas. Estos proyectos, antes de ser ejecutados pasan por una etapa previa denominada en este caso, etapa de factibilidad. En esta etapa los proyectos son analizados bajo diferentes criterios (dependientes de cada escenario), para determinar si pueden o no ser integrados en su ejecución con otros proyectos. Luego del análisis realizado; el cual se representa por la intervención de un agente tipo agencia central; los proyectos son ejecutados de forma integrada o de forma independiente. Los proyectos que se pueden integrar deben pasar por una serie de procesos para determinar en primera instancia la fecha definitiva de ejecución, la cual depende del primer proyecto del grupo de proyectos integrados que vaya a ejecutarse.

Finalmente aquellos proyectos que se ejecuten de forma integrada lo harán a la par, reduciendo la cantidad total de tiempo en el cual hay intervenciones en la zona analizada. Esto último, es medido como forma de representar el impacto que la gestión integrada tiene en las comunidades. Ellas podrán apoyar u oponerse a la gestión de la infraestructura dependiendo de la cantidad de proyectos que se ejecuten cerca del lugar donde viven.



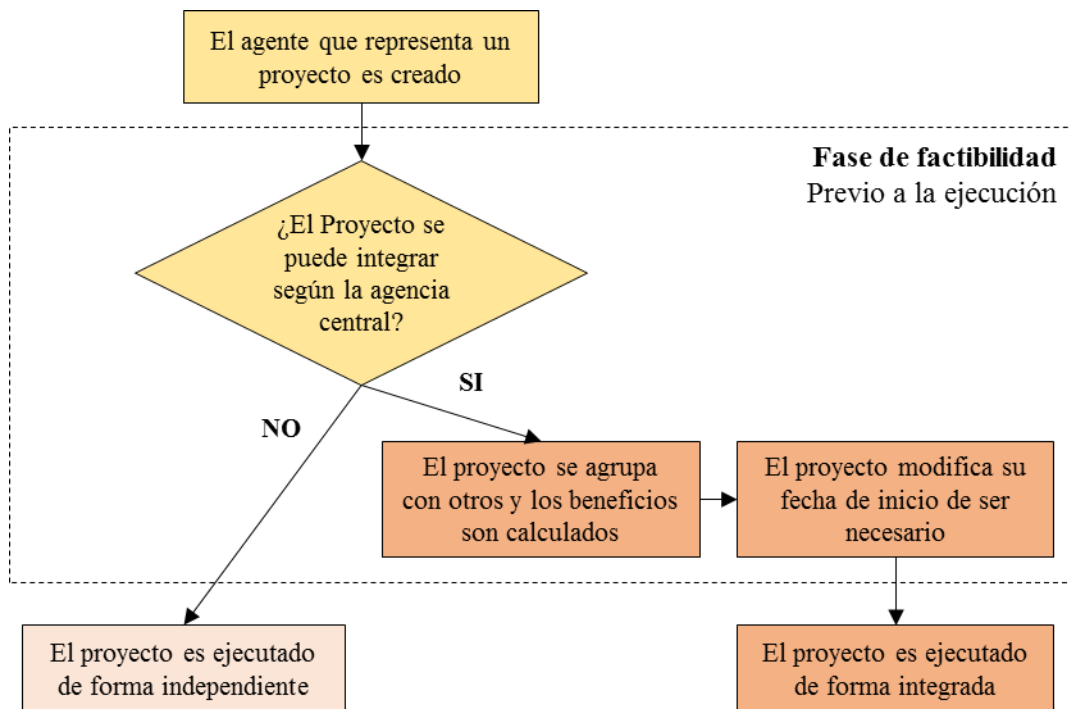
**Figura 8. Abstracción del modelo.**

#### 4.2.1 Proyectos de Intervención

Los agentes tipo proyecto representan las diferentes actividades de intervención que las agencias encargadas llevan a cabo sobre los sistemas analizados. Estas actividades de intervención ya están definidas, es decir, se sabe a qué tipo de actividad corresponden, la fecha en que serán ejecutadas y ya cuentan con el financiamiento correspondiente. Si bien, la mayoría de los estudios que ha abordado la gestión integrada lo ha hecho considerando los activos de infraestructura como elemento principal, también ha habido otros trabajos que han usado proyectos como el elemento de estudio (Kielhauser et al., 2017; Shahata et al., 2022). La diferencia entre ambos radica que cuando se analizan los activos, se debe incluir umbrales de intervención que dependen del estado y condición de estos, no obstante, esta información muchas veces no se encuentra, ni tampoco se dispone de curvas de deterioro y condición de los activos en el tiempo. En cambio, al trabajar con proyectos, los activos pasan a un segundo plano y las actividades en sí adquieren mayor relevancia en el análisis, dado que ya se cuenta con los tipos de proyectos que serán realizados y la fecha estimada en la que deberán ser ejecutados.

En la **Figura 9** se muestra el diagrama de estado de un agente tipo proyecto. En él se observa que existen dos grandes estados: factibilidad y ejecución. Se le denomina estado de factibilidad, al periodo previo a la ejecución del proyecto. Dado que estos proyectos ya han sido definidos, la fase

de diseño, planificación y obtención del financiamiento ya ha ocurrido, por tanto solo resta esta fase previa antes de la materialización del proyecto. Dentro del estado de factibilidad, los agentes tipo proyecto son analizados por la agencia central para determinar cuál de ellos puede integrarse con otros (crear agrupamientos de proyectos), lo cual depende de los criterios establecidos dentro de cada escenario (ver **Tabla 5**). Una vez establecido que los proyectos se pueden integrar, son calculados los beneficios de costos, y los proyectos pueden ver modificada su fecha de inicio. Posteriormente los proyectos son ejecutados de forma independiente o en forma integrada (en agrupamientos). Por último, en el estado de ejecución son calculadas las métricas que servirán para identificar la postura de los agentes tipo comunidad, lo que será visto más adelante (ver **Tabla 7**). Por último, los parámetros y variables de entrada de los agentes tipo proyecto son descritos en la **Tabla 3**. Estos parámetros sirven entre otras cosas para determinar si los proyectos pueden o no ser integrados con otros, dado que cuando la agencia central los analiza, compara sus parámetros; como la ubicación espacio-temporal (entre otros criterios); para determinar la posibilidad de integración.



**Figura 9. Diagrama de estado de un agente tipo proyecto**

**Tabla 3. Parámetros y variables de los agentes tipo proyecto**

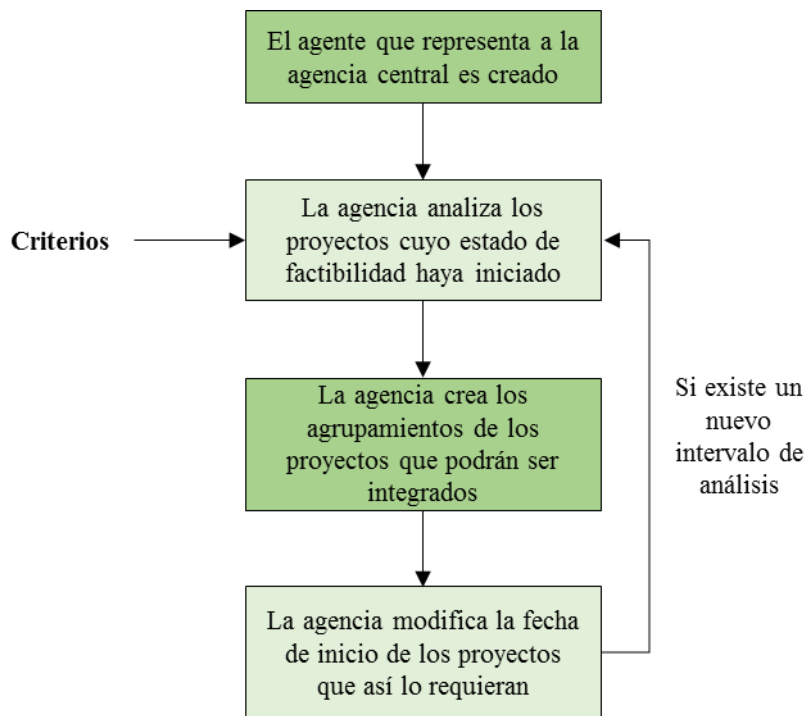
<b>Parámetro/Variable</b>	<b>Definición</b>
Sistema de Infraestructura	Corresponde al sistema de infraestructura al que corresponde el proyecto
Ubicación	Corresponde a la ubicación de cada proyecto en coordenadas GIS y se define como el punto central del proyecto, bajo la base de que cada proyecto es lineal.
Calle	Corresponde a la calle donde está ubicado el proyecto.
Número inicial	Lugar de la calle que indica uno de los límites del proyecto (numeración menor).
Número Final	Lugar de la calle que indica uno de los límites del proyecto (numeración mayor).
Fecha de inicio	Fecha en la que el proyecto inicia.
Fecha de término	Fecha en la que el proyecto finaliza.
Lugar	Se refiere a si el proyecto se lleva a cabo en la calzada o en la acera.
Tipo de proyecto	Se diferencia entre proyectos de reparación/renovación y mantenimiento/repación.
Categoría de la calle	La categoría de importancia en la que se encuentra la calle.
Duración de proyecto	Los días que tarda el proyecto en ejecutarse.
Periodo de factibilidad	Tiempo antes de la ejecución, corresponde al periodo en que el proyecto se encuentra en el estado de factibilidad.
Traslape	Metros lineales de traslape entre proyectos de intervención.
Costo	Costo de ejecutar el proyecto
Superficie	Área que comprende la ejecución del proyecto
Atraso o adelanto	Atraso o adelanto en la fecha de inicio de un proyecto.

#### 4.2.2 Agencia Central

En la práctica, la gestión integrada puede verse dificultada por la escasa coordinación entre las agencias de infraestructura, lo que reviste un gran desafío para su implementación (Halfawy, 2008). Si bien, el presente estudio intenta analizar la gestión integrada desde un punto de vista práctico, la inclusión de la incertidumbre en la coordinación de las agencias reviste mayor complejidad y no es el foco de la investigación. Por tanto, para crear el modelo, se usa uno de los hallazgos de Araya & Vasquez (2022), donde se indica según expertos que, la gestión integrada podría ser posible si se creara una agencia central que pudiera encargarse exclusivamente de la integración de los proyectos. Dado lo anterior, en este modelo solo se incluye un solo agente tipo agencia, el cual se encargará de analizar y de integrar los proyectos de los diferentes sistemas de infraestructura analizados. En la práctica, el agente tipo agencia central representa la serie de pasos administrativos previos necesarios para evaluar la integración de los proyectos analizados, por lo cual, también

representa la integración de múltiples agencias, si es que estas llevaran a cabo los procesos de forma ordenada y metódica.

En la **Figura 10** se observa el diagrama de estado de un agente tipo agencia central. Aquí es posible identificar que la integración de los proyectos depende en gran medida de los criterios que pueden ser usados para establecer si dos o más proyectos cumplen los requisitos para poder ser integrados (ver sección 4.3.1). Luego la agencia integradora, es la encargada de generar los agrupamientos de proyectos que se pueden integrar entre sí y también, es capaz de modificar la fecha de inicio de los proyectos, para que estos puedan ser ejecutados de forma conjunta a partir de la misma fecha.



**Figura 10. Diagrama de estado agente tipo agencia central**

### 4.2.3 Comunidad

Dado que los proyectos se ubican en una zona determinada, la cual puede corresponder a una ciudad o una zona de ella, resulta razonable considerar que en torno a los proyectos existen comunidades que puedan verse afectadas por las externalidades que ellos generan, tal como retrasos en la movilización de un lugar a otro y mayores costos por conceptos de traslado (Abu Samra et al., 2018). A esto también se le han sumado otras afectaciones como la contaminación acústica y las emisiones de partículas. Si bien estos parámetros reflejan el impacto que los proyectos pueden tener sobre las comunidades ubicadas en torno a ellos mismos, dentro de los objetivos de este estudio se considera determinar la postura de la comunidad en relación a la gestión integrada. No obstante, obtener los datos anteriores puede ser costoso y restrictivo, sobre todo, si la intención es analizar

la gestión integrada de manera global, dado que se debería hacer una encuesta masiva, de tal forma de que sea representativa del lugar de estudio. Por otro lado, cuando se habla de percepciones, las comunidades pueden basarse en diferentes factores, los cuales pueden estar sujetos a sus propias características, por ejemplo, la situación socio-económica (Araya et al., 2021). Dado que en este estudio no fue posible realizar una encuesta masiva de la percepción de las comunidades respecto de la gestión integrada, se propone estudiar la percepción de las comunidades por medio de parámetros cuantificables y medibles dentro del mismo modelo. Se realiza lo anterior por las siguientes razones:

- La percepción de las comunidades varía en el tiempo, y aunque una encuesta masiva sirve para caracterizar socio demográficamente a las comunidades, solo permite saber la percepción en un instante del tiempo.
- Se propone relacionar la percepción con parámetros que dependen de los proyectos y su ejecución, los que si varían en el tiempo.
- Por otro lado y en atención a una de las principales funciones de la gestión integrada, que es disminuir el doble trabajo (Amador & Magnuson, 2011; Halfawy, 2008), resulta razonable establecer una relación entre la cantidad de proyectos ejecutados y la percepción de las comunidades, lo cual también es sustentado por la opinión de expertos consultados.

Dentro de la modelación, los agentes tipo comunidad son creados y ubicados aleatoriamente dentro de la zona de análisis (ver **Tabla 4**), tal como se muestra en la **Figura 11**. Luego estos definen su postura en torno a la gestión de las agencias en base a las métricas de análisis que serán definidas en la sección 4.3.3. La definición de cada uno de los parámetros y variables de los agentes tipo comunidad se muestra en la **Tabla 4**.

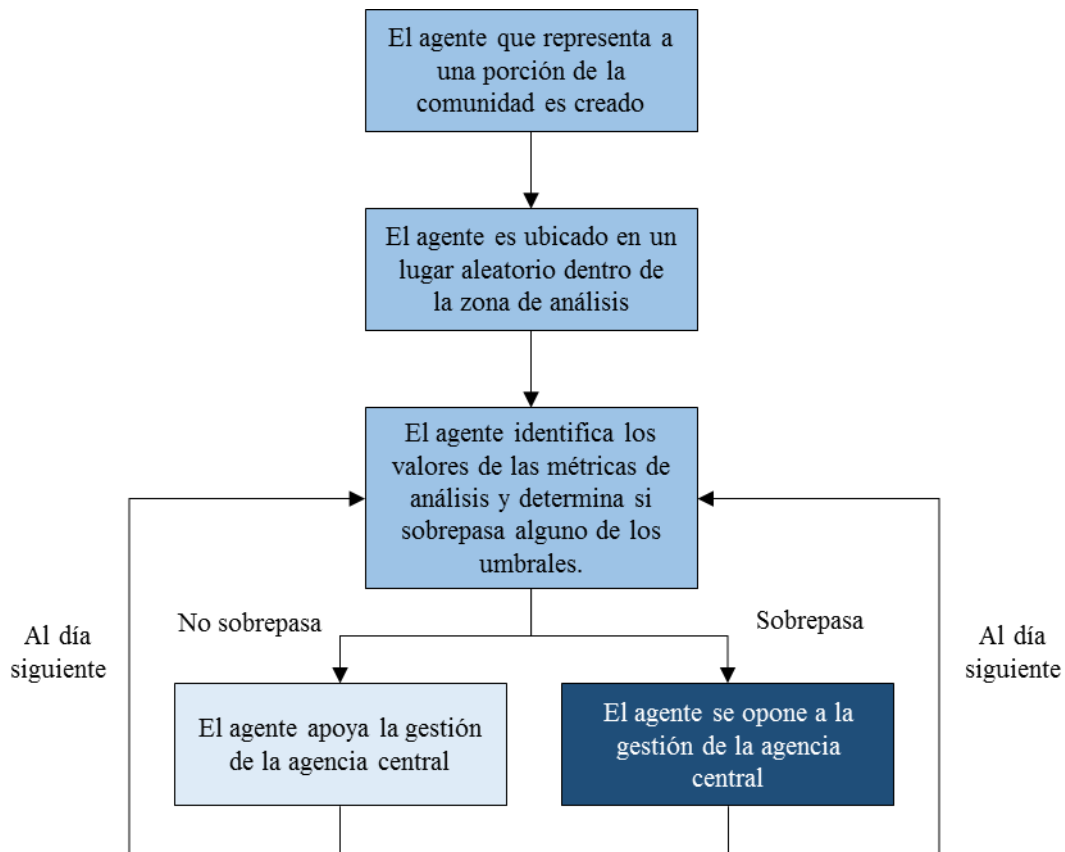
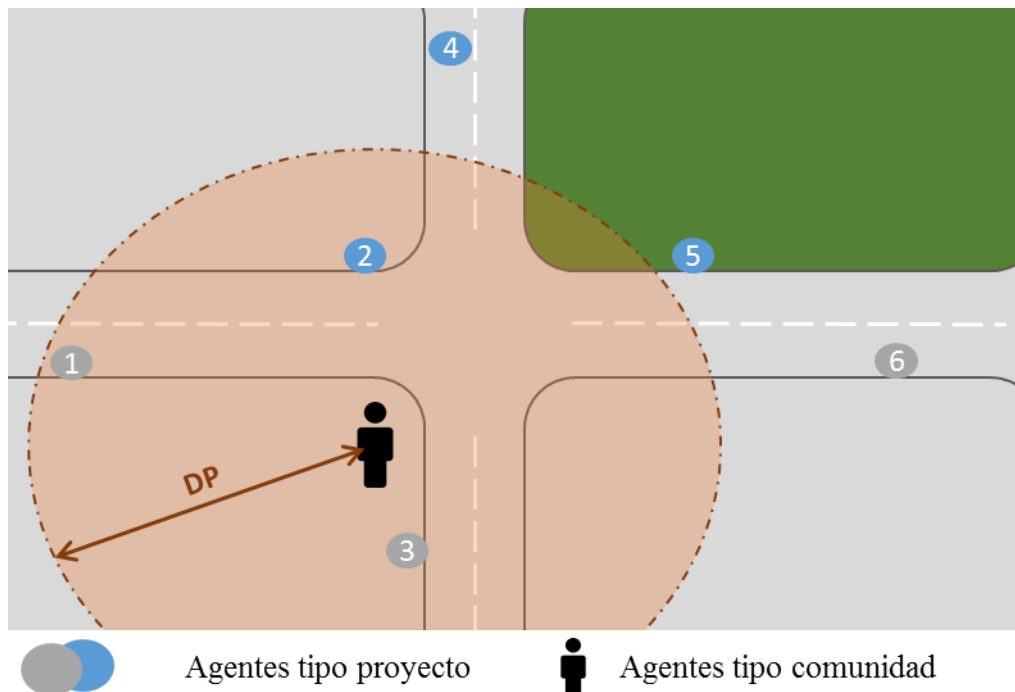


Figura 11. Diagrama de estado agentes tipo comunidad

Tabla 4. Parámetros y variables de los agentes tipo comunidad

Parámetro/Variable	Definición
Ubicación	Ubicación aleatoria del agente dentro del área de análisis (e.g. dentro de los límites de la ciudad).
Distancia de proximidad (DP)	Es aquella distancia que se considera para decir que un proyecto es cercano a un agente tipo comunidad.
Proyectos cercanos percibidos en el año	Valor que indica la cantidad de proyectos cercanos al agente ejecutados al año (dentro de la distancia de proximidad).
Días percibidos al año con proyectos	Valor que indica la cantidad de días al año con proyectos cercanos en ejecución (dentro de la distancia de proximidad).
Días continuos percibidos sin proyectos cerca	Número de días continuos en que no hay proyectos que se estén ejecutando cerca de un agente (dentro de la distancia de proximidad).

Es necesario clarificar que la distancia de proximidad consiste en el radio que describe la zona de afectación para cada agente, tal como se muestra en la **Figura 12**. Dentro de esta zona circular cada agente contabiliza los proyectos que son ejecutados en el tiempo, así como los días en que hay y no hay proyectos, de tal forma de obtener los valores para las variables descritas en la **Tabla 4**.



**Figura 12. Esquema ilustrativo distancia de proximidad**

#### 4.2.4 Fuente de información

Para la implementación del modelo, se debe disponer de una base de datos de proyectos de intervención que sean gestionados por más de una agencia. Estos deben estar distribuidos en una zona geográfica determinada y en un intervalo temporal específico. Para acceder a una base de datos de este tipo, resulta necesario contactar a cada una de las agencias que tienen a su cargo la administración de los sistemas urbanos de infraestructura que serán analizados. No obstante, por corresponder a una gran base de datos debido a que son proyectos de al menos 5 años, el acceso a información específica y detallada no es posible. Para ello, este estudio implementa el modelo con los datos que pueden ser entregados por la Dirección de Obras Municipales de una Municipalidad de Chile.

Una Dirección de Obras Municipales (DOM), está encargada de otorgar los permisos de construcción y urbanización dentro de la jurisdicción de una Municipalidad, y vela que todos los proyectos sean diseñados y ejecutados según la normativa comunal y nacional vigente (como el Plan Regulador Comunal y la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones). Este ente público debe fiscalizar no solo los proyectos ejecutados en terrenos privados, sino también en la vía pública de una comuna. Por tanto, también otorgan permisos a los proyectos de intervención de los diferentes sistemas de infraestructura de una ciudad.

Para acceder a la información, el método establecido consiste en solicitarla haciendo uso de la Ley de Transparencia (Ley N° 20.285 Sobre Acceso a La Información Pública, 2008). Esta es una ley

chilena que permite a diferentes organizaciones y personas acceder a la información que manejan las entidades públicas del país, por medio de una solicitud realizada por la plataforma web destinada a ello. Para la entrega de la información, el organismo público debe asegurarse de que los datos solicitados no correspondan a información sensible y su entrega o búsqueda no signifique un uso excesivo de recursos por parte de la misma institución.

Al acceder a la base de datos de alguna DOM, se cuenta con la información relacionada a los permisos de uso del espacio público. Para este modelo, se hace el supuesto de que cada permiso de construcción equivale a un proyecto diferente.

Desde el punto de vista de la fuente de información usada para representar el funcionamiento de las agencias, se opta por usar hallazgos anteriores (Araya & Vasquez, 2022) y realizar una simplificación, dado que el objetivo de este estudio no es estudiar las interacciones entre agencias, por tanto este agente funciona según las necesidades del modelo, aunque apegándose a los plazos típicos de la gestión de proyectos dentro de agencias chilenas.

Por último, dado que no se dispone de datos de encuestas masivas, la inclusión y comportamiento de la comunidad dentro del modelo se discute con diez expertos relacionados a la participación ciudadana en proyectos de infraestructura pública urbana. Estos expertos provienen de la academia (2), de organismos públicos (4), agencias privadas de infraestructura (2) y representantes de la comunidad (2), y tienen en promedio 17,4 años de experiencia profesional y comunitaria. Para conocer sus opiniones se llevan a cabo entrevistas semi-estructuradas, donde también se les muestra el modelo realizado sin la inclusión de los agentes tipo comunidad, instancia que también sirve para realizar la validación del modelo, lo que será abordado en la sección 4.4.

### **4.3 Implementación del Modelo**

Para la implementación del modelo basado en agentes, el número de agentes tipo proyecto depende del intervalo de tiempo analizado y del caso de estudio que sea escogido. El número de agencias corresponderá solo a uno, dado que este agente solo representa los procesos administrativos para llevar a cabo la integración, representando de forma ideal lo que ocurre en la realidad y tomando la idea de un estudio anterior (Araya & Vasquez, 2022). Por último, la cantidad de agentes tipo comunidad corresponde a 1000, de tal forma de representar a una muestra de las comunidades de la zona analizada, puesto que considerar un número igual al de la población equivaldría a un uso excesivo de recursos computacionales.

El entorno usado para la modelación corresponde a un mapa SIG correspondiente a una comuna de Chile, y los proyectos usados corresponderán a los entregados por la DOM de la misma comuna. Por último, los agentes tipo comunidad serán ubicados dentro de los límites de la zona de análisis de forma aleatoria.

La implementación del modelo consta de dos fases:

- El análisis de los criterios de integración.
- El análisis del impacto de la gestión integrada en las comunidades.

El análisis de los criterios de integración hace referencia al estudio de la efectividad del uso de diferentes criterios en la integración de proyectos. Se analizan distintos tipos de criterios, tanto los presentes en la literatura, como algunos criterios propuestos, de tal forma de representar lo variable que puede ser la efectividad de la gestión integrada dependiendo del contexto en el cual se podría llevar a cabo.

Por otro lado, el análisis del impacto de la gestión integrada en las comunidades consiste en, el estudio de los beneficios que la gestión integrada puede tener más allá del aspecto económico. En este caso, se estudian los beneficios que podrían ser percibidos por las comunidades que habitualmente tienen que convivir con proyectos de intervención en la vía pública. El análisis en esta fase se realiza tomando en cuenta algunos de los criterios analizados en la fase anterior.

Respecto de los detalles de la implementación del modelo, en primer lugar se presentan y describen los criterios que son utilizados para analizar la factibilidad de implementar la gestión integrada.

#### 4.3.1 Criterios de Integración

Uno de los aspectos fundamentales a estudiar son los diferentes criterios que se podrían utilizar como requisitos para que, dos o más proyectos de diferentes sistemas de infraestructura y diferentes agencias sean integrados. En la **Tabla 5** se muestran los criterios considerados en este estudio, dentro de los cuales se encuentran tanto los criterios identificados en la literatura, como los criterios que han sido propuestos. La finalidad del modelo es que, a través de la simulación se pueda identificar cuál de los criterios es el más conveniente y menos conveniente para realizar la integración. Lo anterior podrá ser usado para analizar la factibilidad de aplicar la gestión integrada, en realidades donde no todos los criterios puedan ser utilizados, o bien, por temas de cultura o preferencias de las agencias, solo sean usados algunos criterios para llevar a cabo la integración.

Al momento de construir los escenarios de simulación, se decide diferenciar entre los criterios, distinguiendo entre criterios primarios y secundarios. Los que se considera imprescindibles para establecer la integración de proyectos, se denominan criterios primarios y son: la cercanía espacial y temporal. Y los criterios prescindibles para llevar a cabo la integración son todos los demás y son definidos en este estudio como criterios secundarios. Luego, los escenarios de análisis contendrán obligatoriamente todos los criterios primarios y en ocasiones un criterio secundario.

En relación a los criterios primarios, en primer lugar se tiene el de cercanía espacial. Se debe tener en cuenta que para este estudio se definen 3 niveles para este criterio, el cual va desde el traslape entre proyectos, hasta una cercanía sin un traslape necesariamente. Cuando se habla de traslape, se tiene como requisito que los proyectos solo se pueden integrar si estos se traslapan entre sí, es decir, existe una zona lineal en común para las obras que se vayan a ejecutar, tal como se indica en la **Figura 13**. Por otro lado, también se establecen criterios espaciales menos restrictivos, es decir, se considera que dos proyectos se pueden integrar incluso si ambos proyectos no están traslapados. No obstante los proyectos deben estar suficientemente cerca el uno del otro para que se considere la integración, para ello se consideran los niveles de proyectos cercanos (1) y no necesariamente

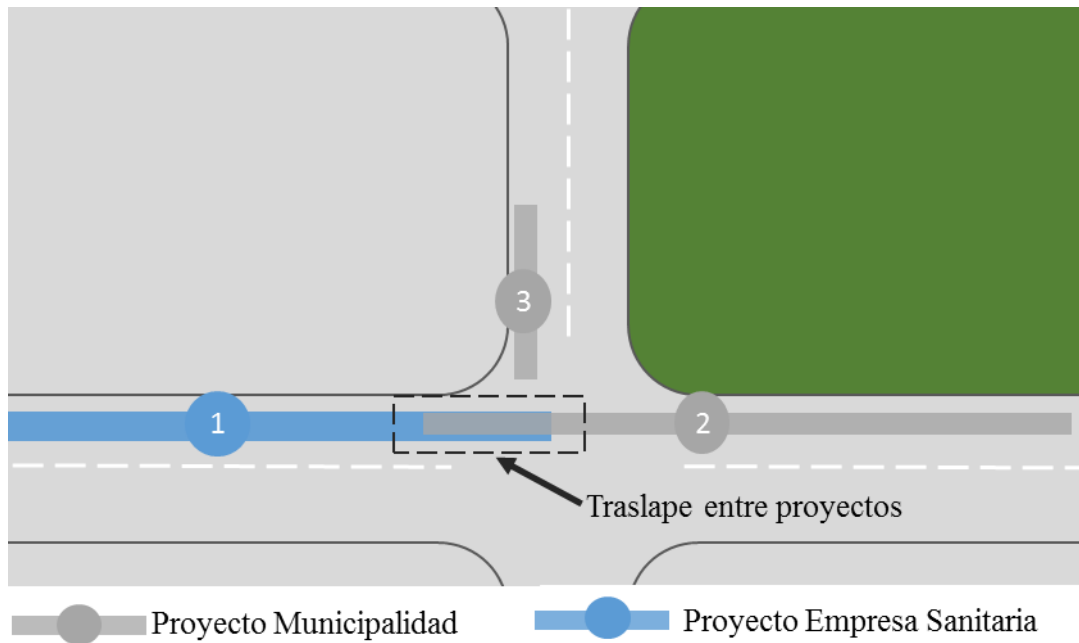
cercanos (2). Esto se define a partir del valor que toma la distancia límite entre proyectos ubicados en la misma calle (D1) y la distancia límite entre proyectos de calles diferentes (D2). Los rangos que pueden tener están explicados en la **Tabla 5**, y la ilustración de las distancias D1 y D2 se muestra en la **Figura 14**.

Por otro lado, el criterio de cercanía temporal se divide en intervalos de un año, o integración anual (A) y en un intervalo de cinco años o una integración quinquenal (Q). Se analizan ambos intervalos de cercanía temporal por corresponder a un escenario realista y similar a la literatura respectivamente.

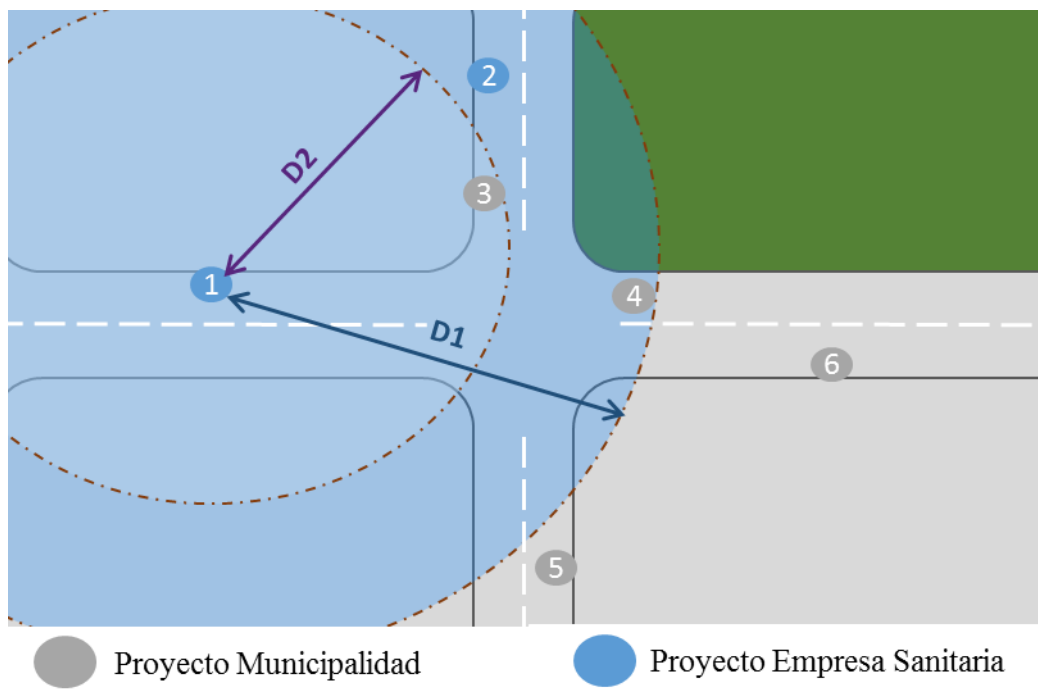
Todos los demás criterios se aplican de forma binaria, es decir, el escenario puede o no tener el criterio. A continuación, en la **Tabla 5** se explica cada uno de los criterios usados para la modelación.

#### 4.3.2 Supuestos del Modelo

Aunque el modelo construido en este estudio representa en parte la realidad, para su construcción se deben hacer algunos supuestos, los que representan o definen ciertos lineamientos del funcionamiento del mismo modelo. En la **Tabla 6** se presentan los supuestos del modelo.



**Figura 13. Esquema ilustrativo del traslape entre proyectos**



**Figura 14. Esquema ilustrativo D1 y D2**

**Tabla 5. Criterios de integración de proyectos**

<b>Criterio</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Definición</b>	<b>Rango</b>	<b>Fuente</b>	
Traslape entre proyectos	T	Integrar proyectos solo con traslape.	Si ó No necesariamente	Ver Tabla 1	
Cercanía espacial	1-2*	Distancia dentro de la misma calle (D1)	Distancia entre proyectos de la misma calle.	100 ó 500 metros	Ver Tabla 1
		Distancia de otras calles (D2)	Distancia entre proyectos ubicados en calles diferentes.	50 ó 100 metros	Ver Tabla 1
Intervalo temporal	A-Q	Intervalo de tiempo dentro del cual los proyectos se pueden integrar.	1 ó 5 años	Ver Tabla 1	
Tipo de proyecto	RC	Integrar proyectos de cierto tipo.	Solo renovación/construcción ó Todo tipo de proyecto	Ver Tabla 1	
Categoría de la calle	CA	Integrar proyectos solo en calles de cierta categoría.	Solo categoría A ó Todas las categorías	Propuesto	
Ubicación del proyecto	C	Integrar proyectos que se ejecuten en la calle o la acera	solo en la calle ó calle y acera	Propuesto	
Superficie del proyecto	S	Integrar proyectos de cierto tamaño. El tamaño de proyectos depende de diferencia de numeración de la calle en la que se sitúa el proyecto.	Mayores a 10 m <sup>2</sup> ó Todos los proyectos	Propuesto	
Duración de proyecto	D	Integrar proyectos de cierta duración.	Mayores a 10 días ó Todos los proyectos	Propuesto	
Costo del proyecto	CC	Integrar proyectos sobre cierto costo	Mayores a 1000 USD ó Todos los proyectos	Propuesto	

\*(1):D1=100/D2=50 - (2):D1=500/D2=100.

**Tabla 6. Supuestos de análisis**

<b>Parámetro/variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Justificación/referencia</b>
Ahorro	de 5%	Porcentaje de ahorro por proyecto cuando dos o más proyectos son integrados. El valor fue propuesto por Metayer et al. (2020)
Intervalo temporal de integración	1 o 5 años	Corresponde al intervalo temporal dentro del cual los proyectos pueden ser integrados. Los expertos mencionaron que un intervalo realista corresponde a 1 año, no obstante, como forma de ilustrar los beneficios, el modelo también se simula para un intervalo de integración de 5 años. Se define que cada proyecto es analizado por la agencia central 6 meses antes de que inicie el año dentro del cual será ejecutado, o bien 6 meses antes del inicio del año 1 de la simulación (para el caso de un intervalo de integración de 5 años). Se eligen 6 meses siguiendo la recomendación de expertos y para garantizar un buen funcionamiento de la simulación, no obstante, el modelo arrojaría los mismos resultados si esta fase fuera acortada, dado que solo se debe cumplir que se lleve a cabo antes del año presupuestario del proyecto.
Etapa de factibilidad	6 meses	Se define que cada proyecto es analizado por la agencia central 6 meses antes de que inicie el año dentro del cual será ejecutado, o bien 6 meses antes del inicio del año 1 de la simulación (para el caso de un intervalo de integración de 5 años). Se eligen 6 meses siguiendo la recomendación de expertos y para garantizar un buen funcionamiento de la simulación, no obstante, el modelo arrojaría los mismos resultados si esta fase fuera acortada, dado que solo se debe cumplir que se lleve a cabo antes del año presupuestario del proyecto.
Cantidad de proyectos que se pueden integrar entre sí	Todos los posibles	Corresponde a la cantidad máxima de proyectos que se podrían integrar entre si y por tanto ejecutar a partir de la misma fecha. Dado que este estudio no analiza los detalles de la integración según tipo de proyecto, este valor no se ve limitado.
Holgura para adelantar proyectos	de 1 día a 5 años	Corresponde a la flexibilidad que tienen los proyectos para ser adelantados, de tal forma de que sean ejecutados a partir de la misma fecha que los otros con los cuales se integrará. La flexibilidad tiene directa relación con el intervalo definido para la integración, siendo 1 año, el máximo recomendado por los expertos.
Costo de proyectos	de 51 a 859,959 USD	Corresponde al costo de cada proyecto. Los valores fueron obtenidos de la literatura (Metayer et al., 2020; Shahata et al., 2022) y por medio de la consulta a expertos.
Distancia de proximidad para los agentes tipo comunidad (DP)	500 metros	Consiste en la distancia hasta la cual un habitante considera que un proyecto ejecutado en la vía pública le está afectando. El valor fue recomendado por expertos y aunque no sea representativo, sirve como una métrica de análisis.

#### 4.3.3 Métricas

Se define las métricas, como los parámetros que son medidos en cada simulación realizada. Estos parámetros permiten comparar el desempeño y los beneficios de la gestión integrada en los

escenarios de análisis. Las métricas utilizadas en el modelo realizado en este estudio se encuentran en la **Tabla 7**.

La métrica fundamental de este estudio es la cantidad de proyectos integrados, es decir, identificar a partir de los criterios de integración cuantos de los proyectos que inicialmente eran ejecutados de forma independiente, pueden ser integrados.

Una vez que se determina que un proyecto será integrado, se une a un grupo de proyectos, los cuales al menos deben cumplir con los criterios de cercanía espacial y temporal indicada en el escenario de análisis. Estas agrupaciones o paquetes de proyectos se ejecutan al mismo tiempo en la simulación, bajo el supuesto de que los proyectos solo se pueden adelantar, no obstante en la práctica los proyectos pudieran adelantarse o atrasarse, dependiendo de la urgencia que tengan. Lamentablemente en este estudio no se pudo acceder a esa información, por lo cual no se puede determinar la urgencia de los proyectos de tal forma de definir el proyecto; del grupo de proyectos integrados; que sea el más urgente para que la fecha de los demás deba adecuarse a él. Por último, se menciona que para efectos del análisis global de la gestión integrada, la movilidad de los proyectos no constituye materia de análisis de este estudio, dado que esto apunta hacia el procedimiento de integración, lo que requiere disponer de una base de datos más detallada. No obstante, se opta por dejar el supuesto de adelantar proyectos, dado que se asume que adelantar proyectos es más factible que atrasarlos, debido a que hacer esto último podría afectar gravemente el estado de los activos intervenidos y poner en riesgo a la comunidad (Shahata & Zayed, 2016).

Una vez que se establecen los grupos de proyectos y se modifica la fecha de inicio de los proyectos que lo requieran, la cantidad de proyectos finales que se ejecutan en cada escenario simulado, se calcula como, la suma de los proyectos que son ejecutados de forma aislada para cada agencia y la cantidad de agrupamientos de proyectos integrados que se genera, tal como se indica en la siguiente ecuación.

$$NP = P_T + G$$

Donde:

$NP$ : Es el número final de proyectos

$P_T$ : Es el número de proyectos que fueron ejecutados de forma tradicional o independiente.

$G$ : es el número de agrupamientos de proyectos integrados, que incluye tanto proyectos de la municipalidad, como de la empresa sanitaria.

La cantidad final de proyectos ejecutados permite saber la efectividad del uso de los distintos criterios de integración que son analizados en este estudio. Junto con ello, la cantidad de proyectos integrados permite saber de forma preliminar, el ahorro que podría ser percibido por las agencias encargadas de cada proyecto.

Por otro lado, dado que se incluye a las comunidades, interesa medir cómo estos criterios afectan de forma final a los habitantes o agentes tipo comunidad en el modelo. Dado lo anterior, se mide la cantidad de proyectos totales que se ejecuta cerca de cada agente, de tal forma de representar las molestias que un ciudadano debería afrontar cada vez que hay proyectos cerca del lugar donde

habita. Lo anterior se mide por medio de los proyectos ejecutados al año cerca de un habitante, días al año con al menos un proyecto en ejecución cerca de un habitante y los días continuos sin proyectos.

Para definir los agentes que apoyan o rechazan la gestión se usarán los datos obtenidos de la misma simulación, dado que no se cuenta con datos de encuestas. Por ello, para definir la postura de cada agente, se utilizarán los valores promedio y desviación estándar de las métricas analizadas para todos los agentes durante todo el periodo de análisis. Es decir, se debe llevar a cabo simulaciones previas para determinar los valores finales de las métricas de impacto de la gestión integrada para cada agente tipo comunidad. En estas simulaciones se obtendrá la distribución de agentes según los valores finales de cada métrica, se determinará el promedio y la desviación estándar.

Así el umbral para cada agente por cada métrica, se define con una distribución triangular cuya moda es el promedio, cuyo valor mínimo es el promedio menos la desviación estándar y cuyo valor máximo es el promedio más la desviación estándar. Dado que se consideran tres métricas de impacto, el requisito para que un agente apoye o se oponga a la gestión depende de cada una de las métricas por separado, así basta que solo uno de los tres umbrales sea sobrepasado para que el agente se oponga a la gestión. Luego esto será analizado día a día para definir la cantidad de agentes que apoyan o se oponen a la gestión a lo largo del periodo de análisis, representando de esta forma la percepción de las comunidades durante el tiempo.

**Tabla 7. Métricas de análisis**

<b>Métrica</b>	<b>Definición</b>
Cantidad de proyectos no integrados	Número de proyectos que no pueden ser integrados.
Cantidad de proyectos integrados	Número de proyectos que pueden ser integrados, es decir, agrupados con otros y ejecutados a partir de la misma fecha.
Porcentaje de proyectos integrados	Número de proyectos integrados dividido en la cantidad de proyectos originales totales, multiplicado por 100.
Cantidad de agrupamientos	Número de paquetes de proyectos que son integrados y por tanto son ejecutados a partir de la misma fecha.
Cantidad final de proyectos ejecutados	Corresponde a la suma entre proyectos ejecutados de forma independiente, más los agrupamientos de proyectos.
Ahorros de costes para las agencias	Costo total por agencia en un escenario con integración, menos el costo sin integración.
Promedio del Número de Proyectos ejecutados al año (PNP)	Promedio de proyectos que son ejecutados en el año, cerca de un agente tipo comunidad.
Promedio de Días al año con al menos un Proyecto en ejecución (PDP)	Promedio de días al año en que al menos hay un proyecto que está siendo ejecutado cerca de un agente tipo comunidad.
Promedio de Días continuos Sin proyectos (PDS)	Es el número de días que en promedio un agente tipo comunidad no tiene proyectos cercanos.
Porcentaje de agentes que apoyan la gestión	Porcentaje de agentes cuyos umbrales no han sido sobrepasados y por tanto apoyan la gestión de la agencia.

#### 4.3.4 Caso Estudio

El modelo será implementado finalmente usando los datos de los proyectos de en un caso estudio ubicado en la comuna de Providencia, Región Metropolitana de Chile. Providencia es una de las primeras comunas de Santiago, fundada el año 1897 y actualmente tiene una población de 140.000 habitantes aproximadamente. La antigüedad y población de la comuna la hacen ideal para llevar a cabo el modelo, debido a que la infraestructura presenta una cantidad estable de intervenciones y la cantidad de habitantes que representa cada agente en el modelo es de aproximadamente 140. Lo anterior, permite obtener resultados realistas y representativos.

La base de datos utilizada es obtenida mediante una solicitud por Ley de Transparencia a la DOM de Providencia, y comprende proyectos entre 2017 y 2021, gestionados tanto por la misma Municipalidad de Providencia (2071 proyectos), como por la Empresa Sanitaria que opera en la

misma comuna (1144 proyectos). La Municipalidad tiene a su cargo los proyectos que afectan la infraestructura urbana de transporte (calles y aceras) y la Empresa Sanitaria tiene a su cargo los proyectos que afectan las redes de agua potable y alcantarillado.

Los proyectos corresponden a los permisos de obras en espacios públicos solicitados a la DOM de Providencia. Cada permiso tiene distintas características, luego la distribución de los proyectos según sus características se muestra en la **Tabla 8**. Todos los datos fueron obtenidos por la base de datos entregada, excepto la categoría de la calle y el costo. Para determinar la categoría de la calle se revisó las ordenanzas de derechos municipales de Providencia, y el costo fue obtenido a partir de datos de la literatura junto con recomendaciones de expertos, tal como se detalla en la **Tabla 9**. En la misma **Tabla 9**, también se detalla el tipo de intervención que se realiza, además del tipo de activo que se está interviniendo, según la agencia encargada de los proyectos.

**Tabla 8. Características de los proyectos**

<b>Característica</b>	<b>Detalle</b>	<b>Municipalidad</b>	<b>Empresa Sanitaria</b>
Año	2017	129	115
	2018	676	101
	2019	642	206
	2020	275	333
	2021	349	389
Categoría	A	1052	597
	B	229	155
	C	790	392
Ubicación	Calzada	741	241
	Acera	1330	903
Tipo	Renovación/construcción	1686	380
	Inspección/Mantenimiento/Reparación	385	764
Superficie	Menor a 10m <sup>2</sup>	1205	780
	Mayor o igual a 10m <sup>2</sup>	866	364
Duración	Menor a 10 días	632	995
	Mayor o igual a 10 días	1439	149
Costo*	Menor a 1000USD	1070	928
	Mayor o igual a 1000USD	1001	216

\* El detalle de la distribución de los proyectos según el tipo de intervención se muestra en la Tabla 9.

\*\* El detalle del cálculo del costo se indica en la Tabla 9.

Como no fue posible obtener el costo de los proyectos, se define un rango de precios relacionado a su unidad de superficie o extensión. Este rango de precios proviene de la literatura (Metayer et al., 2020; Shahata et al., 2022) y también de información recopilada para este estudio, la cual fue entregada por expertos. El precio final de los proyectos es definido de forma aleatoria, es decir, para un proyecto de un determinado tipo, su precio será definido al azar dentro del rango indicado en la tabla, el cual se multiplica por la extensión de este (superficie del proyecto o extensión lineal). Esto difiere para el caso del costo por pavimentación y reparación en calzadas y aceras, dado que

el costo unitario de los proyectos en estos casos dependerá de la categoría de la calle, siendo las calzadas y aceras de una calle tipo A la que tenga un costo mayor. En la **Tabla 9**, es posible observar el rango de precios considerado para los proyectos del modelo realizado.

**Tabla 9.** Proyectos y sus costos según tipo de proyecto e intervención realizada

Agencia	Tipo de Proyecto	Intervención	No.	Costo USD	Unidad
Municipalidad	Inspección/ Mantenimiento/ Reparación	Mantenimiento alumbrado público y semáforos	26	[50-100]	\$
		Reparación de otros activos de transporte	359	[100-2000]	\$
	Renovación/ Construcción	Renovación pavimento de calzada	579	[166-214]	\$/m2
		Renovación pavimento de acera	1107	[83-107]	\$/m2
Empresa Sanitaria	Inspección/ Mantenimiento/ Reparación	Inspección	56	[50-150]	\$/m
		Reparación tubería de agua potable	618	[100-300]	\$/m
		Reparación cámara agua potable	5	[120-150]	\$
		Reparación cámara aguas servidas	12	[150-200]	\$
		Reparación de calzada	31	[25-60]	\$/m2
		Reparación de acera	42	[12-30]	\$/m2
	Renovación/ Construcción	Construcción de tubería de agua potable	209	[100-1800]	\$/m
		Construcción de cámara de agua potable	131	[200-400]	\$
		Construcción de colector de aguas servidas	22	[350-2200]	\$/m
		Construcción cámara de aguas servidas	18	[250-1000]	\$

Finalmente en la **Figura 15** se ilustra el ambiente SIG de modelación que fue usado. Los proyectos se ubican dentro de los límites urbanos de la comuna de Providencia (área delineada), al igual que los agentes tipo comunidad, cuya ubicación es definida de forma aleatoria dentro de la misma área al inicio de la modelación. Se omite la porción de la comuna correspondiente a parte del Parque Metropolitano, dado que esta zona corresponde solo a áreas verdes, no hay viviendas y los proyectos de la base de datos obtenida no indicaban una ubicación específica dentro del parque metropolitano.

Por otro lado, aunque la agencia central no posee una ubicación dentro del ambiente de modelación, se muestra en la **Figura 15** de forma ilustrativa.

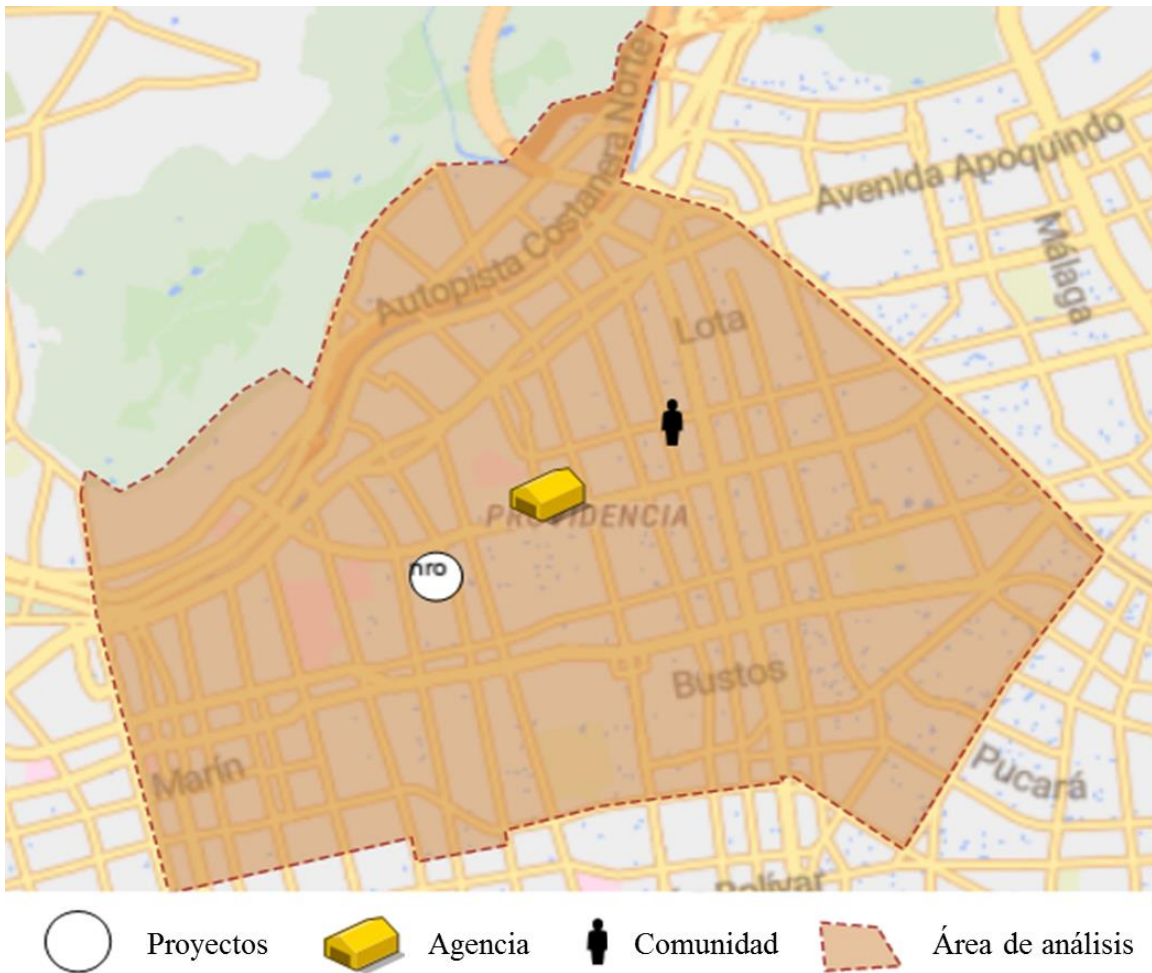


Figura 15. Agentes en ambiente SIG de modelación en AnyLogic 8.8.1

#### 4.3.5 Escenarios de análisis

Dado que serán analizados los criterios de integración y su efecto sobre la integración de proyectos, se considera en total 42 escenarios, de los cuales 6 contienen solo una combinación de criterios primarios y 36 tienen una combinación de los criterios primarios más uno secundario. En la **Tabla 10** se presentan los escenarios de modelación.

**Tabla 10.** Matriz de escenarios de análisis por criterio

Criterios Secundarios	Criterios Primarios					
	Integración anual 5 intervalos de 1 año (A)			Integración quinquenal 1 intervalo de 5 años (Q)		
	Con Traslape	D1=100 D2=50 (1)	D1=500 D2=100 (2)	Con Traslape	D1=100 D2=50 (1)	D1=500 D2=100 (2)
-	AT	A1	A2	QT	Q1	Q2
Solo proyectos de Renovación/Construcción (RC)	AT-RC	A1-RC	A2-RC	QT-RC	Q1-RC	Q2-RC
Solo en calles categoría A (CA)	AT-CA	A1-CA	A2-CA	QT-CA	Q1-CA	Q2-CA
Solo en calzadas (C)	AT-C	A1-C	A2-C	QT-CA	Q1-CA	Q2-C
Solo superficie >10m <sup>2</sup> (S)	AT-S	A1-S	A2-S	QT-S	Q1-S	Q2-S
Solo duración >10 días (D)	AT-D	A1-D	A2-D	QT-D	Q1-D	Q2-D
Solo con un costo mayor a 1000 USD (CC)	AT-CC	A1-CC	A2-CC	QT-CC	Q1-CC	Q2-CC

#### 4.4 Verificación y Validación

La etapa de validación y verificación de los modelos es sumamente importante, pues permite acreditar si un modelo es o no representativo de la realidad y si su propio funcionamiento es lógico. En este sentido se debe hacer la distinción entre verificación y validación, dado que la primera se refiere a la coherencia de la estructura del modelo y su relación con el objetivo de la implementación y la segunda, se refiere a los resultados que se obtienen del modelo, los cuales deberían ajustarse a lo previsto (Sargent, 2013). Comúnmente una manera de saber si un modelo es válido o no, es compararlo con el fenómeno que se está estudiando. Esto en algunas ocasiones, como la del presente estudio, podría significar un uso excesivo de recursos para obtener datos reales y precisos (Sargent, 2013), sin mencionar que, la gestión integrada es un tema prácticamente inexistente en Chile.

Para verificar el modelo, los datos obtenidos son discutidos entre quien realiza el presente estudio y el académico que le supervisa. Para la validación, dado que no se puede contar con datos

empíricos, se opta por utilizar la prueba de validez aparente, una de las pruebas teoría-modelo que se usa en la literatura para determinar la validez de los modelos (Cooley & Solano, 2011).

La prueba de validación usada consiste en entrevistar expertos relacionados con la gestión de sistemas de infraestructura y participación ciudadana, a quienes se les explica el funcionamiento del modelo y se les pregunta acerca de su validez. Lo anterior se realiza al mismo tiempo en que se les consulta a los expertos por la forma en que se podía incluir a las comunidades, tal como se indica en la sección 4.2.4.

## **4.5 Limitaciones del Modelo**

Antes de presentar los resultados, es necesario reconocer las limitaciones que este modelo tiene. Es así, como dentro de las limitaciones se encuentra la poca precisión en el ahorro generado por la integración de proyectos, dado que estos se asumen como un porcentaje fijo (5%). No obstante, esto es remediado mediante el análisis de sensibilidad realizado al porcentaje de ahorro, lo que entrega un rango posible, el cual es validado por los expertos.

Otras limitaciones provienen de los supuestos realizados para llevar a cabo el modelo. En primer lugar se encuentra la agencia central, la cual se incluye como forma de representar un comportamiento ideal entre diferentes agencias, lo que en la práctica no ocurre de la misma manera. Desde el punto de vista de las comunidades, los supuestos empleados pueden no ser representativos, debido a que no fueron recomendados por la misma comunidad. Por otro lado, este modelo no entrega el procedimiento práctico para que dos o más proyectos sean integrados, dado que no se cuenta con todo el detalle de las actividades e ítems presupuestarios de cada proyecto. Y por último, debido a la complejidad del problema abordado y a lo reciente de la temática de la gestión integrada, no es posible contrastar los datos obtenidos con datos reales del caso de estudio analizado.

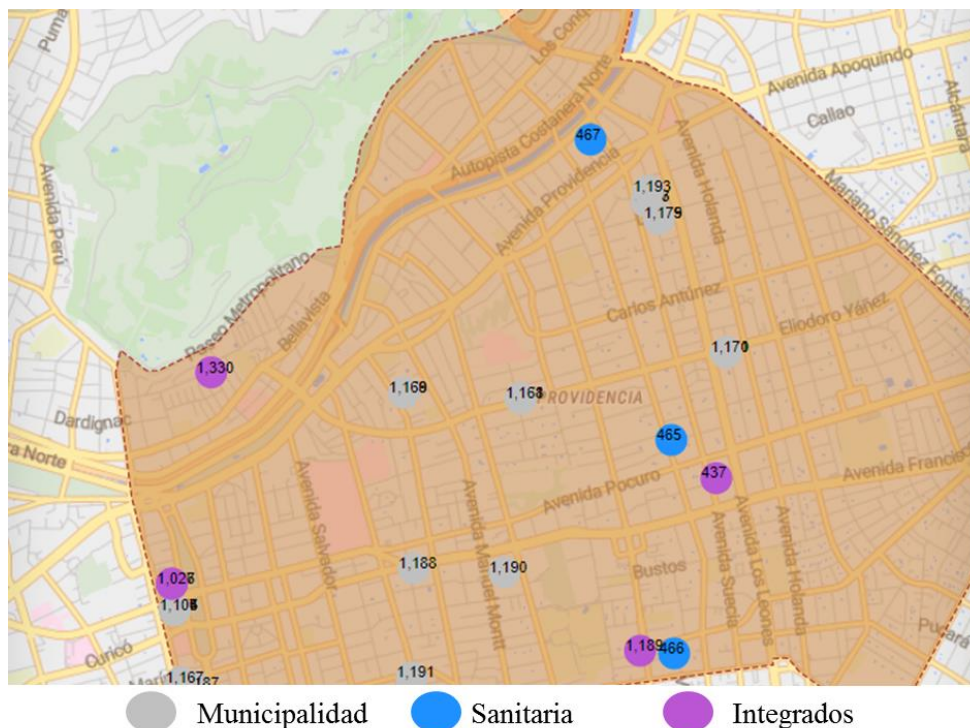
Si bien, existe un set de limitaciones de este estudio, las métricas y supuestos realizados están respaldados por expertos, tal como lo recomienda la literatura. Y por otro lado, lo que en este estudio corresponde a una limitación, abre la posibilidad para futuras investigaciones en el área.

## 5 Resultados

En esta sección se muestran los resultados obtenidos a partir de la modelación basada en agentes, cuya formulación e implementación fue explicada en la sección anterior. Los resultados se dividen en dos grandes secciones: primero, el análisis de criterios de integración y su efecto en las agencias, y segundo, el estudio del impacto y percepción de las comunidades.

### 5.1 Simulación de los criterios de integración

Las simulaciones en esta fase de la modelación se realizan considerando la base de datos inicial de proyectos de la municipalidad y de la empresa sanitaria. Los proyectos se ubican en la zona urbana de la comuna de Providencia, tal como se ilustra en la **Figura 16**, donde es posible diferenciar los proyectos según la agencia de la cual provienen, y si son o no integrados al momento de su ejecución. En la simulación, los proyectos se hacen visibles solo cuando se empiezan a ejecutar, es decir, cuando el tiempo de la simulación, es igual al tiempo de inicio de cada proyecto. Luego, el momento en que cada proyecto comienza a realizarse puede verse modificado dependiendo si, el proyecto se ejecuta de manera integrada o no.



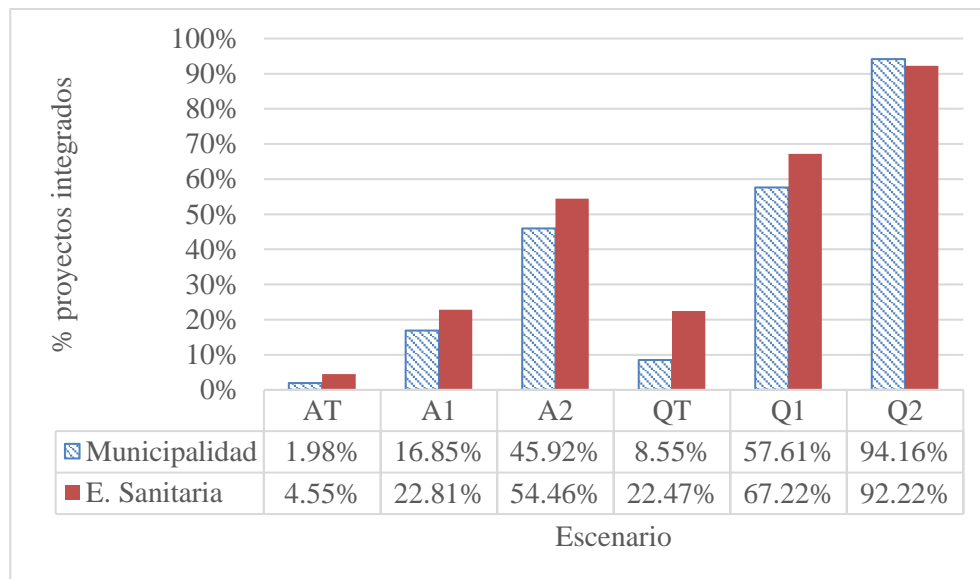
**Figura 16. Agentes tipo proyecto en la simulación.**

Para el análisis de los criterios de integración, en primer lugar, se muestran los efectos que cada uno de los criterios tiene sobre la efectividad de la integración de proyectos, lo que se mide con el porcentaje de integración, es decir, la porción de los proyectos que dadas las condiciones se pueden integrar con otros. Para mayor claridad de los resultados, estos se presentan para cada agencia por separado, así el porcentaje referido a una agencia, se obtiene a partir de los proyectos totales de esa agencia.

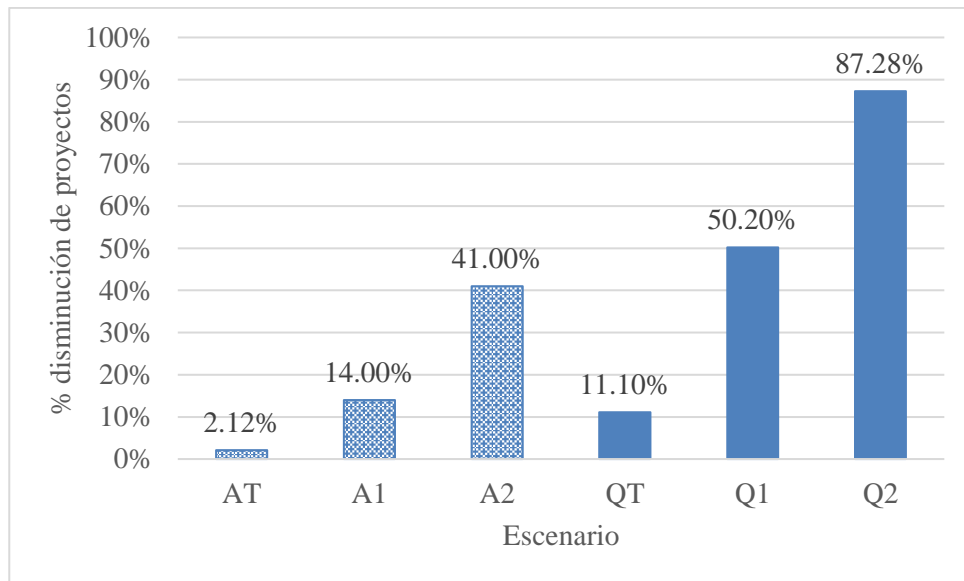
Por otro lado, también se presenta uno de los beneficios que la gestión integrada puede tener en las agencias, es decir, el ahorro en el costo de las obras realizadas.

### 5.1.1 Criterios primarios

Los criterios se dividen en criterios primarios y secundarios, tal como fue explicado en la sección 4.2.2. Dentro del análisis de los criterios primarios, en la **Figura 17** se muestra el porcentaje de integración de proyectos y la **Figura 18** el porcentaje de reducción de proyectos totales.



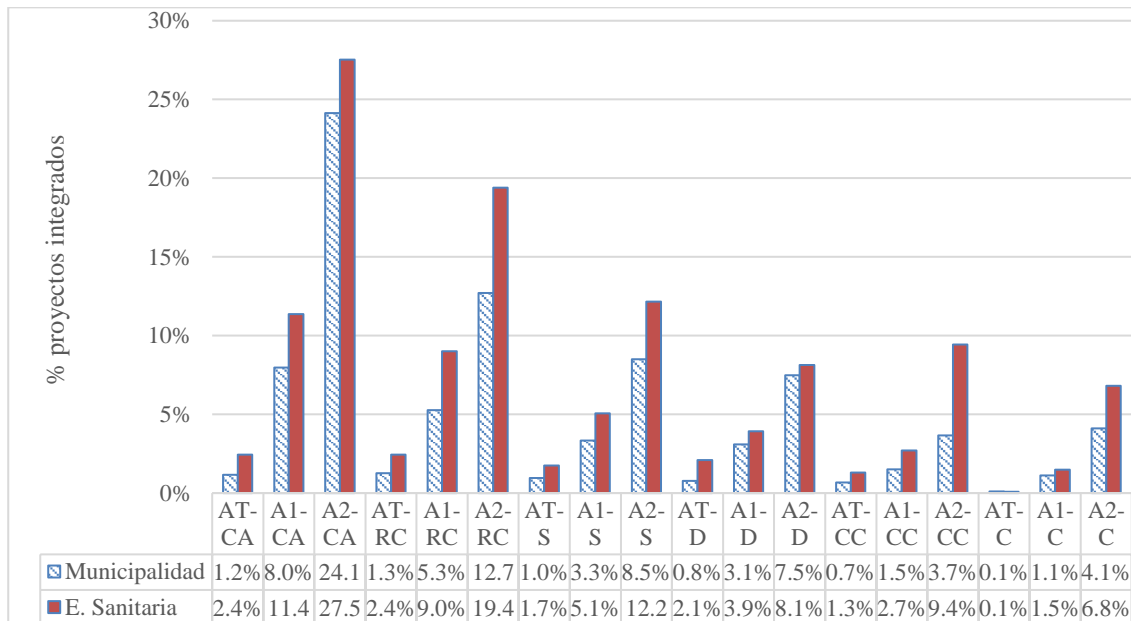
**Figura 17. Porcentaje de proyectos integrados por agencia – criterios primarios**



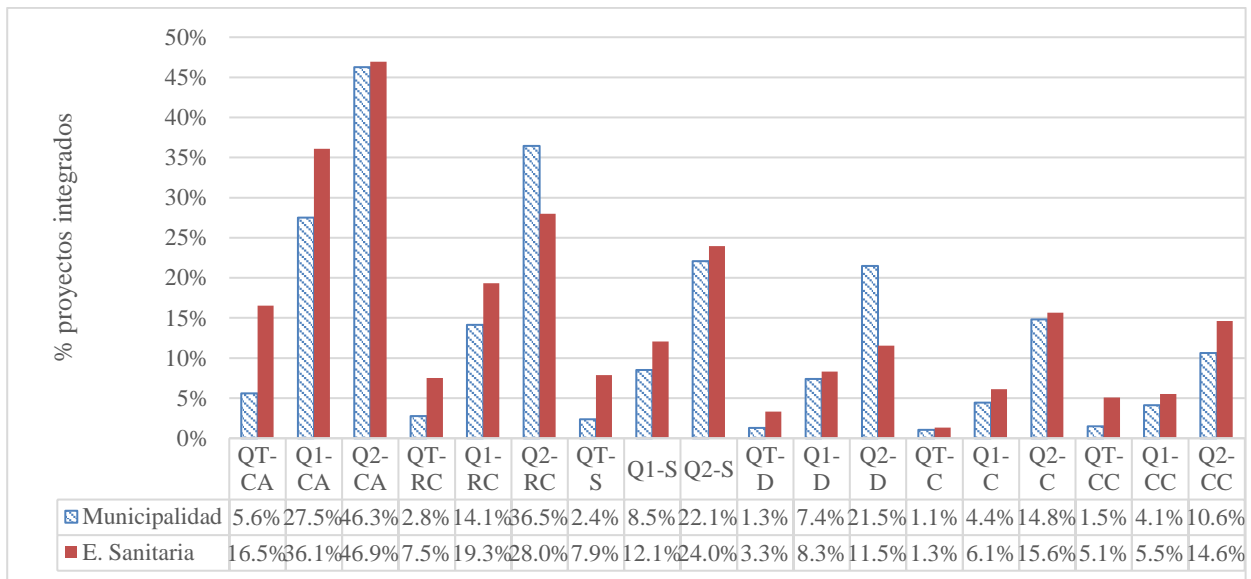
**Figura 18. Porcentaje de disminución de proyectos totales - criterios primarios**

### 5.1.2 Criterios secundarios

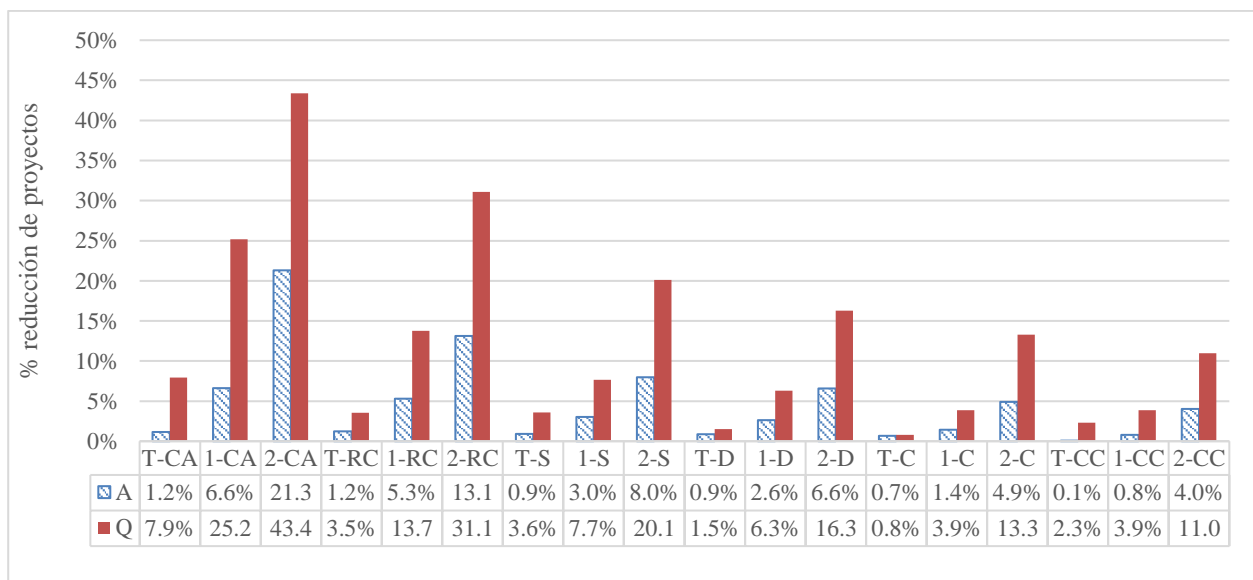
Se repite el mismo análisis anterior, pero esta vez además de considerar los criterios primarios, también se consideran los criterios secundarios, pero de forma individual. Es así como en la **Figura 19** y la **Figura 20** se muestra el porcentaje de integración de proyectos, y el porcentaje de reducción de proyectos totales se ilustra en la **Figura 21**.



**Figura 19. Porcentaje de proyectos integrados por agencia escenarios A – criterios secundarios**



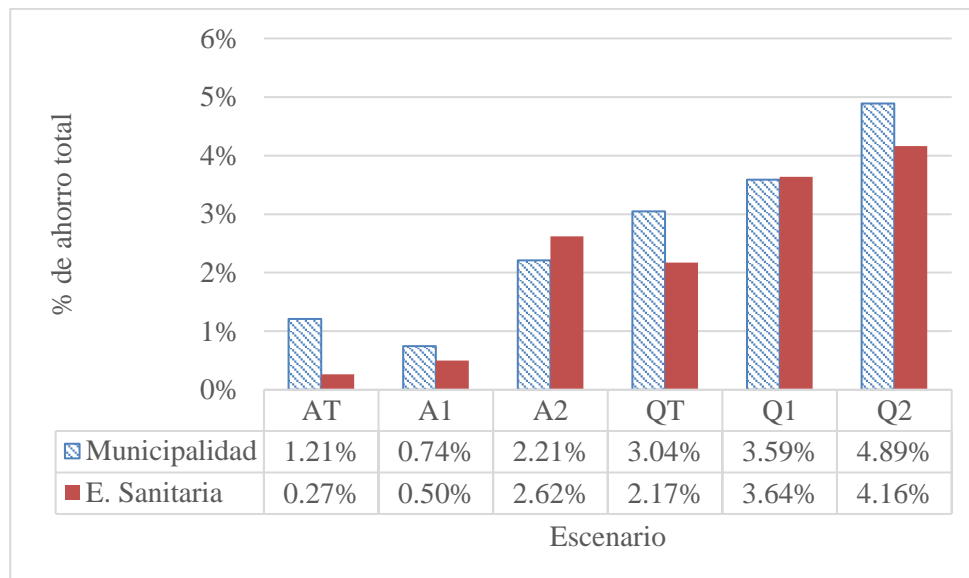
**Figura 20. Porcentaje de proyectos integrados por agencia escenarios Q – criterios secundarios**



**Figura 21. Porcentaje de disminución de proyectos totales - criterios secundarios**

### 5.1.3 Beneficios económicos de criterios primarios

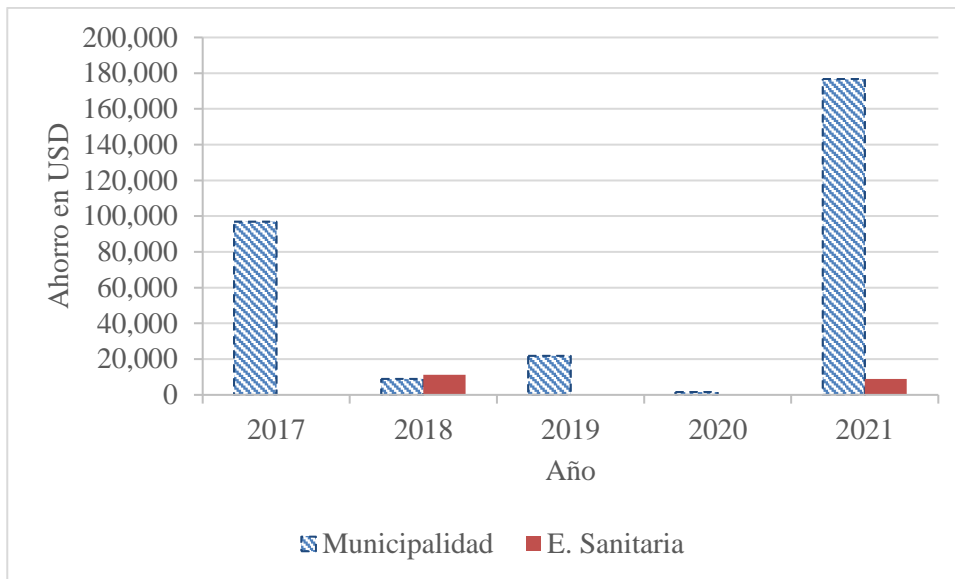
En la **Figura 22** se muestra el análisis de los beneficios económicos de los escenarios con integración con criterios primarios, lo que se muestra en términos porcentuales. Por otro lado, en la **Tabla 11** se entregan los resultados del presupuesto en USD para cada escenario simulado. Luego, en la **Figura 23** y la **Figura 24** se compara el ahorro anual para los escenarios con traslape y con integración anual (AT) y quinquenal (QT) respectivamente. Se debe tener en consideración que los ahorros negativos significan un gasto extra para la agencia.



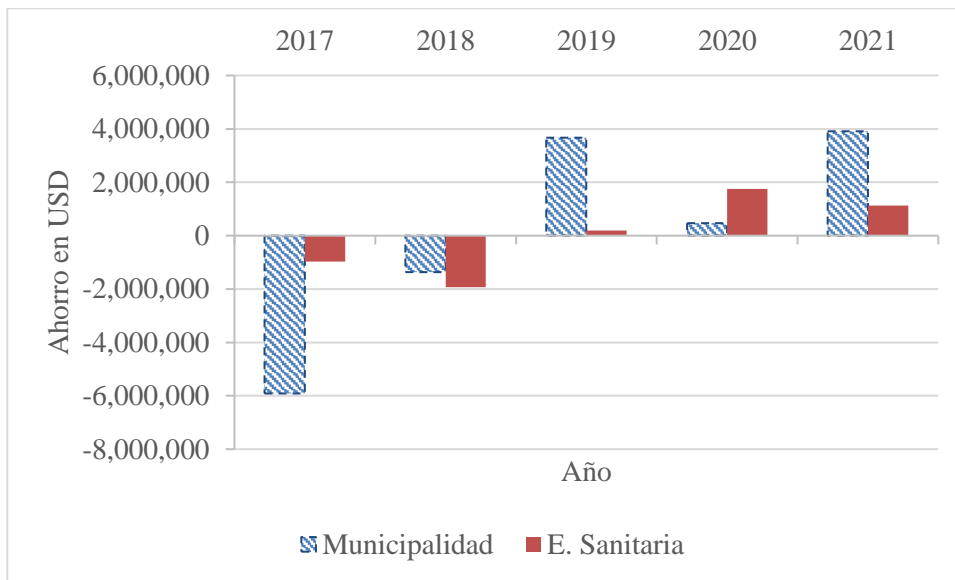
**Figura 22. Porcentaje de ahorro total al final de la simulación**

**Tabla 11. Presupuesto al final de cada escenario de simulación**

Escenario	Municipalidad	E. Sanitaria
S/I	\$ 25,488,370.00	\$ 7,946,707.94
AT	\$ 25,182,761.20	\$ 7,920,722.92
A1	\$ 25,300,899.90	\$ 7,896,430.10
A2	\$ 24,931,419.38	\$ 7,754,284.19
QT	\$ 24,703,020.55	\$ 7,757,468.74
Q1	\$ 24,585,477.90	\$ 7,668,326.56
Q2	\$ 24,241,823.00	\$ 7,617,096.90



**Figura 23. Ahorro anuales escenario AT**



**Figura 24. Ahorros anuales escenario QT**

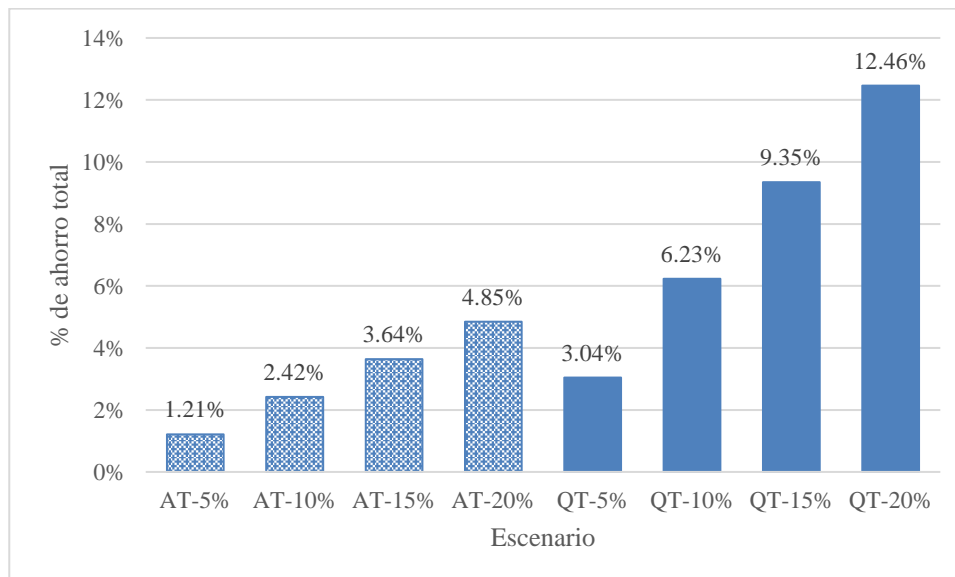
#### 5.1.4 Análisis de sensibilidad

Para finalizar esta sección, se presenta un análisis de sensibilidad del ahorro final según el ahorro fijo inicial. Como forma de evitar la presentación de información innecesaria, solo se toma en cuenta en el análisis los escenarios con el criterio de traslape, siendo considerado el escenario con integración anual (AT) y con integración quinquenal (QT). La **Tabla 12** resume el gasto final de cada agencia al final de la simulación (en USD) para los escenarios de análisis, variando el porcentaje fijo de ahorro inicial desde un 5% hasta un 20%, con intervalos de 5%.

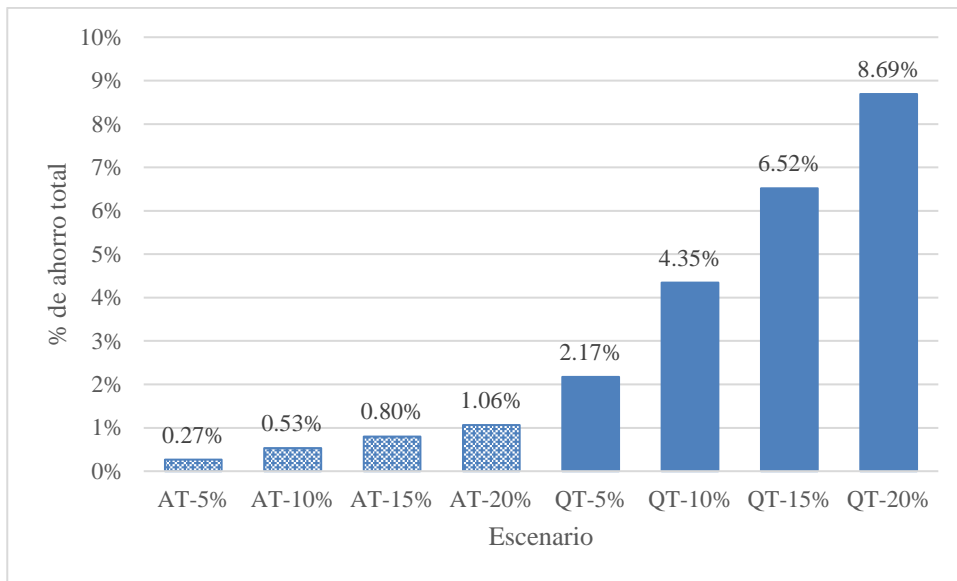
Posteriormente, en la **Figura 25** y la **Figura 26** se ilustra el porcentaje de ahorro al final de la simulación, para escenarios con los valores de ahorro fijo inicial considerados anteriormente. En la **Figura 25** se muestran los resultados para la Municipalidad y en la **Figura 26** se muestran los resultados para la Empresa Sanitaria.

**Tabla 12. Presupuesto ejecutado al final de la simulación por escenario (USD)**

Escenario	Municipalidad	Empresa Sanitaria
S/I	\$ 25,221,107.000	\$ 7,650,114.941
AT - 5%	\$ 24,915,472.750	\$ 7,629,748.769
AT - 10%	\$ 24,609,838.500	\$ 7,609,382.597
AT - 15%	\$ 24,304,204.250	\$ 7,589,016.425
AT - 20%	\$ 23,998,570.000	\$ 7,568,650.252
QT - 5%	\$ 24,453,307.100	\$ 7,483,894.635
QT - 10%	\$ 23,649,507.200	\$ 7,317,674.330
QT - 15%	\$ 22,863,707.300	\$ 7,151,454.023
QT - 20%	\$ 22,077,907.399	\$ 6,985,233.717



**Figura 25. Variación del porcentaje de ahorro según escenario para la Municipalidad**



**Figura 26. Variación del porcentaje de ahorro según escenario para la Empresa Sanitaria**

## 5.2 Simulación de la percepción de las comunidades

En la presente sección se muestran solo los resultados para 3 escenarios de simulación: sin integración (S/I), integración anual (A1) e integración quinquenal (Q2), donde los últimos dos escenarios consideran el criterio de cercanía más restrictivo (1), pero no es considerado necesariamente un traslape entre proyectos (T). Aquí, se analizan las métricas propuestas para el estudio del impacto y percepción de las comunidades en relación a la gestión integrada, lo que corresponde a la segunda fase de esta investigación. En la **Figura 27** se observa un pantallazo de una de las simulaciones, donde se incluyen los agentes tipo comunidad en el análisis. En la figura se puede visualizar algunos agentes tipo proyecto de ambas agencias (según color), y también se visualizan los agentes tipo comunidad, los cuales se ubican de forma aleatoria dentro del área delimitada al inicio de la modelación. El color de los agentes tipo comunidad indica si en el momento de la captura de pantalla apoya o se opone a la gestión.

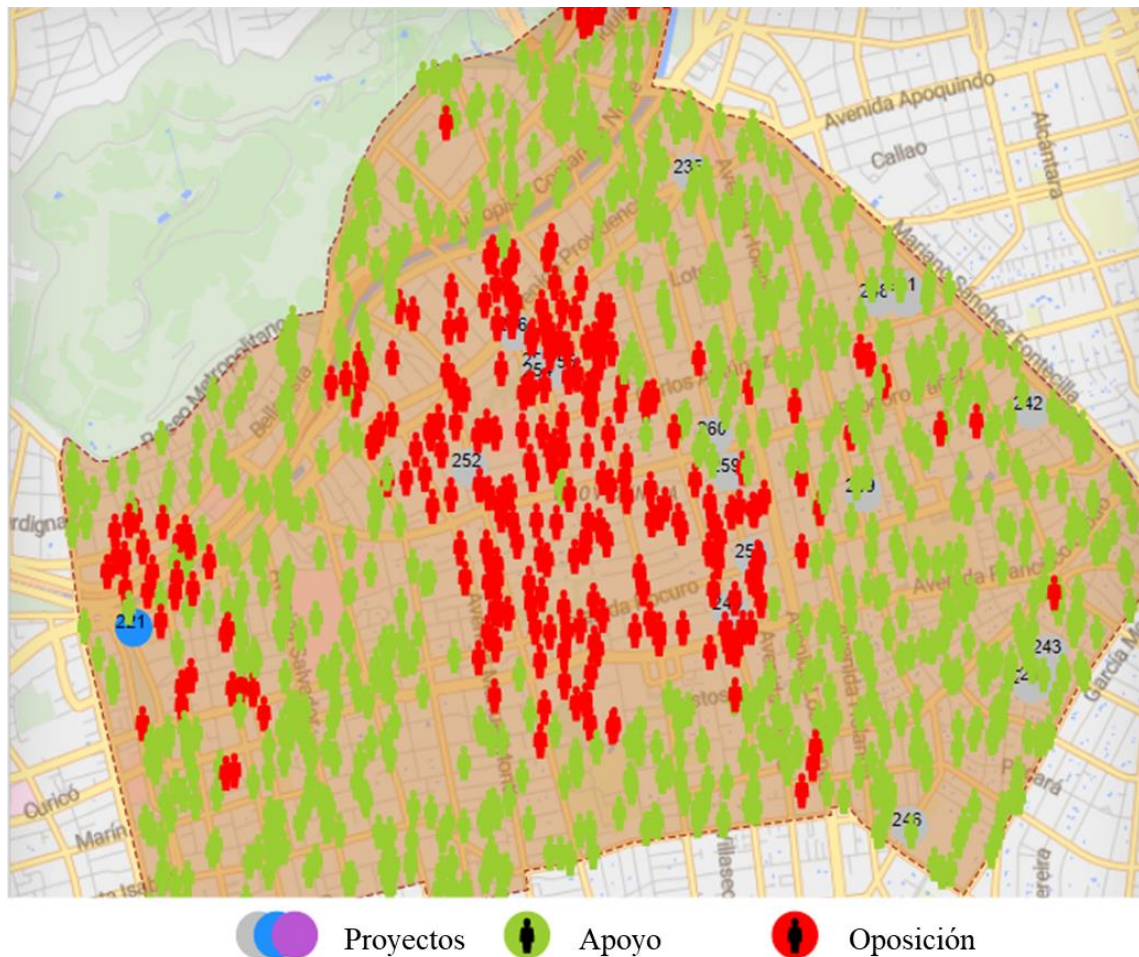
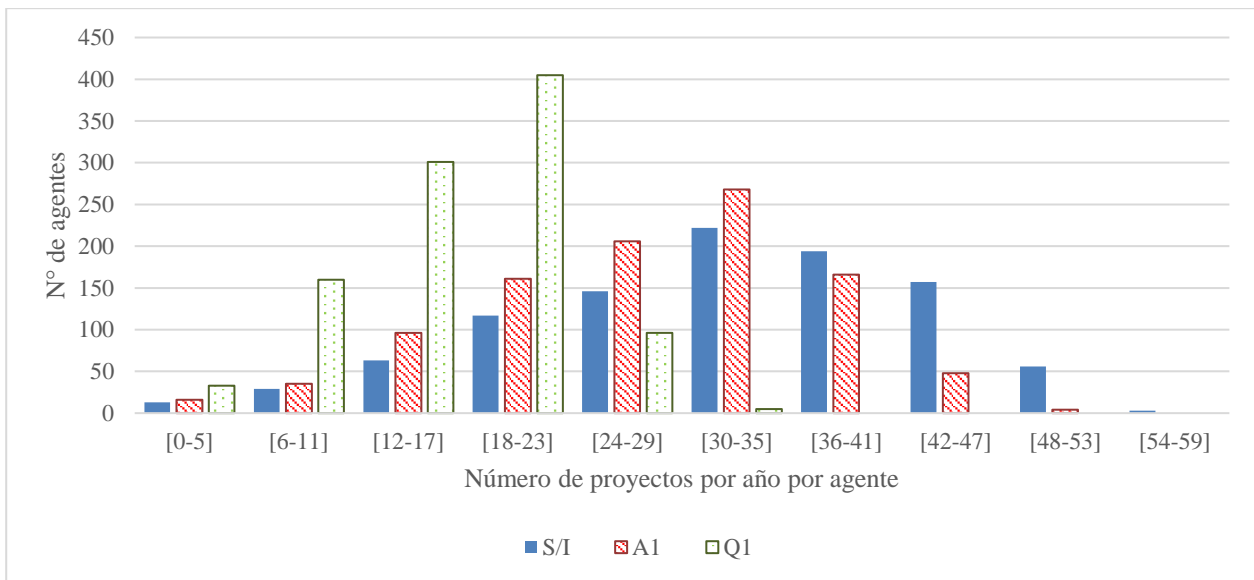


Figura 27. Agentes tipo comunidad junto a los agentes tipo proyecto dentro de la simulación

### 5.2.1 Métricas de impacto a las comunidades

Para comenzar, se muestran los resultados al final de la simulación de cada escenario. Se presenta la distribución de agentes que se encuentra dentro un cierto rango de valores para cada una de las métricas de impacto analizadas (para el detalle de la métricas revisar la sección 4.3.3). Así en la **Figura 28** se muestra la distribución de agentes según el promedio de proyectos al año que cada uno tuvo en sus cercanías. En la **Figura 29** se observa la distribución de los agentes según el promedio de días al año en que tuvieron al menos un proyecto en ejecución en sus cercanías. Y en la **Figura 30** se muestra la distribución de agentes según el promedio de la cantidad de días continuos sin proyectos en el periodo de análisis.

Por último, en la **Tabla 13** se indican los valores promedios y la desviación estándar de cada una de las distribuciones analizadas. Junto con ello, se muestran los valores promedio considerando los 3 escenarios analizados, dado que estos valores serán usados más adelante como umbral para determinar si un agente apoya o se opone a la gestión, tal como se indica en la sección 4.3.3.



**Figura 28. Distribución de agentes según el promedio del número de proyectos por año.**

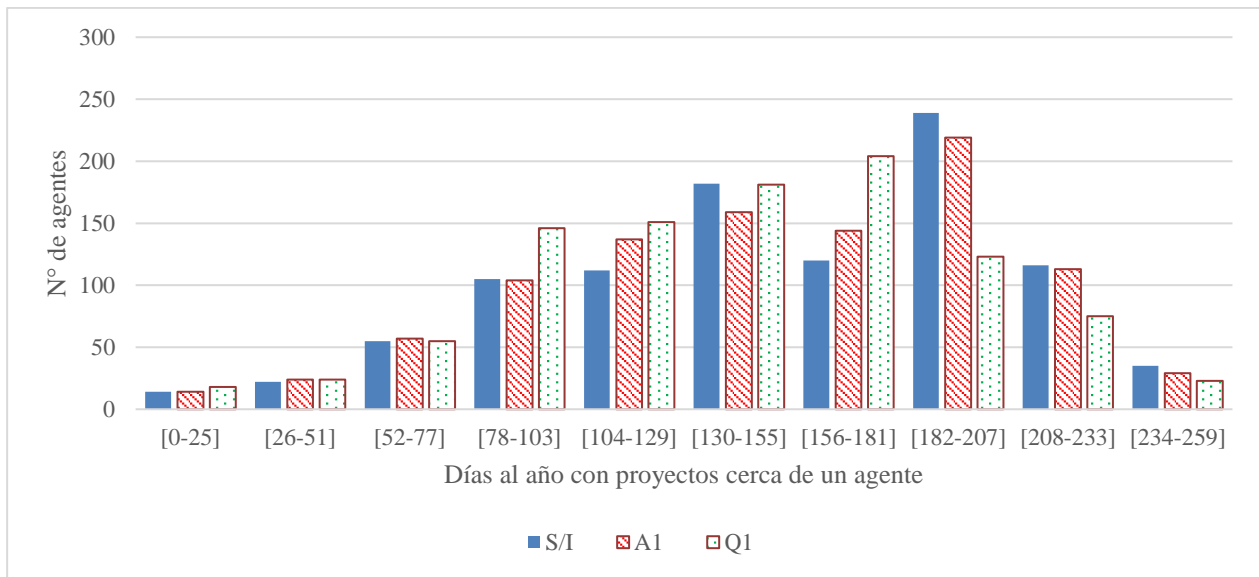


Figura 29. Distribución de agentes según el promedio de días al año con proyectos.

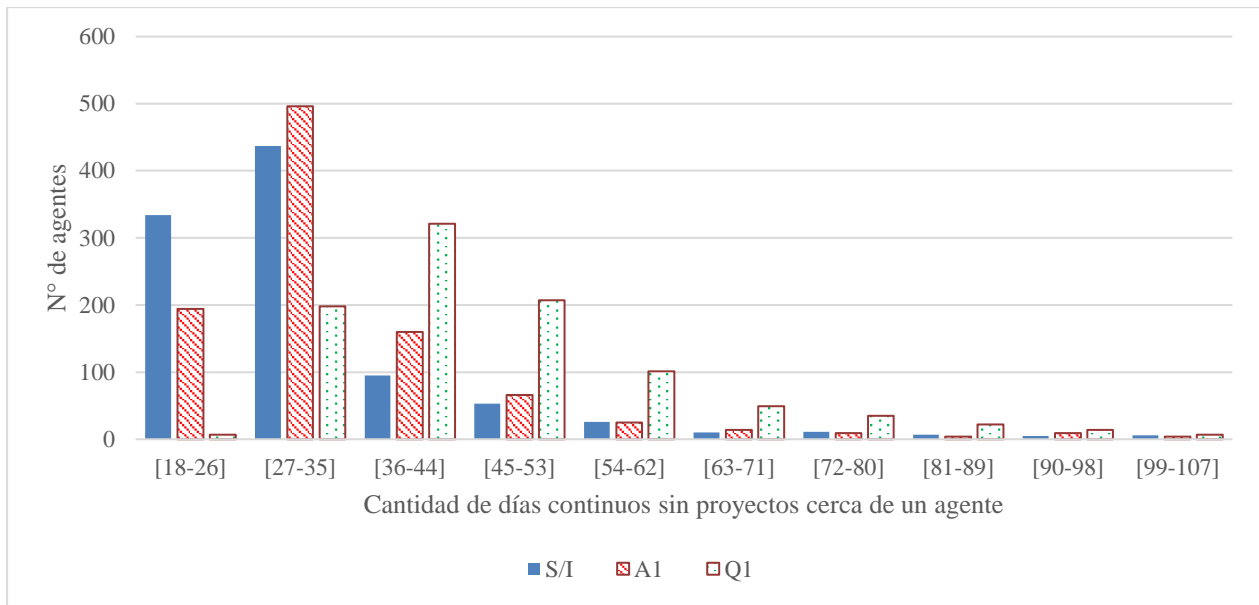


Figura 30. Distribución de agentes según la máxima cantidad de días seguidos sin proyectos.

Tabla 13. Valores promedio de las métricas de impacto a la comunidad

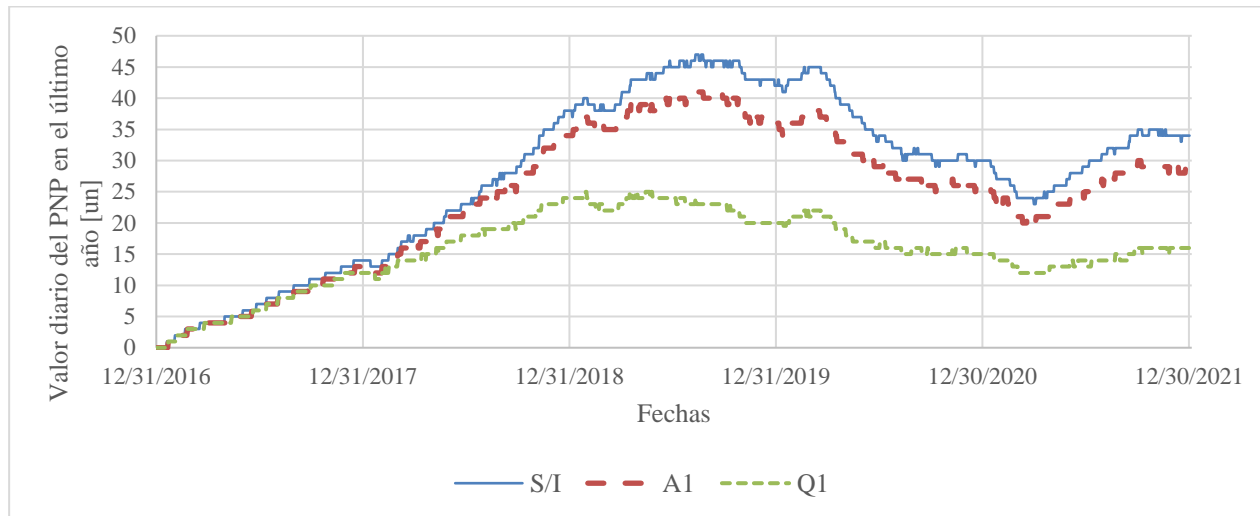
Escenario	Proyectos por año	Desv. Est	Días con proyecto por año	Desv. Est	Días continuos sin proyectos	Desv. Est
S/I	32.2	10.9	153.3	53.1	36.5	48.5
A1	27.9	9.3	152.2	53.1	38.8	48.4
Q1	16.8	5.7	141.5	50.9	52.5	49.4
	25.6	8.7	149.0	52.4	42.6	48.8

### 5.2.2 Métricas a lo largo del tiempo

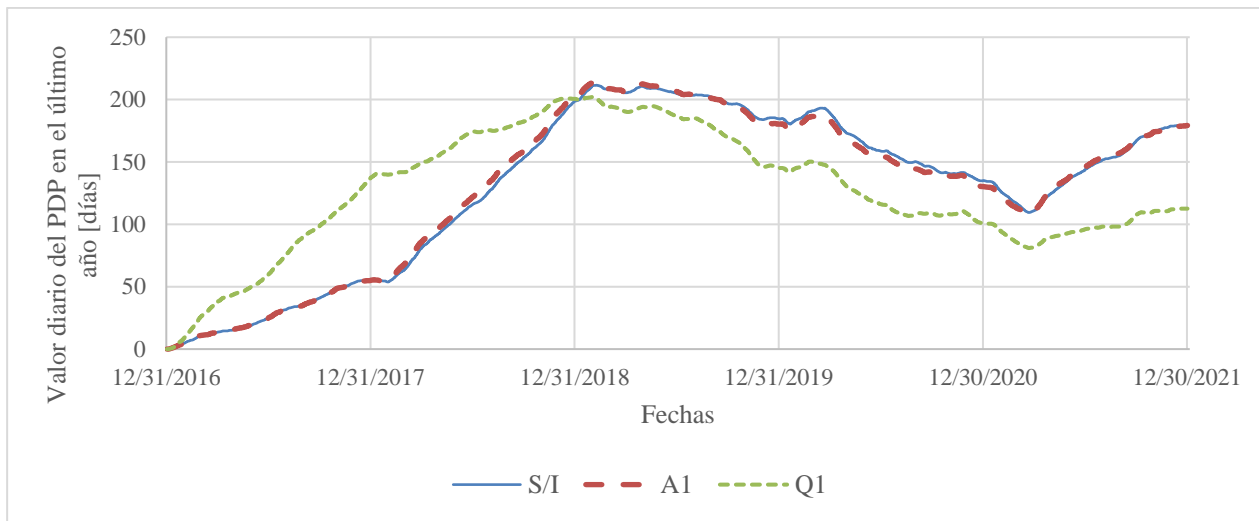
Junto con presentar la distribución de agentes según las métricas analizadas al final del periodo de análisis, también se ilustra el valor promedio diario de cada una de las métricas analizadas durante los 5 años que dura la simulación. Se debe notar que los valores del primer año no consideran el efecto del año anterior, por lo tanto los resultados obtenidos se muestran solo de forma ilustrativa, debiendo considerar para el análisis, solo los últimos 4 años de la simulación, es decir, entre el año 2018 y 2021, ambos incluidos.

El valor mostrado en cada una de las figuras corresponde al valor promedio entre todos los agentes, obtenido para cada día del análisis, por tanto es un valor dinámico y representa el valor de la métrica analizada a través del tiempo.

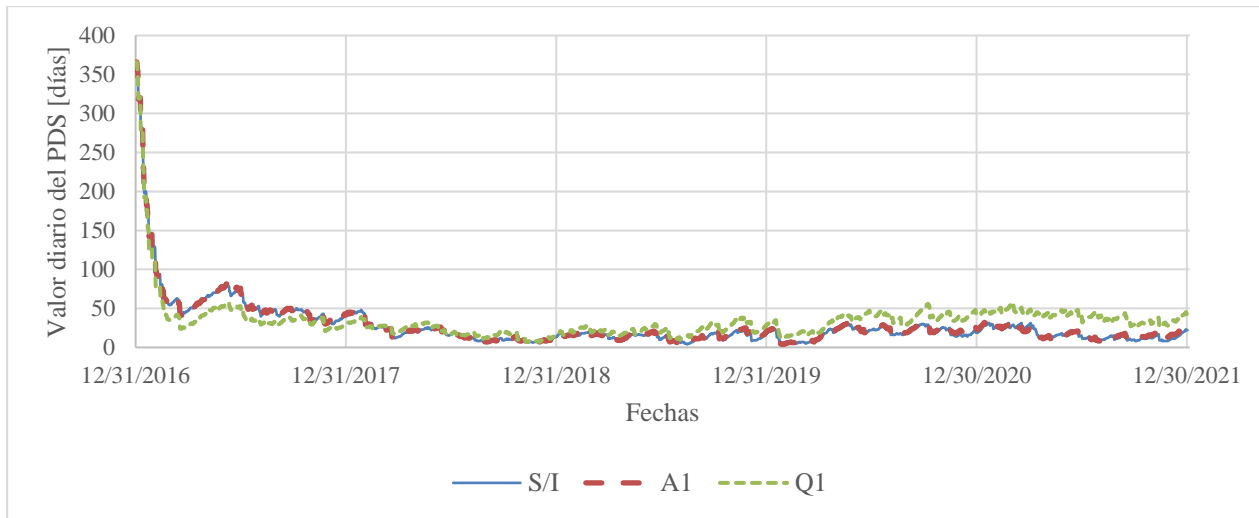
La **Figura 31** muestra el valor promedio diario de los proyectos por año (PNP) dentro del último año, es decir, el valor solo considera los proyectos que los agentes han tenido hasta la fecha de análisis y desde un año atrás. Por tanto, a medida que avanza el tiempo, el número de proyectos al año por agente varía según la cantidad de proyectos que se hayan ejecutado en el último año. Por otro lado, la **Figura 32** ilustra el promedio diario de los días con proyectos al año (PDP) que ha tenido cada agente durante el año previo a la fecha de análisis (similar a la figura anterior). Por último, la **Figura 33** muestra el promedio diario entre los agentes de la cantidad de días continuos sin proyectos (PDS).



**Figura 31. Número promedio de proyectos por año dentro del último**



**Figura 32. Número promedio de días con proyectos al año dentro del último año**



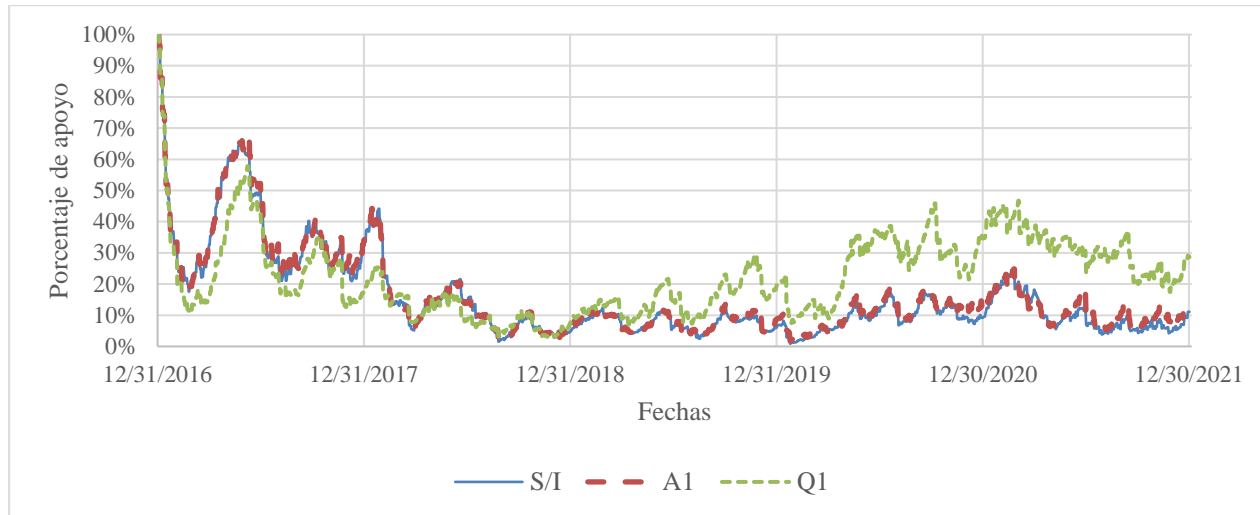
**Figura 33. Número promedio de días continuos sin proyectos**

### 5.2.3 Postura de la comunidad

Junto con el análisis de cada una de las métricas de impacto a la comunidad, a continuación se ilustra el porcentaje de apoyo diario a la gestión de parte de la comunidad.

La aprobación o rechazo de cada agente es determinado por medio del traspaso de umbrales definidos. Dichos umbrales corresponden a ciertos valores que pueden tomar las métricas analizadas anteriormente para cada agente (PNP, PDP y PDS). Así un agente puede rechazar la gestión siempre y cuando al menos una de las métricas analizadas esté fuera del rango establecido. Dicho rango es determinado como el promedio más o menos la desviación estándar, tal como se define en la sección 4.3.3. Los umbrales son mostrados en la **Tabla 13**.

Dado lo anterior, en la **Figura 34** se ilustra la variación diaria del porcentaje de apoyo de la comunidad hacia la gestión.



**Figura 34. Porcentaje de la comunidad que apoya la gestión.**

#### 5.2.4 Análisis de sensibilidad distancia de proximidad

Para determinar la variabilidad de los resultados si se hubiera escogido un parámetro de distancia de proximidad diferente, se realiza un análisis de sensibilidad. Como nota, el parámetro de la distancia de proximidad (DP) para los agentes tipo comunidad, básicamente es el supuesto más importante para calcular las métricas analizadas, dado que parte del hecho de que un agente se ve influido por proyectos cercanos a su ubicación. Para mayor detalle de este parámetro, revisar la sección 4.2.3. La **Tabla 14** muestra el resumen de los resultados para un escenario sin integración (S/I), con integración anual (A1) y con integración quinquenal (Q1), variando la distancia de proximidad entre 250 y 750 metros, con intervalos de 250. Es así como es posible identificar qué sucede con las métricas cuando la distancia de proximidad es menor o mayor a la escogida en el estudio.

Luego, en la **Figura 35** se muestra el porcentaje de variación del número de proyectos al año por agente tipo comunidad (PNP), en la **Figura 36** se muestra el porcentaje de variación de los días al año con proyectos por agente (PDP), y la **Figura 37** muestra el porcentaje de variación para la cantidad de días continuos sin proyectos por cada agente (PDS). El porcentaje de variación siempre se calcula en relación al escenario sin integración para cada distancia de proximidad.

Tabla 14. Resumen de métricas analizadas al final de cada escenario

Escenario	Distancia	N° de proyectos al año	Días con proyectos al año	Días sin proyectos
S/I	250	8.2	59.2	110
	500	32.2	153.6	36
	750	68.4	226.4	21
A1	250	6.2	54.9	129
	500	23.2	146.5	42
	750	49.4	221.5	24
Q1	250	4.4	50.6	156
	500	16.8	141.5	52
	750	35.2	220.5	30

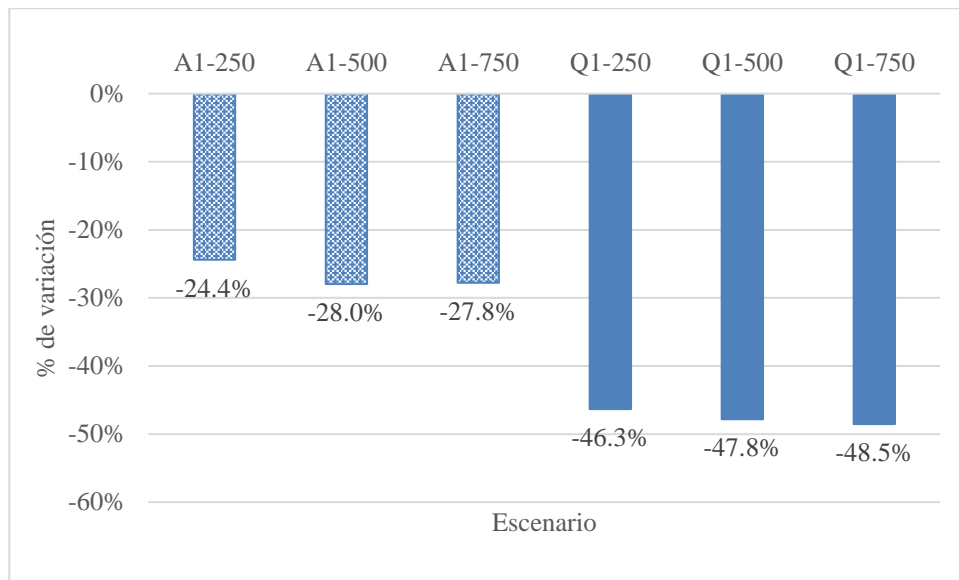
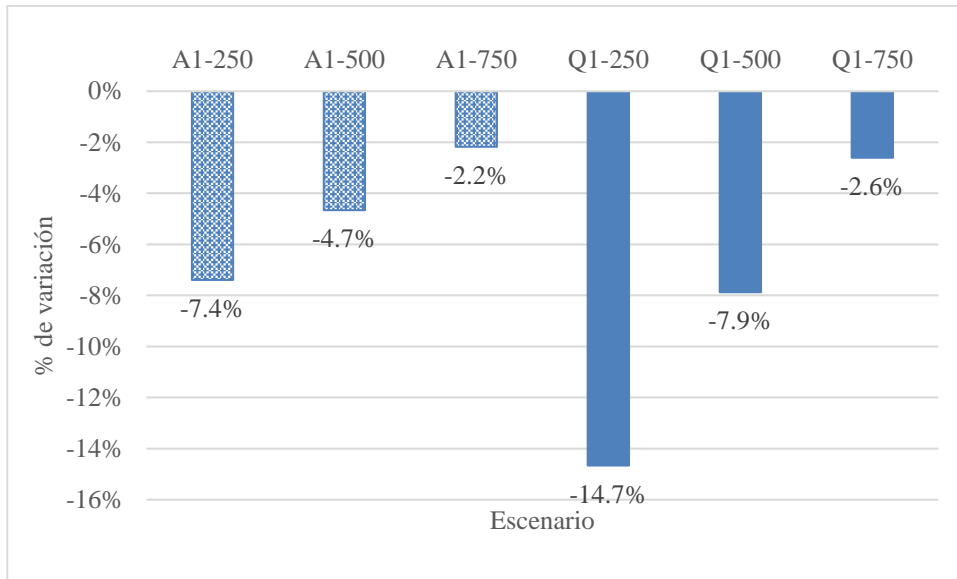
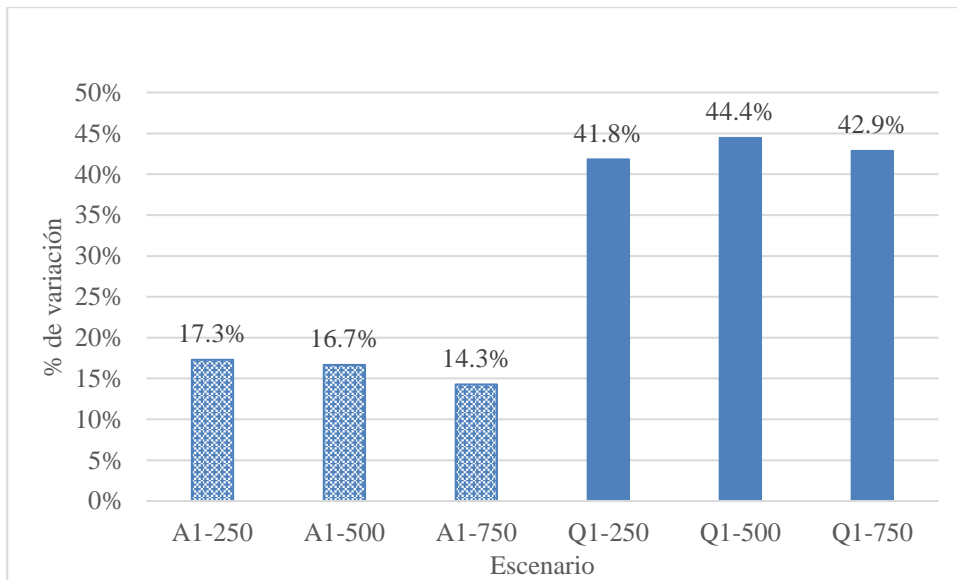


Figura 35. Variación del N° de proyectos según distancia de proximidad



**Figura 36. Variación de los días con proyectos según distancia de proximidad**



**Figura 37. Variación de los días con proyectos según distancia de proximidad**

## **6 Discusión**

En la presente sección serán analizados y discutidos los resultados presentados en la sección anterior. En las secciones 6.1 y 6.2 serán discutidos los resultados de la fase 1 del presente estudio, y en las secciones 6.3 y 6.4 se discuten los resultados de la fase 2.

### **6.1 Criterios de integración**

#### 6.1.1 Importancia y utilidad de considerar los criterios

En la literatura reciente ligada a la gestión integrada el foco ha estado principalmente en la creación de herramientas para la toma de decisiones (Shahata et al., 2022), y en la optimización de los esquemas de proyectos de intervención (Abu-Samra et al., 2020; Metayer et al., 2020). Si bien, esto ha representado un gran avance para la literatura, aún existe una gran brecha entre los avances de la academia y la forma en que se podría implementar la gestión integrada en la realidad. Uno de los aspectos que es cuestionado en este estudio, es plantearse la interrogante de si es posible implementar la gestión integrada en diferentes contextos. Para ello, se realiza un estudio de los criterios de integración de proyectos que habitualmente se consideran en la literatura, y sobre ellos, se incluyen otros criterios, que pudieran o no, tener los tomadores de decisiones, de tal forma de realizar un análisis que permita visualizar la existencia de la gestión integrada en contextos más cercanos a los reales.

Si bien, bastaría la cercanía espacial y temporal para poder integrar los proyectos (Metayer et al., 2020), lo cierto es que la realidad puede ser muy distinta, y posiblemente no basta solo con criterios técnicos para integrar proyectos, sino que también se puede incluir criterios económicos y ligados a la realidad local, como la importancia de la calle donde se lleva a cabo el proyecto.

#### 6.1.2 Criterios que no pudieron ser incorporados en el estudio

En la literatura habitualmente se consideran como criterios de integración la cercanía espacial y temporal entre los proyectos, además de la consideración de que los proyectos integrados debían tener partidas similares, como por ejemplo, el quiebre y reposición del pavimento de un tramo de la calle. Si bien, este último aspecto es importante, resulta imposible considerarlo en este estudio, dado que a diferencia de los estudios presentes en la literatura, aquí se hace énfasis en un análisis global de la gestión integrada, considerando los proyectos de toda una ciudad y no solo de un sector de ella. Y junto a lo anterior, conseguir el detalle de las partidas de esta gran cantidad de proyectos no fue posible.

Por otro lado, la finalidad de este estudio no es profundizar en la forma en que los proyectos se integran en la práctica, sino más bien, analizar los distintos impactos que genera su integración. Para ello se establecen dos criterios mínimos, o criterios primarios, que son: la cercanía espacial en sus tres niveles (T, 1 y 2), y la cercanía temporal en sus dos niveles (A y Q). Si bien, la consideración de las partidas de las obras es importante para integrar los proyectos en la práctica, en función de la base de datos que se usa para realizar este estudio, no es posible considerar este criterio.

Por último, se debe mencionar que este análisis más detallado y a una escala global puede ser difícil de realizar, con lo cual se emplean otros criterios para representar la variabilidad de la efectividad de la gestión integrada.

Además de lo anterior, otro criterio que no pudo ser incluido en el análisis es el estado físico y de desempeño de los activos que son intervenidos con los proyectos. Esto ha sido ampliamente considerado como criterio de integración, dado que la mayoría de los modelos se ha llevado a cabo considerando activos de infraestructura y no tan solo proyectos. Esto quiere decir, que dentro de los supuestos de análisis más comunes en la literatura, está el contar con información real y fidedigna del estado de los activos y sus curvas de deterioro, de tal forma de planificar sus intervenciones a largo plazo, teniendo en consideración el mejor momento en que podría ser intervenido, No obstante, en la práctica los activos no son intervenidos en el momento óptimo técnico-económico, por lo cual este estudio parte de la base de que los proyectos están listos para ser ejecutados y el motivo de su realización queda a juicio de las respectivas agencias encargadas. Es así como este estudio se encarga de analizar qué es lo que sucedería con la gestión integrada en un contexto típico, demostrando que es posible aplicar la gestión integrada incluso si no se cuenta con un análisis técnico-económico a largo plazo de los activos de infraestructura entre las agencias, lo que en la práctica es difícil que ocurra en la totalidad de los casos y entre las agencias (planificación integrada).

### 6.1.3 Utilización de criterios nuevos

Tal como se indica en la **Tabla 5**, gran parte de los criterios de este estudio son criterios propuestos. Si bien, son criterios que no han sido utilizados en la literatura, se plantea su uso como forma de colaborar a la discusión de todas las dificultades que puede tener la gestión integrada para llevarse a cabo. En este sentido, resulta pertinente explicar por qué se usan y se proponen los nuevos criterios:

- Categoría de la calle: Si bien, se ha considerado la importancia de las calles y del tráfico que circula por ellas para determinar índices de riesgo para la gestión integrada (Shahata et al., 2022), lo cierto es que la categoría de las calles no ha sido considerado como una limitante para integrar proyectos. Si bien, puede resultar restrictivo, el hecho de considerar que solo los proyectos de ciertas calles se pueden integrar, también sirve para representar la voluntad de los actores involucrados (en este caso las agencias), de realizar los esfuerzos necesarios por integrar los proyectos. Dado que, difícilmente los trabajadores de una agencia harían un esfuerzo mayor a la importancia misma del proyecto, para poder coordinarlo con un proyecto de otra agencia. En definitiva, la categoría de la calle, resulta en una medida de importancia del proyectos para la ciudad, dado que depende de la calle, el impacto que podría tener el proyecto, no solo en su entorno inmediato, sino que en un nivel macro. Si bien, esto puede ser un punto de vista pesimista, refleja la realidad de algunos contextos en que existen más desafíos que impulsores para llevar a cabo la gestión integrada (Araya & Vasquez, 2022).
- Calzada o acera: Aunque este criterio no se ha considerado explícitamente a la hora de integrar los proyectos, en la mayoría de los estudios se ha empleado cuando se considera que los proyectos deben estar ubicados en la misma posición, o al menos traslapados para coordinarse. Este criterio se considera secundario porque aunque se entiende que una de las

funciones de la gestión integrada es evitar la interrupción tanto para las comunidades, como en los demás sistemas de infraestructura, la ubicación dentro de la calzada o la acera, generan efectos similares en cuanto al tránsito de peatones y vehículos, además de representar en ambos casos, una interrupción para las comunidades cercanas. Es decir, este criterio es una medida de la importancia que las comunidades podrían darle a la ubicación del proyecto, ya que impacta en el entorno inmediato. En este sentido las comunidades y tomadores de decisiones podrían preferir integrar proyectos que solo se ejecuten en las calzadas, más no solo en las aceras.

- Superficie del proyecto, Duración del proyecto y Costo del proyecto: estos últimos criterios tienen una función similar a los anteriores, dado que intentan representar bajo tres parámetros distintos, la importancia de los proyectos, pero en este caso, la importancia para las agencias. Por lo cual, cuando se establecen estos criterios, se está considerando que los esfuerzos para integrar proyectos solo se llevarán a cabo para los proyectos más importantes bajo el punto de vista de las agencias. Se consideran tres parámetros para representar la importancia que las agencias dan a los proyectos, dado que no se tiene información respecto de indicadores de riesgo u otro tipo de indicadores de importancia que las agencias hayan considerado para los proyectos de la base de datos que aquí se utilizó.

#### 6.1.4 Criterios espacio-temporales

Los criterios primarios considerados en este estudio son la columna vertebral del análisis, dado que consisten en criterios irrefutables para considerar la integración de proyectos. Todos los estudios presentes en la literatura han utilizado estos criterios para analizar y modelar la gestión integrada, no obstante, su uso ha variado de uno a otro, así como en el presente estudio.

En primer lugar, existen estudios que consideran como intervalo temporal, la cercanía temporal entre proyectos, sin importar que sean de años diferentes (Abu-Samra et al., 2020; Abu Samra et al., 2018; Metayer et al., 2020; Shahata et al., 2022). Si bien, esta consideración resulta lógica en la teoría, en la práctica puede haber problemas de índole administrativo, es decir, puede que no exista financiamiento suficiente un determinado año, no se pueda traspasar el financiamiento de un año a otro, o bien, los proyectos deben ser ejecutados dentro de un determinado rango de tiempo para cumplir con exigencias normativas y legales, tal como sucede con las empresas sanitarias en Chile. Dado lo anterior, este estudio representa la realidad mediante el criterio de integración con intervalos de 1 año, y representa la literatura con intervalos de integración de 5 años. En la literatura pocos estudios han puesto restricciones a la cercanía temporal entre proyectos (Amador & Magnuson, 2011), no obstante, la consideración de esta limitante es de utilidad para los investigadores y tomadores de decisiones.

Respecto de los criterios espaciales, estos se dividen en 3, y van desde proyectos ubicados en el mismo lugar o traslapados, hasta proyectos cercanos no necesariamente traslapados. En la literatura se ha considerado la integración solo con proyectos que al menos tengan un traslape (Abu-Samra et al., 2020; Metayer et al., 2020). Por otro lado, este estudio considera que dos proyectos pueden generar la misma interrupción si están lo suficientemente cerca, independiente de si se traslapan o no. Es por ello, que se ha querido ampliar el espectro de análisis a la integración de proyectos cercanos que no necesariamente se traslapan, siendo el criterio de cercanía más restrictivo (1), el criterio que mejor podría representar la realidad en términos de interrupción al entorno inmediato y cercano a los proyectos de intervención.

### 6.1.5 Porcentaje de proyectos integrados

Tal como se analizó en la sección 5.1.1 y 5.1.2, existe una diferencia entre el uso de criterios primarios y el uso de criterios primarios junto a los secundarios. En primer lugar es posible observar que la cantidad final de proyectos que pueden ser integrados es mayor para los criterios espacio temporales menos restrictivos, es decir para una cercanía temporal “Q” y para una cercanía espacial “2”, tal como se muestra en la **Figura 17**, la **Figura 19** y la **Figura 20**. Es así como el porcentaje de integración de proyectos puede ir desde un 3%, para un escenario con integración anual y con traslape, hasta un 93%, para un escenario con integración quinquenal y una cercanía espacial “2” (ver **Figura 17**). Sin duda se debe tener cuidado al momento del análisis de los resultados, dado que los escenarios con el criterio espacial menos restrictivo (2) es poco probable que se lleven a la práctica debido a la lejanía espacial entre los proyectos, siendo útil su aplicación solo para proyectos de gran envergadura.

Por otro lado, se debe observar que el porcentaje de proyectos integrados para un escenario “QT” vendría siendo un resultado representativo de lo que actualmente se asume en la literatura (ver **Figura 38**). Dado que se permite la integración interanual entre proyectos, pero siempre y cuando haya un traslape. En resumen, en un contexto como el chileno, o bien, considerando las restricciones administrativas y económicas de las agencias, los escenarios más factibles de ser llevados a la práctica son el AT y el A1 (ver **Figura 38**). Si bien, en la literatura se menciona que el traslape entre proyectos es necesario, en este estudio se comprueba por medio de la modelación basada en agentes, que considerar el escenario A1 genera beneficios más allá de los percibidos por las agencias. Como nota, los valores obtenidos en la **Figura 38**, corresponden al promedio de los valores de la municipalidad y la empresa sanitaria, mostrados en la **Figura 17**.

	Escenario factible en un contexto como el chileno	Escenario poco factible en un contexto como el chileno
Escenario no considerado en la literatura	<b>A1</b> 19.8 % de integración	<b>Q2</b> 93.2 % de integración
Escenario considerado en la literatura	<b>AT</b> 3.3 % de integración	<b>QT</b> 15.5 % de integración

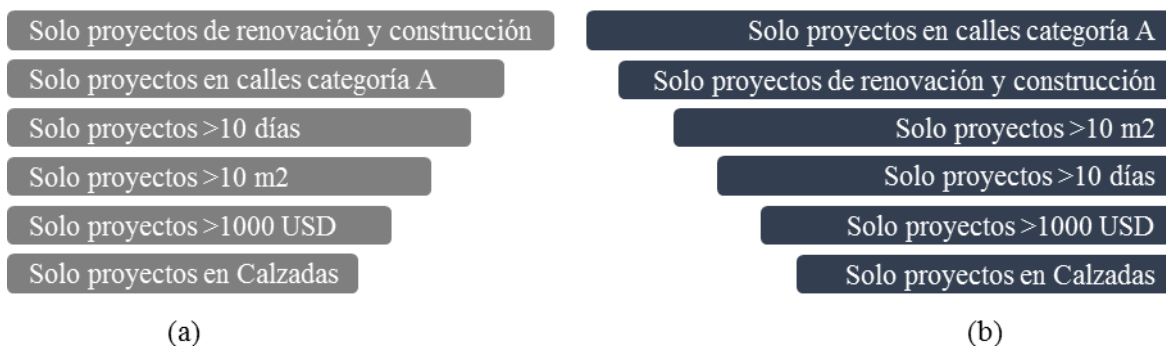
**Figura 38. Comparación del porcentaje de integración entre escenarios**

Desde el punto de vista de los criterios secundarios, la **Figura 39 (a)** muestra los criterios desde el más conveniente al menos conveniente de aplicar, al menos cuando se considera traslape entre los proyectos para que haya integración.

Si bien, el porcentaje de proyectos integrados es cercano al 2% en el mejor de los casos cuando se considera traslape para la integración (criterio de cercanía espacial más restrictivo), se puede decir, que los resultados son lógicos, dado que, los criterios secundarios que más conveniente resultan, son aquellos criterios que más importancia han tenido en la literatura junto con los criterios primarios considerados en este estudio (Abu-Samra et al., 2020; Metayer et al., 2020; Shahata et al., 2022), tal como el tipo de proyecto y la importancia de las calles. Si bien la importancia de las calles no se ha usado como criterio de integración, se ha incluido en el cálculo de la prioridad de intervención de los activos.

Ahora bien, cuando no se toma en cuenta necesariamente el traslape entre proyectos, sino que se considera el segundo criterio espacial más restrictivo (1), los resultados respecto de los criterios más convenientes varían un poco, tal como se muestra en la **Figura 39 (b)**. No obstante, los dos criterios más importantes además de los primarios, siguen siendo los mismos. Como nota, el ordenamiento de los criterios se obtiene para los escenarios con el criterio de mayor restricción temporal (A) y los porcentajes pueden verse con mayor claridad en la **Figura 19**.

Por último, se debe agregar que el porcentaje de proyectos integrados es mayor para la empresa sanitaria, versus la municipalidad, cuando se considera el traslape. Por otro lado, la cantidad de proyectos integrados es mayor para la municipalidad al menos cuando se consideran los criterios de cercanía 1 y 2.



**Figura 39. Criterios secundarios según factibilidad de integración para escenarios “A” cuando hay traslape (a) y cuando no hay traslape necesariamente (b)**

#### 6.1.6 Disminución de proyectos totales

Dado que existe la integración de proyectos, aunque la cantidad de proyectos para las agencias siga siendo la misma, para la ciudadanía y las comunidades cercanas, estos proyectos se verán reducidos. Esto parte de la base de que un ciudadano percibe los proyectos de forma similar, sin importar qué sistema de infraestructura está siendo intervenido.

Tal como ocurre con la cantidad de proyectos integrados, el porcentaje de disminución de proyectos es mayor cuando solo se consideran los criterios primarios **Figura 18**, versus, cuando se consideran también los criterios secundarios **Figura 21**. Además de lo anterior, se identifica que mientras los criterios primarios son menos restrictivos, existe una mayor disminución de los proyectos totales,

siendo criterios más convenientes a la integración de proyectos, similares a los analizados anteriormente (Q1 y Q2).

Se debe tener en cuenta que la cantidad final de proyectos, así como los porcentajes de reducción de proyectos totales, se presentan bajo el supuesto de que los proyectos pueden unirse entre sí al cumplirse los criterios de integración, no habiendo un límite de la cantidad máxima de proyectos de puedan ser integrados entre sí. Lo anterior no es parte de este estudio, pero da pie a la realización de futuros estudios, en donde se pueda determinar la máxima cantidad de proyectos que es factible que se integren entre sí, considerando aspectos que escapan a este estudio, como la logística de la integración, los recursos humanos y los procesos administrativos y legales que pudieran estar asociados. Si bien, el número de proyectos que se pudiera integrar efectivamente podría verse limitado, el hecho de coordinar las fechas entre proyectos cercanos o entre agrupamientos de proyectos cercanos, ya sería un gran beneficio, y eso es lo que captura el presente trabajo.

## 6.2 Beneficios para las agencias

### 6.2.1 Formas de obtener el ahorro

En este estudio se ha optado por considerar que cuando un proyecto puede ser integrado, se produce un ahorro del 5% del valor inicial del proyecto. Es decir, cuando un proyecto se integra, su costo final es de un 95% del costo inicial de la base de datos. Sin duda esto es una consideración bastante rígida y no permite ver totalmente todos los beneficios económicos que podría tener la gestión integrada, no obstante, no fue posible hacer un análisis en mayor profundidad dado que no se contaba con una base de datos con información precisa de los costos de los proyectos, ni de las partidas en común que tenían los proyectos.

Se mencionan las partidas en común dado que, en la literatura uno de los beneficios identificados de integrar proyectos, ha sido la reducción del doble trabajo y su consiguiente ahorro para la o las agencias que llevan a cabo el proyecto (Amador & Magnuson, 2011). No obstante, para determinar este ahorro se necesita un gran detalle de información, por lo cual, los estudios presentes en la literatura lo abordan de forma limitada, es decir, consideran proyectos de un sector reducido de una ciudad, y una cantidad reducida de activos de infraestructura (Abu-Samra et al., 2020; Metayer et al., 2020), la cual no supera el orden de las decenas de activos o proyectos.

Por otro lado, Metayer et al. (2020) emplea en su análisis un porcentaje fijo de ahorro por proyecto integrado, equivalente al 5%, lo que le permite realizar su estudio y concluir al respecto del ahorro final, lo que también se lleva a cabo en la presente investigación.

Si bien el ahorro asumido está por debajo de lo que expertos chilenos indicaron como posibles ahorros, la finalidad de usar el 5% de ahorro, además de estar respaldado por la academia, permite conocer un umbral inferior para los beneficios económicos que las agencias podrían percibir en un contexto donde la gestión integrada si se lleve a cabo.

### 6.2.2 Ahorro entre escenarios

Comparando los resultados del ahorro para los escenarios, es posible ver que el ahorro en términos porcentuales va desde un 0.68% hasta un 4.52%, lo cual corresponde a un ahorro bastante bajo. No obstante, en unidades monetarias el ahorro resulta ser considerable. Por otro lado, los porcentajes de ahorro se obtienen del total de proyectos ejecutados en la zona de análisis en los sistemas de infraestructura de transporte, agua potable y aguas servidas.

Tal como se ve en la sección anterior, mientras los criterios son menos restrictivos, hay mayor cantidad de proyectos integrados y por ende mayores ahorros percibidos. No obstante, en esta sección ocurre una diferencia entre los escenarios A1 y AT, donde se observa que los ahorros obtenidos para el escenario más restrictivo de los dos, es el mayor ahorro. Esto es debido a la envergadura y por tanto al costo de los proyectos que son integrados en los escenarios con traslape, los que habitualmente son proyectos que se extienden dentro de una misma calle, por más de una cuadra, lo que los hace proyectos más caros. En la simulación, en primer lugar, el ahorro está determinado por la cantidad de proyectos integrados, no obstante, aunque la cantidad es menor en el escenario AT, el ahorro resultante es mayor. Esto genera evidencia de que aunque no exista una mayor cantidad de proyectos integrados, no significa necesariamente que esto pueda ser menos beneficioso económicamente para las agencias. No obstante, aún resta analizar qué sucede con los beneficios percibidos por las comunidades.

	Escenario factible en un contexto como el chileno	Escenario poco factible en un contexto como el chileno
Escenario no considerado en la literatura	<p><b>A1</b></p> <p>0.68 % de ahorro.</p> <p>237,747.94 USD</p>	<p><b>Q2</b></p> <p>4.52 % de ahorro</p> <p>1,576,158.04 UDS</p>
Escenario considerado en la literatura	<p><b>AT</b></p> <p>0.76 % de ahorro</p> <p>331,593.82 USD</p>	<p><b>QT</b></p> <p>2.73 % de ahorro</p> <p>974,588.66 USD</p>

**Figura 40. Comparación del ahorro entre escenarios**

### 6.2.3 Comparación de resultados con la literatura

Tanto la literatura, como este estudio han querido demostrar los beneficios económicos que la gestión integrada podría generar en las agencias e instituciones a cargo de la infraestructura. Sin embargo, la forma de obtener el costo por proyecto y los consiguientes ahorros, han variado de un estudio a otro, no habiendo un consenso respecto de cómo se puede calcular efectivamente los beneficios económicos.

Por un lado, Amador & Magnuson (2011) determinan; contrariamente al resto de estudios; que la gestión integrada significaría un aumento de los presupuestos, pero que en términos generales el gasto sería cercano al óptimo, según ellos mismos indican. Por otro lado, existen estudios que han demostrado la conveniencia de llevar a cabo la gestión integrada debido a la disminución en los costos de ciclo de vida (Abu-Samra et al., 2020; Abu Samra et al., 2018) y a la disminución del costo de renovación de los activos de infraestructura (Abu Samra et al., 2018; Metayer et al., 2020). Ahora, este estudio demuestra un ahorro en un tercer pilar, el que se refiere al costo anual de la operación, mantención y renovación de la infraestructura, el cual pone el foco en los gastos que hacen las agencias, versus el gasto que genera cada activo o conjunto de activos de infraestructura por si solo.

Si bien se pueden comparar los ahorros, lo cierto es que cada estudio los obtiene de manera diferente, por lo que en definitiva significan ahorros en distintos niveles de la gestión. Más aún, existe otra gran diferencia de este estudio respecto a los de la literatura, que los demás estudios contemplan periodos de análisis superiores a 5 años, lo que podría incluso entregar mayores beneficios, tal como se ilustra en la **Figura 41**.

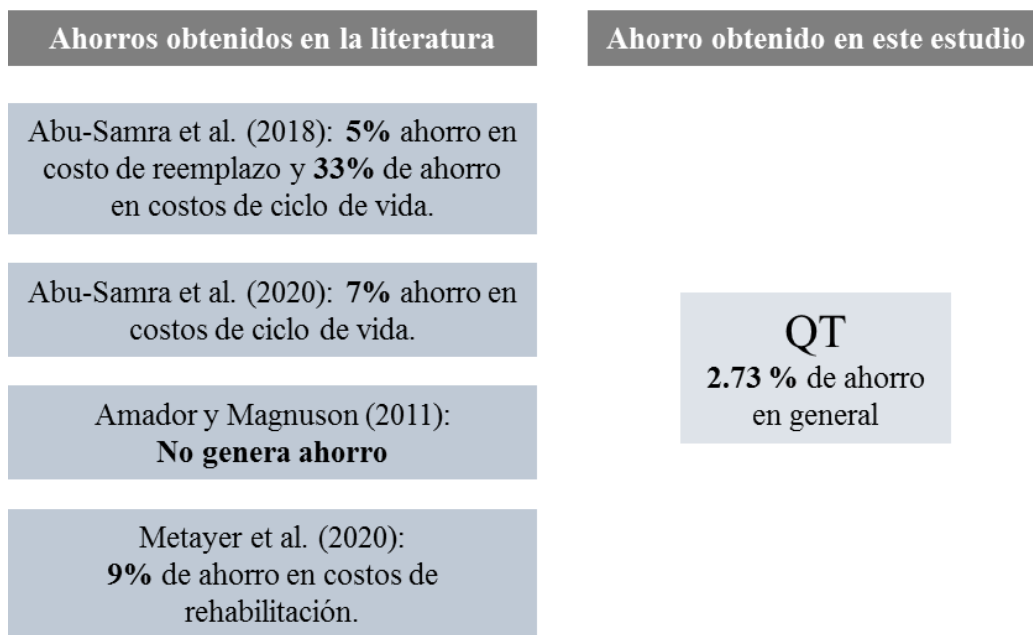


Figura 41. Comparación del ahorro con la literatura

#### 6.2.4 Análisis de sensibilidad

Como forma de contrastar la diferencia de valores obtenidos, según el porcentaje de ahorro fijo inicial cuando los proyectos son integrados, se lleva a cabo un análisis de sensibilidad con la ayuda de la herramienta de variación de parámetros del programa Anylogic. Se simulan los escenarios AT y QT variando el ahorro fijo inicial de 5% a un 20% con intervalos de 5%.

Por medio del análisis realizado es posible observar que el valor de ahorro final para los escenarios con traslape varía con a una tasa fija, es decir, para un ahorro fijo inicial del doble, los ahorros finales obtenidos también corresponderán al doble del escenario base. Por tanto, cuando se considera un ahorro fijo inicial de 10%, 15% y 20%, los resultados finales entregan un ahorro equivalente al doble, triple y cuádruple de un escenario con ahorro fijo inicial de 5%.

### 6.3 Beneficios para las comunidades

#### 6.3.1 Escenarios utilizados para el análisis

La idea de analizar 3 escenarios es comparar lo que sucede en la actualidad (S/I), con un escenario factible de realizar (A1) y con un escenario ideal (Q2). Se deja como criterio fijo el de la cercanía más restrictiva por representar mejor lo que podría ser la integración de proyectos en la realidad, dado que aunque dos proyectos no se conecten o traslapen físicamente, una cercanía estrecha significa finalmente que los proyectos afectan a la misma comunidad, dado que esta última es el foco de análisis. Si bien se incluyen los escenarios con traslape en el análisis anterior, resulta que la utilidad de considerar solo los proyectos que se traslapan reduce bastante el espectro de proyectos que se pueden integrar, así puede haber 2 o más proyectos a menos de 100 metros de distancia los

cuales no se podrían integrar por no estar traslapados. Por último, el uso de una distancia de cercanía en vez del traslape entre proyectos constituye también un supuesto y debe ser aceptado o refutado con estudios posteriores.

### 6.3.2 Métricas de análisis

En este estudio las métricas analizadas presentan un aporte a la literatura, en el sentido de que comúnmente las métricas de impacto de los proyectos a las comunidades se calculan proyecto a proyecto, lo que puede omitir las molestias producidas por proyectos que son ejecutados cerca, tanto en ubicación espacial, como temporal. Es así como en la práctica se puede decir que el nivel de interrupción de un proyecto es permitido porque solo se analiza un proyecto puntual. No obstante, este estudio ofrece la mirada del análisis de la interrupción de los proyectos desde el punto de vista de quienes son los afectados, es decir, las comunidades.

Si bien la gestión de sistemas de infraestructura ha incluido en el análisis de la evaluación de proyectos a las comunidades, el impacto asociado generalmente es indirecto, es decir, se refleja en aspectos como, el aumento de plusvalía del sector, reducción de tiempos de transporte y disminución de efectos negativos por la operación de la infraestructura, todos estos impactos medidos generalmente a largo plazo o bien, se aplican una vez que se han concretado los proyectos. Ahora bien, en la literatura se han identificado los impactos que generan los proyectos de intervención de los sistemas de infraestructura, en especial, los proyectos de la infraestructura de transporte. Aunque este estudio no profundice en los impactos finales, tal como, el ruido y la contaminación acústica, visual y atmosférica (ver **Figura 42**), muestra la reducción de proyectos, lo que en definitiva reducirá los impactos finales percibidos por las comunidades, además de la percepción de las comunidades al ver que sus vecindarios están menos ocupados por proyectos de intervención de las distintas agencias de infraestructura.

Por último, como forma de ilustrar la reducción de proyectos, se generan diferentes métricas que muestran no solo la reducción total de proyectos, sino la cantidad de días con y sin proyectos, siendo mostrado también lo que sucede en el tiempo, generando una perspectiva dinámica de lo que sucede en la realidad. Si bien las métricas ya fueron presentadas, es necesario entregar una explicación al lector acerca de su uso:

- Número de proyectos ejecutados al año: Esta métrica indica la cantidad de proyectos que cada ciudadano percibe en relación al lugar donde vive. Trata de representar una medida de eficiencia de las agencias frente a los ciudadanos, dado que cuando existe una gran cantidad de proyectos que se ejecutan de forma sucesiva, en un mismo lugar o un lugar cercano, las comunidades se cuestionan la eficiencia con la cual trabajan las agencias. Esto se obtiene según lo comentado por los expertos consultados en este estudio. Lo anterior finalmente repercute en la percepción de las mismas comunidades (Araya & Vasquez, 2022).

- **Días al año con al menos un proyecto:** Esta métrica representa el promedio de días al año que un habitante debe convivir con al menos un proyecto cercano a su hogar. Esta métrica trata de reflejar las molestias acumuladas que deben soportar las comunidades dentro de un intervalo de un año. El tamaño del intervalo sin duda puede afectar la percepción final de las comunidades, en el sentido de que puede que un habitante no recuerde cuantos días con proyectos hubo el año pasado cerca de su casa, no obstante, el intervalo permite obtener una medida estándar que sea ilustrativa y sirva para comparar los distintos escenarios de análisis.
- **Días continuos sin proyectos:** Esta métrica, al contrario de las dos anteriores, representa los beneficios que los habitantes podrían percibir producto de una disminución de proyectos debido a la gestión integrada. A diferencia de la métrica anterior, esta métrica refleja los días continuos sin proyectos, es decir, la cantidad de días sucesivos en que no hay ningún proyecto cerca del agente tipo comunidad analizado.

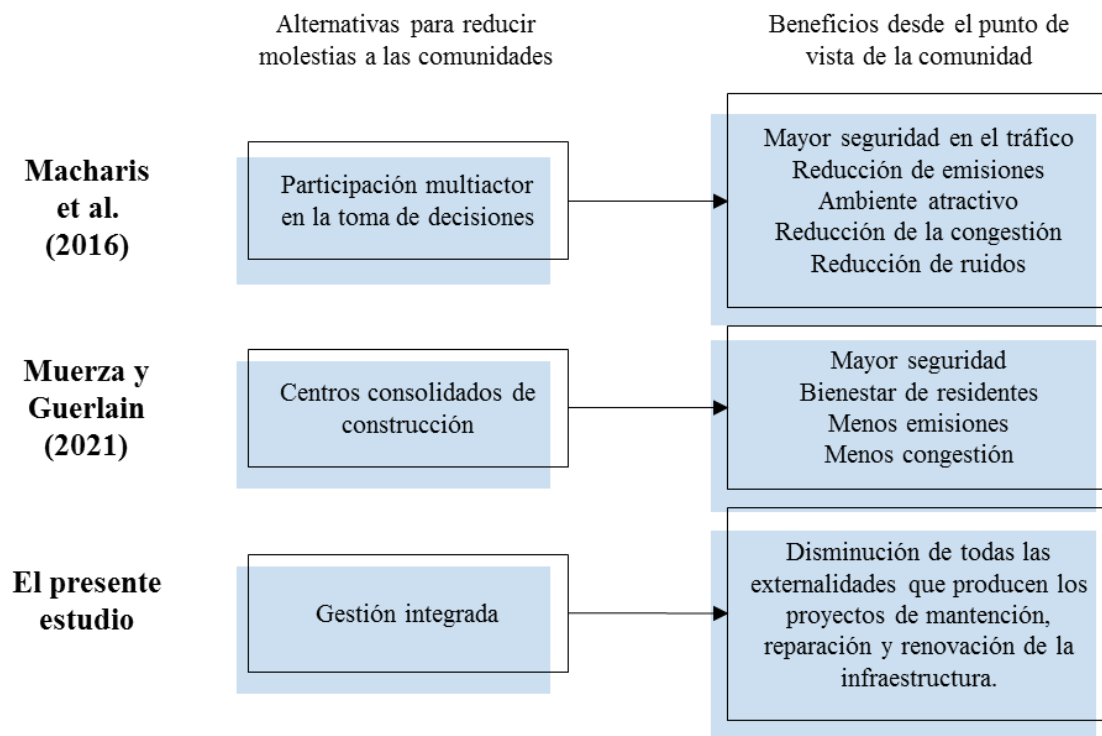
Sin duda pudo haberse elegido otras métricas o incluso menos métricas para el análisis, pero dado que este estudio es uno de los primeros dentro del campo de la gestión integrada que incluye a las comunidades, será tarea de futuros estudios cuestionar la idoneidad del uso de las métricas aquí presentadas, o bien, el planteamiento de nuevas métricas de análisis.

Por último, se menciona lo conveniente que es el uso de la modelación basada en agente para la obtención de las métricas antes descritas, pues permite hacer un análisis detallado y general al mismo tiempo, lo que facilita el estudio de los beneficios de la gestión integrada en las comunidades.

### 6.3.3 Soluciones para reducir el impacto de los proyectos de infraestructura

En este aspecto, se nota una gran brecha de estudios en relación al impacto que los proyectos de intervención generan de forma inmediata en las comunidades, sobre todo el impacto temporal que les genera tener uno o más proyectos cerca de sus casas. Es por ello que han surgido iniciativas de solución, tal como, la participación de las comunidades para reducir disputas por los proyectos de construcción (Macharis et al., 2016) y métodos para mejorar la logística de los proyectos de intervención (Muerza & Guerlain, 2021). Estos últimos estudios fueron desarrollados dentro del contexto de la gestión de los sistemas de infraestructura de transporte, pudiendo ser aplicados en conjunto con la gestión integrada, dado que en definitiva se busca el mismo objetivo: disminuir el impacto de los proyectos de intervención de los sistemas de infraestructura en las comunidades.

La **Figura 42** muestra algunas de las opciones que han presentado la literatura y este estudio, para reducir el impacto que los proyectos de intervención de los sistemas de infraestructura genera en las comunidades.



**Figura 42. Opciones para disminuir el impacto de los proyectos de intervención**

#### 6.3.4 Comparación al final

Al observar la **Figura 31**, la **Figura 32** y la **Figura 33**, es posible notar una clara diferencia entre los tres escenarios de análisis. Sin duda la conveniencia del escenario con un criterio de integración temporal mayor (Q1) representa mejores beneficios, no obstante, se muestran también los resultados para el escenario con integración anual (A1).

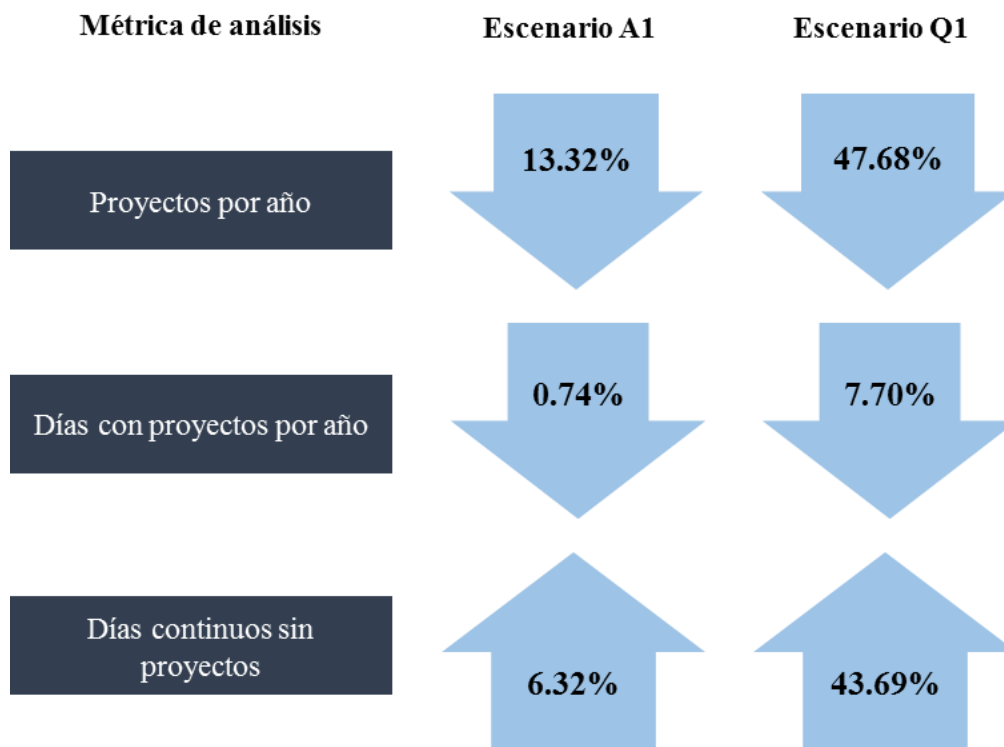
En relación a la distribución de agentes (ver **Figura 31**), queda en evidencia que cuando existe integración, la distribución tiende a desplazarse y cambiar de forma. Para el caso de la métrica de la cantidad de proyectos al año, la distribución indica un aumento en la cantidad de agentes que percibe una menor cantidad de proyectos, versus el escenario sin integración. No obstante, el sesgo de ambas distribuciones es similar (sesgo negativo). Por otro lado, al comparar la distribución de un escenario sin integración, con el escenario Q1, es posible ver que además de un aumento significativo de la frecuencia en los rangos con menor cantidad de proyectos por agentes, existe un cambio de sesgo, desde uno negativo a uno positivo.

De manera similar ocurre con las distribuciones para la métrica de días con proyectos al año (ver **Figura 32**), pero a diferencia de la métrica anterior, el sesgo de las tres distribuciones es un sesgo negativo.

Por último, al comprar las distribuciones de agentes para la métrica de días continuos sin proyectos (ver **Figura 33**), se observa un incremento en la frecuencia en los intervalos de rangos de mayor

valor. Para el caso del escenario sin integración con el escenario A1 y Q1 se mantiene el sesgo positivo, aunque para el escenario Q1, la moda se desplaza hacia la derecha.

Luego de que se han analizado las distribuciones, se pueden comparar los resultados finales para cada simulación, en la **Figura 43**, se puede observar el beneficio de cada escenario con integración (A1 y Q1), frente a un escenario sin integración. Por último, se debe agregar que el uso de estas métricas en la práctica, debe estar sujeto a la calibración y consulta con los actores involucrados, de tal forma de poder usar la métrica que mejor represente los beneficios percibidos por la comunidad. Este último paso quedará para investigaciones futuras.



**Figura 43. Diferencias entre escenarios al final de la simulación**

### 6.3.5 Comparación temporal

Además de llevarse a cabo un análisis de las métricas de impacto al final de la simulación, lo que representa un parámetro fijo, se analiza la variabilidad de cada métrica a medida que transcurre el tiempo de la simulación. Lo anterior permite obtener una comparación dinámica de los 3 escenarios analizados, lo que deja ver que aunque el escenario de integración quinquenal (Q1) es generalmente el más conveniente en términos de la reducción de los impactos a las comunidades, también es un escenario que en ocasiones produce mayores impactos. Lo anterior se explica por el hecho de que el escenario permite el desplazamiento de proyectos de un año a otro, ocasionando que en algunos años haya más proyectos que en el escenario sin integración.

Los valores diarios representan el promedio de cada métrica de análisis. Este valor corresponde a la media aritmética del valor alcanzado por todos los agentes de la simulación. He aquí una gran ventaja de la modelación basada en agentes, pues permite realizar un análisis tanto global, como detallado de cada escenario, pudiéndose obtener valores que varían en el tiempo y por agente.

Producto de la comparación dinámica, es posible ver lo beneficioso que sería poder contar con un contexto donde se lleve a cabo la integración entre proyectos de diferentes años (Q1), dado que los beneficios percibidos son generalmente más significativos. No obstante, al considerar el contexto chileno, donde es poco probable que lo anterior suceda, se muestran también los resultados para un escenario con integración anual (A1). Luego, al comparar el escenario sin integración con el A1, se observa de igual manera una reducción de los proyectos cercanos a cada agente, lo que finalmente se traduce en beneficios como la reducción de interrupciones y externalidades como, ruido, polvo y otros aspectos que aunque no son detallados en este estudio, son entendidos como parte de las externalidades de un proyecto de construcción (Budayan & Celik, 2021).

Al comprar el número de proyectos al año (PNP) en el tiempo, en la **Figura 31**, es posible notar los beneficios sostenidos que implican los escenarios con integración, donde se observa que la cantidad de proyectos al año, siempre es menor respecto al escenario sin integración.

Por otro lado, si se analizan los días con proyectos (PDP), es posible notar una diferencia respecto de la figura anterior. En la **Figura 32** se ilustra que los escenarios S/I y A1 son prácticamente similares en el tiempo, no obstante el escenario con integración mantiene beneficios, que aunque son menores, son sostenidos en el tiempo. No así el escenario Q1, el cual muestra un impacto mayor a las comunidades los primeros dos años de la simulación, lo que se explica por el desplazamiento de proyectos hacia estos años. No obstante, desde el año 2018 en adelante, los beneficios son cuantiosos y las curvas se separan nuevamente de forma significativa.

Luego al comparar la métrica de los días continuos sin proyectos (PDS), se observa un comportamiento bastante sostenido y oscilatorio en el tiempo para las tres curvas (ver **Figura 33**). Se observa una gran similitud entre el escenario S/I y el A1, no obstante, este último presenta valores levemente superiores, al igual como ocurre con la métrica PNP. Por su parte el escenario Q1 genera valores desfavorables dentro del primer año y luego del año 2017 se percibe una notoria diferencia entre este y los otros dos escenarios, lo que muestra valores favorables, similar como ocurre con la métrica PDP.

### 6.3.6 Análisis de sensibilidad

El principal supuesto tomado en cuenta para calcular las métricas anteriores (PNP, PDP y PDS), es la distancia de proximidad (DP). Esta distancia representa el radio que delimita la zona de percepción de un agente tipo comunidad, o bien, de un habitante. Para este estudio se establece una zona fija y estática para cada agente, lo que representa el lugar donde vive y la zona que lo rodea. Luego para identificar cuanto varían los datos al cambiar la magnitud de la distancia DP, se lleva a cabo un análisis de sensibilidad variando entre 250 y 750 metros, con intervalos de 250, por lo cual se comparan tres casos: igual distancia de proximidad, distancia de proximidad menor y

distancia mayor. Para llevar a cabo el análisis de sensibilidad se comparan los resultados de las métricas entre los escenarios con integración y el escenario sin integración. Es decir, se calculan las métricas para todos los escenarios con una distancia DP determinada y luego se compara entre ellos, obteniéndose los beneficios en términos porcentuales. Por último, el análisis de sensibilidad compara los beneficios obtenidos.

Para el PNP es posible observar que el porcentaje de variación de los resultados de los escenarios con integración, versus el escenario sin integración resulta similar en todos los casos, habiendo diferencias en no más de 3.6 puntos porcentuales.

Para el caso del PDP se observa un resultado similar, no obstante, los porcentajes de variación son mayores, dado que llega a haber una variación de 12.1 puntos porcentuales máximo.

Para el PDS se observa que se obtienen resultados similares en términos de los beneficios, observándose variaciones de hasta 3 puntos porcentuales.

## **6.4 Percepción de las comunidades**

### 6.4.1 Forma de obtener la percepción

Habitualmente en los estudios, la percepción de la comunidad respecto de la gestión de sistemas de infraestructura ha sido determinada por medio de encuestas masivas (Adekola et al., 2021; Araya et al., 2020; Jahanshahi et al., 2022). En estas encuestas se lleva a cabo también, una recopilación de la información sociodemográfica de las personas. Lo anterior permite relacionar el perfil de las personas con una determinada postura o tendencia y por medio de la caracterización sociodemográfica también es posible saber que tan representativas son las encuestas.

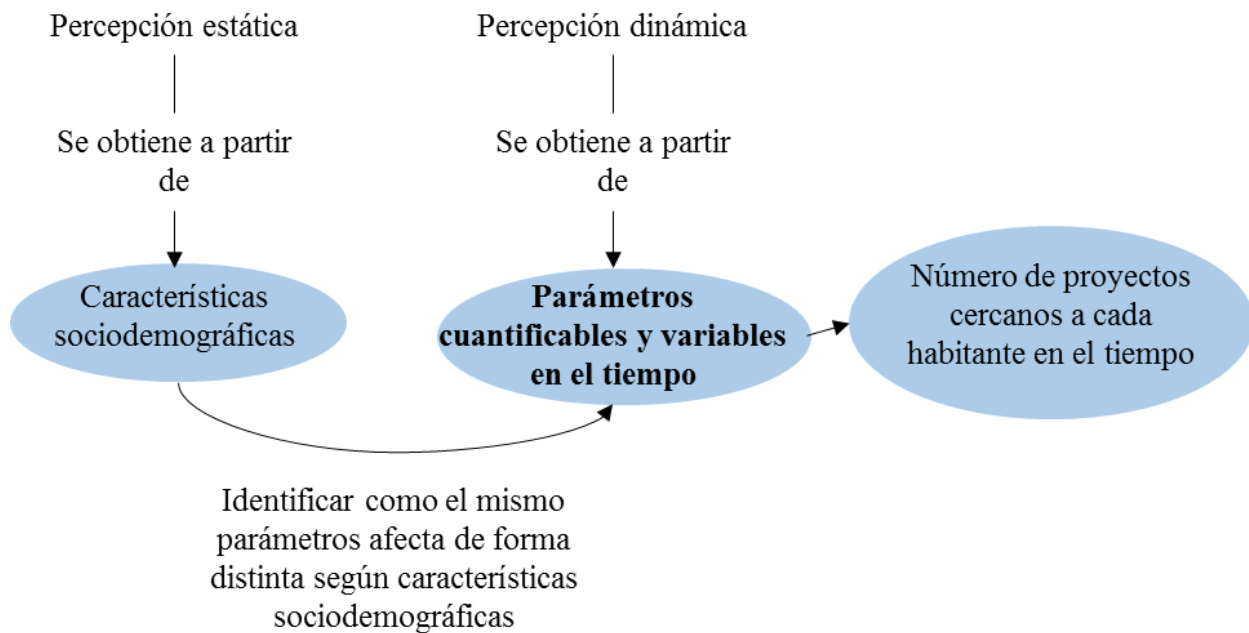
En el presente estudio no fue posible llevar a cabo una encuesta acerca de la gestión integrada, no obstante, con la herramienta de modelación utilizada, se ofrece una alternativa que podría ser una opción para determinar la postura de las personas.

Se establece la relación entre las métricas de estudio (PNP, PDP y PDS) y la percepción de las comunidades en base a las recomendaciones de los expertos consultados en este estudio, quienes argumentan que la percepción de las personas está directamente relacionada a la cantidad de proyectos que ellas ven realizarse en un mismo lugar, de forma consecutiva y en un mismo o en diferentes sistemas de infraestructura.

En la literatura reciente, Araya et al. (2021) es uno de los primeros autores en el área de la gestión de sistemas de infraestructura, en representar la percepción de las comunidades usando la modelación basada en agentes. Si bien este estudio plantea lo mismo, se reconoce que no se cuenta con encuestas previas que permitan determinar la percepción de las personas en base a sus características sociodemográficas. En cambio, esta investigación propone una nueva forma de determinar la percepción de las comunidades a partir de datos dinámicos, lo cual tiene sentido si se considera que la percepción de las comunidades no es estática, sino que cambia en el tiempo.

Es así como se opta por la opción de representar la postura de las comunidades por medio de valores medibles que surgen de la base de datos de los proyectos, pero que afectan a cada agente de forma separada. Este análisis es permitido gracias a la herramienta de modelación basada en agentes. Si

bien esta forma de representar la percepción de las comunidades es validada por un conjunto de expertos chilenos, aún resta llevar a cabo otros pasos para lograr obtener una mejor representación de la percepción de las comunidades, es decir, obtener la percepción a partir de datos dinámicos, y por medio de estudios y calibraciones, identificar como estos datos dinámicos afectan a las personas de forma diferente, dependiendo de sus características sociodemográficas. Así por ejemplo, se podría identificar diferentes distancias de proximidad (DP) para diferentes habitantes, según su ubicación dentro de la zona de estudio, su rango etario o nivel sociocultural, entre otras características, tal como se resume en la **Figura 44**.



**Figura 44. Formas de representar la percepción de las comunidades**

#### 6.4.2 Comparación entre los escenarios

Tal como como se indicó anteriormente, se presentan los resultados condensados en un valor único que depende de las comunidades: postura en relación a la gestión integrada. Es por ello que en la **Figura 34**, se muestra la curva de apoyo de los agentes durante el tiempo y por todo el periodo de análisis. Aquí es posible observar los resultados por escenario, los que siguen la tendencia de las métricas anteriores, pero esta vez considerándolas en conjunto. Es posible ver que los escenarios sin integración (S/I) y con integración anual (A1) son bastante similares, no obstante se puede apreciar que el escenario con integración trae consigo una mayor aprobación de la gestión durante el tiempo. Luego, el escenario con integración quinquenal (Q1) inicia la simulación con una aprobación inferior a los otros dos escenarios, lo que se debe al desplazamiento de algunos

proyectos al primer año, tal como se mencionó anteriormente. No obstante, luego del año 2018 se aprecia una clara diferencia en cuanto a la aprobación, la cual sube drásticamente.

Se puede observar que el comportamiento de todas las curvas mantiene una tendencia en el tiempo, lo que demuestra que el uso de esta métrica combinada puede ser de utilidad para comparar escenarios de forma objetiva y considerando más de una sola métrica en el análisis.

## **7 Recomendaciones**

Antes de comenzar con las recomendaciones para la implementación de gestión integrada, se debe reconocer que los resultados de este estudio aún distan bastante de la realidad, no obstante, los resultados presentados tienen un carácter mucho más amplio, dado que se presentan múltiples escenarios de integración y no un único escenario, aceptando que la integración puede darse en varios niveles y los beneficios pueden ser variados y no ser solo para las agencias.

En relación a lo anterior, en primer lugar, se debe tener en consideración que la gestión integrada no entregará los mismos resultados para cada contexto, dado que los criterios utilizados pueden variar entre una agencia y otra y entre un país y otro.

Mencionado lo anterior, y en base a los resultados de este estudio es posible generar recomendaciones para las agencias y tomadores de decisiones en base a la implementación de la gestión integrada.

### **7.1 Intervalo temporal**

Los resultados indican que para lograr una gestión integrada con mayores beneficios, es necesario permitir que los proyectos de distintos años se puedan integrar. Lo anterior puede ser una limitación para muchos escenarios o contextos, dado que la gestión estratégica en las agencias puede estar limitada por los periodos políticos y por restricciones presupuestarias (Araya & Vasquez, 2022), e incluso por restricciones de comunicación entre las agencias (Halfawy, 2008). Dado lo anterior, se recomienda a las agencias y tomadores de decisiones llevar a cabo mesas de trabajo e impulsar políticas de comunicación y colaboración entre las agencias de tal forma de lograr que la integración de proyectos al menos a nivel anual sea posible y sea una práctica recurrente. Más aún si se considera que la inversión o los esfuerzos iniciales de las agencias no tendrían que ser demasiado grandes, dado que el presupuesto anual final sería igual o menor al presupuesto que podría haber tenido en un contexto sin integración.

Dado que la integración de proyectos a nivel anual es algo que si se podría lograr en la práctica, se debe tener en consideración, que para que esto sea posible se necesitarían dos cosas: los proyectos del año deberían estar definidos para cada agencia, y los encargados de la integración deberían ponerse de acuerdo antes que inicie el año presupuestario y la ejecución de los proyectos.

### **7.2 Cercanía entre proyectos**

Los resultados indican que mientras más grande es la distancia permitida entre proyectos, mayor es la cantidad de proyectos integrados. No obstante, se debe tener cuidado en diferenciar entre una integración de proyectos y una coordinación de proyectos. Entendiéndose lo segundo como solo llevar a cabo dos proyectos relativamente cercanos en la misma fecha, pero siendo considerado cada uno, como proyectos separados debido a su cercanía.

Si bien, aquí se analizan dos rangos de distancia, se considera que los valores para los escenarios con menor rango de distancia 1 son los más realistas, más aún si habitualmente en la literatura se considera que para que dos proyectos sean integrados, además deben estar traslapados parcial o totalmente.

Dicho lo anterior, se recomienda a las agencias y tomadores de decisiones realizar estudios para determinar cuál sería la mejor distancia a considerar para considerar que dos proyectos podrían ser integrados y así calcular los reales beneficios que esto podría tener. Hasta no contar con una distancia estándar, es posible que solo se puedan integrar proyectos que se puedan traslapar espacialmente, dejando de lado los beneficios que podría traer integrar proyectos que no pudieran traslaparse, tal como los beneficios identificados en el análisis de las métricas de impacto a las comunidades.

### **7.3 Beneficios**

Si bien el criterio de integración de proyectos sobre cierto costo no es un criterio que de buenos resultados, lo cierto es que en la práctica integrar proyectos cuya inversión sea baja, pudieran no entregar los mismos beneficios económicos que aquellos proyectos más grandes y de mayor inversión. Es por ello que se recomienda a las agencias y tomadores de decisiones que determinen los recursos en tiempo y dinero que deben emplear para integrar dos o más proyectos, versus los beneficios de integrarlos, tal como se hace actualmente para la evaluación de proyectos considerando los costos de ciclo de vida. Aquí la diferencia sería, que se estaría comparando solo los costos y beneficios de la ejecución de cada proyecto, durante el tiempo que dure la misma ejecución.

En relación a los recursos necesarios para la integración de proyectos se debe tener en consideración las horas hombre que se deben emplear, antes del periodo presupuestario del proyecto que se vaya a ejecutar, lo que podría ser considerado un trabajo extra y por ende, no sea realizado. Es por ello que, para lograr una integración efectiva debería haber personal encargado exclusivamente de integrar proyectos. Ahora bien, se debe justificar la contratación de nuevo personal y determinar cuál sería la motivación para hacerlo.

En este sentido surge la necesidad de calcular los beneficios de la integración de proyectos, pero no solo los beneficios para las agencias, sino también los beneficios para las comunidades. Es por ello que este estudio pone énfasis en el cálculo de ambos beneficios, que aunque no sean del todo precisos, sirven para generar un primer acercamiento al análisis costo-beneficio de la gestión integrada al menos en la etapa de ejecución de los proyectos. Aunque para realizar un análisis real, resulta necesario transformar los beneficios para las comunidades en unidades monetarias, lo cual es otro desafío propuesto.

## **7.4 Inclusión de las comunidades**

Aunque en este estudio hayan sido calculados los beneficios de la gestión integrada para las comunidades, lo cierto es que las métricas usadas, aunque resultan lógicas y están respaldadas por expertos, aún es necesario realizar una validación por la población beneficiada. Dado lo anterior, es que se recomienda realizar estudios que permitan determinar la importancia que las comunidades le dan a las métricas aquí propuestas y si es necesario, considerar nuevas métricas de análisis.

Pudiendo determinar la percepción que las comunidades tienen en relación a los beneficios de la gestión integrada, será posible realizar un análisis acabado, que permita saber si el esfuerzo empleado en la integración de proyectos por parte de las agencias está justificado.

## 8 Conclusión

Por medio de la presente tesis se ha podido analizar algunos de los criterios que se han ocupado para integrar proyectos de diferentes sistemas de infraestructura en lo que se conoce como gestión integrada. Además de lo anterior se simula la gestión integrada por medio de una modelación basada en agentes, y a través de los resultados se observa el impacto y postura de las comunidades frente a la gestión integrada.

Se concluye que la gestión integrada es una forma de gestión de sistemas de infraestructura interdependientes que puede generar beneficios no solo para las agencias, sino también para las comunidades. No obstante, se debe tener presente las limitaciones que cada contexto puede imponer a la gestión integrada, con la finalidad de calcular los costos y beneficios y determinar si es conveniente o no aplicarla en un determinado escenario o realidad, como en distintos países.

Por medio de este estudio se ha demostrado a diferencia de la literatura, que los escenarios de integración son múltiples y el nivel de integración global varía considerablemente de un escenario a otro, lo que implica en los diferentes beneficios que se pueden obtener.

Los proyectos que pueden ser integrados deben cumplir al menos los requisitos de cercanía espacial y temporal, y además, deben cumplir criterios adicionales que pudieran ser impuestos por las agencias o el marco regulatorio, tal como un periodo breve de planificación.

Se ha demostrado también que la herramienta de Modelación Basada en Agentes sirve para simular la gestión integrada, permitiendo integrar a las comunidades en el análisis. Además desde el punto de vista de las comunidades, este estudio ha logrado realizar un análisis del impacto de la gestión integrada teniendo como centro de análisis a las mismas comunidades, es decir, que las métricas propuestas son calculadas en base a la ubicación de una comunidad, en vez de como se lleva a cabo comúnmente en la literatura, en donde las métricas dependen de cada proyecto.

Se presenta una forma diferente de obtener la percepción de las comunidades por medio de parámetros dinámicos, no obstante aún queda la labor de determinar cómo las características sociodemográficas pueden influenciar el uso de los parámetros y sus valores umbrales.

Queda como desafíos para estudios futuros, el desarrollo de un procedimiento detallado que permita integrar proyectos en el tiempo, considerando las restricciones identificadas en este estudio. También se hace necesario calibrar métricas, como la distancia entre proyectos y la distancia de proximidad de las comunidades, de tal forma de estandarizar el cálculo de beneficios de la gestión integrada.

## Referencias

- Abebe, Y., Adey, B. T., & Tesfamariam, S. (2021). Sustainable funding strategies for stormwater infrastructure management: A system dynamics model. *Sustainable Cities and Society*, 64(August 2020), 102485. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102485>
- Abu-Samra, S., Ahmed, M., & Amador, L. (2020). Asset Management Framework for Integrated Municipal Infrastructure. *Journal of Infrastructure Systems*, 26(4), 04020039. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)is.1943-555x.0000580](https://doi.org/10.1061/(asce)is.1943-555x.0000580)
- Abu Dabous, S., Zeiada, W., Zayed, T., & Al-Ruzouq, R. (2020). Sustainability-informed multi-criteria decision support framework for ranking and prioritization of pavement sections. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118755. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118755>
- Abu Samra, S., Ahmed, M., Hammad, A., & Zayed, T. (2018). Multiobjective Framework for Managing Municipal Integrated Infrastructure. *Journal of Construction Engineering and Management*, 144(1), 04017091. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001402](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001402)
- Adekola, P. O., Iyalomhe, F. O., Paczoski, A., Abebe, S. T., Pawłowska, B., Bąk, M., & Cirella, G. T. (2021). Public perception and awareness of waste management from Benin City. *Scientific Reports*, 11(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79688-y>
- Alhazmi, N. (2016). Article information :A theoretical framework for physical asset management practices. *Facilities*, 36(3/4), 135–150. <https://doi.org/10.1108/F-02-2016-0025>
- Almeida, N., Trindade, M., Komljenovic, D., & Finger, M. (2022). A conceptual construct on value for infrastructure asset management. *Utilities Policy*, 75(October 2019), 101354. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2022.101354>
- Amador, L. E., & Magnuson, S. (2011). Adjacency modeling for coordination of investments in infrastructure asset management: Case study of Kindersley, Saskatchewan, Canada. *Journal of the Transportation Research Board*, 2246, 8–15. <https://doi.org/10.3141/2246-02>
- Araya, F., Faust, K., & Kaminsky, J. A. (2020). Understanding hosting communities as a stakeholder in the provision of water and wastewater services to displaced persons. *Sustainable Cities and Society*, 57(November 2019), 102114. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102114>
- Araya, F., Faust, K. M., & Kaminsky, J. A. (2021). Agent-Based Model of Hosting Communities' Perceptions of Water and Wastewater Infrastructure during the German Refugee Crisis. *Journal of Management in Engineering*, 37(4), 1–17. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0000938](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000938)
- Araya, F., & Vasquez, S. (2022). Challenges, Drivers, and Benefits To Integrated Infrastructure Management of Water, Wastewater, Stormwater and Transportation Systems. *Sustainable Cities and Society*, 82(April), 103913. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103913>
- Asgarpour, S., Hartmann, A., Augustijn, E.-W. P. W. M., & Dorée, A. (2022). The Other Side of the Interdependency Coin: Identifying Coordination and Investment Opportunities for Infrastructure Systems. *Journal of Infrastructure Systems*, 28(2), 4022011. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)is.1943-555x.0000678](https://doi.org/10.1061/(asce)is.1943-555x.0000678)
- Atef, A., & Moselhi, O. (2014). Modeling spatial and functional interdependencies of civil infrastructure networks. *Pipelines 2014: From Underground to the Forefront of Innovation and Sustainability - Proceedings of the Pipelines 2014 Conference*, 1558–1567. <https://doi.org/10.1061/9780784413692.141>

- Batty, M., & Torrens, P. M. (2005). Modelling and prediction in a complex world. *Futures*, 37(7 SPEC.ISS.), 745–766. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2004.11.003>
- Beitelmal, W., Molenaar, K. R., Javernick-Will, A., & Pellicer, E. (2017). Challenges and barriers to establishing infrastructure asset management A comparative study between Libya and the USA. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 24(6), 1184–1202. <https://doi.org/10.1108/ECAM-12-2015-0200>
- Budayan, C., & Celik, T. (2021). Determination of Important Building Construction Nuisances in Residential Areas on Neighbouring Community. *Teknik Dergi*, 10611–10628. <https://doi.org/10.18400/tekderg.486628>
- Canadian Environmental Assessment Agency. (2008). *Public Participation Guide* (Minister of Public Works and Government Services Canada (ed.)). <http://www.elsevier.com/locate/scp>
- Chappin, E. J. L., & van der Lei, T. (2014). Adaptation of interconnected infrastructures to climate change: Asocio-technical systems perspective. *Utilities Policy*, 31, 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2014.07.003>
- Coffelt, D., & Hendrickson, C. (2019). *Fundamentals of Infrastructure Management* (Vol. 3rd).
- Cooley, P., & Solano, E. (2011). Agent-Based Model (ABM) Validation Considerations. *SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation*, c, 134–139. [http://www.thinkmind.org/index.php?view=article&articleid=simul\\_2011\\_7\\_10\\_50045](http://www.thinkmind.org/index.php?view=article&articleid=simul_2011_7_10_50045)
- Echaveguren, T., Chamorro, A., & De Solminihac, H. (2017). Concepts for modeling road asset management systems using agent-based simulation. *Revista Ingenieria de Construccion*, 32(1), 47–56. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732017000100005>
- Elsawah, H., Bakry, I., & Moselhi, O. (2016). Decision Support Model for Integrated Risk Assessment and Prioritization of Intervention Plans of Municipal Infrastructure. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 7(4), 04016010. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ps.1949-1204.0000245](https://doi.org/10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000245)
- EPA, E. P. A. (2012). *Caja de Herramientas para la Participación Pública Marzo 2012*. 71.
- FCM, & NRC. (2003). Coordinating Infrastructure Works a Best Practice By The National Guide to Sustainable Municipal Infrastructure. In *Federation of Canadian Municipalities and National Research Council The*.
- Fischer, J. M., & Amekudzi, A. (2011). Quality of Life, Sustainable Civil Infrastructure, and Sustainable Development: Strategically Expanding Choice. *Journal of Urban Planning and Development*, 137(1), 39–48. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)up.1943-5444.0000039](https://doi.org/10.1061/(asce)up.1943-5444.0000039)
- Fu, G., Wilkinson, S., & Dawson, R. J. (2016). A Spatial Network Model for Civil Infrastructure System Development. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 31(9), 661–680. <https://doi.org/10.1111/mice.12204>
- Grafius, D. R., Varga, L., & Jude, S. (2020). Infrastructure Interdependencies: Opportunities from Complexity. *Journal of Infrastructure Systems*, 26(4), 04020036. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)is.1943-555x.0000575](https://doi.org/10.1061/(asce)is.1943-555x.0000575)
- Grigg, N. S. (2003). Water, Wastewater, and Stormwater Infrastructure Management. In *Water, Wastewater, and Stormwater Infrastructure Management*. Lewis Publishers. <https://doi.org/10.1201/b12237>
- Grigorvey, I. (2016). AnyLogic in Three Days. In *Apostilas Simulação* (2 nd).
- Haas, R., & Hudson, W. R. (2015). *Pavement Asset Management*. Wiley.
- Halfawy, M. R. (2008). Integration of Municipal Infrastructure Asset Management Processes:

- Challenges and Solutions. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 22(3), 216–229. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0887-3801\(2008\)22:3\(216\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0887-3801(2008)22:3(216))
- Halfawy, M. R. (2010). Municipal information models and federated software architecture for implementing integrated infrastructure management environments. *Automation in Construction*, 19(4), 433–446. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.11.013>
- Hasan, S., & Foliente, G. (2015). Modeling infrastructure system interdependencies and socioeconomic impacts of failure in extreme events: emerging R&D challenges. *Natural Hazards*, 78(3), 2143–2168. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1814-7>
- Holden, R., Val, D. V., Burkhard, R., & Nodwell, S. (2013). A network flow model for interdependent infrastructures at the local scale. *Safety Science*, 53, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.08.013>
- InfraGuide. (2003). *An integrated approach to assessment and evaluation of municipal road, sewer and water networks. Canada: InfraGuide innovations and best practices (multi-discipline), National Guide to Sustainable Municipal Infrastructure.*
- IPWEA. (2006). Introduction. In *International Infrastructure Management Manual* (3rd ed., pp. 1.2-1.8).
- Jahanshahi, D., Costello, S. B., Dirks, K. N., Chowdhury, S., & Wee, B. van. (2022). Understanding Perceptions of Cycling Infrastructure Provision and its Role in Cycling Equity. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 036119812211178. <https://doi.org/10.1177/03611981221117821>
- Johansen Bertoglio, O. (1997). *Introducción a la Teoría General de Sistemas.*
- Kielhauser, C., Adey, B. T., & Lethanh, N. (2017). Investigation of a static and a dynamic neighbourhood methodology to develop work programs for multiple close municipal infrastructure networks. *Structure and Infrastructure Engineering*, 13(3), 361–389. <https://doi.org/10.1080/15732479.2016.1162818>
- Kirkman, R., & Voulvoulis, N. (2017). The role of public communication in decision making for waste management infrastructure. *Journal of Environmental Management*, 203, 640–647. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.002>
- Macal, C. M., & North, M. J. (2010). Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation*, 4(3), 151–162. <https://doi.org/10.1057/jos.2010.3>
- Macharis, C., Kin, B., Balm, S., & Ploos Van Amstel, W. (2016). Multiactor participatory decision making in urban construction logistics. *Transportation Research Record*, 2547, 83–90. <https://doi.org/10.3141/2547-12>
- Manny, L. (2023). Socio-Technical Challenges Towards Data-Driven and Integrated Urban Water Management: A Socio-Technical Network Approach. *SSRN Electronic Journal*, 90(January), 104360. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4168134>
- McPhearson, T., Haase, D., Kabisch, N., & Gren, Å. (2016). Advancing understanding of the complex nature of urban systems. *Ecological Indicators*, 70, 566–573. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.054>
- Metayer, G., Torres-Machi, C., & Bastias, A. (2020). A Proposed Framework for the Integrated Management of Municipal Infrastructure. *Construction Research Congress*, 007(1994), 809–818.
- Ministerio de Desarrollo Social. (2017). *Manual de Participación Ciudadana Ministerio de Desarrollo Social.* <https://biblioteca.digital.gob.cl/bitstream/handle/123456789/2298/2017.07.20 - MANUAL>

- Definitivo Participacion Ciudadana.pdf?sequence=1&isAllowed=y  
 Ley N° 20.285 Sobre Acceso a la Información Pública, Pub. L. No. 11.08.2008, 1 (2008).  
<https://bcn.cl/2f8ep>
- Muerza, V., & Guerlain, C. (2021). Sustainable construction logistics in urban areas: A framework for assessing the suitability of the implementation of construction consolidation centres. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(13). <https://doi.org/10.3390/su13137349>
- North, M. (2001). Multi-Agent Social and Organizational Modeling of Electric Power and Natural Gas Markets. *Computational & Mathematical Organization Theory*, *7*(4), 331–337.
- Osman, H. (2012). Agent-based simulation of urban infrastructure asset management activities. *Automation in Construction*, *28*, 45–57. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.06.004>
- Osman, H. (2016). Coordination of urban infrastructure reconstruction projects. *Structure and Infrastructure Engineering*, *12*(1), 108–121. <https://doi.org/10.1080/15732479.2014.995677>
- Oughton, E. J., Usher, W., Tyler, P., & Hall, J. W. (2018). Infrastructure as a Complex Adaptive System. *Complexity*, *2018*, 11–14. <https://doi.org/10.1155/2018/3427826>
- Ouyang, M. (2014). Review on modeling and simulation of interdependent critical infrastructure systems. *Reliability Engineering and System Safety*, *121*, 43–60. <https://doi.org/10.1016/j.res.2013.06.040>
- Rashedi, R., & Hegazy, T. (2016). Holistic Analysis of Infrastructure Deterioration and Rehabilitation Using System Dynamics. *Journal of Infrastructure Systems*, *22*(1), 04015016. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)is.1943-555x.0000273](https://doi.org/10.1061/(asce)is.1943-555x.0000273)
- Rashid, M., & Pandit, D. (2020). Rural communities' perception of and willingness to pay for wastewater and stormwater management infrastructure in bihar, India. *Journal of Water Sanitation and Hygiene for Development*, *10*(1), 36–47. <https://doi.org/10.2166/washdev.2020.033>
- Rinaldi, S. M., Peerenboom, J. P., & Kelly, T. K. (2001). Identifying, Understanding, and Analyzing Critical Infrastructure Interdependencies. *IEEE Control Systems Magazine*, *21*(6), 11–25.
- Saidi, S., Kattan, L., Jayasinghe, P., Hettiaratchi, P., & Taron, J. (2018). Integrated infrastructure systems—A review. *Sustainable Cities and Society*, *36*(September), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.09.022>
- Sanford Bernhardt, K. L. (2004). An Agent-Based Framenwork for Modeling Civil Infrastructure Systems Management. *Information Technology in Civil Engineering*, *2002*, 1–8.
- Sanford Bernhardt, K. L., & McNeil, S. (2008). Agent-Based Modeling: Approach for Improving Infrastructure Management. *Journal of Infrastructure Systems*, *14*(3), 253–261. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1076-0342\(2008\)14:3\(253\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1076-0342(2008)14:3(253))
- Sanusi, F., Choi, J., Ulak, M. B., Ozguven, E. E., & Abichou, T. (2020). Metadata-Based Analysis of Physical–Social–Civic Systems to Develop the Knowledge Base for Hurricane Shelter Planning. *Journal of Management in Engineering*, *36*(5), 04020041. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0000802](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000802)
- Sargent, R. G. (2013). AN INTRODUCTION TO VERIFICATION AND VALIDATION OF SIMULATION MODELS. *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference*, 321–327.
- Shahata, K., El-zahab, S., Zayed, T., & Alfalah, G. (2022). Automation in Construction Rehabilitation of municipal infrastructure using risk-based performance. *Automation in*

- Construction*, 140(April), 104335. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104335>
- Shahata, K., & Zayed, T. (2010). *Integrated Decision-Support Framework for Municipal Infrastructure Asset*. 514, 1492–1502.
- Shahata, K., & Zayed, T. (2016). Integrated Risk-Assessment Framework for Municipal Infrastructure. *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(1), 04015052. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001028](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001028)
- Spearing, L. A., & Faust, K. M. (2020). Cascading system impacts of the 2018 Camp Fire in California: The interdependent provision of infrastructure services to displaced populations. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50(March), 101822. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101822>
- Timilsina, G., Hochman, G., & Song, Z. (2020). Infrastructure, Economic Growth, and Poverty : A Review. *Policy Research Working Paper, No. 9258*. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/33821>
- Tscheikner-Gratl, F., Sitzenfrei, R., Rauch, W., & Kleidorfer, M. (2016). Integrated rehabilitation planning of urban infrastructure systems using a street section priority model. *Urban Water Journal*, 13(1), 28–40. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2015.1057174>
- Uddin, W., Hudson, W. R., & Haas, R. (2013). The Challenge of Managing Infrastructure. In *Public Infrastructure Asset Management* (2nd ed., pp. 3–10). McGraw-Hill Education.
- Vasquez, S., & Araya, F. (2022). Exploring Challenges to Implement an Integrated Urban Infrastructure Management Approach. *Constructio Research Congress*, 240–248.
- Volchenkov, D. (2008). Analysis of urban complex networks. *Condensed Matter Physics*, 11(2), 331–340. <https://doi.org/10.5488/CMP.11.2.331>
- World Bank Group. (2021). *Demographic Trends and Urbanization*. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35469>
- Wu, P. P. Y., Fookes, C., Pitchforth, J., & Mengersen, K. (2015). A framework for model integration and holistic modelling of socio-technical systems. *Decision Support Systems*, 71, 14–27. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2015.01.006>
- Yang, Y., Ng, S. T., Xu, F. J., & Skitmore, M. (2018). Towards sustainable and resilient high density cities through better integration of infrastructure networks. *Sustainable Cities and Society*, 42(January), 407–422. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.07.013>
- Yazdani, S., Dola, K., Azizi, M. M., & Yusof, J. M. (2014). Challenges of Coordination in Provision of Urban Infrastructure for New Residential Areas: The Iranian Experience. *Environmental Management and Sustainable Development*, 4(1), 48. <https://doi.org/10.5296/emsd.v4i1.6557>