



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

CARRERA DE SISTEMAS INFORMÁTICOS Y COMPUTACIÓN

Ciudades gestionadas por datos a través de gemelos digitales

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:

INGENIERO EN SISTEMAS INFORMÁTICOS Y COMPUTACIÓN

Autor: López Montaño, Jhandry David

Ortiz Rivera, Luis Enrique

Director: Cabrera Silva, Armando Augusto

LOJA

2023

Aprobación del director del Trabajo de Titulación

Loja, **día de mes de año**

Magister,
Armando Augusto Cabrera Silva
Director de la carrera de Sistemas Informáticos y Computación
Ciudad.-

De mi consideración:

Me permito comunicar que, en calidad de director del presente Trabajo de Titulación denominado: Ciudades gestionadas por datos a través de Gemelos Digitales realizado por Jhandry David López Montaño y Luis Enrique Ortiz Rivera ha sido orientado y revisado durante su ejecución, así mismo ha sido verificado a través de la herramienta de similitud académica institucional, y cuenta con un porcentaje de coincidencia aceptable. En virtud de ello, y por considerar que el mismo cumple con todos los parámetros establecidos por la Universidad, doy mi aprobación a fin de continuar con el proceso académico correspondiente.

Particular que comunico para los fines pertinentes.

Atentamente,

Director: Mgtr. Armando Augusto Cabrera Silva
C.I.: 1102725213
Correo electrónico: aacabrera@utpl.edu.ec

Declaración de autoría y cesión de derechos

Nosotros, Jhandry David López Montaño y Luis Enrique Ortiz Rivera, declaramos y aceptamos en forma expresa lo siguiente:

Ser autor (a) del Trabajo de Titulación denominado: Ciudades gestionadas por datos a través de Gemelos Digitales, de la carrera de Sistemas Informáticos y Computación, específicamente de los contenidos comprendidos en: Capítulo 1. Generalidades, Capítulo 2. Marco teórico, Capítulo 3. Modelo Operativo del Gémino Digital, Capítulo 4. Herramientas de desarrollo y despliegue, Capítulo 5. Desarrollo, Capítulo 6. Validación y ejecución, Conclusiones y Recomendaciones, siendo Cabrera Silva Armando Augusto, director del presente trabajo; también declaro que la presente investigación no vulnera derechos de terceros ni utiliza fraudulentamente obras preexistentes. Además, ratifico que las ideas, criterios, opiniones, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad. Eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones judiciales o administrativas, en relación con la propiedad intelectual de este trabajo.

Que la presente obra, producto de mis actividades académicas y de investigación, forma parte del patrimonio de la Universidad Técnica Particular de Loja, de conformidad con el artículo 20, literal j), de la Ley Orgánica de Educación Superior; y, artículo 91 del Estatuto Orgánico de la UTPL, que establece: "Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad", en tal virtud, cedo a favor de la Universidad Técnica Particular de Loja la titularidad de los derechos patrimoniales que me corresponden en calidad de autor/a, de forma incondicional, completa, exclusiva y por todo el tiempo de su vigencia.

La Universidad Técnica Particular de Loja queda facultada para ingresar el presente trabajo al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública, en cumplimiento del artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

.....
Autor: Jhandry David López Montaño

C.I.: 1105666034

Correo electrónico: jdlopez12@utpl.edu.ec

.....
Autor: Luis Enrique Ortiz Rivera

C.I.: 1105330367

Correo electrónico: leortiz6@utpl.edu.ec

Dedicatoria

Dedico este trabajo:

A...

Luis Enrique Ortiz Rivera

Agradecimiento

Agradezco...

A la Universidad Técnica Particular de Loja, por la oportunidad brindada de alcanzar un nuevo reto profesional.

Al Mgtr. Armando Cabrera, director de tesis quien compartió sus conocimientos y comprensión durante este proceso de aprendizaje.

A mis colegas y amigos Bruno, Jonathan, Jorge y Ricardo con los cuales tuve la fortuna de coincidir y compartir.

Luis Enrique Ortiz Rivera

Índice de Contenido

Carátula.....	1
Aprobación del director del Trabajo de Titulación.....	1
Declaración de autoría y cesión de derechos.....	2
Dedicatoria.....	4
Agradecimiento	5
Índice de Contenido	6
Índice de Tablas.....	9
Índice de Figuras	9
Resumen	13
Abstract.....	14
Introducción	15
Capítulo uno	16
Generalidades.....	16
1.1. Problemática	16
1.2. Justificación	17
1.3. Objetivos	18
1.3.1. Objetivos Específicos	18
1.4. Estructura del Documento.....	18
Capítulo dos.....	20
Marco teórico	20
2.1. Definición de Ciudad	20
2.2. Ciudad Moderna.....	21
2.2.1. Desafíos de las Ciudades Modernas	21
2.2.2. La Transformación Digital de las Ciudades Modernas mediante las TIC ...	22
2.3. Ciudad Inteligente	24
2.3.1. Características de una Ciudad Inteligente	26
2.4. Gemelo Digital.....	28
2.4.1. Tipos de Gemelo Digital	29
2.4.2. Variantes de un Gemelo Digital	31
2.4.3. Beneficios de los Gemelos Digitales en la Gestión de Ciudades	33
2.4.4. Diseño de un Gemelo Digital para una Ciudad Inteligente.....	34
2.4.5. Componentes de un Gemelo Digital	40

2.5.	Modelos Digitales 3D para la Representación de un Ciudad	45
2.5.1.	Niveles de Detalle en Modelos Digitales 3D	46
2.5.2.	Modelo Digital de Elevación	48
2.5.3.	Modelo de Información de la Ciudad	50
2.5.4.	Modelo de Información de Construcción	52
2.5.5.	Modelo de Información Geográfica.....	56
2.5.6.	Otros Modelos de Información.....	60
2.6.	Modelos Semánticos de Ciudades en 3D.....	62
2.6.1.	Modelo Semántico CityGML.....	63
2.6.2.	Modelo Semántico IFC	68
2.6.3.	Modelo Semántico de Datos.....	69
2.7.	Sistemas de la Era Digital	71
2.7.1.	Sistema de Registros	71
2.7.2.	Sistema de Compromiso	71
2.7.3.	Sistemas de Inteligencia.....	72
2.7.4.	Sistemas de las Cosas	73
2.8.	Lago de Datos.....	75
2.8.1.	Modelo de un Lago de Datos para una Ciudad Inteligente	75
Capítulo tres	78	
Modelo Operativo del Gemelo Digital.....	78	
3.1.	Ciclo del Modelo Operativo	78
3.1.1.	Recopilación de datos	79
3.1.2.	Análisis y Procesamiento de Datos	80
3.1.3.	Modelado y Simulación	81
3.1.4.	Visualización de Información	82
3.1.5.	Toma de Decisiones.....	82
3.1.6.	Optimización de la Producción	83
3.2.	Arquitectura.....	84
Capítulo cuatro.....	86	
Herramientas de desarrollo y despliegue	86	
4.1.	Herramientas de Modelado 3D.....	86
4.1.1.	ArcGIS Pro.....	86
4.1.2.	Revit.....	87
4.2.	Herramientas de Manejo de Datos	88

4.2.1.	Azure Data Lake Gen2	89
4.2.2.	ArcGIS Online	90
4.3.	Herramientas de Modelado Semántico	91
4.3.1.	Revit IFC	91
4.3.2.	FME Desktop	92
4.3.3.	GeoJSON.....	93
4.3.4.	Formato JSON-LD.....	93
4.4.	Herramientas de Simulación	94
4.4.1.	Traffic Simulation.....	94
4.5.	Herramientas de Visualización	95
4.5.1.	ArcGIS Experience Builder	95
4.6.	Disposición de Herramientas en la Arquitectura del Sistema.....	96
Capítulo cinco	98	
Desarrollo	98	
5.1.	Caso de Estudio	98
5.2.	Fuentes de datos	99
5.2.1.	Generación de Modelos 3D	99
5.2.2.	Integración de datos del Catastro de Loja y datos del GIM.....	100
5.3.	Almacenamiento, procesamiento e interpretación de los datos	104
5.3.1.	Análisis y procesamiento de datos usando los servicios de Azure	105
5.3.2.	Desarrollo del Modelo Semántico 3D	109
5.3.3.	Mapeo de la Ontología a un Modelo de Tablas	116
5.4.	Visualización del Gemelo Digital	117
5.4.1.	Configurar un proyecto en ArcGIS Experience Builder	118
5.4.2.	Conexión a los datos	122
5.4.3.	Configurar las interacciones y funcionalidades	124
5.4.4.	Publicar y desplegar el proyecto.....	126
Capítulo seis	129	
Validación y Ejecución	129	
6.1.	Representación de Capas GIS y BIM.....	130
6.1.1.	Metodología de validación.....	130
6.1.2.	Carga de Modelos GIS y BIM	131
6.1.3.	Ánálsis de Resultados	135

6.2.	Precisión Espacial del Gemelo Digital	135
6.2.1.	Metodología de Validación	136
6.2.2.	Puntos de referencia	137
6.2.3.	Medición de Parcelas	138
6.2.4.	Análisis de resultados	140
6.3.	Precisión de información del Gemelo Digital	142
6.3.1.	Metodología de Evaluación	142
6.3.2.	Muestra Representativa de Entidades.....	143
6.3.3.	Análisis de Resultados	144
	Conclusiones	149
	Recomendaciones	151
	Referencias.....	153

Índice de Tablas

Tabla 1 Dimensiones de una ciudad inteligente según la EU.....	27
Tabla 2 Creación de valor a través del uso del gemelo digital en diferentes ámbitos	39
Tabla 3 Ontologías Relacionadas con las Dimensiones de la Ciudad Inteligente	69
Tabla 4 Formatos de datos geoespaciales	70
Tabla 5 Campos de las entidades en JSON-LD.....	109
Tabla 6 Propiedades de la clase SpatialObject.....	110
Tabla 7 Propiedades de la clase Geometry	114
Tabla 8 Archivos Principales para la Representación del Modelo GIS del Catastro de la Ciudad en Formato Shapefile.....	131
Tabla 9 Comparación de Coordenadas de Referencia	138
Tabla 10 Resultados de Medición de Parcelas en el Gemelo Digital	138
Tabla 11 Comparación de Atributos entre el Gemelo Digital y el Sistema de Catastro Existente	144

Índice de Figuras

Figura 1 Componentes principales de un gemelo digital	29
Figura 2 Tipos de Gemelo Digital	30
Figura 3 Entorno de un gemelo digital.....	31
Figura 4 Variantes de Gemelo Digital.....	32
Figura 5 Capas necesarias para desarrollar una ciudad inteligente gemela digital	34
Figura 6 Mapa del suelo	35
Figura 7 Ejemplo de Modelo 3D BIM Integrado en el Terreno	36

Figura 8 Comparación 2D y 3D de Infraestructuras en la Capa 2 del Modelo de SCDT	37
Figura 9 Vista 3D de movilidad urbana en una ciudad.....	38
Figura 10 Representación de una ciudad conectada por sensores IoT	38
Figura 11 Diagrama de los componentes de un gemelo digital	41
Figura 12 Visualización de datos en un gemelo digital	42
Figura 13 Uso de un modelo predictivo para el consumo eléctrico de un edificio	43
Figura 14 Arquitectura del gemelo digital	44
Figura 15 Diferentes detalles geométricos para una columna de acero	46
Figura 16 Representación de un mismo edificio en diferentes niveles de detalle	47
Figura 17 Diferencias entre el MDS y MDT	48
Figura 18 Captura de información altimétrica por LIDAR aéreo.....	49
Figura 19 Visualización de un Modelo de Información de la Ciudad.....	51
Figura 20 Integración de GIS, BIM y IoT en el Modelo CIM.....	52
Figura 21 Ciclo de vida de un proyecto	53
Figura 22 Ejemplo de un modelo BIM	54
Figura 23 Procesos de creación de modelos BIM en edificios nuevos o existentes.....	55
Figura 24 Tipos de entidades geográficas.....	57
Figura 25 Datos ráster.....	57
Figura 26 Ejemplo de tabla de atributos de una entidad.....	58
Figura 27 Superposición de diferentes capas de datos en un mapa GIS.....	60
Figura 28 Integración de modelos para una visión holística de la ciudad	61
Figura 29 Descripción general del módulo CityGML 3.0.....	63
Figura 30 Modelo de ciudad 3D de acuerdo con el estándar CityGML	65
Figura 31 Aplicación de ISO 19109 e ISO 19107 en el estándar CityGML	66
Figura 32 Representación interior/exterior de un edificio	67
Figura 33 Modelo IFC y modelos CityGML con diferentes LOD	68
Figura 34 Sistemas de registro, compromiso, análisis e inteligencia	72
Figura 35 Interacción de los diferentes sistemas de la era digital con los clientes	74
Figura 36 Componentes clave de un Lago de datos para una ciudad inteligente	76
Figura 37 Modelo operativo propuesto	78
Figura 38 Datos generados por el usuario para el análisis espacial urbano	79
Figura 39 Simulación de ruido derivada de un modelo de ciudad en 3D	81
Figura 40 Arquitectura de Gemelo Digital de Ciudad.....	84
Figura 41 Mapa representado en la interfaz de ArcGIS Pro	87
Figura 42 Modelo BIM de casa creada en Revit	88
Figura 43 Interfaz de Usuario de la plataforma Azure Data Lake	90
Figura 44 Modelos GIS cargados en Arcgis Online de Esri	91

Figura 45 Interfaz de usuario de Revit con las opciones del estándar IFC	92
Figura 46 Escena de una simulación de tráfico en un puente elevado	94
Figura 47 Interfaz de ArcGIS Web AppBuilder	95
Figura 48 Disposición de las herramientas en la Arquitectura del gemelo digital	96
Figura 49 Importación del shapefile y conversión a entidad en ArcGIS	100
Figura 50 Carga de datos Excel y Shapefile en DataFrames de Pandas y GeoPandas ...	101
Figura 51 Script de Python para unir datos utilizando pandas y la clave catastral como elemento de vinculación.....	102
Figura 52 Creación del campo 'altura' y cálculo de valores en la tabla de atributos en ArcGIS	103
Figura 53 Utilización de la herramienta de extrusión en ArcGIS para generar geometrías 3D de las construcciones existentes en cada lote	103
Figura 54 Grupo de recursos Digital_Twin crado en Azure.....	105
Figura 55 Cuenta de almacenamiento digitaltwinsmartcity creada en Azure	106
Figura 56 Herramienta de copiado e ingestión de Azure Data Factory.....	107
Figura 57 Selección del ADLS como destino.....	108
Figura 58 Ejemplo de instancia de la clase SpatialObject	112
Figura 59 Ejemplo de instancia de la clase Feature	113
Figura 60 Ejemplo de instancia de la clase Geometry	115
Figura 61 Ejemplo de instancia de la clase Parcel	116
Figura 62 Pantalla de Inicio y herramientas disponibles en ArcGIS Online.....	118
Figura 63 Plantillas para comenzar un proyecto.....	118
Figura 64 Widgets disponibles en Experience Builder	119
Figura 65 Opción Página de Experience Builder	120
Figura 66 Estructura base de las páginas	121
Figura 67 Widget Caja de Herramientas.....	121
Figura 68 Escenas Web disponibles	123
Figura 69 Selección de datos para el widget Mapa	123
Figura 70 Configuración de elementos emergentes de una capa.....	124
Figura 71 Configuración de herramientas establecida para el mapa	125
Figura 72 Proyecto en Experience Builder	126
Figura 73 Opciones de uso compartido	127
Figura 74 Enlace proporcionado por ArcGIS Online	127
Figura 75 Representación 2D del Modelo GIS con Parcelas y Atributos	132
Figura 76 Representación de modelos BIM como Capas IFC en ArcGIS Pro.....	133
Figura 77 Interfaz de Revit muestra la opción para el uso del estándar IFC	133

Figura 78 Interfaz de ArcGIS en la que se permite la autenticación de usuario con una cuenta de Autodesk.....	134
Figura 79 Modelo BIM importado desde Autodesk hacia ArcGisPro.....	134
Figura 80 Herramientas en la plataforma de ArcGis Pro	135
Figura 81 Parcela medida en el gemelo digital.....	139
Figura 82 Parque Central de Loja en Google Maps.....	140
Figura 83 Parque Central de Loja en el Gemelo Digital.....	141
Figura 84 Cédula Catastral en el Sistema de Catastro Existente.....	146
Figura 85 Ventana de Elemento Emergente.....	147

Resumen

El crecimiento poblacional, la contaminación, la congestión y la falta de infraestructuras adecuadas plantean desafíos significativos para la gestión urbana en las ciudades actuales. La creciente población y las demandas en infraestructura y recursos naturales son impulsadas por la urbanización constante. Ante esta problemática, la gestión de datos se convierte en un factor clave para abordar las necesidades cambiantes de la población urbana.

Las ciudades enfrentan dificultades en la recopilación, gestión y análisis de datos debido a su constante transformación. Evaluar el impacto de políticas y decisiones en entornos urbanos complejos es un reto adicional. Además, la falta de una gestión eficiente de datos, la dispersión de información en diferentes sistemas y el acceso limitado a los datos obstaculizan la toma de decisiones informadas y la mejora de la gobernanza urbana.

Para superar estos desafíos, el uso de tecnologías modernas, como los gemelos digitales, se convierte en un pilar fundamental. Los gemelos digitales ofrecen una representación completa y precisa de la realidad urbana, facilitando la toma de decisiones basadas en información y permitiendo una planificación más eficaz. Sin embargo, para aprovechar plenamente los beneficios de los gemelos digitales, es esencial indagar en estos conceptos clave. Esto incluye comprender la definición de ciudad, abordar los retos que enfrentan las ciudades modernas y profundizar en la noción de ciudad inteligente. Además, resulta esencial adquirir un sólido dominio de las herramientas esenciales de modelado 3D, gestión de datos, simulación y visualización, en el contexto de la implementación de gemelos digitales. A través de un análisis exhaustivo de la representación de capas GIS y BIM, así como de la precisión espacial y la integridad de la información en gemelos digitales, se establece una base sólida. En ese sentido, se cimienta una base robusta que permitirá la construcción de un gemelo digital eficiente y la creación de un modelo operativo sólido. Para poner en práctica estos conceptos, se realizó un caso de estudio del catastro de Loja, empleando datos reales para demostrar cómo este enfoque se traduce en la gestión urbana efectiva y sostenible.

Abstract

Introducción

En la actualidad, las ciudades modernas enfrentan una serie de desafíos que requieren atención y soluciones adecuadas. Entre estos desafíos se encuentran el aumento acelerado de la población urbana, la creciente polarización en el desarrollo económico, el incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero, y la disminución de los presupuestos públicos. Estos problemas representan obstáculos significativos para el desarrollo sostenible y el bienestar de los [ciudadanos](#) (Ontiveros et al., 2016).

Comentado [LEOR1]: Ontiveros, 2016

Ante estos retos, el concepto de "Ciudad Inteligente" ha cobrado gran relevancia. Una ciudad inteligente busca utilizar la información y la tecnología de manera estratégica para mejorar la calidad de vida de sus habitantes, optimizar recursos y promover la eficiencia en la gestión urbana.

Este trabajo se enfoca en la gestión de ciudades mediante gemelos digitales, como una solución para avanzar hacia el desarrollo de ciudades inteligentes. Mediante la integración de capas GIS y BIM, y la incorporación de datos generados por dispositivos y sensores en la ciudad, los gemelos digitales ofrecen una perspectiva holística y actualizada de la ciudad. Esto proporciona a los responsables de la toma de decisiones información valiosa para enfrentar los desafíos que caracterizan a las ciudades modernas y avanzar hacia un futuro urbano más eficiente y sostenible.

A lo largo de los capítulos, exploraremos fundamentos teóricos, herramientas de desarrollo y despliegue, la implementación del gemelo digital y presentaremos un análisis de resultados de la validación del caso estudio propuesto.

Capítulo uno

Generalidades

En este capítulo, se aborda la problemática central relacionada con la gestión de ciudades, destacando los desafíos que enfrenta este ámbito. Se resalta la importancia de abordar estos desafíos y se establecen los objetivos específicos del trabajo para contribuir al conocimiento en este campo. Además, se presenta una visión general del contenido del trabajo, describiendo los diferentes capítulos y temas principales que se abordarán en cada uno.

1.1. Problemática

Actualmente las ciudades se enfrentan a desafíos importantes debido al crecimiento poblacional, la contaminación, la congestión y la falta de infraestructuras adecuadas. Además, el crecimiento económico sostenible y los requisitos ambientales y energéticos cada vez más estrictos añaden presión a la gestión urbana. Según el informe "World Urbanization Prospects 2018" de las Naciones Unidas, se prevé que para 2050, alrededor del 68% de la población mundial vivirá en ciudades, lo que generará mayores demandas en infraestructura, servicios, vivienda, transporte y recursos naturales en entornos urbanos (Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas, 2018).

Este crecimiento poblacional plantea desafíos significativos en la gestión de datos en ciudades. La recopilación, gestión y análisis de datos para abordar las necesidades en constante cambio de la población urbana se vuelven esenciales. A medida que las ciudades experimentan constantes cambios y transformaciones debido al crecimiento de la población, evaluar las consecuencias de políticas y decisiones en entornos urbanos complejos se convierte en un reto (Argota Sánchez-Vaquerizo, 2021). Además, la falta de una gestión eficiente de los datos urbanos, la dispersión de la información en diferentes sistemas y el acceso limitado a los datos por parte de los ciudadanos y otras partes interesadas, generan obstáculos adicionales en la toma de decisiones informadas y en la mejora de la gestión y gobernanza de las ciudades.

Para hacer frente a los desafíos actuales y lograr una gestión urbana eficiente y sostenible, resulta fundamental el uso de tecnologías modernas, como los gemelos digitales. Estas innovadoras herramientas proporcionan a los administradores urbanos información valiosa para mejorar la gestión de la ciudad, adaptarse a los desafíos y tomar decisiones más eficientes y sostenibles. Los gemelos digitales ofrecen una visión integral y precisa de la realidad urbana, facilitando la planificación y la toma de decisiones informadas. Con la implementación de un gemelo digital, es posible gestionar de manera segura y confiable los datos urbanos, protegiendo la privacidad de los ciudadanos y fomentando la confianza en el gobierno. De esta forma, se establece una base sólida para el desarrollo urbano en un entorno de crecimiento poblacional constante.

1.2. Justificación

La justificación de la implementación de un gemelo digital en la gestión de ciudades se fundamenta en varios aspectos clave.

En primer lugar, la complejidad de las ciudades y su constante transformación requieren de herramientas y enfoques que permitan una comprensión más profunda de los efectos de las políticas y decisiones en estos entornos. Un gemelo digital proporciona una réplica virtual en tiempo real de la ciudad, lo que permite simular diferentes escenarios y evaluar los impactos potenciales antes de implementar cambios en la vida real. Esto ayuda a minimizar riesgos y a tomar decisiones más informadas y acertadas.

En segundo lugar, la gestión de datos en las ciudades se enfrenta a desafíos como la falta de integración de la información proveniente de diversas fuentes y sistemas, así como la dificultad de acceso a los datos por parte de los ciudadanos y otros actores interesados. Un gemelo digital facilita la recopilación, integración y análisis de datos provenientes de múltiples fuentes, proporcionando una visión más completa y precisa de los procesos urbanos. Además, al estar basado en datos en tiempo real, el gemelo digital permite una toma de decisiones ágil y adaptable a los cambios en la ciudad.

En tercer lugar, la seguridad y privacidad de los datos son aspectos cruciales en la gestión de la información urbana. Al implementar un gemelo digital, se pueden establecer

medidas de seguridad y protección de datos para garantizar que la información sensible esté debidamente resguardada. Esto contribuye a generar confianza entre los ciudadanos y las autoridades, fortaleciendo la relación y el compromiso con la gestión de la ciudad (Smith, 2016).

Por último, la capacitación en el uso de datos y herramientas de análisis es fundamental para aprovechar al máximo el potencial de la información disponible. Un gemelo digital proporciona una plataforma donde los empleados y otros usuarios pueden adquirir habilidades y conocimientos necesarios para utilizar los datos y herramientas de manera efectiva, lo que conduce a una mejor toma de decisiones y una gestión más eficiente (Lazer et al., 2014).

1.3. Objetivos

El objetivo general del presente trabajo de titulación es construir un gemelo digital para representar las capas GIS (siglas en inglés de Geographic Information System) y BIM (siglas en inglés de Building Information Modeling) de una ciudad.

1.3.1. Objetivos Específicos

- Definir el modelo operativo que integre el modelo semántico 3D (siglas en inglés de Three-Dimensional) y las herramientas de modelado GIS y BIM.
- Definir el conjunto de herramientas que permitan modelar los distintos activos, procesos y actividades de una ciudad inteligente.
- Diseñar el gemelo digital con la información procedente del modelo operativo de ciudad inteligente.
- Validar y ejecutar el gemelo digital a través de la ejecución de procesos y actividades dentro de una ciudad para determinar la sostenibilidad del modelo operativo.

1.4. Estructura del Documento

El trabajo de titulación se encuentra estructurado en 6 capítulos:

- Capítulo 1: Generalidades. Presenta los antecedentes del proyecto y los objetivos del trabajo de titulación.

- Capítulo 2: Marco Teórico. Se aborda el marco teórico que sustenta el desarrollo del gemelo digital, incluyendo conceptos y fundamentos relevantes.
- Capítulo 3: Modelo Operativo del Gemelo Digital. Se describe en detalle el modelo operativo del gemelo digital, definiendo la integración de capas GIS y BIM, así como el funcionamiento en conjunto de los componentes.
- Capítulo 4: Herramientas de Desarrollo y Despliegue. Se examinan las herramientas utilizadas para el desarrollo y despliegue del gemelo digital, destacando su funcionalidad y contribución al proyecto.
- Capítulo 5: Desarrollo En este capítulo se detalla el proceso de desarrollo del gemelo digital, incluyendo la implementación de las capas GIS y BIM, así como la integración de datos.
- Capítulo 6: Validación y Ejecución. Se presenta el análisis de resultados obtenidos durante la validación del gemelo digital, demostrando su funcionalidad y cumplimiento de los objetivos establecidos.

Capítulo dos

Marco teórico

El capítulo presenta una revisión de los temas clave relacionados con los gemelos digitales en la gestión urbana. Estos temas son esenciales para comprender el contexto y las implicaciones de las ciudades gestionadas por datos a través de gemelos digitales. Se describirán las características y desafíos de las ciudades modernas, la evolución hacia ciudades inteligentes y cómo los gemelos digitales se han convertido en una herramienta valiosa para mejorar la gestión urbana. Además, se discutirán las tecnologías y soluciones que se han desarrollado en este ámbito y cómo se aplican a las ciudades para mejorar su eficiencia, eficacia y resiliencia.

2.1. Definición de Ciudad

El término ciudad puede tener distintos significados, pero entre los más comunes se encuentran los siguientes:

De acuerdo con el Diccionario de la lengua española, una ciudad se define como un "conjunto de edificios y calles, regidos por un ayuntamiento, cuya población densa y numerosa se dedica por lo común a actividades no agrícolas" (Rae, 2023).

Pero para Centre (2019) la definición de ciudad se refiere a una entidad urbana compleja que experimenta cambios y transformaciones constantes. Esta entidad está compuesta por una población en crecimiento y se enfrenta a desafíos en términos de gestión y planificación urbana, así como en la búsqueda de soluciones sostenibles, tanto en infraestructura como en el medio ambiente. La ciudad, además de ser una huella física en un mapa, es una entidad orgánica con identidad propia, capaz de dar respuesta a las demandas y necesidades de sus habitantes y de influir en su territorio circundante.

La ciudad es una realidad compleja y diversa que se puede entender desde diferentes perspectivas. No existe una única definición de ciudad, sino que cada país o región puede establecer sus propios criterios basados en factores como el número de habitantes, el tipo de actividad económica o la densidad de población. Además, la ciudad es una entidad urbana dinámica y en constante transformación.

Comentado [AS2]: Mejorar el orden de los contenidos, empiezan con gemelos digitales, siguen con ciudades inteligentes (debería iniciar con la definición de ciudad) luego gemelos digitales, no se entiende

En este contexto, la ciudad moderna es aquella que se ajusta a las nuevas demandas y desafíos que plantean los cambios sociales, culturales, tecnológicos y ambientales que se dan en el mundo actual.

2.2. Ciudad Moderna

En las últimas décadas, la ciudad moderna ha experimentado una profunda transformación, impulsada por el rápido crecimiento de la población, los avances tecnológicos y los desafíos globales. Estas ciudades contemporáneas se destacan por su complejidad y diversidad, siendo centros vitales de actividad económica, social y cultural. Por lo tanto, es esencial abordar y comprender de manera integral los diversos temas que conciernen a estas ciudades en constante evolución.

2.2.1. Desafíos de las Ciudades Modernas

Según Ontiveros et al. (2016), las ciudades en todo el mundo se enfrentan a desafíos comunes que requieren atención y soluciones adecuadas.

- **Aumento de la Población:** Según las estimaciones de las Naciones Unidas, alrededor de 2.500 millones de personas podrían agregarse a las áreas urbanas a mediados de siglo, predice el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de la (Nations, s/f).
- **Creciente polarización:** Se caracteriza por un crecimiento económico que no se distribuye equitativamente y conlleva un aumento de la desigualdad. Esta disparidad socioeconómica plantea desafíos en términos de equidad y acceso a oportunidades para todos los ciudadanos.
- **Aumento de las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI):** Estas emisiones contribuyen al cambio climático y a sus impactos asociados, como el aumento de las temperaturas, los eventos climáticos extremos y el deterioro del medio ambiente. Las ciudades son responsables de una gran parte de las emisiones globales de GEI, debido a su densidad poblacional, la demanda de energía y el transporte. Para abordar este problema, es fundamental que las ciudades encuentren formas de

Comentado [LEOR3]: Cita de la ONU

reducir su huella de carbono y adopten prácticas más sostenibles en términos de energía, transporte y gestión ambiental.

- **Disminución de los Presupuestos Públicos:** Esto limita la capacidad de las ciudades para abordar estos desafíos de manera efectiva. La falta de recursos financieros dificulta la implementación de proyectos y políticas que podrían mejorar la calidad de vida de los ciudadanos y promover la sostenibilidad urbana.

Es importante destacar que el crecimiento de la población urbana significa que más de 2.000 millones de personas ingresarán a las ciudades en busca de servicios básicos como energía, agua, saneamiento, transporte y vivienda. Estas necesidades deben ser satisfechas en un contexto de escasez de recursos y limitaciones ambientales, lo que plantea desafíos adicionales para garantizar la viabilidad económica y la sostenibilidad ambiental.

Es necesario considerar también la diversidad de modelos urbanos existentes en las ciudades, que van desde megaciudades hasta pequeñas ciudades y centros urbanos. En muchos casos, las ciudades ya existentes presentan limitaciones para modificar su estructura y condiciones, lo que dificulta la implementación de cambios y mejoras.

Por último, los desafíos en el desarrollo de las ciudades han generado la aparición de diversos campos de estudio interdisciplinarios. La informática es uno de los múltiples campos que abordan los desafíos del desarrollo de la ciudad. En la actualidad, las ciudades están compuestas por sistemas cada vez más complejos y en constante evolución, lo que requiere la colaboración de diferentes áreas de investigación para hacer frente a los innumerables desafíos que surgen (Patrão et al., 2020).

2.2.2. La Transformación Digital de las Ciudades Modernas mediante las TIC

Las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) son un conjunto de herramientas, dispositivos, software y servicios que permiten la adquisición, almacenamiento, procesamiento, transmisión y presentación de información de manera digital. Estas tecnologías incluyen internet, redes de comunicación, computadoras, dispositivos móviles, software, aplicaciones y sistemas de información.

De acuerdo con Ontiveros et al., (2016), hoy en día las TIC se utilizan para mejorar la calidad y eficiencia en la gestión de recursos y servicios municipales, contribuyendo de manera rentable al desarrollo de las ciudades, que son el entorno vital de los ciudadanos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la tecnología no es la única solución para los desafíos urbanos. Para abordar de manera integral los problemas y retos de las ciudades, es necesario llevar a cabo transformaciones en la planificación, gestión, regulación, así como en la percepción y comportamiento de los ciudadanos. Estos últimos deben convertirse en actores clave y participar activamente en todas las iniciativas relacionadas con el desarrollo urbano.

Gracias a las nuevas tecnologías, la forma en que se prestan los servicios públicos en las ciudades ha experimentado un cambio radical. Estas tecnologías permiten ofrecer servicios de manera personalizada y bajo demanda, independientemente de la ubicación de los ciudadanos. La innovación disruptiva respaldada por las tecnologías y los nuevos modelos de negocio contribuye a mejorar la provisión de servicios y a utilizar de manera más eficiente las infraestructuras.

Además, la innovación ofrece la oportunidad de que muchos países salten etapas previas en la planificación y gestión de las ciudades, gracias al apoyo de las TIC. Esto es especialmente relevante para países emergentes y en desarrollo, quienes pueden aprovechar estas tecnologías para acelerar su desarrollo urbano.

Con el objetivo de lograr ciudades y comunidades más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles, tal como se establece en el "Objetivo de Desarrollo Sostenible 11" de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, resulta fundamental comprender las tendencias clave en el futuro de la urbanización. Es necesario evaluar el crecimiento de las ciudades y llevar a cabo medidas de implementación que satisfagan los requisitos multidimensionales tanto de las personas como de la sostenibilidad (Patrão et al., 2020).

Según Patrão et al., (2020), se requiere una comprensión profunda de los procesos de urbanización, incluyendo el análisis de datos y la utilización de tecnologías avanzadas. Esto permite identificar patrones, tendencias y necesidades específicas de cada ciudad, así

como desarrollar estrategias adecuadas para abordar los desafíos urbanos. Además, es esencial considerar la perspectiva humana y los aspectos sociales, económicos y medioambientales en la toma de decisiones, con el fin de fomentar un desarrollo urbano equitativo y sostenible.

El concepto de “Ciudad Inteligente” pretende abordar los desafíos mencionados mediante la identificación de formas nuevas e inteligentes de gestionar la complejidad de la vida urbana e implementar soluciones para problemas multidisciplinarios que van desde el consumo de energía, la gestión de recursos, la protección del medio ambiente, la seguridad, la calidad de vida, la eficiencia de la operación urbana, y la disponibilidad de una amplia variedad de servicios.

2.3. Ciudad Inteligente

Según Wolf et al. (2022), una ciudad inteligente (Smart City en inglés) se define como un “sistema de sistemas” formado por múltiples componentes heterogéneos y distribuidos que interactúan e intercambian información a través de una amplia red. Esta red a gran escala puede estar compuesta por infraestructura de comunicación de última generación, como redes de fibra óptica, tecnologías inalámbricas, Internet de las cosas (IoT) y sistemas de comunicación satelital.

Estas tecnologías permiten la conectividad y la comunicación eficiente entre diversos dispositivos, sensores, sistemas y actores dentro de la ciudad inteligente. Estos actores abarcan a las entidades involucradas en el funcionamiento y la gestión de la ciudad, como los gobiernos locales, los proveedores de servicios, las empresas privadas, las organizaciones comunitarias y los propios ciudadanos. La colaboración entre los diferentes actores facilita la recopilación y el intercambio de datos en tiempo real, lo cual es fundamental para la toma de decisiones informadas y la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos.

De acuerdo con Ontiveros et al. (2016), se han establecido dos definiciones operativas que se aproximan a las iniciativas de una ciudad inteligente. La primera definición describe una ciudad inteligente como aquella que utiliza ampliamente la tecnología, incluyendo una gran cantidad de sensores, para ofrecer servicios públicos eficientes. Estos sensores

Comentado [AS4]: WAN??

recopilan información en tiempo real de miles de dispositivos conectados, lo que permite a la ciudad tener una visión actualizada de su funcionamiento y tomar decisiones basadas en datos precisos.

La segunda definición se refiere a una ciudad que promueve una mejor relación entre el gobierno y los ciudadanos mediante el uso de tecnologías disponibles. En esta definición, las autoridades locales confían en la interacción de los residentes para mejorar la prestación de servicios públicos y crean mecanismos de acceso y difusión de información, como iniciativas de gobierno abierto (Open Government en inglés) y datos abiertos (Open Data en inglés). Estas iniciativas pueden ser utilizadas, por ejemplo, para desarrollar aplicaciones móviles o servicios de reporte de incidencias,¹ que permiten una mayor participación ciudadana en la gestión de la ciudad.

Según Mora & Deakin (2019), la investigación sobre el concepto de “Smart City” se consolidó como un nuevo campo científico en el año 2009. Sin embargo, a pesar del creciente número de publicaciones en este tema, el concepto está lejos de tener una definición clara y establecida. El análisis bibliométrico de la literatura realizado por Mora y Deakin revela que “*los investigadores parecen estar de acuerdo en visualizar la ciudad inteligente como un entorno urbano en el que se activa un enfoque de sostenibilidad urbana impulsado por las TIC*”.

En la literatura, se han identificado dos grupos de publicaciones más citadas. Uno de ellos describe la ciudad inteligente como un enfoque más tecno centrado, es decir, con un énfasis excesivo en la tecnología. El otro grupo destaca uno de los documentos más influyentes en el área, publicado entre 1992 y 2012, Giffinger, como una combinación equilibrada de recursos humanos, factores sociales, culturales, económicos, ambientales y tecnológicos. Este último grupo ve la tecnología como un medio para lograr los resultados de la implementación de una ciudad inteligente de acuerdo con las necesidades de su ubicación (medio ambiente, energía, personas, negocios, gobernanza, etc.) (Patrão et al., 2020).

En resumen, el concepto de ciudad inteligente continúa evolucionando y aún no existe una definición universalmente aceptada en todo el mundo. No debe ser visto como una

Comentado [ASS]: Las definiciones tienen otra forma de representarse en una tesis

solución mágica para todos los problemas urbanos, sino como una herramienta adicional para abordar los desafíos de manera más efectiva y sostenible (Shahat et al., 2021a). Pero está claro que las ciudades inteligentes aprovechan las tecnologías de la información y la comunicación para mejorar los niveles de servicio, el bienestar de los ciudadanos, la sostenibilidad y el desarrollo económico.

Además, la expansión este concepto permitirá, por ejemplo, mejorar las infraestructuras existentes, aumentar la digitalización e integración de instalaciones y servicios, extender el uso de herramientas de colaboración y plataformas automatizadas de gestión de servicios, aumentar la seguridad de los ciudadanos y del transporte, hacer las ciudades más atractivas para las partes interesadas y estar a la altura de las expectativas de los ciudadanos (Patrão et al., 2020).

2.3.1. Características de una Ciudad Inteligente

La creciente cantidad de iniciativas en el dinámico entorno socioeconómico, técnico y político a nivel mundial ha generado una amplia variedad de características que definen una ciudad inteligente. Estas características pueden estar relacionadas con diferentes objetivos, ya sean generales, específicos u operativos, y se manifiestan a través de diversos patrones de roles y relaciones de actores, instrumentos políticos y métodos de implementación (Manville et al., 2014). Los patrones de roles y relaciones de actores se refieren a las estructuras de gobernanza, las responsabilidades asignadas a cada actor, las colaboraciones entre ellos y las dinámicas de poder existentes.

En el informe *Mapping Smart Cities in the EU* de la Comisión de Industria, Investigación y Energía del Parlamento Europeo, se resumen algunas dimensiones clave asociadas con una ciudad inteligente. (Manville et al., 2014). Estas dimensiones representan aspectos temáticos en los cuales las iniciativas y proyectos de una ciudad inteligente pueden centrarse para mejorar la calidad de vida de los ciudadanos, optimizar la infraestructura urbana y promover un desarrollo sostenible. Las dimensiones mencionadas en el informe son consideradas características clave de una ciudad inteligente, ya que representan los ámbitos

en los cuales se pueden implementar soluciones y tecnologías inteligentes para enfrentar los desafíos urbanos actuales.

Tabla 1

Dimensiones de una ciudad inteligente según la EU

Característica	Descripción
Smart Governance	Gobernanza inteligente, es decir, una gobernanza conjunta dentro y fuera de la ciudad, que incluye servicios e interacciones que vinculan y, en su caso, integran a las organizaciones públicas, privadas y ciudadanos para que la ciudad pueda funcionar eficiente y eficazmente como un solo organismo.
Smart Economy	Economía inteligente, se refiere a los negocios y el comercio electrónico, el aumento de la productividad, la fabricación y la prestación de servicios con ayuda de las TIC. También establece clústeres y ecosistemas inteligentes (por ejemplo, negocios digitales y emprendimiento).
Smart Mobility	Por movilidad inteligente, se refiere a sistemas de transporte y logística integrados y apoyados por las TIC. Información relevante y en tiempo real para ahorrar tiempo y mejorar la eficiencia de los desplazamientos, ahorrar costes y reducir las emisiones de CO ₂ , así como a los gestores de red de transporte para mejorar los servicios y proporcionar información a ciudadanos.
Smart Environment	El entorno inteligente abarca energías renovables, redes energéticas basadas en las TIC, medición, control y vigilancia de la contaminación, renovación de edificios y servicios, edificios verdes, planificación urbana verde, eficiencia en el uso de recursos, reutilización y sustitución de recursos. También incluye servicios urbanos como alumbrado público, gestión de residuos, sistemas de drenaje y recursos hídricos controlados para evaluar el sistema, reducir la contaminación y mejorar la calidad del agua.
Smart People	Personas inteligentes, se toma en cuenta las competencias electrónicas, trabajo con las TIC, acceso a educación y formación, recursos humanos y gestión de capacidades en una sociedad inclusiva que fomenta la creatividad y la innovación. Además, esta característica permite a las personas y comunidades utilizar, manipular y personalizar los datos a través de herramientas analíticas y cuadros de mando para tomar decisiones y crear productos y servicios.
Smart Living	Vida inteligente, son los estilos de vida, el comportamiento y el consumo facilitados por las TIC. La vida inteligente es también una vida saludable y segura en una ciudad culturalmente vibrante, con diversas instalaciones culturales, y que incorpora viviendas de buena calidad. La vida inteligente también está vinculada a altos niveles de cohesión y capital sociales.

Nota. Adaptado de Mapping Smart Cities in the EU por (Manville et al., 2014).

Comentado [LO6]: Cita:

[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2014/507480/IPOL-ITRE_ET\(2014\)507480_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2014/507480/IPOL-ITRE_ET(2014)507480_EN.pdf)

Es importante destacar que estas dimensiones representan áreas estratégicas donde las iniciativas y proyectos pueden enfocarse para lograr una gestión urbana más eficiente y sostenible. Estas dimensiones proporcionan un marco integral para abordar los desafíos actuales de las ciudades modernas y aprovechar al máximo las oportunidades que ofrece la tecnología y la innovación.

Una de las tecnologías innovadoras que ha surgido para potenciar la gestión de ciudades inteligentes es el gemelo digital. Con esta tecnología, los responsables de la toma de decisiones pueden evaluar el impacto de diferentes intervenciones urbanas, anticipar efectos y optimizar la planificación estratégica en el contexto urbano.

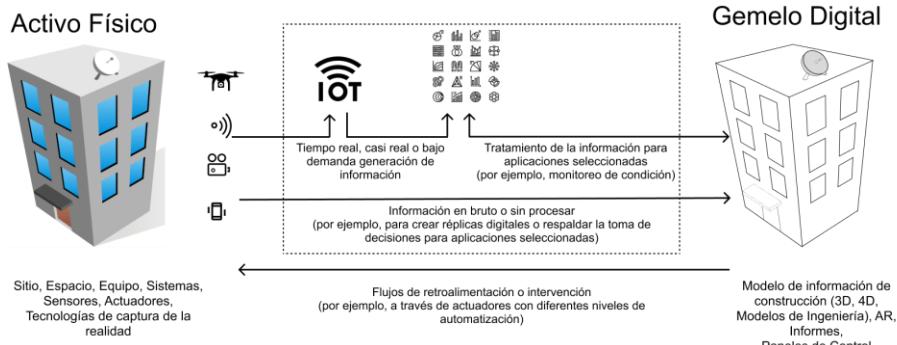
2.4. Gemelo Digital

El concepto de gemelo digital (Digital Twin en inglés) se refiere a un modelo informático preciso que representa un sistema o proceso físico. Este modelo se utiliza para simular y analizar el comportamiento y desempeño de un sistema o proceso, y se basa en una gran cantidad de datos recolectados de sensores y dispositivos conectados. Lo distintivo del gemelo digital radica en su capacidad de actualizarse continuamente, reflejando en tiempo real el estado real del sistema o proceso que representa (Cruz & Tonin, 2022).

El término y los primeros estudios de este tipo de modelos se le atribuyen al Dr. Michael Grieves en el contexto del *Product Lifecycle Management* (PLM), que se refiere al seguimiento de las etapas de desarrollo e introducción al mercado, crecimiento, madurez y declive de un producto (Grieves, 2005). Su idea era vincular los mundos del espacio real y del espacio virtual a lo largo del ciclo de vida del sistema.

Según Tao et al. (2018), el gemelo digital se divide en tres componentes principales: el entorno físico real, la representación digital y la conexión entre ambos. Como en la Figura 1, esta conexión permite el intercambio de datos en tiempo real, el almacenamiento de datos históricos y la simulación del desempeño de un proceso, producto o servicio.

Comentado [L07]: <https://doi.org/10.1504/IJPD.2005.006669>

Figura 1*Componentes principales de un gemelo digital*

Nota. Adaptado de Digital Twins in Built Environments: An Investigation of the Characteristics,

Applications, and Challenges por (Shahzad et al., 2022).

2.4.1. Tipos de Gemelo Digital

En el presente trabajo se exploran distintas formas de clasificar el gemelo digital, y se analizarán en detalle cuatro tipos específicos de gemelo digital.

- **Prototipo de Gemelo Digital:** En el contexto de la fabricación y producción de productos, un prototipo de gemelo digital (DTP, en inglés) es una herramienta valiosa para recopilar y almacenar información sobre el gemelo físico. Esta información puede incluir diseños asistidos por computadora (CAD, en inglés), listas de materiales, dibujos, y cualquier otra información relevante para el proceso de fabricación y las partes interesadas de la cadena de producción. Gracias a las características del gemelo digital, el prototipo puede simular escenarios de fabricación y realizar pruebas de validación, evaluación y control de calidad antes del proceso de fabricación real. Esto reduce eficazmente los costos y el tiempo de producción al identificar problemas o posibles riesgos en el gemelo físico antes de comenzar la producción. En este sentido, los DTP también pueden llamarse prototipos experimentales, donde el nivel de detalle aumenta a medida que se realizan pruebas virtuales y se obtiene una

Comentado [AS8]: Mejorar calidad del grafico, decidir, todos los gráficos en español o todos los gráficos en Inglés

Comentado [AS9]: Tienen que explicar el gráfico

Comentado [AS10]: Y esto, son los tipos, no se introduce, se presentan gráficos pero no se entiende la secuencia

Comentado [AS11]: Y esto, son los tipos, no se introduce, se presentan gráficos pero no se entiende la secuencia

declaración confiable sobre la calidad del diseño, reduciendo la necesidad de costosos prototipos de hardware (Botín-Sanabria et al., 2022).

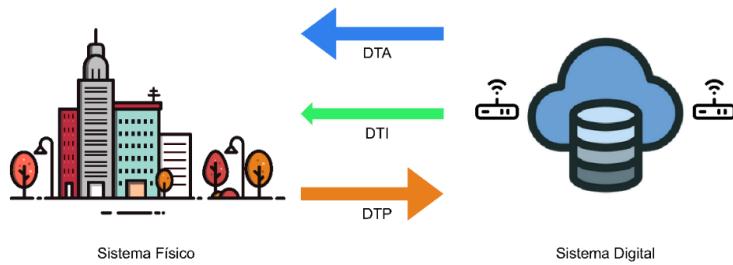
- **Instancia de Gemelo Digital:** Instancia de gemelo digital (DTI, en inglés) es una forma específica de gemelo digital que se conecta directamente con su objetivo físico correspondiente. A diferencia del DTP, que se enfoca en la simulación y predicción de comportamientos del sistema, el DTI se ocupa de la comunicación de datos entre el sistema digital y el sistema físico, brindando información o pautas que ayudan al sistema físico a adaptarse de manera eficiente a los cambios en el entorno. Ambas, tanto el DTI como el DTP, establecen una conexión bidireccional entre el sistema físico y el sistema digital, permitiendo una interacción continua entre ambos (Qian et al., 2022).

Comentado [AS12]: La figura 5 es aquí

Figura 2

Tipos de Gemelo Digital

Comentado [AS13]: Tienen que explicar los gráficos



Nota. Adaptado de Digital Twin—Cyber Replica of Physical Things: Architecture, Applications and Future Research Directions por (Qian et al., 2022).

- **Agregación de Gemelo Digital:** Se refiere a la agregación de varios DTI para administrar sistemas más complejos, permitiendo que los datos fluyan de los sistemas digitales hacia los físicos. El operador puede entonces utilizar esta información para operar el sistema físico de acuerdo con las predicciones del sistema digital. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el flujo de datos no se puede transferir directamente del sistema físico al sistema digital, por lo que se requieren mecanismos

adicionales para recopilar la información del sistema físico y permitir que el gemelo digital funcione de manera efectiva (Qian et al., 2022).

Comentado [AS14]: Se puede indicar cuáles???

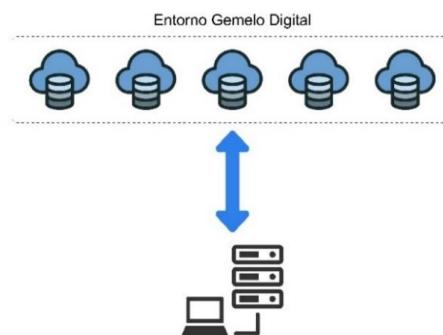
Comentado [AS15]: Se puede indicar cuáles???

- **Entorno de Gemelo Digital:** El entorno de gemelo digital (DTE, en inglés) puede considerarse como el límite de la aplicación de gemelo digital. Un DTE puede contener múltiples sistemas de gemelos digitales. Un solo DTE puede albergar varios sistemas de gemelos digitales, y su función principal es la de administrar y coordinar todos los sistemas de gemelos digitales bajo su responsabilidad, con el objetivo de mejorar la operación de los sistemas físicos correspondientes. En términos de aplicación, el DTE se utiliza principalmente para manejar sistemas de gran escala. Además, se requiere la implementación de un mecanismo de sincronización para agilizar el procesamiento de consultas entre los diferentes sistemas de gemelos digitales (Qian et al., 2022).

Figura 3

Entorno de un gemelo digital

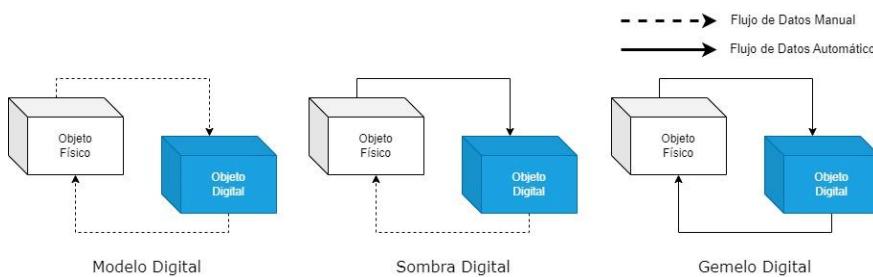
Comentado [AS16]: Tienen que explicar el gráfico



Nota. Adaptado de Digital Twin—Cyber Replica of Physical Things: Architecture, Applications and Future Research Directions por (Qian et al., 2022).

2.4.2. Variantes de un Gemelo Digital

Los gemelos digitales se clasifican en tres variantes principales según cómo se lleva a cabo el intercambio de información entre sistemas físicos y digitales. Cada variante representa una forma específica de simular sistemas físicos en el mundo digital, como se muestra en la Figura 4.

Figura 4*Variantes de Gemelo Digital*

Nota. Adaptado de Designing a unique Digital Twin for linear infrastructures lifecycle management por (Tchana et al., 2019).

- **Modelo Digital:** El modelo digital se basa en la creación de una representación digital de un objeto físico. Sin embargo, no existe una transferencia automática de datos entre el objeto físico y su representación digital, lo que significa que todos los cambios en el objeto físico deben ser actualizados manualmente en su representación digital correspondiente (Botín-Sanabria et al., 2022).
- **Sombra Digital:** En cambio, el modelo de sombra digital permite un flujo de datos unidireccional desde el objeto físico hacia su representación digital, lo que permite que los cambios en el objeto físico alteren de manera dinámica la representación digital, brindando una visión actualizada y virtual del objeto físico. Además, el administrador puede monitorear el rendimiento del objeto y responder a problemas en tiempo real a través de esta representación virtual. Es importante destacar que las modificaciones en el modelo digital no tienen efecto sobre el objeto físico (Qian et al., 2022).
- **Gemelo digital:** El modelo de gemelo digital es una evolución del modelo y la sombra digital. Se distingue de los anteriores modelos por su enlace bidireccional entre el objeto físico y el objeto digital (Qian et al., 2022). Este enlace permite un flujo

automático de datos entre ambos objetos, permitiendo el intercambio de datos en tiempo real. A través del procesamiento y análisis de estos datos, se obtiene información valiosa que se utiliza para controlar y ajustar los actuadores en el objeto físico. Los actuadores son dispositivos que realizan acciones concretas en el objeto físico. Al mismo tiempo, los datos obtenidos del objeto físico afectan la representación digital para asegurarse de que refleje con precisión el estado actual y cualquier cambio en el objeto físico. (Botín-Sanabria et al., 2022).

2.4.3. Beneficios de los Gemelos Digitales en la Gestión de Ciudades

Los gemelos digitales son una tecnología emergente que puede involucrar a todos los niveles de la administración de la ciudad, incluyendo la administración ejecutiva, varios equipos operativos (como transporte público, policía, bomberos, servicios de emergencia y servicios públicos), planificadores de la ciudad, personal de marca y marketing y socios externos. Según Nazir (2020), hay beneficios que cada rol puede usar de un gemelo digital:

- **Gestión ejecutiva:** Los gemelos digitales mejoran la toma de decisiones a nivel ejecutivo al proporcionar una visión holística y flexible de los activos, las instalaciones y los procesos. Los gemelos digitales permiten a los responsables de la toma de decisiones monitorear de cerca los indicadores clave de rendimiento de alto nivel.
- **Operaciones de la ciudad:** Los gemelos digitales permiten un enfoque de "control de misión" para las operaciones de la ciudad. Una vista en tiempo real de los activos (por ejemplo, un semáforo) y cadenas de valor completas (por ejemplo, una calle principal de la ciudad) brinda a los equipos operativos la capacidad de predecir problemas y mitigar riesgos.
- **Urbanistas:** La planificación urbana es un aspecto importante, pero desafiante, de la construcción de ciudades. Los urbanistas suelen tener dificultades para predecir los posibles resultados de nuevos desarrollos o mejoras. Los gemelos digitales brindan oportunidades significativas en la generación y el desarrollo de ideas, la colaboración en etapas tempranas y la opción, simulación y prueba rápidas.

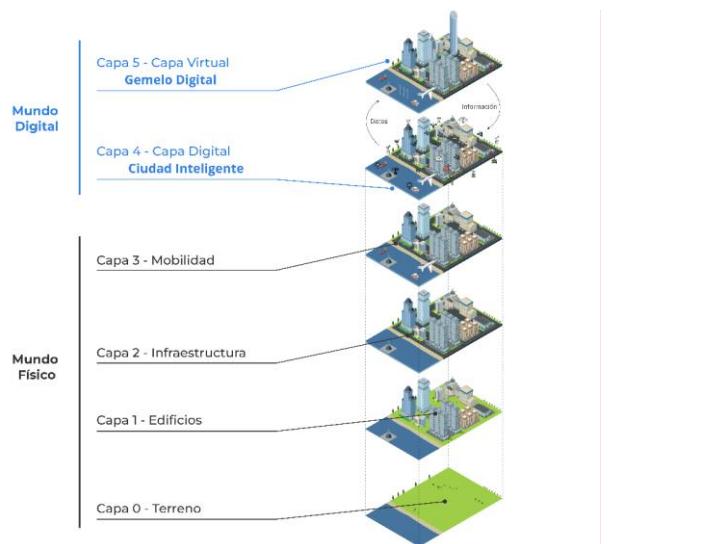
- **Personal de marketing y ventas:** La gran cantidad de datos disponibles a través de los gemelos digitales permite a los equipos de administración de la ciudad realizar análisis de causa raíz (por ejemplo, análisis de accidentes frecuentes en un semáforo) y formular campañas de marketing enfocadas destinadas a cambiar el comportamiento de los ciudadanos. Una vista en tiempo real de los movimientos y pisadas de los ciudadanos brinda importantes oportunidades de generación de ingresos para las ciudades en términos de publicidad y ventas de bienes raíces.
- **Socios:** Los gemelos digitales facilitan la colaboración y la comunicación con los socios. Los gemelos digitales también aceleran el desarrollo de productos y servicios al mejorar el intercambio de datos (entre las agencias de transporte público y los proveedores de servicios de transporte, por ejemplo).

2.4.4. Diseño de un Gemelo Digital para una Ciudad Inteligente

Según White et al. (2021), un gemelo digital para ciudad inteligente (SCDT siglas en inglés) se compone de seis capas de información, como se ilustra en la Figura 5.

Figura 5

Capas necesarias para desarrollar una ciudad inteligente gemela digital



Nota. Adaptado de A digital twin smart city for citizen feedback por (White et al., 2021).

Comentado [AS17]: No hay relación con la sección anterior. Primero hablamos de ciudades inteligentes y aparece de la nada gemelos digitales.

En el último párrafo de la sección anterior debe hablarse de la relación ciudad inteligente - gemelo digital. a

Comentado [LEOR18]: Cambiar al español ciudad inteligente

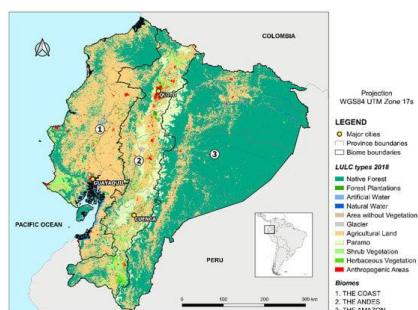
Las primeras cinco capas proporcionan información sobre terreno, edificios, infraestructura, movilidad y dispositivos IoT en la ciudad. La capa digital recopila estos datos y los transfiere al gemelo digital, para simular y mejorar la movilidad, ubicación de edificios y diseño de energías renovables. Esta información optimizada se aplica luego en el mundo real.

A continuación, se detallan las funciones de cada capa:

- **Capa 0, Territorio** El diseño de una SCDT comienza con la comprensión de la geografía y características del terreno donde se construirá. Esta información básica, conocida como la "capa cero", es esencial para construir un modelo preciso y detallado de la ciudad, incluye aspectos como la presencia de zonas costeras, ríos o canales, pendientes pronunciadas o colinas, zonas de arena, suelo fértil para cultivos y zonas con problemas de drenaje que pueden causar deslizamientos de tierra o inundaciones. Un mapa del suelo, como el de Figura 6, es esencial para incorporar esta información en el modelo de SCDT.

Figura 6

Mapa del suelo



Nota. Tipos de uso y cobertura del suelo Ecuatoriano Adaptado de Deforestation in Continental

Ecuador with a Focus on Protected Areas por (Kleemann et al., 2022).

- **Capa 1, Edificios:** La primera capa del modelo de SCDT agrega los edificios actuales de la ciudad al modelo. Los edificios cuentan con modelos altamente precisos llamados BIM que se utilizan como gemelos digitales de los edificios reales. La

Comentado [AS19]: Antes indicaron "capa cero" ahora la "primera capa" estandarizar!!!!

Porqué no incluyen grafico como en la capa cero???

implementación de estos modelos BIM en la capa 1 del modelo SCDT permite una mayor precisión y detalle en la representación digital de los edificios de la ciudad.

Figura 7

Ejemplo de Modelo 3D BIM Integrado en el Terreno



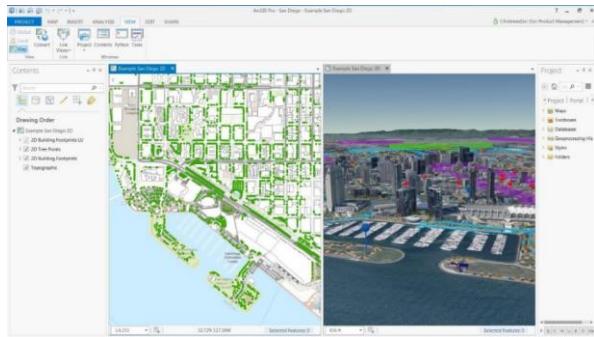
Nota. Se muestra un ejemplo de un modelo 3D BIM integrado en el del terreno. Esta integración permite una visualización completa, facilitando el análisis y la toma de decisiones en el proceso de planificación y diseño. Tomado de Building scene layer—ArcGIS Pro – Documentation por (ArcGIS Pro, 2021).

- **Capa 2, Infraestructura:** La capa 2 del modelo de SCDT se refiere a la infraestructura que rodea a los edificios existentes en la ciudad. Esto incluye las estructuras físicas y organizativas básicas, como carreteras, suministro eléctrico y telecomunicaciones, necesarias para el funcionamiento de una sociedad o empresa.

Comentado [AS20]: Porqué no incluyen grafico como en la capa cero???

Figura 8

Comparación 2D y 3D de Infraestructuras en la Capa 2 del Modelo de SCDT

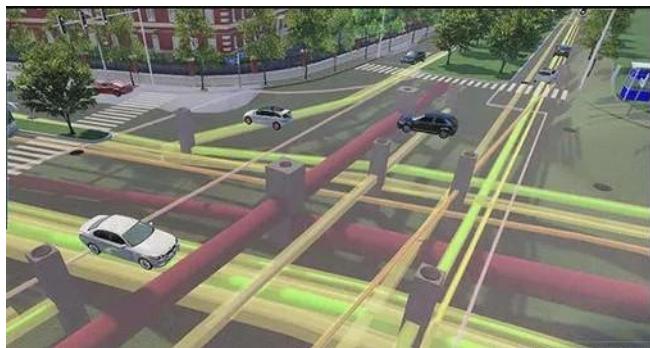


Nota. La figura muestra dos representaciones de la infraestructura de la Capa 2 del modelo SCDT que rodea a los edificios en una ciudad. En la escena 2D, se ilustra las diversas infraestructuras como árboles, calles y otros elementos urbanos. Por otro lado, en la escena 3D se muestra los mismos elementos, pero de una manera más realista. Figura tomada de Understanding ArcGIS Pro por (Esri, 2019).

- **Capa 3, Movilidad:** La capa 3 del modelo SCDT añade movilidad a las capas de infraestructura y edificios. Esta movilidad cubre desplazamientos diarios de personas, como estudiantes a universidades o trabajadores a sus empleos, y el transporte de bienes, desde alimentos al supermercado hasta paquetes de mensajería y electrodomésticos a tiendas.

Figura 9

Vista 3D de movilidad urbana en una ciudad

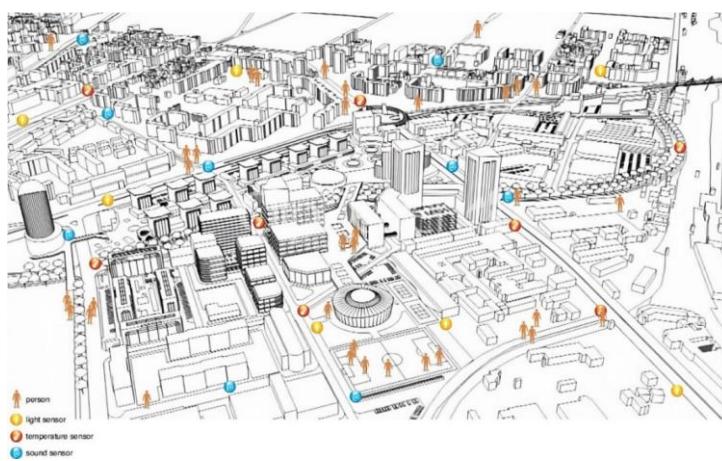


Nota. Adaptada de Caso BIM - Ingeniería municipal por (Zhihu, 2020).

- **Capa 4, Capa Digital:** La capa digital/ciudad inteligente es una tendencia en la cual se integran sensores IoT en la ciudad para recopilar datos que se utilizan para supervisar y gestionar diferentes sistemas y servicios públicos. Estos datos se utilizan en la capa virtual/gemelo digital para realizar simulaciones y retroalimentar la información a través de las capas de la ciudad. Los datos pueden ser proporcionados por ciudadanos, servicios y activos móviles repartidos por toda la ciudad.

Figura 10

Representación de una ciudad conectada por sensores IoT



Nota. Adaptado de On the effect of human mobility to the design of metropolitan mobile opportunistic networks of sensors por (Tomasini et al., 2017).

- **Capa 5, Capa Virtual:** La capa virtual/gemelo digital se basa en los datos que se producen a partir de la capa digital/ciudad inteligente. Se envían datos desde la capa digital sobre la movilidad, infraestructura, edificios y terreno de la ciudad. Estos datos se utilizan para realizar simulaciones en la capa virtual, que luego pueden transmitirse como información a través de las capas de la ciudad.

Según Wolf et al. (2022), el uso de gemelos digitales puede generar un gran valor a largo plazo en diferentes ámbitos. A medida que se obtiene más conocimiento sobre el gemelo digital a lo largo de su ciclo de vida, se pueden obtener beneficios a partir de los datos recolectados. En la Tabla 2 se muestran los diferentes ámbitos para en los que se desenvuelve un gemelo digital.

Tabla 2

Creación de valor a través del uso del gemelo digital en diferentes ámbitos

Ámbito	Detalle
Transporte	Los semáforos se conectan a los vehículos equipados con unidades de abordo para ajustar la señal en verde, lo que mejora el servicio de autobuses para los pasajeros y reduce la congestión en las intersecciones clave.
Medio ambiente	Los sensores miden el aire para implementar medidas que reduzcan la contaminación y mejoren la calidad de vida.
Seguridad Pública	Las alertas de peligro personal activadas por los sistemas de proximidad informan a los trabajadores de la construcción sobre posibles riesgos, como peligros aéreos, lo que crea un entorno de trabajo más seguro
Infraestructura	Los sensores supervisan el estado de las infraestructuras, como alcantarillas en zonas propensas a inundaciones, para notificar a tiempo posibles inundaciones.

Comentado [AS21]: Mejorar redacción

Comentado [AS22]: Mejorar redacción

Para alcanzar el verdadero potencial de una Ciudad inteligente, es fundamental contar con una gran cantidad de datos precisos y exhaustivos sobre las diferentes áreas de la ciudad, como el transporte inteligente, la gestión de energía y el monitoreo ambiental. Estos datos deben ser compartidos e interconectados para proporcionar una visión completa del

funcionamiento de la ciudad y apoyar decisiones informadas (Wolf et al., 2022). Además, para realizar simulaciones urbanas, como la propagación del ruido, la evaluación de la calidad del aire y la contaminación, la demanda de energía y la estimación de la producción, es necesario contar con datos detallados sobre la topografía urbana y un modelo digital preciso del entorno físico de la ciudad (Shi et al., 2021a).

2.4.5. Componentes de un Gemelo Digital

Un gemelo digital es un sistema complejo que combina infraestructura, simulación, procesamiento de datos, interacción persona ordenador y servicios (Tao et al., 2019). Estos enfoques proporcionan una nueva forma de comprender a los gemelos digitales como una digitalización avanzada de un sistema, ampliando la representación del entorno físico con operaciones. Esto genera un modelo digital con muchas propiedades deseadas, como escalabilidad, interoperabilidad, extensibilidad y alta fidelidad (Schleich et al., 2017). De acuerdo con Grübel et al. (2022), el gemelo digital se define como un sistema compuesto por cinco componentes específicos que se detalla a continuación.

- **Entorno físico:** El concepto de gemelo digital implica la creación de un modelo virtual de un objeto o entorno físico en un ambiente digital para simular su comportamiento. La implementación de este concepto se basa en los sistemas IoT y la teledetección, que son esenciales para la recopilación y registro de datos sobre el entorno físico (Grübel et al., 2022). Estos sistemas utilizan dispositivos y sensores para recopilar datos sobre factores como el clima, el tráfico, la población, entre otros, y permiten interacciones con el entorno físico a través de actuadores. La Figura 10 ilustra muestra los sistemas recopilan información y proporcionan interacciones con el entorno.
- **Entorno de datos:** Es una parte fundamental del gemelo digital ya que es donde se almacena y gestiona la información necesaria para la simulación y el análisis del sistema. Este entorno contiene la memoria del gemelo digital, es decir, los datos recolectados y generados por los sensores, dispositivos y sistemas conectados. A menudo, este entorno se encuentra ubicado en la nube, esto permite una accesibilidad y escalabilidad convenientes, pero también puede almacenarse localmente o en el

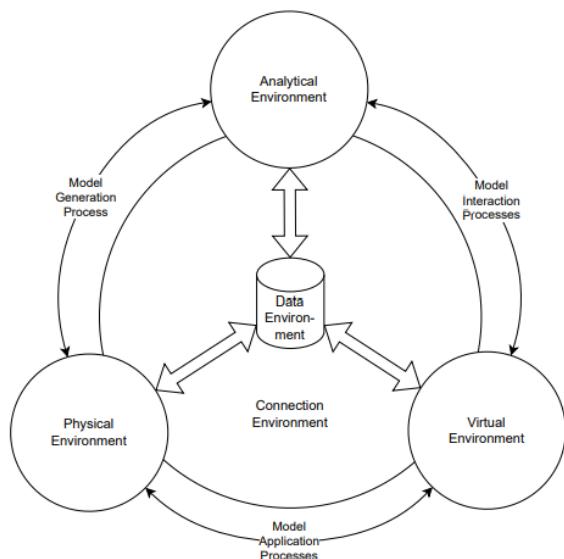
Comentado [LEOR23]: Evitar incluir este tipo de construcciones en la escritura (preguntas).

borde, es decir, en dispositivos cercanos al sistema físico que se está simulando. Esta ubicación dependerá de las necesidades y requisitos específicos del sistema y del uso que se le quiera dar a la información almacenada (Grübel et al., 2022).

El Entorno de Datos es responsable de la integración y el procesamiento de los datos recolectados. Esto incluye la limpieza, la validación y la normalización de los datos, así como la combinación de datos de diferentes fuentes para crear una visión completa del sistema (ver Figura 11). Es importante tener en cuenta que los datos recolectados pueden ser de diferentes tipos, como datos estructurados, no estructurados o semiestructurados, y cada uno de ellos debe ser tratado de manera diferente. Además, es esencial asegurar la seguridad y privacidad de los datos recolectados, garantizando que solo las personas autorizadas tengan acceso a ellos y que se almacenen y manejen de manera segura cumpliendo con las regulaciones y leyes aplicables.

Figura 11

Diagrama de los componentes de un gemelo digital



Nota. La figura muestra cinco componentes principales de cualquier gemelo digital. Estos componentes son el entorno físico, el entorno de datos, el entorno analítico, el entorno virtual y el

entorno de conexión. Adaptado de The Hitchhiker's Guide to Fused Twins: A Review of Access to Digital Twins In Situ in Smart Cities por (Grübel et al., 2022).

En el caso de los gemelos digitales de ciudad, el entorno de datos también incluye una representación semántica de los datos, es decir, información sobre la función y el significado de los elementos de la ciudad, lo que permite una comprensión más profunda de la ciudad y su relación con el entorno (Steindl et al., 2020).

- **Entorno virtual:** El entorno virtual pretende modelar al entorno físico con gran precisión mediante la integración de varios tipos de modelos diferentes, como modelos geométricos, modelos físicos, modelos de comportamiento y modelos de reglas (Steindl et al., 2020). Además, es el componente que permite la interacción humana con el sistema. Este entorno proporciona una interfaz fácil de usar que permite a los usuarios acceder a la información, percepciones y predicciones generadas por el entorno analítico (Grübel et al., 2022). Esto puede incluir gráficos, mapas interactivos y visualizaciones en tiempo real, entre otros. Ver Figura 12.

Figura 12

Visualización de datos en un gemelo digital



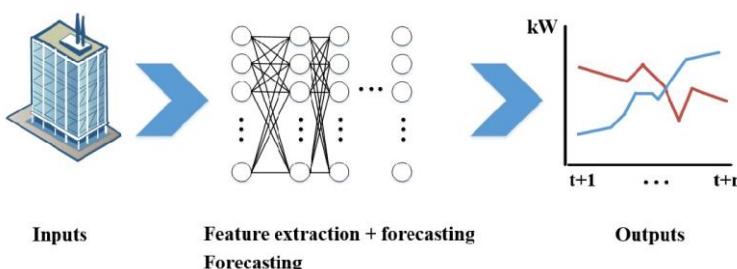
Nota. Panel de control de un gemelo digital para el programa Vision Zero New York City, el cual está disponible en la página web de Cool Maps. (<https://coolmaps.esri.com/Dashboards/VisionZero/>). La captura de pantalla fue realizada por el autor (Luis Enrique Ortiz Rivera) en (2023).

El entorno virtual también permite la interacción con otros sistemas y dispositivos, lo que permite una mejor toma de decisiones y gestión del sistema. Por ejemplo, puede permitir a los usuarios enviar comandos a través de una aplicación móvil o una interfaz web para controlar el sistema, o puede permitir a los usuarios acceder a los datos y resultados del análisis a través de una interfaz de programación de aplicaciones (API en inglés).

- **Entorno analítico:** En este entorno los procesos y modelos del gemelo digital se calculan utilizando herramientas avanzadas de análisis y procesamiento de datos, como algoritmos de aprendizaje automático y técnicas estadísticas. Estos procesos y modelos pueden ser ejecutados en una variedad de plataformas, incluyendo computadoras locales o en la nube. El objetivo es generar percepciones y predicciones precisas sobre el sistema que se está simulando (Grübel et al., 2022).

Figura 13

Uso de un modelo predictivo para el consumo eléctrico de un edificio



Nota. Adaptado de A Review of Deep Learning Techniques for Forecasting Energy Use in Buildings por (Runge & Zmeureanu, 2021).

Una vez generadas, estas percepciones y predicciones se comunican al entorno de datos, donde son almacenadas y pueden ser accedidas por otros componentes del sistema para mejorar la eficiencia y la optimización, así como para identificar problemas y oportunidades. Además, estas percepciones y predicciones también pueden ser utilizadas

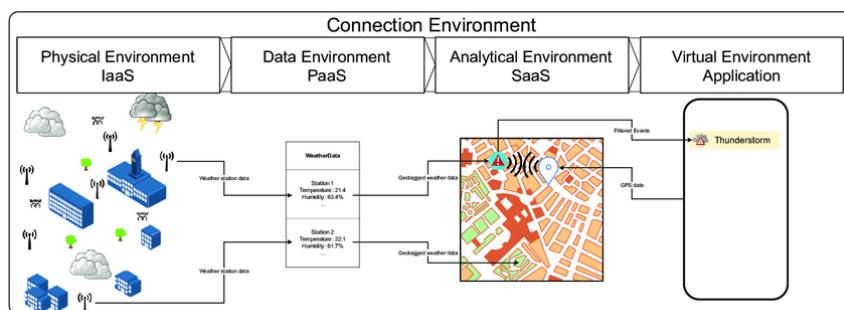
para visualizar los datos y ayudar a los usuarios a comprender e interpretar los resultados del análisis.

- **Entorno de Conexión:** Por último, el entorno de conexión ofrece una API para transferir los datos necesarios entre los componentes del sistema. Existen dos enfoques para diseñar el entorno de conexión: desde una perspectiva de servicio, donde el entorno de conexión no se considera un componente independiente sino como las API expuestas por los diferentes componentes, y desde una perspectiva de capa de compatibilidad/hipervisor, en la que el entorno de conexión actúa como intermediario entre los demás componentes del sistema (Grübel et al., 2022). Ambos enfoques tienen sus ventajas y desventajas y dependerán de las necesidades específicas del proyecto y de la arquitectura del sistema.

El siguiente es un ejemplo de una arquitectura de gemelo digital, que ilustra los diferentes componentes y cómo interactúan entre sí.

Figura 14

Arquitectura del gemelo digital



Nota. La siguiente figura presenta una aplicación de alertas con relación a un fenómeno meteorológico cercano. El Entorno Físico del gemelo digital se forma a través de sensores y redes locales y teledetección, y el Entorno de Datos sirve como plataforma para el procesamiento de datos. El Entorno Analítico se utiliza para modelar el tiempo y calcular la proximidad al evento previsto, y el Entorno Virtual se implementa como una aplicación de smartphone que proporciona una alerta en un panel de control. El entorno de conexión abarca todos los servicios y entornos y proporciona una API

que permite sustituir un entorno por otro, lo que hace que el gemelo digital sea modular y componible. Adaptado de The Hitchhiker's Guide to Fused Twins: A Review of Access to Digital Twins In Situ in Smart Cities por (Grübel et al., 2022).

Para crear un gemelo digital de una ciudad, es fundamental considerar todos estos componentes, y uno de los primeros que debe desarrollar es el Entorno Virtual. En este contexto, resulta fundamental conocer los modelos digitales 3D disponibles que permitan una precisa representación de la ciudad.

2.5. Modelos Digitales 3D para la Representación de un Ciudad

Los modelos digitales son representaciones informáticas precisas de los objetos, sus características y sus interrelaciones en una ciudad. Esto incluye tanto las características naturales como las creadas por el hombre, como el modelo digital del terreno (MDT por sus siglas en inglés), el modelo digital de superficie (MDS por sus siglas en inglés), la vegetación, las masas de agua, así como las construcciones hechas por el hombre, como edificios, puentes, túneles e infraestructuras, a través de enfoques como el BIM (Shi et al., 2021b). La integración de estos diversos modelos digitales permite obtener una visión holística y detallada de la ciudad, facilitando la toma de decisiones informadas y la planificación estratégica para lograr una gestión urbana eficiente y sostenible.

En el desarrollo de esta investigación, se analizarán y explorarán diversos modelos digitales clave, cada uno con su enfoque específico y propósito en la gestión de ciudades inteligentes. Entre ellos, se destaca el Modelo de Información de la Ciudad (CIM), que emerge como un modelo integrador al combinar el GIS y el BIM. Además, se abordarán otros modelos digitales relevantes, como NIM (Network Information Model) y LIM (Land Information Model), para comprender cómo en conjunto contribuyen a una visión holística y actualizada del entorno urbano.

Estos modelos digitales proporcionan información clave sobre la ubicación, la forma, la extensión, el aspecto visual, la clasificación, los atributos temáticos, los aspectos

Comentado [AS24]: esta sección no debería estar dentro de la sección gemelo digital???

funcionales y sus interrelaciones, lo que es esencial para llevar a cabo simulaciones urbanas precisas y mejorar la planificación y la toma de decisiones en la ciudad. (Shi et al., 2021).

2.5.1. Niveles de Detalle en Modelos Digitales 3D

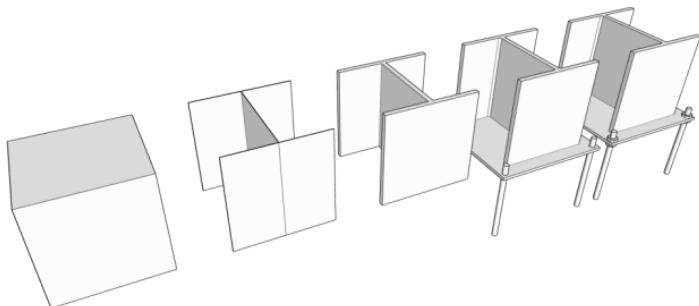
Los Niveles de Detalle, comúnmente conocidos como LOD (por sus siglas en inglés), son un concepto fundamental en el ámbito de los modelos 3D. Estos términos, que incluyen "nivel de detalle", "nivel de desarrollo" y "nivel de información", adquieren diferentes significados según el contexto o el enfoque en el que se utilicen. (Boeykens, 2022)

Según Boeykens (2022), LOD se refiere al grado de detalle y precisión con el que se representan objetos y entidades en un modelo digital. Estos niveles se utilizan para comunicar la confiabilidad y la cantidad de información presente en cada etapa del proyecto. A medida que el proyecto avanza, el LOD aumenta, lo que se traduce en modelos más precisos y detallados. Sin embargo, la adopción y aplicación del LOD pueden variar según los estándares y las prácticas de cada país.

Existen diferentes especificaciones de LOD, como la presentada por BIMForum (2023),¹⁵ que proporciona una guía para definir los niveles de desarrollo en distintas etapas del proyecto. Se establecen niveles numéricos (por ejemplo, LOD 100, LOD 200, LOD 300, etc.) que indican el grado de detalle y precisión de los objetos y componentes del modelo, como se muestra en la Figura 15.

Figura 15

Diferentes detalles geométricos para una columna de acero



Comentado [JM25]: [What Is LOD, or Level of Detail? | Engineering.com](#)

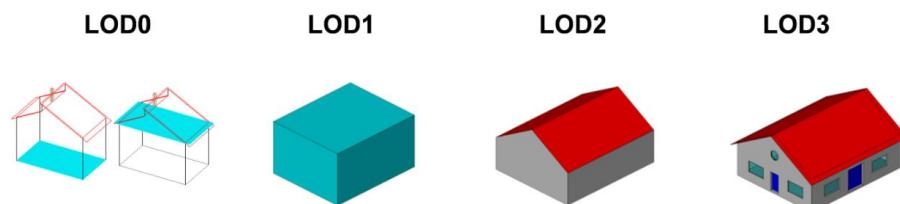
Comentado [JM26]: [Level of Development \(LOD\) Specification 2022 Supplement – BIM Forum](#)

Nota. Adaptado de What Is LOD, or Level of Detail? Por (Boeykens, 2022).

El modelo conceptual CityGML diferencia cuatro niveles de detalles consecutivos (LOD 0-3), donde los objetos se vuelven más detallados al aumentar el LOD con respecto a su geometría. La clasificación de objetos del mundo real en espacios y límites espaciales se basa únicamente en la semántica de estos objetos y no en su tipo de geometría utilizada, ya que CityGML 3.0 permite varias representaciones geométricas de objetos. Un edificio, por ejemplo, puede representarse espacialmente mediante un sólido 3D (p. ej., en LOD1), pero al mismo tiempo, la geometría del mundo real también puede abstraerse mediante un solo punto, huella o huella de techo (LOD0), o por una malla 3D (LOD3). La capa exterior del edificio también puede descomponerse semánticamente en superficies de paredes, techos y suelos. La Figura 16 muestra diferentes representaciones del mismo objeto de construcción del mundo real en diferentes LOD geométricos (y apariencias) (Kolbe et al., 2021).

Figura 16

Representación de un mismo edificio en diferentes niveles de detalle



Nota. Adaptado de OGC City Geography Markup Language (CityGML) Part 1: Conceptual Model Standard por (Kolbe et al., 2021).

La precisión y detalle del modelo 3D de una ciudad depende del propósito para el que se utilice el modelo. Para la modelización de una ciudad, se recomienda utilizar LOD1 o LOD2, ya que, estos dos niveles utilizan información general, como imágenes o fotografías exteriores o imágenes referenciales satelitales, lo que permite una semiautomatización del modelado 3D. Generalmente, un LOD2 es suficiente para realizar simulaciones y análisis (Airaksinen et al., 2019).

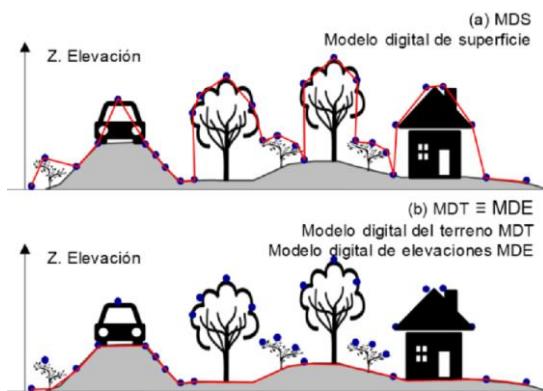
Los Niveles de Detalle, desempeñan un papel de gran importancia y utilidad en el desarrollo de modelos 3D en diferentes contextos. Tanto así que los softwares de modelado BIM, como Autodesk Revit y Archicad, ofrecen herramientas para configurar y visualizar diferentes niveles de detalle en sus modelos. Sin embargo, la estandarización y la evaluación efectiva del LOD siguen siendo temas de debate en la industria.

2.5.2. Modelo Digital de Elevación

Los modelos digitales de elevación (MDE) son representaciones geométricas de la topografía donde las elevaciones se representan como píxeles en formato raster. Los DEM se clasifican en MDT, que representan una topografía sin características de superficie; y Modelos de superficie digital MDS, que representan las superficies superiores de las características elevadas sobre la tierra, incluidos edificios, árboles y torres. La Figura 17 muestra la diferencia entre ambos modelos.

Figura 17

Diferencias entre el MDS y MDT



Nota. Diferencias entre Modelo Digital de Superficie (a) y Modelo Digital del Terreno (b). Adaptado de [Contribuciones metodológicas para la obtención de información altimétrica requerida en la evaluación local de amenazas por inundaciones a partir de nuevas tecnologías geoespaciales por \(Escobar Villanueva, 2020\)](#).

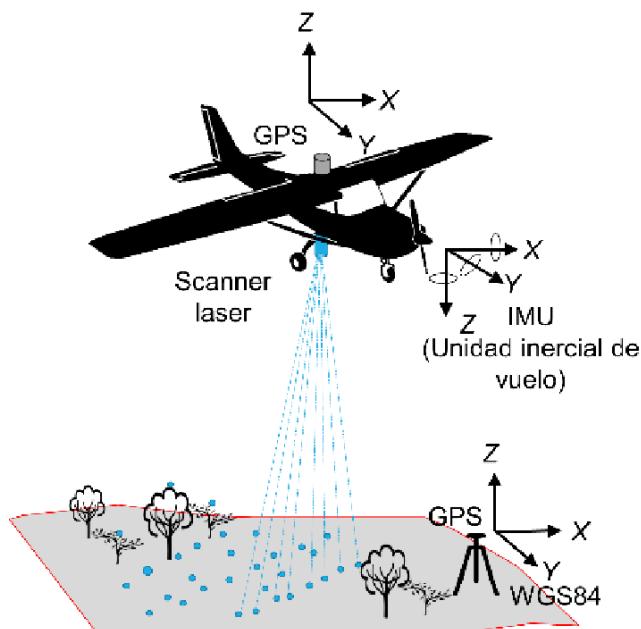
Comentado [AS27]: este párrafo está suelto

Históricamente, los MDE se producían arduamente a partir de datos de campo medidos, líneas de contorno en mapas topográficos y fotogrametría de fotografías aéreas. La

precisión de MDE y la eficiencia de producción mejoraron considerablemente con el inicio de la detección y el alcance de la luz (LiDAR). Los datos LiDAR son costosos de obtener para áreas pequeñas, ya que se recopilan desde aeronaves pilotadas (LiDAR aerotransportado) y/o desde el nivel del suelo (LiDAR terrestre), como se muestra en la Figura 18. LiDAR aerotransportado es más eficiente para estudios a escala regional, mientras que LiDAR terrestre es óptimo para escalas hiperlocales. Además, ambos requieren una amplia experiencia en la adquisición y el procesamiento de datos. Aunque LiDAR ha producido algunas de las representaciones más precisas de la superficie de la Tierra, su disponibilidad y accesibilidad son un desafío técnico o financiero para secciones del grupo de usuarios.

Figura 18

Captura de información altimétrica por LiDAR aéreo



Nota. Adaptado de Contribuciones metodológicas para la obtención de información altimétrica requerida en la evaluación local de amenazas por inundaciones a partir de nuevas tecnologías geoespaciales por (Escobar Villanueva, 2020).

Sin embargo, el impulso reciente para hacer que los datos LiDAR financiados por el estado estén más disponibles a través de portales en línea mejorará la disponibilidad. Además, el crecimiento tecnológico y la accesibilidad de los sistemas aéreos no ocupados (UAS) han revolucionado la producción de información geográfica, aumentando la disponibilidad de recopilación de imágenes de alta resolución que pueden procesarse para crear ortofoto mosaicos y MDE. Los MDE son capas de entrada en muchos cálculos y aplicaciones del Sistema de Información Geográfica (SIG). Los MDS, específicamente, son un componente crítico de los análisis geoespaciales, que van desde la agricultura de precisión hasta el desarrollo urbano, la silvicultura y el modelado 3D.

2.5.3. Modelo de Información de la Ciudad

La tecnología de gemelos digitales está revolucionando la forma en la que se conceptualizan las ciudades inteligentes, convirtiéndolas en una realidad tangible mediante el uso de un modelo de información de la ciudad (CIM en inglés). Este modelo incluye funciones como el modelado, la monitorización, el análisis y la simulación, lo que permite una proyección completa de la ciudad en cuanto a sistemas de IoT, computación en la nube, macrodatos y tecnologías de comunicación (Xia et al., 2022).

El modelo CIM es una representación digital de las características físicas y funcionales de una ciudad. Incluye datos sobre las infraestructuras, edificios y otros elementos de la ciudad, así como información sobre cómo se utilizan y cómo interactúan entre sí. El modelo CIM se basa en los datos cartográficos y espaciales de la ciudad, registros, nubes de puntos procedentes de escaneado láser, fotografías aéreas y modelos de información de edificios (ver Figura 19).

Figura 19

Visualización de un Modelo de Información de la Ciudad



Nota. Adoptado de Intelligent Information Systems for the representation and management of the city.

Urban survey and design for resilience por (Bocconcino & others, 2021).

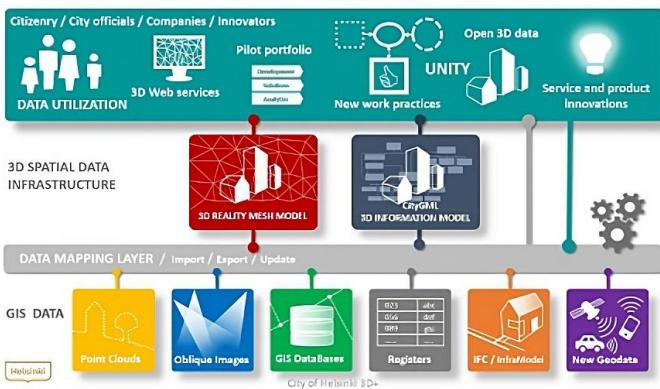
El CIM describe digitalmente objetivos físicos sobre y bajo tierra y en interiores y exteriores de una ciudad, así como sus estados espacio temporales, proporcionando una representación digital de las características físicas y funcionales de un grupo de edificios a nivel de ciudad. También proporciona una definición estándar de la información de gestión de los sistemas, redes, aplicaciones y servicios. Además, permite recopilar datos precisos y valiosos para la futura implementación de la innovación y la transformación, ampliando así el concepto de CIM al modelo de ciudad inteligente. (Xia et al., 2022).

Las ciudades inteligentes utilizan un espejo digital de la ciudad para detectar, analizar e integrar información crítica sobre los sistemas centrales de las operaciones urbanas, con el objetivo de garantizar un desarrollo urbano sostenible (Yigitcanlar et al., 2019). La implementación de una ciudad inteligente se logra mediante el establecimiento de un modelo CIM, la implementación de la función de gestión automática utilizando la tecnología de gemelos digitales urbanos y llevando a cabo la simulación avanzada y la predicción de problemas complejos de parámetros urbanos multifactoriales (económicos, sociales y espaciales), multidimensionales (espacio, tiempo, coste y aplicaciones n-dimensionales) y multiescalar (macro, meso y micro). Según la investigación realizada por Xia et al., (2022), se

ha demostrado que el modelo CIM es una combinación natural de datos de modelado GIS de grandes escenas, datos de modelado BIM de ubicaciones remotas y sensores IoT (Souza & Bueno, 2022). Ver Figura 20.

Figura 20

Integración de GIS, BIM y IoT en el Modelo CIM



Nota. Adaptado de The kalasatama digital twins project por (Airaksinen et al., 2019).

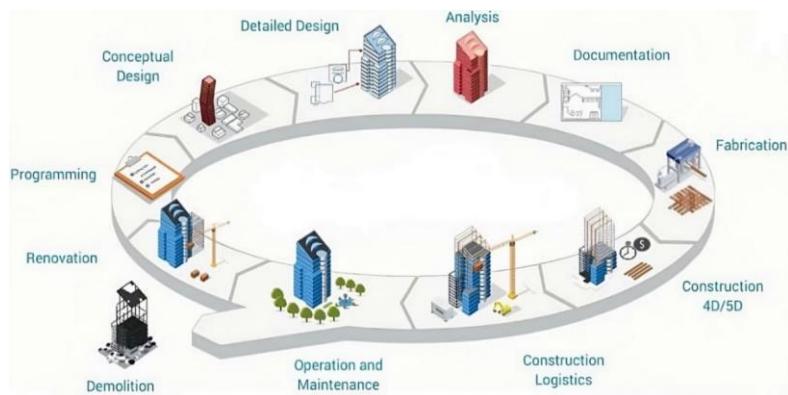
2.5.4. Modelo de Información de Construcción

El BIM se basa en la creación de un modelo digital que incluye toda la información relevante sobre el edificio, incluyendo elementos como la geometría, las características de los materiales, las especificaciones técnicas y los requisitos de rendimiento. Según las normas internacionales, un modelo BIM se define como "una representación digital compartida de las características físicas y funcionales de cualquier objeto construido" (Standard, 2010).

El BIM es una herramienta para gestionar información precisa sobre el edificio a lo largo de todo su ciclo de vida, especialmente para respaldar los procesos de mantenimiento y deconstrucción (ver Figura 21). Se basa en la tecnología de software orientado a objetos, y consta de objetos paramétricos que representan los diferentes componentes de construcción. Estos objetos pueden tener atributos tanto geométricos como no geométricos, incluyendo información funcional, semántica y topológica (Volk et al., 2014).

Figura 21

Ciclo de vida de un proyecto



Nota. La muestra las aplicaciones típicas de BIM en las distintas fases del ciclo de vida de un proyecto. Adaptado de Research on the Construction of Construction Engineering Cost construction Information System Based on BIM Technology por (Wu et al., 2020).

Un elemento muy importante de la tecnología BIM es la posibilidad de compartir el modelo entre todos los usuarios en el proceso de diseño, construcción y operación de un edificio o estructura. El logro de este objetivo está garantizado por la aplicación del modelo de datos estandarizado IFC destinado a describir datos arquitectónicos, de construcción y de la industria de la construcción. IFC es generalmente una descripción digital normalizada de un entorno construido, incluidos edificios e infraestructura civil. Es un estándar internacional abierto ISO 16739-1:2018 destinado a ser independiente de los proveedores de software.

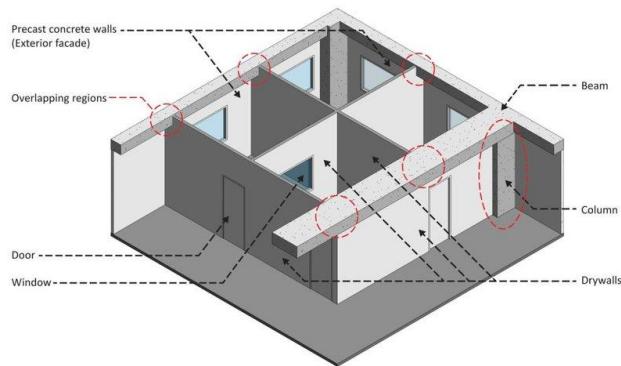
Además, permite la simulación y análisis de diferentes escenarios, la generación automática de planos y documentación, y la toma de decisiones para optimizar los sistemas y componentes de un edificio. Gracias al estándar internacional COBie, también se puede almacenar información de mantenimiento de manera estructurada, convirtiéndolo en una valiosa forma de documentación de las instalaciones. (Volk et al., 2014).

A diferencia del diseño arquitectónico asistido por ordenador (CAAD), que se centra en la representación geométrica y estética de los edificios, BIM se enfoca en crear un modelo

detallado de información que representa los elementos de los edificios como paredes, tuberías, escaleras, enchufes como objetos semánticos, y las relaciones entre ellos (Shi et al., 2021b). Ver Figura 22.

Figura 22

Ejemplo de un modelo BIM

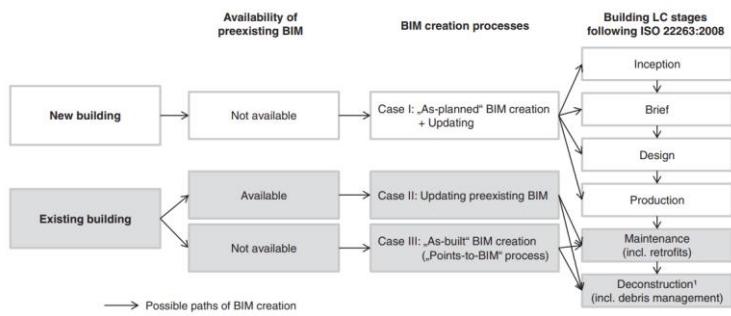


Nota. Adaptado de Development of BIM-based quantity takeoff for light-gauge steel wall framing systems por (Khosakitchalert et al., 2020).

Según Volk et al. (2014), en muchos edificios existentes predomina la información incompleta, obsoleta o fragmentada. La falta de información o la existencia de información obsoleta sobre los edificios puede dar lugar a una gestión ineficaz de los proyectos, a resultados inciertos de los procesos y a pérdidas de tiempo o incrementos de costes en los procesos de mantenimiento, rehabilitación o remediación. Dado que los edificios existentes carecen a menudo de documentación de construcción debido a la omisión de su actualización, se prevén limitaciones en el uso de BIM en los edificios existentes y los retos que plantea la investigación.

Figura 23

Procesos de creación de modelos BIM en edificios nuevos o existentes



Nota. Adaptado de Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs por (Volk et al., 2014).

En la **!Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se representan distintos procesos de creación de BIM para edificios nuevos y existentes. En el caso de los edificios nuevos, el BIM se crea en un proceso que abarca varias fases del ciclo de vida, desde el inicio, las instrucciones, el diseño hasta la producción (caso I) y parte de la entrega del proyecto. En ocasiones, el BIM no es utilizado por todas las partes interesadas de AEC o gestión de instalaciones en el ciclo de vida del edificio, por lo que algunos crean BIM aislados con un único propósito. En los edificios existentes, dependiendo de la disponibilidad de BIM preexistentes, el BIM puede actualizarse (caso II) o crearse de nuevo (caso III).

El BIM es considerado como una tecnología clave en el campo de la Arquitectura, Ingeniería y Construcción (AEC). Se ha establecido como un proceso más avanzado de modelado 3D que integra y gestiona toda la información relacionada con la entidad física de un proyecto, lo que permite notables ahorros en costos y tiempo. Entre los numerosos beneficios del BIM, destacan la reducción de errores, mejora en la colaboración y mejora en la imagen de una organización.

En los últimos años, se ha sugerido que los beneficios del BIM se amplíen al emplear herramientas de realidad virtual (VR) y modelos de aprendizaje de redes neuronales para mejorar el flujo de trabajo colaborativo y apoyar la toma de decisiones durante el ciclo de vida

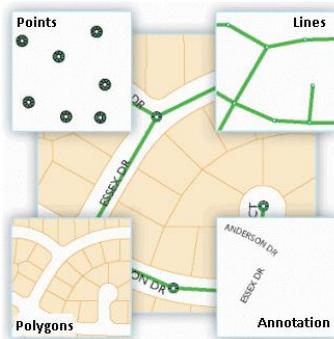
de los proyectos de construcción. Además, se espera que la integración del BIM y GIS combinen los beneficios de modelar edificios y su entorno circundante, pero todavía se encuentran en una fase incipiente de aplicación a escala del entorno urbano, y presentan desafíos como la interoperabilidad de datos, estándares abiertos e integración de visualización. En resumen, el BIM es una herramienta esencial para mejorar la eficiencia en la construcción, y su integración con otras tecnologías como VR y GIS, pueden brindar aún más beneficios en el futuro. (Shahat et al., 2021b).

2.5.5. Modelo de Información Geográfica

Un modelo de información geográfica (a partir de ahora modelo GIS), también conocido como modelo de datos geoespaciales, es una representación digital de objetos, fenómenos o características del mundo real dentro de un GIS. Estos modelos son fundamentales para organizar y estructurar datos geográficos de manera que se puedan capturar, almacenar, analizar y visualizar de manera eficiente. En un modelo GIS, los datos geoespaciales se organizan en atributos y entidades, lo que permite una representación estructurada y detallada de la información geográfica.

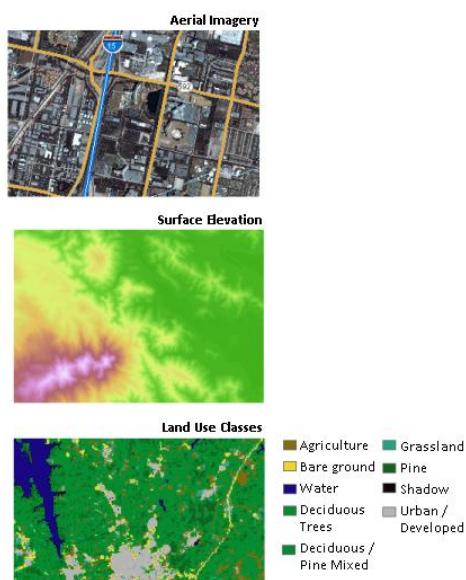
- **Entidades:** Las entidades geográficas son representaciones de cosas ubicadas en la superficie de la Tierra o cercanas a ella. Las entidades geográficas pueden ocurrir de forma natural (por ejemplo, ríos y vegetación) y pueden ser construcciones (como carreteras, canalizaciones, pozos y edificios) o subdivisiones de tierra (como condados, divisiones políticas y parcelas de terreno). La Figura 24, muestra los cuatro tipos de entidad que comúnmente se representan.

Comentado [LO28]: Cita: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/6/3386>

Figura 24*Tipos de entidades geográficas*

Nota. Adaptado de Aspectos clave de SIG (ArcGIS Resources, s/f).

- **Datasets Ráster:** Los ráster son datasets basados en celdas que se emplean para contener imágenes, modelos digitales de elevación y otros datos temáticos.

Figura 25*Datos ráster*

Nota. Adaptado de Aspectos clave de SIG (ArcGIS Resources, s/f).

- **Atributos e información descriptiva:** Se trata de información tabular tradicional utilizada para describir entidades y categorías acerca de los objetos geográficos que contiene cada dataset.

Figura 26

Ejemplo de tabla de atributos de una entidad

Feature Class Table					
Shape	ID	PIN	Area	Addr	Code
	1	334-1626-001	7,342	341 Cherry Ct.	SFR
	2	334-1626-002	8,020	343 Cherry Ct.	UND
	3	334-1626-003	10,031	345 Cherry Ct.	SFR
	4	334-1626-004	9,254	347 Cherry Ct.	SFR
	5	334-1626-005	8,856	348 Cherry Ct.	UND
	6	334-1626-006	9,975	346 Cherry Ct.	SFR
	7	334-1626-007	8,230	344 Cherry Ct.	SFR
	8	334-1626-008	8,645	342 Cherry Ct.	SFR

Nota. Adaptado de Aspectos clave de SIG (ArcGIS Resources, s/f).

Para visualizar entidades o modelos GIS, se utilizan sistemas de información geográfica (GIS). Estos sistemas permiten representar y manipular datos geoespaciales, brindando una visión clara y detallada del entorno geográfico. Esto facilita la toma de decisiones informadas en campos como cartografía, análisis ambiental, planificación urbana y gestión de recursos naturales.

Además, los GIS tienen la capacidad de integrar diversos tipos de modelos, como modelos de información BIM, modelos MDE o modelos con estructura GIS, siempre que tengan un formato y sistema de coordenadas compatibles. Esto amplía la utilidad de los sistemas de información geográfica en una variedad de aplicaciones y disciplinas.

2.5.5.1. Sistema de Información Geográfica. Es un sistema de información que se utiliza para capturar, almacenar, procesar y presentar datos espaciales y atributos relacionados con la Tierra.

El GIS como tecnología o sistema permite el almacenamiento de información espacial en una base de datos relacional y, como ciencia, también está más allá del sistema de almacenamiento de datos. Normalmente, la información espacial representa la realidad a

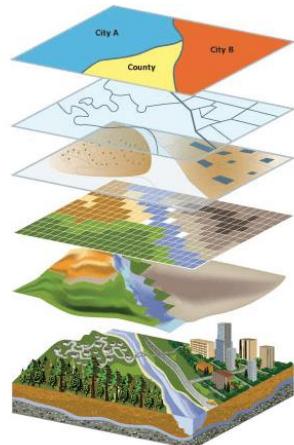
través de un modelo abstracto, e incluye coordenadas, la relación espacial entre características y atributos no espaciales (Liu et al., 2017).

Los GIS, según el Centro Nacional de Información y Análisis Geográficos, son un sistema de hardware, software y procedimientos diseñados para apoyar la captura, gestión, edición, análisis, modelización y visualización de datos referenciados geográficamente para resolver problemas complejos de planificación y gestión. Los componentes clave de los GIS incluyen hardware informático (por ejemplo, ordenadores de mesa, portátiles), software especializado (por ejemplo, ArcGIS de Esri, GIS en línea, aplicaciones web y móviles de GIS gratuitas y de código abierto), datos referenciados geográficamente (por ejemplo, demográficos, sociales, económicos, políticos, composición racial, renta media de los hogares), y personas que participan en todas las fases de elaboración y lectura de mapas. Los GIS se utilizan para cartografiar, medir controlar, modelizar y gestionar datos con referencias espaciales. Herramienta de superposición, o el concepto de apilar capas que contienen diferentes tipos de datos y compararlos entre sí en función de su ubicación es el concepto fundamental del análisis espacial (Bagheri, 2023).

Como se muestra en la Figura 27, en los GIS cada conjunto de datos se gestiona como una capa y puede combinarse gráficamente con otras capas. Según Bagheri (2023) combinando capas mediante operaciones de análisis y visualización espacial, los GIS nos permiten explorar cuestiones de importancia crítica y, posiblemente encontrar respuestas a esas preguntas. Los GIS ofrecen una forma sistemática de superponer todo tipo de conjunto de datos; así a través de esta composición superpuesta de capas, se pueden identificar, explicar y predecir las relaciones espaciales entre distintas capas, los patrones espaciales y las tendencias futuras.

Figura 27

Superposición de diferentes capas de datos en un mapa GIS



Nota. Adaptado de Using mixed methods research with Geographic Information Systems (GIS) de por (Bagheri, 2023).

2.5.6. Otros Modelos de Información

Además de los modelos GIS y BIM, existen otros modelos de información esenciales para la planificación y gestión de ciudades y proyectos de construcción. Estos modelos también se basan en un sistema de referencia geográfico y almacenan información vinculada a una ubicación específica, permitiendo mostrar la información en un contexto espacial e integrarla con otras capas de datos.

En la Figura 28, se observe la integración de estos modelos entre sí, junto con otros modelos como GIS, BIM y modelos de ciudad 3D para proporcionar una visión holística de la información de la ciudad.

Figura 28

Integración de modelos para una visión holística de la ciudad



Nota. La imagen muestra cómo la combinación de diferentes modelos de información, como GIS, BIM y modelos de sistemas de transporte, energía y agua, entre otros, permite proporcionar una comprensión más completa y detallada de la ciudad y sus sistemas.

Landscape Information Model (LIM): Es un tipo de modelo espacial que se utiliza para representar los aspectos físicos y ambientales del paisaje. Este modelo se utiliza principalmente para la planificación del paisaje, la conservación de la biodiversidad, la gestión de recursos naturales y la evaluación de impactos ambientales (Kim & Son, 2014).

El LIM incluye información sobre la topografía, la vegetación, la hidrología, la geología y la fauna. También puede incluir información sobre usos del suelo, actividades humanas y planes de conservación.

Network Information Model (NIM): Es un tipo de modelo de información que se utiliza para representar las redes de infraestructura, como las redes de transporte, energía, agua y telecomunicaciones. Este modelo se utiliza para la planificación, diseño, construcción y gestión de estas redes, y para la toma de decisiones relacionadas con la infraestructura (Lin et al., 1998).

El NIM incluye información sobre la geometría de las redes, como las carreteras, los tubos, las líneas de energía, las líneas de telecomunicaciones, las estaciones y los puntos de

acceso. También incluye información sobre la capacidad, el estado, la operación y el mantenimiento de las redes.

Todos estos modelos digitales mencionados pueden integrarse en un sistema GIS mediante estándares de interoperabilidad, lo que proporciona una visión completa y actualizada de la ciudad y facilita la colaboración entre distintos equipos y disciplinas en la planificación y gestión urbana. Sin embargo, para lograr una integración eficiente, es crucial contar con un modelo semántico consistente que establezca reglas y relaciones entre los datos, asegurando una interpretación uniforme y significativa de la información en el sistema GIS. Un modelo semántico bien definido es esencial para una gestión de datos efectiva y una toma de decisiones informadas en el complejo entorno urbano.

2.6. Modelos Semánticos de Ciudades en 3D

Según Shi et al., (2021a), los modelos semánticos de ciudades en 3D son representaciones virtuales precisas del entorno urbano, que incluyen elementos como edificios, calles, árboles, puentes y terreno. A diferencia de los modelos de realidad virtual, estos modelos están estructurados según criterios temáticos y lógicos, y no sólo en términos de representación gráfica.

Los objetos en un modelo semántico de ciudad en 3D representan las entidades del mundo real con sus propiedades temáticas, geométricas, topológicas y de apariencia, y también expresan las relaciones lógicas y espaciales entre los distintos objetos. Los objetos pertenecen a un conjunto de clases predefinidas, como edificios, carreteras, mobiliario urbano o cuerpos de agua, con atributos espaciales y temáticos, cuya semántica, es decir, el significado de los componentes y propiedades del modelo se define explícitamente en una especificación. En términos de modelos de datos estandarizados (abiertos) disponibles para modelos de ciudades, CityGML ofrece la única solución existente actualmente.

Además de representar la semántica de los elementos de una ciudad, es fundamental también capturar y gestionar los datos generados por dispositivos y sensores en un modelo semántico de datos.

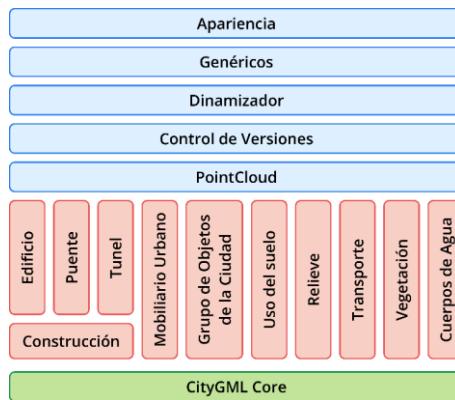
2.6.1. Modelo Semántico CityGML

El CityGML es un estándar internacional abierto y completo para la representación de información urbana en el dominio geoespacial, establecido por el Open Geospatial Consortium (OGC). Es uno de los formatos de modelado 3D semántico más destacados y representa un avance importante en la integración de BIM y GIS. CityGML es un modelo de información semántica común que representa objetos 3D en su contexto geoespacial y puede ser compartido por diferentes aplicaciones. Su objetivo es estructurar la información sobre las ciudades y sus características contextuales de manera integral (Liu et al., 2017).

El modelo conceptual CityGML se descompone temáticamente en un módulo principal y diferentes tipos de módulos de extensión, como se muestra en Figura 29. El módulo Core (mostrado en color verde) comprende los conceptos y componentes básicos del CityGML y, por lo tanto, debe ser implementado por cualquier sistema conforme. Cada módulo de color rojo cubre un campo temático específico de modelos de ciudades virtuales en 3D (Yao et al., 2018).

Figura 29

Descripción general del módulo CityGML 3.0



Nota. Los recuadros verticales muestran los diferentes módulos temáticos. Los módulos horizontales especifican conceptos que son aplicables a todos los módulos temáticos. Adaptado de OGC City Geography Markup Language (CityGML) Part 1: Conceptual Model Standard por (Kolbe et al., 2021).

Según Kolbe et al. (2021), los tres módulos Edificio, Puente y Túnel modelan estructuras civiles y comparten conceptos comunes que se agrupan dentro del módulo de Construcción. Los cinco módulos de extensión de color azul agregan aspectos de modelado específicos que se pueden usar junto con todos los módulos temáticos.

- **Módulo de Apariencia:** Contiene los conceptos para representar las apariencias (como texturas y colores) de los objetos de la ciudad.
- **Módulo Genéricos:** Define los conceptos de objetos, atributos y relaciones genéricos.
- **Módulo Dinamizador:** Contiene los conceptos para representar las propiedades de los objetos de la ciudad mediante datos de series temporales y vincularlos con sensores, servicios de datos de sensores o archivos externos.
- **Módulo Control de Versiones:** Agrega conceptos para la representación de versiones simultáneas, historias de objetos del mundo real e historias de funciones.
- **Módulo PointCloud:** Proporciona conceptos para representar la geometría de los objetos de la ciudad mediante nubes de puntos 3D.

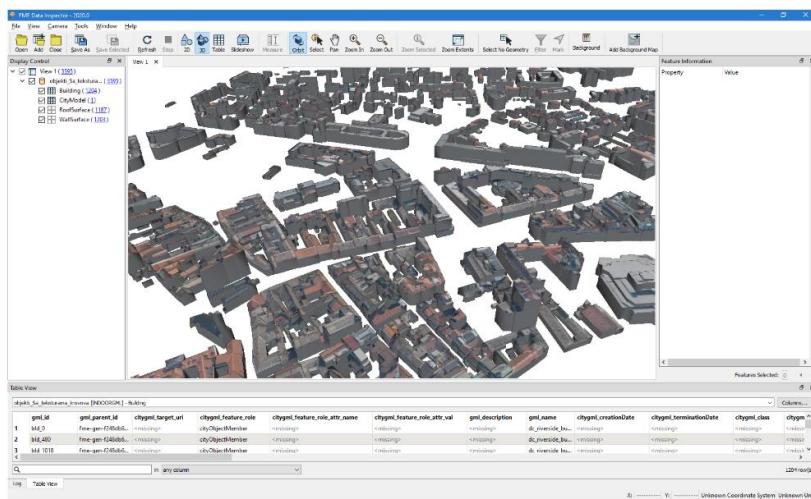
Además de los objetos 3D cubiertos por las clases temáticas de CityGML, existen otros objetos que pueden ser representados mediante la extensión de dominio de aplicación (ADE en inglés). Esta herramienta permite agregar nuevos elementos o propiedades al modelo de información sin necesidad de publicar una nueva versión del modelo de datos. Este enfoque ha sido utilizado para ampliar el uso del modelo hacia áreas como la energía solar, las simulaciones de emisiones sonoras y la evaluación del impacto de las inundaciones. (Ruohomaki et al., 2018).

Los modelos CityGML son herramientas valiosas utilizadas en gemelos digitales de ciudades y entornos urbanos para representar y simular las características y comportamientos del mundo real, como se muestra en la Figura 30. Estos modelos permiten a los ingenieros y planificadores analizar y visualizar el rendimiento de los sistemas urbanos, como redes de transporte y servicios públicos, y evaluar el impacto de diferentes escenarios de diseño y planificación en una amplia gama de aplicaciones, tales como la planificación

urbana, la gestión de desastres y el turismo virtual. Esto proporciona una comprensión más profunda de los sistemas urbanos y su interacción, lo que es esencial para la planificación, la toma de decisiones y la gestión de la ciudad. (Airaksinen et al., 2019).

Figura 30

Modelo de ciudad 3D de acuerdo con el estándar CityGML



Nota. Adaptado de Building Virtual 3D City Model for Smart Cities Applications: A Case Study on Campus Area of the University of Novi Sad por (Jovanović et al., 2020).

Los objetos del mundo real son representados por características geográficas de acuerdo con la definición ISO 19109. Estas características son modeladas mediante tipos correspondientes y representadas como clases en el modelo conceptual. Las propiedades espaciales de estos objetos son representadas utilizando las clases de geometría definidas en ISO 19107. Las representaciones espaciales pueden tener diferentes dimensiones dependiendo del tipo de elemento y el nivel de detalle (LOD en inglés). Por lo general, se utilizan valores de coordenadas 3D para representar geometrías primitivas como puntos, curvas, superficies y sólidos. Además, las formas volumétricas se representan siguiendo las especificaciones de ISO 19107 y la Representación de límites (B-Rep) (Kolbe et al., 2021).

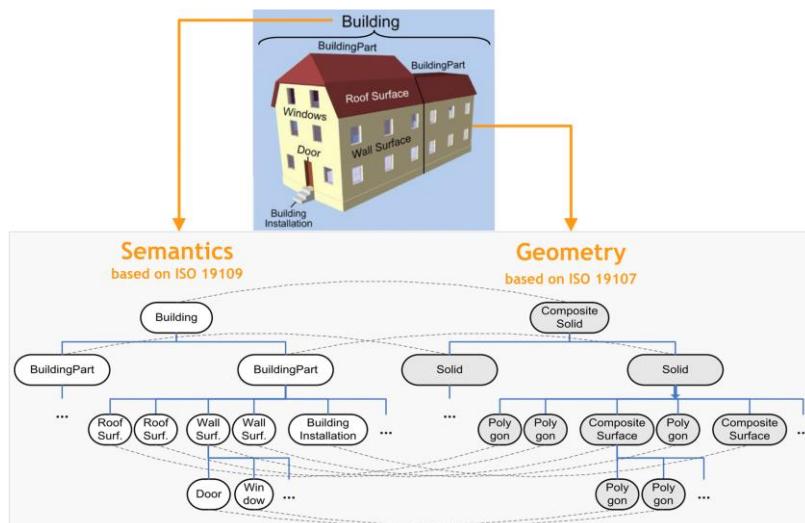
Esto permite una explicación más detallada de las geometrías, como se describe en Foley et al., (2002).

Por lo tanto, la composición de los modelos CityGML está dada por datos vectoriales 3D y la semántica del proyecto, dando propiedades identificables a la geometría y preservando la interoperabilidad semántica. La Figura 31 muestra la aplicación de las ISO 19109 y 19107 en los modelos CityGML, dando una guía para tratar los datos semánticos y datos geométricos siguiendo la misma estructura (Kolbe et al., 2021).

Comentado [JDLM29]: <https://docs.ogc.org/is/20-010/20-010.html>

Figura 31

Aplicación de ISO 19109 e ISO 19107 en el estándar CityGML



Nota. Adaptado de 3DCityDB - a 3D geodatabase solution for the management, analysis, and visualization of semantic 3D city models based on CityGML por (Yao et al., 2018).

El modelo conceptual CityGML diferencia cuatro niveles de detalles consecutivos (LOD 0-3), donde los objetos se vuelven más detallados al aumentar el LOD con respecto a su geometría. La clasificación de objetos del mundo real en espacios y límites espaciales se basa únicamente en la semántica de estos objetos y no en su tipo de geometría utilizada, ya que CityGML 3.0 permite varias representaciones geométricas de objetos. Un edificio, por ejemplo, puede representarse espacialmente mediante un sólido 3D (p. ej., en LOD1), pero

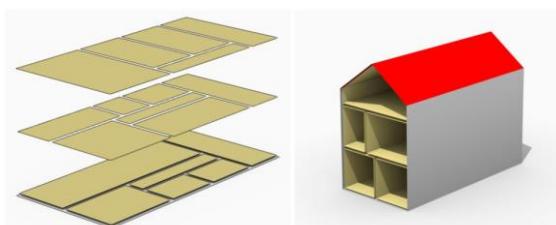
al mismo tiempo, la geometría del mundo real también puede abstraerse mediante un solo punto, huella o huella de techo (LOD0), o por una malla 3D (LOD3). La capa exterior del edificio también puede descomponerse semánticamente en superficies de paredes, techos y suelos. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra diferentes representaciones del mismo objeto de construcción del mundo real en diferentes LOD geométricos (y apariencias) (Kolbe et al., 2021).

Según Kolbe et al. (2021), LOD4 se eliminó, porque ahora todos los tipos de características pueden tener elementos exteriores e interiores en los LOD 0-3 (para aquellos objetos de la ciudad donde tiene sentido, como edificios, túneles o puentes). Esto significa que la cubierta exterior, como la de un edificio, podría representarse espacialmente en LOD2 y los elementos interiores como habitaciones, puertas, pasillos, escaleras, etc. en LOD1.

CityGML ahora se puede usar para representar planos de planta de edificios, que son representaciones LOD0 de interiores de edificios (cf. Konde et al., 2018). Incluso es posible modelar la estructura exterior de un edificio en LOD1, mientras que la estructura interior se representa en LOD2 o LOD3. La Figura 32 muestra las diferentes representaciones interiores/exteriores de un edificio. Los detalles sobre los cambios en el concepto LOD de CityGML se proporcionan en (Löwner et al., 2016).

Figura 32

Representación interior/exterior de un edificio



Nota. Adaptado de PROPOSAL FOR A NEW LOD AND MULTI-REPRESENTATION CONCEPT FOR CITYGML por (Löwner et al., 2016).

Además, el uso de un modelo semántico IFC permite una mayor comprensión y clasificación de los elementos de la ciudad, especialmente para edificios y su relación con el entorno, lo que mejora la precisión y eficacia en la planificación y toma de decisiones.

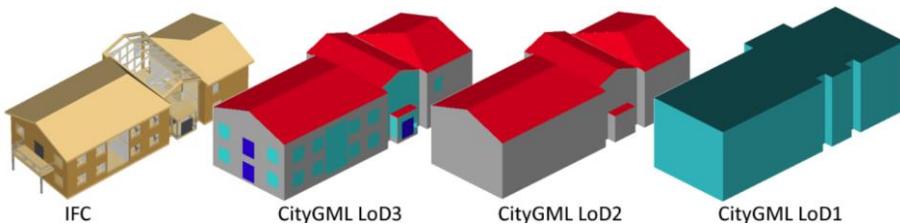
2.6.2. Modelo Semántico IFC

La Industry Foundation Classes (IFC en inglés) es un formato de intercambio de datos desarrollado por la organización internacional buildingSMART. Es un modelo complejo que permite representar tanto la geometría como la estructura semántica de un edificio utilizando un enfoque orientado a objetos. El edificio se descompone en sus componentes y en sus espacios, describiendo ambos en detalle junto con las interrelaciones entre ellos. Su estructura de datos es amplia y se puede utilizar para casi cualquier escenario de intercambio de datos en el ciclo de vida de un edificio. El modelo de datos IFC es esencial para la implementación de los conceptos BIM y es la base de varias iniciativas de estandarización a nivel internacional. (Borrman et al., 2018).

Además, el concepto de LOD en IFC es diferente al de CityGML, es decir, Nivel de Desarrollo (LODt), y se utiliza para especificar y articular con un alto nivel de claridad el contenido y la fiabilidad del BIM en varias etapas del proceso de diseño y construcción como se muestra en la Figura 33. Los LODt corresponden más bien a entregables concretos y son más precisos, en cierto sentido, que los LOD que no permiten la ejecución de una obra (Tolmer et al., 2013).

Figura 33

Modelo IFC y modelos CityGML con diferentes LOD



Nota. Adaptado de The kalasatama digital twins Project por (Airaksinen et al., 2019).

Si bien los modelos CityGML y IFC son efectivos para representar activos urbanos, la integración y comprensión de datos provenientes de dispositivos y sensores requiere un enfoque más avanzado. Un modelo semántico de datos basado en ontología se vuelve fundamental en este contexto, permitiendo la vinculación y enriquecimiento de la información de manera coherente y posibilitando la integración de diversas fuentes.

2.6.3. Modelo Semántico de Datos

El modelo semántico de datos es un método para estructurar bases de datos. Este método organiza los datos de manera lógica, específica y fácilmente comprensible. Puede entenderse como una forma de dar orden y contexto a los datos. El modelo semántico organiza los elementos de datos describiendo las relaciones entre ellos. Así, el usuario puede comprender cómo se relacionan los conjuntos de datos entre sí.

Para crear este modelo, se define un dominio específico relacionado con una iniciativa dentro de una ciudad inteligente. Al emplear ontologías en su construcción, se establecen relaciones y significados en los datos, lo que facilita su interpretación y análisis para tomar decisiones informadas. La Tabla 3 contiene ejemplos de ontologías relacionadas con algunas dimensiones de una ciudad inteligente:

Tabla 3

Ontologías relacionadas con las dimensiones de Ciudad Inteligente

Dimensión	Ontología
Energía y Eficiencia Energética	Semantic Sensor Network Ontology (SSN)
Movilidad y Transporte	Transport and Mobility Ontology (TMO)
Medio Ambiente y Calidad del Aire	Sensor, Observation, Sample, and Actuator (SOSA)
Gobernanza y Participación Ciudadana	Citizen Participation Ontology (CPO)
Infraestructura y Servicios Urbanos	Urban Infrastructure and Services Ontology (UISO)
Tecnologías de la Información	Internet of Things (IoT) Ontology
Seguridad y Vigilancia	Public Safety and Emergency Management Ontology (PSO)
Salud y Bienestar	Health and Wellbeing Ontology (HWO)
Economía y Desarrollo Económico	Economic Ontology (ECO)

Nota.

2.6.3.1. Formatos de Datos de Interoperabilidad. La interoperabilidad de datos es esencial para una comunicación eficiente entre sistemas. Los formatos de interoperabilidad estandarizan la representación y estructura de datos, facilitando el intercambio coherente de información (Esri, s/f-b). La Tabla 4 muestra los formatos de datos más habituales admitidos por los sistemas GIS.

Tabla 4

Formatos de datos geoespaciales

Categoría	Formato de Datos
Entidades geoespaciales	Geodatabases, Bases de datos especiales, Shapefiles, GeoPackage, GeoJSON, KML, JSON, XML, SDTS, Servicios web OGC
Datos tabulares	Bases de datos, dBase, CSV/Text/ASCII, Microsoft Excel, Microsoft Access, Cualquier dato conectado a través de la API OLE DB
Imágenes, Earth Observation y 3D	Satélite comercial, Satélite público (Landsat/Sentinel), Fotografía aérea, UAS/UAV, Lidar (LAS, LAZ), JPEG, TIFF/GeoTIFF/COG, GRIB, HDF, netCDF, CAD/Revit
Web y en tiempo real	RSS, WebSocket, Website (Poll), Kafka Event Messenger, Azure Event Hub, NMEA, GTFS, Waze, Sierra Wireless RAP, Trimble TAIP, Twitter, Common Alerting Protocol (CAP)

Nota. Adaptado de Open Data (Esri, s/f-b).

Estos formatos permiten la integración coherente de diversos tipos de datos, lo que es esencial para desarrollar un modelo semántico sólido y completo destinado a la planificación y gestión de ciudades inteligentes. Un modelo semántico adecuado debe estar capacitado para incorporar información proveniente de múltiples fuentes, especialmente de los sistemas de la era digital, como sensores, dispositivos móviles, plataformas de IoT y sistemas de información en tiempo real. Al recopilar y estructurar esta información, el modelo semántico amplía la percepción del paisaje urbano, identificando y estableciendo relaciones contextuales entre distintos elementos geoespaciales. Esta combinación de datos y enriquecimiento semántico potencia la toma de decisiones informadas y una gestión urbana más efectiva en el entorno actual.

2.7. Sistemas de la Era Digital

En su artículo Nakamura Noriyuki (2017), nos menciona que, el uso de tecnologías como la tecnología móvil, computación nube, Big Data, el IoT marca una tendencia en crecimiento en las ciudades, denotando así el camino hacia las ciudades inteligentes. Todas estas tecnologías facilitan muchos aspectos en la vida de las personas, al mismo tiempo están revolucionando los modelos de negocio convencionales al proporcionar un valor nuevo y sin precedentes. Este uso en tendencia de las TIC genera una gran cantidad de datos los cuales se han categorizado en los siguientes sistemas: Sistemas de registro (Systems of Record, SoR en inglés) estos resguardan las transacciones comerciales, Sistemas de compromiso (Systems of engagement, SoE en inglés) los cuales obtienen datos debido a la participación con las personas y las cosas para crear un nuevo valor.

2.7.1. Sistema de Registros

Nakamura Noriyuki (2017), se refiere a un grupo de sistemas que apoyan principalmente los sistemas de negocio de misión crítica de una empresa, como la contabilidad, la producción y las ventas, en los que la estabilidad y la fiabilidad son vitales.

Se puede entender en cierto grado que los sistemas de registro son los que generan los datos estructurados de las organizaciones

2.7.2. Sistema de Compromiso

Nakamura Noriyuki (2017), se refiere a un grupo de sistemas que facilitan el compromiso mutuo y la interacción entre los consumidores generales y los usuarios empresariales in situ mediante el uso de servicios de medios sociales y dispositivos móviles. El objetivo aquí es fomentar la innovación en los procesos empresariales actuales, crear nuevos productos y servicios y formar ecosistemas que se extiendan más allá de la empresa. Este Sistema permite obtener datos directamente desde los clientes y así poder generar estrategias óptimas para la creación de nuevos productos que satisfacen las necesidades de los usuarios.

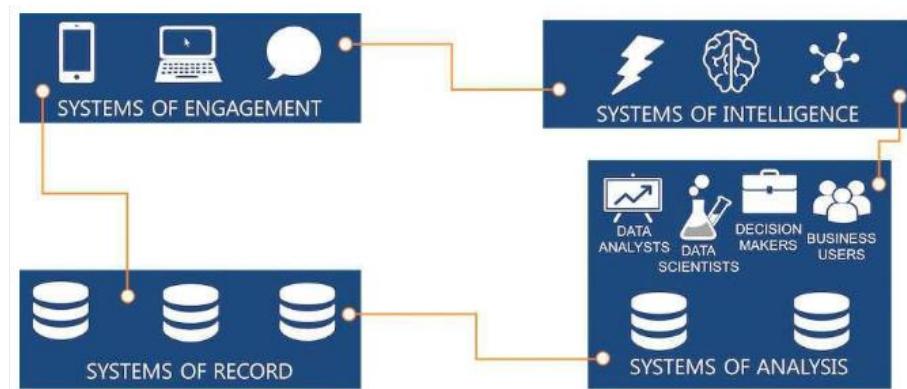
2.7.3. Sistemas de Inteligencia

Anand et al., (2019), describe que los sistemas de inteligencia (Systems of Intelligence, Sol en inglés) procesan y obtienen información de los datos de estos sistemas interconectados. El Sol abarca plataformas avanzadas de análisis y aprendizaje para procesar las diversas entradas de inteligencia que están activas a lo largo del ciclo de vida del cliente. Los sistemas de inteligencia consisten en plataformas inteligentes artificiales con capacidades "integradas" para personalizar el autoservicio, como el procesamiento del lenguaje natural, el reconocimiento del habla y la asistencia virtual.

Los Sistemas SoE, SoR y Sol trabajan en conjunto para asegurar un flujo eficiente de información tanto en organizaciones como en ciudades. Mientras los SoR se encargan de generar y almacenar datos estructurados, los SoE recopilan la información generada por los clientes durante los procesos empresariales. Por otro lado, los Sol procesan y obtienen información valiosa de los datos interconectados, permitiendo una visión integral del ciclo de vida del cliente. Esta interacción entre los sistemas es fundamental para lograr una gestión empresarial óptima, en la Figura 34 se puede observar claramente cómo se relacionan estos sistemas en la era digital.

Figura 34

Sistemas de registro, compromiso, análisis e inteligencia



Comentado [JDLM30]: Adaptar

Nota. La figura expresa la relación entre los diferentes sistemas de la era digital. Adaptada de Dawn of a new era: Why systems of engagement require systems of intelligence (Aslett & Kingstone, 2017).

En un nuevo enfoque descrito por Anand (2019) sugiere separar el sistema de compromiso en subsistemas dedicados a la obtención y almacenamiento de datos de elementos digitales comunes. Esta separación tiene como objetivo mejorar significativamente la eficiencia y efectividad en la gestión de datos, lo que ha dado lugar al surgimiento del Sistema de las Cosas.

2.7.4. Sistemas de las Cosas

El Sistema de las Cosas es una evolución que surge de la separación del sistema de compromiso en subsistemas dedicados a la obtención y almacenamiento de datos de elementos digitales comunes, como teléfonos móviles, y los sistemas del Internet de las cosas (IoT). Este nuevo enfoque tiene como objetivo mejorar la eficiencia y efectividad de la gestión de datos al combinar y aprovechar las capacidades de ambos sistemas.

El IoT es una de las redes con más crecimiento marcando un camino hacia la transformación digital. Anand et al., (2019), describe que para el 2020, los analistas esperan que haya 50.000 millones de dispositivos conectados en todo el mundo. Los fabricantes de dispositivos, los OEM (Original Equipment Manufacturer en inglés), las empresas de alta tecnología y los integradores de sistemas están colaborando para crear soluciones, productos y servicios únicos que permitan las comunicaciones de máquina a máquina (M2M) y de máquina a persona (M2H) para compartir sin problemas los datos en todos los ecosistemas del sector, activados por alertas en tiempo real. Marcando así un camino a futuro en la conexión, intercambio y análisis de datos.

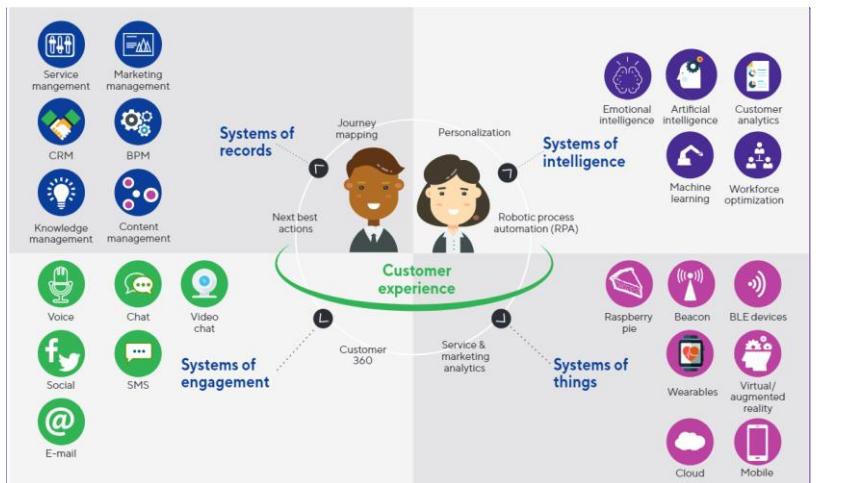
Aslett & Kingstone (2017), expresa que el futuro de la transformación digital es la fusión de los sistemas de registro junto con los datos y los análisis para obtener información procesable, combinados con aplicaciones impulsadas por el compromiso para mejorar la eficiencia de los procesos. Las aplicaciones impulsadas por el compromiso, junto con los datos, proporcionarán una experiencia más dinámica. Sin embargo, las inversiones más recientes en sistemas de inteligencia proporcionan el poder. El aumento de los sistemas de

comunicación con la combinación de los sistemas de compromiso y los sistemas de inteligencia impulsará y permitirá en última instancia la transformación digital.

Para lograr un funcionamiento óptimo en los negocios, es esencial que las organizaciones, tanto del sector privado como gubernamental, adopten un enfoque colaborativo entre todos sus sistemas, incluyendo los Sistemas de Registro (SoR) y los Sistemas de Compromiso (SoE). Además, es fundamental incorporar los Sistemas de Inteligencia (SoI) y los Sistemas de las Cosas (SoT). Al trabajar en conjunto, estos sistemas permiten la recopilación y tratamiento de datos de manera holística, brindando una visión integral y valiosa para la toma de decisiones estratégicas. La Figura 35 ejemplifica cómo estos sistemas interactúan para ofrecer una gestión eficiente de la información y promover la innovación en todas las áreas de la organización.

Figura 35

Interacción de los diferentes sistemas de la era digital con los clientes



Nota. En la imagen se muestra como es la integración y conexión de los sistemas de la era digital, también ilustra como es la recolección y tratamiento de datos de los clientes. Adaptada de The 2020 Customer Experience por (Anand et al., 2019).

Como se observa la cantidad de datos generados por una ciudad representa una tarea compleja debido a la diversidad de datos que son recopilados y almacenados por los

Comentado [JDLM31]: The 2020 Customer Experience
[https://utpl-my.sharepoint.com/personal/leortiz6_utpl_edu_ec/_layouts/15/onedrive.aspx?id=%2Fpersonal%2Fleortiz6_utpl_edu_ec%2FDocuments%2FTESIS%20Luis%20ORTIZ%20%26%20DAVID%20LOPEZ%20Articulos%20y%20Libros%2FEN_CONIAN_T_SoR_SoE_Sol_SoT%2Edpd&parent=%2Fpersonal%2Fleortiz6_utpl_edu_ec%2FDocuments%2FTESIS%20Luis%20ORTI Z%20%26%20DAVID%20LOPEZ%20Articulos%20y%20Libro s&q=1](https://utpl-my.sharepoint.com/personal/leortiz6_utpl_edu_ec/_layouts/15/onedrive.aspx?id=%2Fpersonal%2Fleortiz6_utpl_edu_ec%2FDocuments%2FTESIS%20Luis%20ORTIZ%20%26%20DAVID%20LOPEZ%20Articulos%20y%20Libros%2FEN_CONIAN_T_SoR_SoE_Sol_SoT%2Edpd&parent=%2Fpersonal%2Fleortiz6_utpl_edu_ec%2FDocuments%2FTESIS%20Luis%20ORTIZ%20%26%20DAVID%20LOPEZ%20Articulos%20y%20Libro s&q=1)

diferentes sistemas de la era digital, esta gestión requiere de una estrategia adecuada para aprovechar todo el valor de la información. Para aprovechar todo el valor de esta información, es crucial contar con una estrategia adecuada. Una solución para gestionar los datos de la era digital de manera eficiente es mediante la integración de un lago de datos junto con un gemelo digital.

2.8. Lago de Datos

Un lago de datos (Data Lake en inglés) es un tipo de repositorio de datos que reúne diferentes fuentes de datos, los hace accesibles y convierte los datos en un formato útil para toda una organización. Estas características transforman el lago de datos en una herramienta que facilita la comunicación y la movilidad de datos útiles en una organización.

(McQueen, 2017, p.177-178) La idea del lago de datos es disponer de un único almacén de todos los datos de la empresa, desde los datos brutos (lo que implica [una] copia exacta de los datos del sistema de origen) hasta los datos transformados, que se utilizan para diversas tareas, como la elaboración de informes, la visualización, el análisis y el aprendizaje automático. El lago de datos incluye datos estructurados de bases de datos relacionales (filas y columnas), datos semiestructurados (CSV, registros, XML, JSON), datos no estructurados (correos electrónicos, documentos, PDF) e incluso datos binarios (imágenes, audio, vídeo), creando así un almacén de datos centralizado que da cabida a todas las formas de datos.

Al tratarse de una colección de datos procedentes de diferentes fuentes y formar un entorno de hardware y software se puede crear un catálogo de datos, el cual permite poner a disposición todos los datos a la organización. La disposición general de datos permite la reducción de costos en la manipulación y almacenamiento de datos.

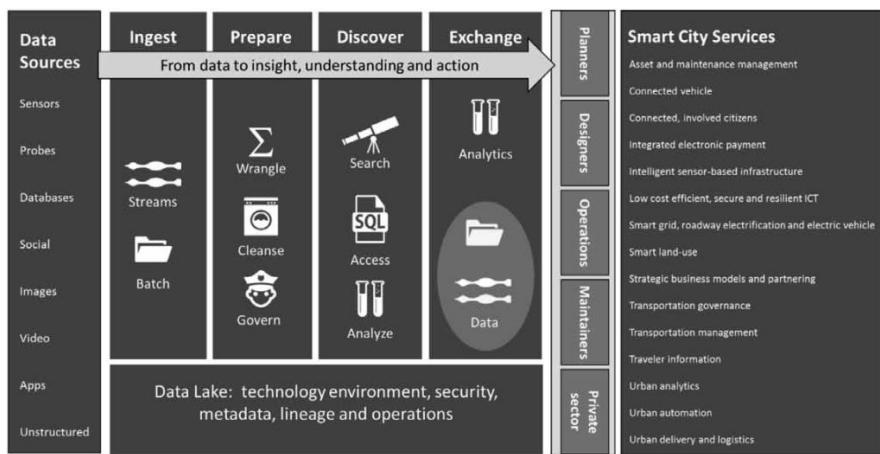
2.8.1. Modelo de un Lago de Datos para una Ciudad Inteligente

En su libro McQueen, (2017) indica una configuración de Lago de datos considerada para realizar la explotación de datos de una ciudad inteligente consta de Los recursos de datos, la ingesta, preparación, descubrimiento, intercambio y la entrega de datos. Esta configuración se muestra en la Figura 36.

Comentado [LO32]: Revisar Cita

Figura 36

Componentes clave de un Lago de datos para una ciudad inteligente



Nota. Modelo de configuración del lago de datos con los principales elementos identificados.

Adaptado de Big Data Analytics for Connected Vehicles and Smart Cities (McQueen, 2017).

- **Fuentes de datos.** Se considera como el primer elemento a las fuentes de datos pues a capacidad de receptar de múltiples fuentes de datos es uno de los aspectos de más relevancia de un Lago de datos. En el contexto de una ciudad inteligente las fuentes de datos incluyen sensores como contadores de tráfico y pasajeros, datos de sondeos y vehículos autónomos. Así mismo los datos pueden proceder de sistema y bases de datos existentes los que proporcionan información ya estructurada (McQueen, 2017). Entre las fuentes de datos más comunes tenemos a: Datos de infraestructura, Datos de viaje, Datos climáticos y captura y gestión de datos en tiempo real.
- **Ingesta de datos.** En las ciudades se encuentra una gran variedad de datos estos pueden ser datos estáticos los cuales se encuentran en archivados en bases de almacenamiento o pueden ser datos provenientes de flujos en tiempo real. Así también el internet de las cosas genera un volumen de datos masivo. Todos estos datos se envían al lago de datos para crear un repositorio en el cual se centraliza la información y permite el acceso e intercambio de datos (McQueen, 2017).

- **Preparación de Datos.** La preparación consiste en la gestión, limpieza y definición de modelos de datos. Este proceso puede ser manual o semi automático. Este elemento es necesario para poder llevar todos los datos a un formato común (McQueen, 2017).
- **Descubrimiento de datos.** En esta parte se analiza y se accede a la información. Se emplean diferentes herramientas como el lenguaje de consulta estructurado y otras funciones estadísticas para la detección de patrones relevantes en los datos, los cuales pueden dar mejor comprensión sobre negocio (McQueen, 2017).
- **Intercambio de datos y análisis.** Un Lago de datos permite el intercambio de datos y el intercambio analítico, convirtiendo en si en una herramienta de comunicación o modelo para ilustrar cómo podría aplicarse la analítica a la función laboral del usuario (McQueen, 2017).
- **Entrega de conocimiento.** Los resultados de los procesos de descubrimiento y análisis se entregan a los profesionales de las ciudades inteligentes, estos usaran la información para formular estrategias de comprensión (McQueen, 2017).
- **Apoyo a los servicios de la ciudad inteligente.** Como elemento final, las estrategias derivadas de los nuevos conocimientos proporcionarán apoyo a los 16 servicios de la ciudad inteligente definidos. Como ejemplo servicio de pago electrónico integrado, el lago de datos podría proporcionar información sobre la estructura óptima de tarifas o billetes para maximizar la experiencia del usuario (McQueen, 2017).

Capítulo tres

Modelo Operativo del Gemelo Digital

Este capítulo aborda el modelo operativo del gemelo digital, enfocándose en sus funciones clave y características intrínsecas. Se explicará cómo el modelo gestiona la integración y el procesamiento de datos, estableciendo las bases para el funcionamiento y la eficiencia del gemelo digital. Se destacará la importancia de este modelo en la consecución de los objetivos específicos del gemelo digital y su impacto en la operatividad general.

3.1. Ciclo del Modelo Operativo

La Figura 37 presenta un ciclo que detalla las etapas del modelo operativo. En su núcleo, se destacan el mundo físico y el gemelo digital, evidenciando su interacción constante. Cada etapa aborda la recolección, integración y procesamiento de datos, que luego influyen en el ajuste del gemelo digital. Este proceso es continuo y se adapta con la entrada de nuevos datos.

Figura 37

Modelo operativo propuesto



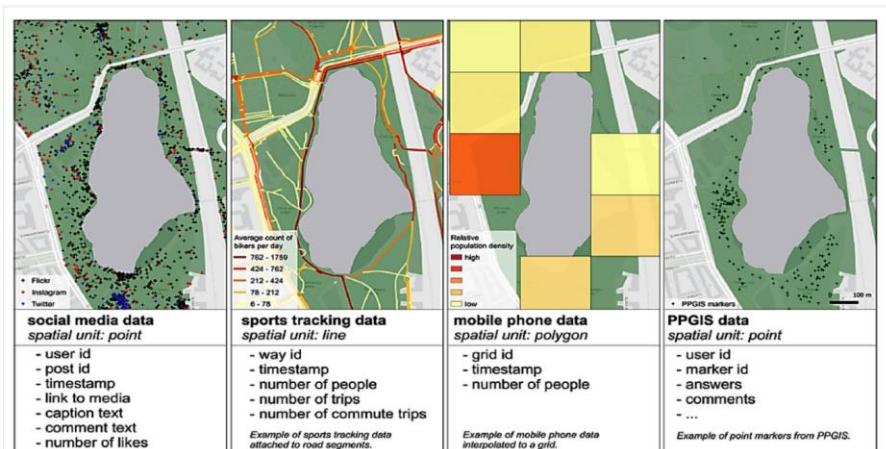
A continuación, se detallan estas fases, explicando cómo se manejan los datos y cómo el modelo operativo dirige el funcionamiento del gemelo digital urbano.

3.1.1. Recopilación de datos

Es un proceso esencial para la creación y mantenimiento de una representación digital precisa y detallada de un sistema físico. Este proceso comienza con la extracción de datos no procesados, ya sea a través de sensores instalados en el entorno físico, dispositivos de captura de datos, encuestas, formularios en línea, entre otros medios (Hu et al., 2022). La Figura 38 ilustra un ejemplo de recolección de datos proporcionados por los usuarios de la ciudad mediante referencias de geolocalización. Estos datos se presentan en variadas formas de diagramas, en función de la fuente y las actividades realizadas por los usuarios.

Figura 38

Datos generados por el usuario para el análisis espacial urbano



Nota. Adaptado de Future City, Digital Twinning and the Urban Realm: A Systematic Literature

Review por (Saeed et al., 2022).

Es importante mencionar que se debe considerar la integridad y confiabilidad de los datos para asegurar la precisión del gemelo digital. Finalmente, los datos se transmiten a un servidor o base de datos basada en la nube, para su almacenamiento y acceso en línea, lo cual permite una mayor flexibilidad y accesibilidad para su posterior uso. Es importante

mencionar que este proceso debe ser continuo, ya que la recolección de datos y su análisis debe ser una tarea constante para poder actualizar y mantener precisión en el gemelo digital.

3.1.2. Análisis y Procesamiento de Datos

Con la gran cantidad de datos heterogéneos recolectados en tiempo real, existe la necesidad de facilitar la conversión y el tratamiento de estos datos sin procesar para obtener información significativa para el modelado y el análisis. Este análisis y preparación incluye tareas como la limpieza y validación de los datos, para asegurar que están libres de errores y están listos para su uso. También incluye tareas como la clasificación y agrupamiento de los datos, para que puedan ser fácilmente comprensibles y utilizables por los profesionales encargados de la toma de decisiones (Hu et al., 2022).

El uso de un Lago de datos como parte del conjunto de herramientas disponibles nos ayudará a facilitar la conversión y el tratamiento de datos sin procesar, para poder obtener información relevante y significativa para el modelado y el análisis, lo que se traduce en una mejor toma de decisiones. Es importante también mencionar que estas herramientas deben ser constantemente actualizadas y monitoreadas para asegurar que se está procesando los datos de manera óptima.

Tras una adecuada preparación de los datos, estos contribuyen a enriquecer el modelo semántico, amplificando su habilidad para reflejar y entender la intrincada realidad de los contextos urbanos y sus movimientos. Este modelo, fortalecido con datos, no se limita a describir; también tiene el poder de predecir tendencias urbanas. Esta proyección permite anticipar desafíos y resaltar oportunidades emergentes. Al integrar una diversidad de datos, el modelo brinda una visión holística de la ciudad, considerando dimensiones sociales, económicas y medioambientales. Este entendimiento profundo es fundamental para abordar los retos urbanísticos.

Con esta base, nos adentraremos en el modelado y simulación, etapas esenciales para la visualización y proyección del desarrollo urbano.

3.1.3. Modelado y Simulación

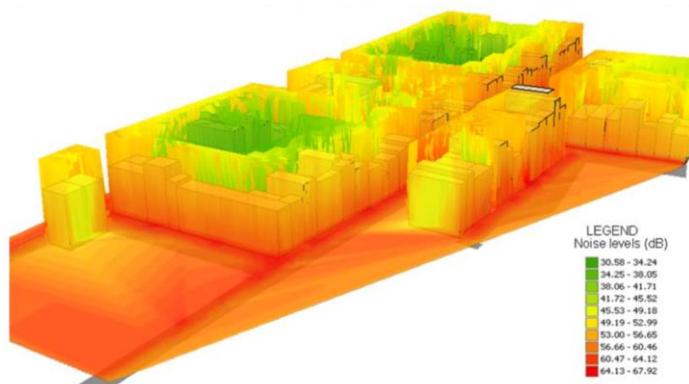
Para lograr crear el modelo de la ciudad, es necesario contar con información precisa y detallada sobre los elementos físicos de la ciudad, como edificios, infraestructura, tráfico, patrones de movimiento de personas, entre otros aspectos (Hu et al., 2022).

Además, se debe prestar especial atención a los puntos clave de movimiento y transformación en los procesos urbanos ya que requieren una especificidad adicional al momento de ser modelados. Por ejemplo, para lograr una representación precisa y detallada del sistema de tráfico, es importante tener en cuenta factores como el número de personas que transitan por una determinada zona, las rutas de transporte, los puntos de congestión vehicular y otros aspectos relacionados con el tráfico. Esto nos permitirá obtener una visión más precisa y detallada del sistema y su interacción con otros aspectos urbanos.

La simulación ofrece funcionalidades básicas, como la visualización de escenarios y la verificación de soluciones, lo que permite a los profesionales tomar decisiones informadas y mejorar continuamente los procesos en la ciudad, como se puede observar en la Figura 39. Por ejemplo, el uso de algoritmos de inteligencia artificial en el gemelo digital permite detectar patrones poco saludables y prevenir tiempos de inactividad costosos, lo que contribuye a la eficiencia y eficacia en la gestión de la ciudad.

Figura 39

Simulación de ruido derivada de un modelo de ciudad en 3D



Nota. Adaptado de *Applications of 3D City Models: State of the Art Review* por (Biljecki et al., 2015).

3.1.4. Visualización de Información

En esta fase se presentan visualmente los resultados del análisis de datos y de los modelos de información y simulación realizados previamente, a través del uso del gemelo digital se presentan de manera visual a través de tableros con visualizaciones, que permiten comparar el rendimiento del modelo digital de la ciudad con el mundo físico. Esto permite destacar las diferencias inaceptables en una o más dimensiones, como la eficiencia energética, la seguridad, la accesibilidad, entre otros aspectos.

Al identificar las áreas donde el rendimiento del modelo digital no se corresponde con el mundo físico análogo, se pueden detectar potenciales cuellos de botella o problemas que necesitan investigación y cambio. Esto permite tomar decisiones informadas y mejorar continuamente el rendimiento del modelo y del mundo físico análogo.

Además de permitir la identificación de problemas, los tableros con visualizaciones también son útiles para presentar resultados y conclusiones a los stakeholders o interesados en el proyecto. Esto ayuda a obtener el apoyo necesario para implementar cambios y mejoras en el modelo y en el mundo físico.

3.1.5. Toma de Decisiones

Las partes interesadas, tales como arquitectos, ingenieros y administradores públicos, pueden tomar decisiones estratégicas y procesables basadas en datos precisos y confiables, obtenidos a través del uso de un gemelo digital de ciudad. Esto permite habilitar capacidades de gestión de interrupciones y facilitar la transición del ciclo de vida de un edificio o infraestructura. Para lograr esto, los sistemas de construcción se basan en funcionalidades de soporte de decisiones, tales como la generación de soluciones semánticas, que se establecen mediante el uso de herramientas y técnicas avanzadas (Hu et al., 2022).

Entre estas técnicas, se destacan las relacionadas con la Inteligencia Artificial para la implementación del soporte de decisiones. La Inteligencia Artificial cubre un área amplia, pero algunos de los dominios clave son la visión por computadora, el aprendizaje automático y el procesamiento del lenguaje natural. La visión por computadora permite la derivación de información significativa a partir de entradas visuales, como imágenes aéreas o cámaras de

seguridad, para facilitar la generación de soluciones y mejorar la eficiencia de los procesos de construcción. Por otro lado, el aprendizaje automático permite el análisis de grandes cantidades de datos y la detección de patrones para mejorar el rendimiento del edificio. Finalmente, el procesamiento del lenguaje natural permite el análisis de comentarios, sugerencias y críticas de los habitantes de la ciudad, lo que ayuda a mejorar la calidad de vida de las personas (Hu et al., 2022).

3.1.6. Optimización de la Producción

Los parámetros de la ciudad física, los procesos de la ciudad y los programas de mantenimiento son ajustados en consecuencia con base en los datos y análisis obtenidos a través del uso del gemelo digital. Esto permite mejorar continuamente el rendimiento y la eficiencia de la ciudad en diferentes aspectos, como la seguridad, la eficiencia energética, la accesibilidad, entre otros.

Por ejemplo, si se detecta que hay un cuello de botella en una determinada área de la ciudad debido al alto tráfico vehicular, se pueden tomar medidas para mejorar la circulación de vehículos, como la implementación de medidas de congestión vehicular o la creación de carriles exclusivos para bicicletas. De igual manera, si se detecta que un edificio tiene un alto consumo energético, se pueden tomar medidas para mejorar la eficiencia energética, como la instalación de paneles solares o la implementación de sistemas de iluminación eficientes.

Además, los programas de mantenimiento se ajustan en consecuencia con base en los datos y análisis obtenidos a través del uso del gemelo digital. Esto permite detectar y prevenir problemas antes de que ocurran, lo que ayuda a reducir costos y aumentar la vida útil de los edificios y la infraestructura de la ciudad.

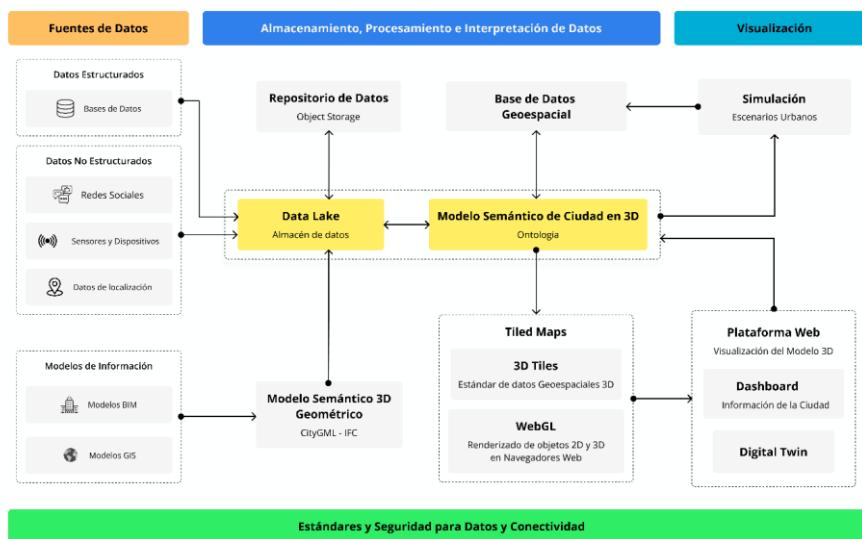
Una vez que hemos comprendido a fondo el modelo operativo, lo concebimos como una arquitectura, permitiéndonos identificar claramente sus componentes esenciales. Esta visualización estructurada facilita la selección de las herramientas adecuadas requeridas para su construcción y optimización.

3.2. Arquitectura

La Figura 40 ilustra la arquitectura propuesta para construir un gemelo digital de ciudad en base al modelo operativo propuesto.

Figura 40

Arquitectura de Gemelo Digital de Ciudad



Esta arquitectura establece los componentes esenciales de un gemelo digital alineados con las etapas del modelo operativo. De esta manera, se delinean cuatro capas fundamentales que conforman la estructura del gemelo digital.

- **Fuentes de Datos:** Esta capa se encarga de recopilar datos de múltiples fuentes, incluyendo sensores y otros sistemas digitales, con el objetivo principal de monitorear y controlar activos en tiempo real. Se integran tanto modelos BIM (Building Information Modeling) como GIS (Sistemas de Información Geográfica) para ofrecer una representación detallada y geolocalizada de los activos.
- **Almacenamiento, Procesamiento e Interpretación de Datos:** Esta capa es fundamental y comprende módulos dedicados a la gestión de datos. Su función es

tratar, almacenar y recuperar datos. Además, se encarga de procesar datos crudos y transformarlos en información valiosa y conocimiento aplicable.

- **Visualización:** A través de interfaces avanzadas y pantallas de realidad mixta, esta capa permite a los usuarios interactuar directamente con los activos físicos. Además, facilita la implementación de soluciones generadas por el sistema, ofreciendo una experiencia interactiva y enriquecedora.
- **Estándares y Seguridad:** Esta capa que engloba a las demás, se enfoca en establecer y aplicar normas que permitan la integración efectiva de diferentes sistemas y herramientas, asegurando que puedan comunicarse y operar conjuntamente sin inconvenientes. Además, prioriza la protección de la información, garantizando que los datos se transmitan, almacenen y procesen de manera segura, evitando vulnerabilidades y amenazas que puedan comprometer la integridad y confidencialidad de la información.

Una vez establecida la arquitectura para la construcción del gemelo digital de ciudad, es importante mencionar las herramientas y tecnologías que se utilizarán para llevar a cabo esta tarea. Estas herramientas incluyen software de gestión de datos, algoritmos de procesamiento de datos, plataformas de visualización y realidad aumentada/virtual, entre otros. Sin embargo, es importante destacar que la investigación y el desarrollo en esta área son constantes, y es probable que surjan nuevas herramientas y tecnologías a medida que el campo evoluciona. Por lo tanto, es esencial mantenerse al día con las últimas tendencias y avances en tecnología para asegurar que se estén utilizando las mejores herramientas disponibles para la construcción del gemelo digital.

Capítulo cuatro

Herramientas de Desarrollo y Despliegue

Comentado [LEOR33]: Capitalizar

Una vez establecido el modelo operativo y la estructura del gemelo digital, se llevaron a cabo diversas búsquedas para determinar las herramientas necesarias para la construcción de un gemelo digital. En este capítulo, se presenta una lista cuidadosamente seleccionada de software. Esta selección prioriza herramientas de código abierto, aquellas que ofrecen acceso gratuito para estudiantes, o las que no requieren licencias de uso, garantizando que cumplan con los objetivos específicos del proyecto.

4.1. Herramientas de Modelado 3D

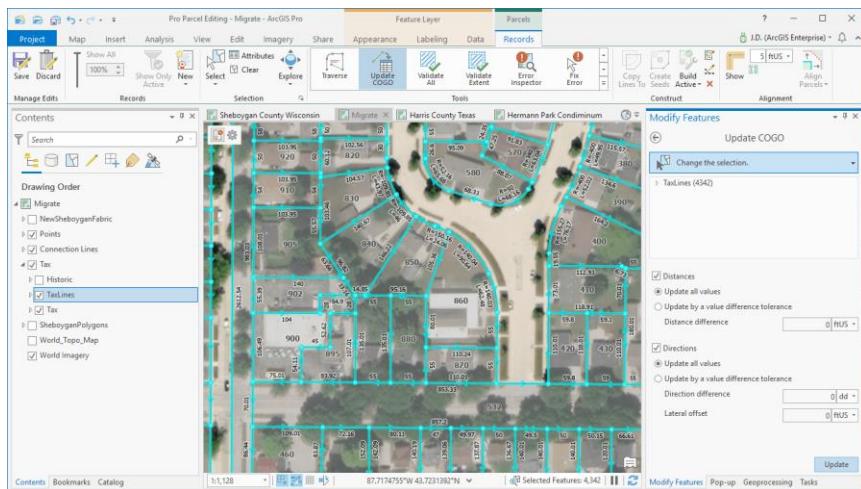
La primera necesidad es identificar un software que permita la construcción de objetos y entidades que serán replicadas en el modelo. La importancia de la parte visual, especialmente en modelos de producto y proceso, es evidente. Por ende, se requiere seleccionar un software de modelado, texturizado y animación tridimensional que permita una precisa replicación de las características de entidades del mundo real en modelos digitales.

4.1.1. ArcGIS Pro

Dentro del completo conjunto de herramientas de Esri, encontramos ArcGIS Pro una aplicación SIG de escritorio que permite crear y trabajar con datos espaciales en entornos 2D, 3D y 4D. Con ArcGIS Pro, puedes explorar, visualizar, analizar, editar y compartir mapas y datos. ArcGIS Pro se puede conectar con ArcGIS Online o un portal de ArcGIS Enterprise para acceder a datos y servicios web. Los proyectos de ArcGIS Pro pueden contener varios elementos, como mapas, escenas, tablas, gráficos y diseños (Esri, 2021). En la Figura 41 se puede ver una muestra de la interfaz de ArcGIS Pro.

Figura 41

Mapa representado en la interfaz de ArcGIS Pro



Nota. Tomado de la publicación ¿Qué hay de nuevo en ArcGIS Pro-2.5? de la página Telemática (Telemática. 2020).

El uso de ArcGIS para un gemelo digital permite generar un modelo tridimensional preciso del entorno existente, lo que permite a los usuarios visualizar y analizar proyectos. Esto ayuda a los usuarios a entender mejor el impacto de un proyecto en el entorno, a identificar posibles problemas y a tomar decisiones informadas.

4.1.2. Revit

El software Autodesk Revit se ha desarrollado específicamente para BIM (Building Information Modeling). Esta solución permite a los profesionales del diseño y la construcción transformar las ideas desde el concepto hasta su culminación, aportando un enfoque coordinado y homogéneo basado en modelos. En una única aplicación, Revit incluye funcionalidades para diseño arquitectónico, construcción estructural.

Revit nos permite modelar formas, estructuras y sistemas en 3D con exactitud paramétrica, precisión y facilidad. También Revit agiliza la documentación con revisiones instantáneas de planos, alzados, tablas de planificación y secciones a medida que cambian

los proyectos. El software también proporciona a equipos multidisciplinares las herramientas especializadas y el entorno de proyecto unificado que necesitan (Autodesk, 2023). En la Figura 42 se puede ver una muestra de la interfaz de Revit.

Comentado [JDLM34]: <https://www.autodesk.es/products/revit/overview?term=1-YEAR&tab=subscription&plc=RVT>

Figura 42

Modelo BIM de casa creada en Revit



Nota. Tomado de La página oficial de (Artaker CAD Systems, 2021)

Revit es una herramienta muy poderosa para la creación de gemelos digitales de edificios debido a su capacidad para crear modelos detallados y precisos, su capacidad de colaboración, y su capacidad de presentación. Además, que es una herramienta que permite el uso de estándares de modelado como IFC. Todas estas características son de gran utilidad para la representación de modelos de una ciudad en un gemelo digital.

4.2. Herramientas de Manejo de Datos

Las herramientas de manejo de datos son un conjunto de programas y tecnologías diseñadas para ayudar a los usuarios a almacenar, organizar, analizar y visualizar grandes conjuntos de datos. Con el crecimiento constante en la cantidad de datos generados y recolectados, estas herramientas son cada vez más importantes para ayudar a las organizaciones a obtener insights valiosos y tomar decisiones informadas.

Entre las herramientas de manejo de datos más comunes se encuentran las hojas de cálculo, bases de datos, plataformas de Inteligencia Empresarial, data warehousing, Apache Hadoop y lenguajes de programación como Python y R. Estas herramientas pueden utilizarse de manera individual o combinada para alcanzar los objetivos específicos de una organización.

4.2.1. Azure Data Lake Gen2

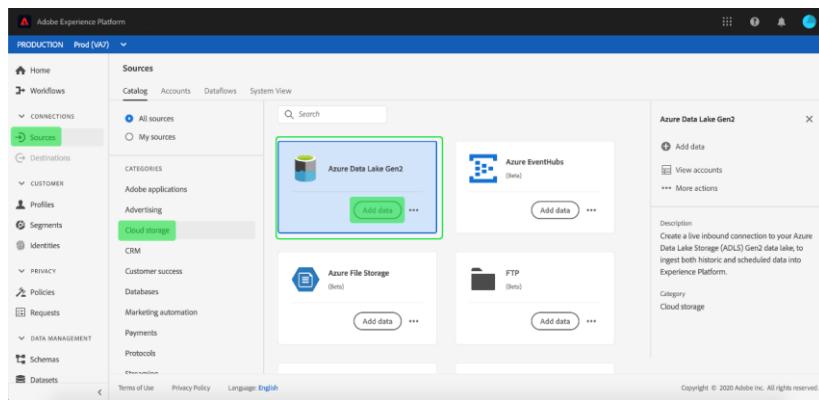
Azure Data Lake Storage Gen2 es una solución de almacenamiento en la nube diseñada para el análisis de macrodatos. Esta plataforma ofrece una capacidad excepcional para almacenar y procesar grandes volúmenes de datos en cualquier formato, garantizando al mismo tiempo una alta disponibilidad, seguridad y rendimiento. Una de sus características destacadas es su integración con Azure Blob Storage, lo que permite disfrutar de opciones de almacenamiento por niveles de coste reducido, con diferentes niveles de acceso, como frecuente, ocasional o archivado (Microsoft Learn, 2020).

Además de su versatilidad en el manejo de macrodatos, Azure Data Lake Storage Gen2 se destaca por su compatibilidad con Hadoop, lo que facilita su integración con diversos marcos y aplicaciones de análisis de datos, como Spark, Databricks, Synapse Analytics y HDInsight. Su estructura jerárquica de directorios permite una organización eficiente de los datos en carpetas y archivos, con la capacidad de realizar operaciones atómicas, como renombrar o eliminar, de manera fiable (Microsoft Learn, 2020).

Otro aspecto destacado es su modelo de seguridad, que ofrece un mayor nivel de precisión al asignar permisos a nivel de archivo o directorio mediante listas de control de acceso (ACL) basadas en roles. Y, por último, la escalabilidad masiva de Azure Data Lake Storage Gen2 permite almacenar y procesar petabytes de datos con un rendimiento excepcional, ofreciendo una solución robusta y eficiente para el análisis de macrodatos a gran escala (Microsoft Learn, 2020).

Figura 43

Interfaz de Usuario de la plataforma Azure Data Lake



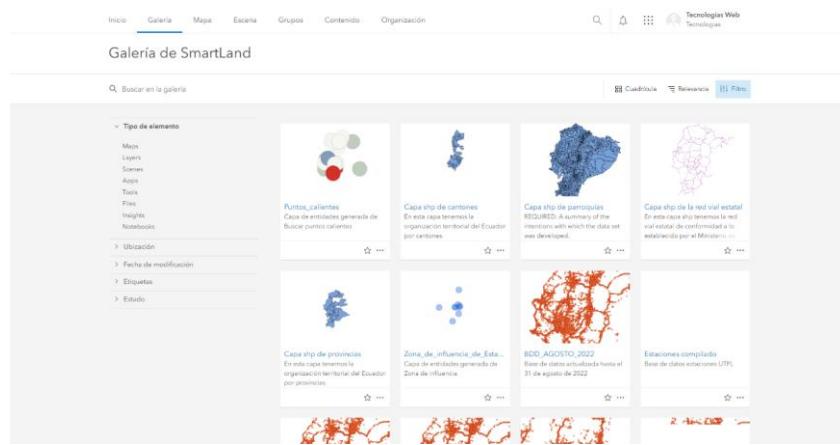
Nota. Tomado de la página oficial Conectar a Azure Data Lake Storage Gen2 y Blob Storage de la página de Adobe (Adobe, 2021).

4.2.2. ArcGIS Online

ArcGIS Online es un software basado en la nube que permite crear, compartir y almacenar elementos 3d como mapas web interactivos. El software se ejecuta en cualquier dispositivo con conexión a Internet. Su infraestructura incluye la colaboración con distintas plataformas lo que permite la gestión eficiente y escalabilidad de los proyectos. ArcGIS se integra en flujos de trabajo y sistemas empresariales centrales (Esri, 2022).

Figura 44

Modelos GIS cargados en Arcgis Online de Esri



Nota. Tomado de la página oficial de (Esri, 2022).

4.3. Herramientas de Modelado Semántico

Las herramientas de modelado semántico son un conjunto de tecnologías y metodologías que se utilizan para representar el conocimiento en un lenguaje formal y estructurado, con el objetivo de hacerlo más fácil de procesar y utilizar por las computadoras. El modelado semántico se basa en el uso de ontologías, que son esquemas de representación del conocimiento que describen las entidades, propiedades y relaciones en un dominio específico.

4.3.1. Revit IFC

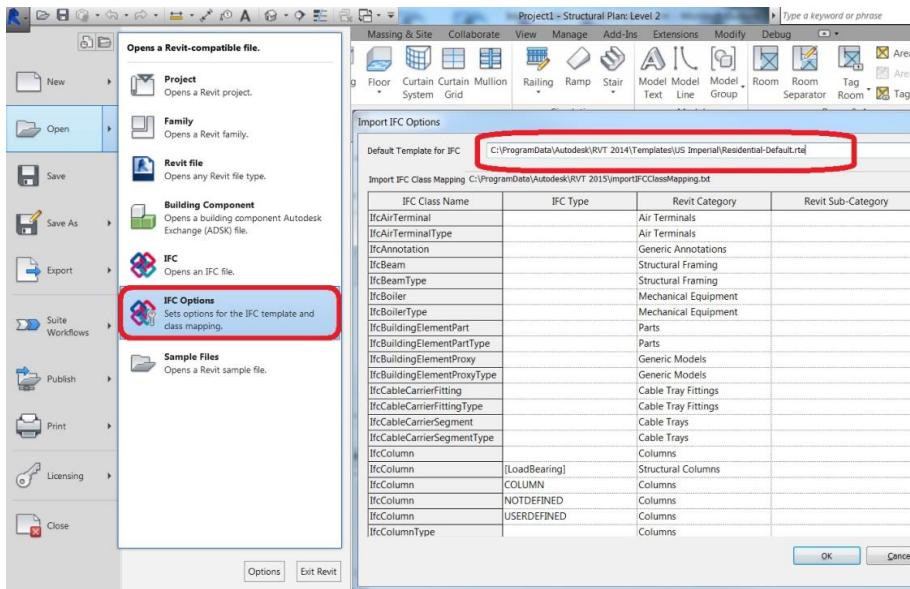
Revit permite importaciones y exportaciones de IFC con certificación completa basadas en las normas de intercambio de datos IFC de buildingSMART. Para importar (para abrir o vincular un archivo IFC), Revit admite archivos IFC basados en las normas de intercambio de datos de buildingSMART International (bSI). Así también Para importar (solo vínculo), Revit también admite archivos IFC basados en la norma bSI IFC4.

Al exportar un modelo de información de edificación de Revit al formato IFC, la información se pone directamente a disposición de otros especialistas, tales como ingenieros

de estructuras y técnicos de instalaciones del edificio (Autodesk, 2021). En la Figura 45 se muestra algunas de las opciones IFC.

Figura 45

Interfaz de usuario de Revit con las opciones del estándar IFC



Revit es una herramienta valiosa en la construcción de gemelos digitales debido a su compatibilidad con el estándar IFC. Esto garantiza una estructura uniforme y organizada en los modelos digitales de diseño y construcción, además de facilitar la integración de estos modelos en otras plataformas.

4.3.2. FME Desktop

"Feature Manipulation Engine" o FME, es una plataforma de integración de datos con soporte para datos espaciales a nivel mundial. FME Desktop es un conjunto de herramientas que convierte, procesa e integra datos. Admite una amplia gama de formatos de datos como XML, GIS y CAD. Puede extraer datos de una fuente, transformarlos para satisfacer las necesidades del usuario y luego cargar los datos en la ubicación deseada (GeOilEnergy, s/f).

Comentado [JDLM35]: <https://knowledge.autodesk.com/support/revit/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2022/ESP/Revit-DocumentPresent/files/GUID-6708CFD6-0AD7-461F-ADE8-6527423EC895.htm.html>

El uso de la herramienta nos simplifica la adherencia al estándar CityGML, permitiéndonos mantener una consistencia en la estructuración de los modelos en el gemelo digital.

4.3.3. GeoJSON

Es un formato de datos geoespaciales que se utiliza para representar información geográfica en formato de texto. Es ampliamente utilizado en aplicaciones web y sistemas de información geográfica (SIG) debido a su simplicidad y facilidad de uso. GeoJSON utiliza la sintaxis de notación de objetos JavaScript (JSON) para describir características geográficas como puntos, líneas y polígonos, junto con sus propiedades asociadas.

Con GeoJSON, es posible incluir atributos semánticos relevantes para cada elemento 3D de la ciudad, como información sobre su función, características, estado, entre otros. Estos datos semánticos complementan la representación espacial de los elementos y enriquecen el modelo digital de la ciudad. Al integrar los aspectos semánticos en el formato GeoJSON, se logra una visión más completa y contextualizada de la ciudad, lo que es fundamental para la toma de decisiones informadas y la gestión eficiente del entorno urbano en el contexto de una ciudad inteligente.

4.3.4. Formato JSON-LD

JSON-LD (JavaScript Object Notation for Linked Data) es un formato de datos que combina la simplicidad de JSON con la capacidad de vincular información usando URIs (Uniform Resource Identifiers). Permite representar datos de una manera estructurada y legible por máquinas, al tiempo que facilita la integración y el enriquecimiento semántico mediante el uso de URIs para hacer referencia a clases y propiedades definidas en ontologías externas.

En formato JSON-LD se utiliza para vincular los datos representados en formato JSON con las clases y propiedades definidas en diversas ontologías. Esto permite establecer conexiones semánticas entre los elementos de la ciudad y enriquecerlos con información contextual relevante de otras fuentes.

Al utilizar URIs para las clases y propiedades, JSON-LD permite crear un contexto compartido entre diferentes sistemas y aplicaciones que trabajan con los datos del gemelo digital. Esta interoperabilidad facilita la integración de datos provenientes de diferentes fuentes y garantiza que la información sea interpretada de manera consistente y precisa.

4.4. Herramientas de Simulación

Las herramientas de simulación son programas informáticos que permiten simular y analizar el comportamiento y las interacciones de un sistema o proceso. Estas herramientas son ampliamente utilizadas en una variedad de campos, como la ingeniería, la física, la economía, la medicina, entre otros, ya que permiten predecir el comportamiento de los sistemas en situaciones diferentes a las reales, lo que ayuda a mejorar la toma de decisiones y a reducir los riesgos.

4.4.1. Traffic Simulation

Infraworks es capaz de ejecutar simulaciones computadas en la nube que son utilizadas por Ingenieros Civiles y de Transporte para validar y confirmar propuestas mientras diseñan carreteras, autopistas, intersecciones, estacionamientos, etc. en muy poco tiempo. Es bastante útil en redes potencialmente congestionables, donde las relaciones de flujo libre, velocidad y densidad ya no aplicarían (Javier García, 2020). En la Figura 46 se muestra una representación 3D de carreteras en la Interfaz de Infraworks.

Figura 46

Escena de una simulación de tráfico en un puente elevado



Nota. Tomado de la página oficial de Autodesk (Javier García, 2020)

Comentado [JM36]: <https://www.autodesk.com/autodesk-university/es/class/Analisis-avanzado-de-simulacion-de-trafico-en-Infraworks-2020>

El uso de herramientas de simulación es crucial en la construcción de un gemelo digital, ya que, combinado con la ingesta de datos, proporcionan información valiosa para tomar decisiones basadas en escenarios posibles.

4.5. Herramientas de Visualización

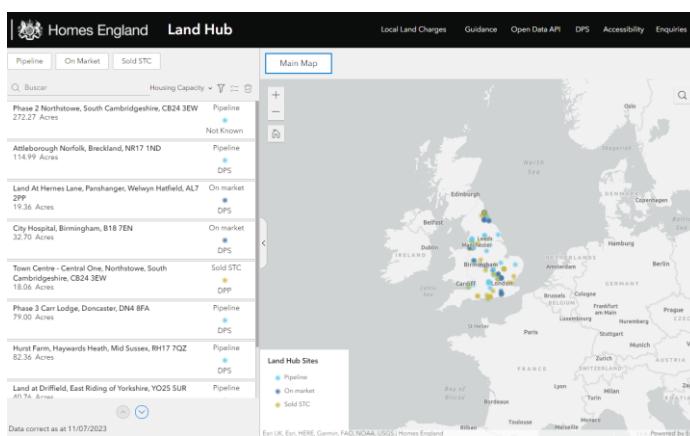
Estas herramientas permiten visualizar la información en diferentes formatos, como mapas interactivos, gráficos, imágenes y videos, lo que facilita la comprensión y el análisis de la información a través de una interfaz web. A continuación, se presentan algunas de las herramientas utilizadas para la construcción y visualización de la información de gemelos digitales de ciudades:

4.5.1. ArcGIS Experience Builder

ArcGIS Experience Builder es una plataforma de desarrollo que le permite crear aplicaciones web personalizadas y atractivas con datos espaciales. Puede utilizar una interfaz de usuario intuitiva para arrastrar y soltar widgets, mapas, escenas y otros elementos en un lienzo flexible. También puede ampliar la funcionalidad de la plataforma con el uso de widgets y plantillas personalizados utilizando el SDK de ArcGIS Experience Builder (Esri, s/f)

Figura 47

Interfaz de ArcGIS Web AppBuilder



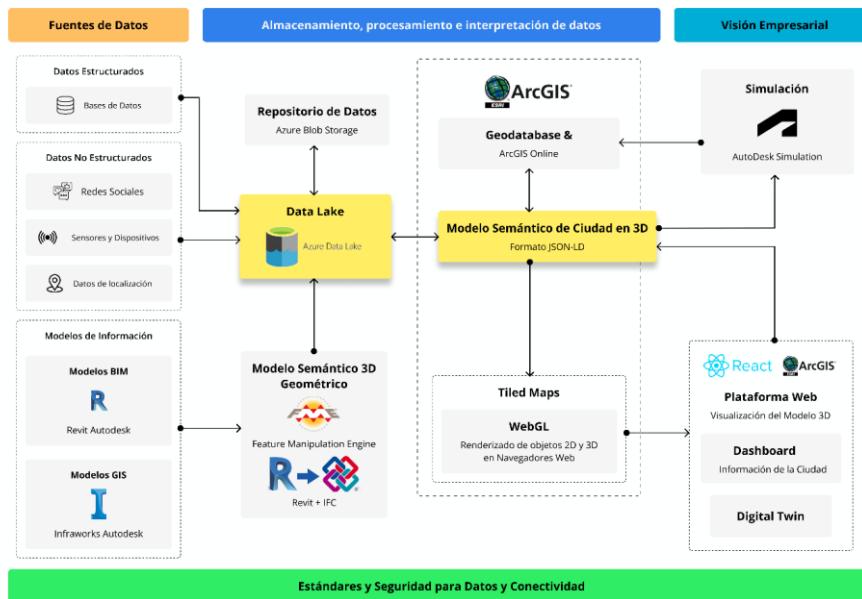
Nota. Tomado de la página de (Homes England).

4.6. Disposición de Herramientas en la Arquitectura del Sistema

Una vez elegidas las herramientas para el Gemelo digital, procederemos a ubicarlas siguiendo el flujo de datos para lograr una disposición eficiente Figura 48.

Figura 48

Disposición de las herramientas en la Arquitectura del gemelo digital



La arquitectura del gemelo digital se construye en varias etapas, utilizando herramientas específicas para cada función:

- **Generación de Modelos BIM y GIS:** Para esta tarea, empleamos Revit e Infraworks respectivamente.
- **Unificación y Estandarización:** Una vez creados, los modelos se unifican semánticamente. Utilizamos Revit IFC para estandarizar los modelos BIM y el CityGML Importer for Autodesk para alinear los modelos GIS con el estándar CityGML.
- **Gestión de Datos:** Azure Data Lake es la herramienta elegida para recopilar y estructurar los vastos datos generados por la ciudad en el formato deseado.

Adicionalmente, ArcGIS Online se utiliza para alojar los modelos previamente generados, permitiendo su integración con un modelo semántico preestablecido.

- **Visualización y Despliegue:** Con los datos y modelos integrados, recurrimos a ArcGIS Experience Builder para visualizar y presentar el gemelo digital en una plataforma web 3D.

Cada herramienta y etapa es esencial para garantizar que el gemelo digital sea una representación precisa y funcional de la realidad urbana

Capítulo cinco

Desarrollo

En este capítulo se presenta el proceso de creación e implementación de un gemelo digital del catastro de la ciudad de Loja. Este capítulo sigue el modelo operativo compuesto por tres etapas fundamentales para la construcción del gemelo digital. La primera etapa aborda la obtención y recopilación de la fuente de datos, incluyendo información geoespacial relevante y datos catastrales de la ciudad. La segunda etapa se centra en el almacenamiento, procesamiento e interpretación de los datos recopilados, empleando técnicas de análisis espacial y herramientas de gestión de bases de datos geoespaciales. Finalmente, en la tercera etapa, se explora la visualización de la información en el gemelo digital, permitiendo una representación visual detallada y realista del catastro urbano. Este capítulo proporciona una visión del proceso de desarrollo del gemelo digital, destacando su relevancia para la mejora de la planificación y gestión urbana en la ciudad de Loja.

5.1. Caso de Estudio

En el presente caso de estudio, se trabajó en colaboración con el Municipio de Loja (ubicado en la ciudad de Loja, Ecuador), con el objetivo de mejorar significativamente la administración y gestión del catastro. Previo al proyecto, los datos catastrales se encontraban dispersos y desactualizados en diferentes departamentos, mientras que el shapefile utilizado no reflejaba adecuadamente la realidad del programa de Gestión de Información Municipal (GIM).

Para abordar esta problemática, se emplearon las avanzadas tecnologías de ArcGIS Pro y ArcGIS Experience Builder, permitiendo centralizar y visualizar los datos catastrales en la nube. Adicionalmente, se desarrolló un script en Python que posibilitó la actualización del shapefile con información del programa GIM y la generación de un archivo geojson completo, incluyendo la altura de los edificios, manteniendo así la precisión y actualidad de la información.

El objetivo principal de este caso de estudio consiste en mejorar la eficiencia en la administración y gestión catastral, ofreciendo una plataforma tecnológica moderna que

permita la recopilación, procesamiento y entrega de datos e información territorial de manera más ágil y efectiva. Al emplear la tecnología de ArcGIS, se busca alcanzar una mayor transparencia en el manejo de los datos, mejorando su calidad y proporcionando una experiencia interactiva y accesible tanto para los ciudadanos como para los profesionales involucrados en la administración de tierras.

5.2. Fuentes de datos

La primera etapa del desarrollo siguiendo el modelo operativo comienza recopilando datos de diversos sistemas digitales que forman parte del ecosistema urbano. También se utiliza información de modelos BIM y GIS disponibles para crear una representación tridimensional (3D) de la ciudad y geolocalizar los datos en su contexto urbano.

En el contexto del modelo de una ciudad, los sistemas de registro incluyen bases de datos de sistemas de catastro. Estos sistemas proporcionan datos estructurados como la delimitación del terreno, número de lotización, datos de propietario, entre otros.

Por otro lado, los sistemas de compromiso incluyen datos generados por los usuarios a través de aplicaciones móviles. Por ejemplo, cuando un usuario toma una foto de un edificio y comparte información sobre su infraestructura, como su ubicación y su nombre, en una aplicación como Google Maps, esa información se puede utilizar para representar el edificio gráficamente en un mapa digital.

Una vez recolectados los datos, es necesario realizar un proceso de integración y análisis para poder generar información útil y valiosa para la toma de decisiones en la ciudad. Para esto, es importante contar con herramientas y tecnologías de almacenamiento, procesamiento e interpretación de datos, las cuales se abordarán en los siguientes apartados.

5.2.1. Generación de Modelos 3D

En esta sección, se describen las tecnologías y herramientas seleccionadas para la creación de modelos 3D en el contexto del gemelo digital de la ciudad de Loja. Para obtener datos precisos y detallados sobre la topografía y la estructura física de la ciudad, se recurrió a diversas fuentes de datos existentes.

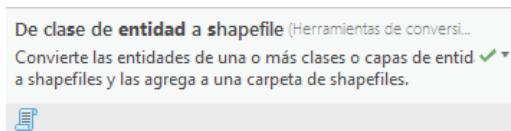
Para la creación de los modelos 3D se utilizó ArcGIS Pro junto con sus herramientas de geoprocесamiento. Estas herramientas permitieron aprovechar la potencia del sistema de información geográfica de ArcGIS para generar modelos 3D a partir de los mapas y datos geoespaciales disponibles. Mediante la integración de datos de elevación, datos de edificios y otros datos relacionados, se logró crear modelos tridimensionales realistas y precisos de la ciudad y sus componentes urbanos.

Se trabajó con el catastro proporcionado por el municipio de Loja como punto de partida para la creación de un modelo 3D utilizando ArcGIS. A partir de esta información, se siguieron una serie de pasos para lograr dicho objetivo:

1. Importación del shapefile: Primero se importó el shapefile que contenía los datos de la lotización de Loja al entorno 3D de ArcGIS. Esto se hizo usando la herramienta de conversión de shape a entidad, con esto se obtuvo la primera capa de entidades.

Figura 49

Importación del shapefile y conversión a entidad en ArcGIS



2. Aplicación de la herramienta de extrusión: Para generar las geometrías 3D de las construcciones existentes en los lotes, se utilizó la herramienta de extrusión de ArcGIS. Usamos un valor de 6 m para dar volumen y forma tridimensional a los lotes representados en los modelos. Se uso dicho valor por que hasta el momento no se contaba con un campo o atributo para representar la altura de las construcciones o área de construcción dentro del lote.

5.2.2. Integración de Datos del Catastro de Loja y Datos del GIM

Se nos proporcionó un archivo del sistema de Gestión de Ingresos Municipales, este archivo contiene información complementaria como el nombre del propietario, la clave

catastral, el número de cédula y el número de pisos de cada uno de los registros. No obstante, esta valiosa información se presentaba en formato Microsoft Excel, lo cual implicaba la necesidad de combinarla de manera efectiva con el shapefile del catastro para obtener una visión completa y enriquecida de los datos.

Con el objetivo de llevar a cabo la integración de los datos, se empleó un script de python y se hizo uso de la biblioteca pandas. Esta librería proporciona herramientas eficientes y flexibles para la manipulación y análisis de datos, lo cual resulta fundamental en el proceso de integración de información.

1. El primer paso en este proceso consistió en cargar el archivo Excel en un DataFrame de pandas, aprovechando las funciones especializadas de la biblioteca para importar y estructurar los datos de manera adecuada. Por otro lado, se procedió a cargar el shapefile del catastro en un GeoDataFrame utilizando la librería geopandas, la cual permite trabajar con datos geoespaciales y fusionarlos con facilidad. En la siguiente Figura 50 se muestra cómo se realizó la carga y lectura de archivos usando las librerías de Python como pandas y geopandas.

Figura 50

Carga de datos Excel y Shapefile en DataFrames de Pandas y GeoPandas

```
!pip install geopandas
import pandas as pd
import json
!pip install geopandas
# Carga el archivo Excel
df_excel = pd.read_excel('/content/Catastro.xlsx')
# Convierte la columna ClaveShape del DataFrame de Excel a cadena (string)
df_excel['ClaveShape'] = df_excel['ClaveShape'].astype(str)
# Carga el archivo GeoJSON
with open('/content/Lotes_Loja.geojson') as geojson:
    geojson_data = json.load(geojson)
```

2. Una vez que ambos conjuntos de datos estuvieron listos, se implementó un script de Python utilizando las funciones de pandas para realizar la unión de los datos. En este caso particular, la clave catastral sirvió como elemento de vinculación entre los registros del archivo Excel y el shapefile del catastro. Esta operación de unión permitió combinar los atributos de interés, como el nombre

del propietario, el número de cédula, el número de pisos, con la información geoespacial del catastro. En la Figura 51 se muestra el proceso con el cual se realizó la unión de datos.

Figura 51

Script de Python para unir datos utilizando pandas y la clave catastral como elemento de vinculación

```

for feature in geojson_data['features']:
    cadastral_code = feature['properties']['cadastralCode']
    ...
    floors_type = feature['properties']['floors']
    print("Floors Type:", type(floors_type))
    dni_type = feature['properties'][['dni']]
    print("DNI Type:", type(dni_type))
    Area_type = feature['properties'][['areaConstruction']]
    print("Area Type:", type(Area_type))
    ...
    print("Comparando cadastralCode:", cadastral_code)

    matching_row = df_excel[df_excel['ClaveShape'] == str(cadastral_code)]

    clave_shape = matching_row['ClaveShape']
    print("Comparando ClaveShape:", clave_shape)

if not matching_row.empty:
    # Actualiza los campos del GeoJSON con los valores del Excel
    feature['properties'][['dni']] = matching_row['Cedula'].iloc[0]
    feature['properties'][['owner']] = matching_row[['Propietario']].iloc[0]
    feature['properties'][['floors']] = int(matching_row['Pisos'].iloc[0])
    feature['properties'][['areaConstruction']] = float(matching_row['Area'].iloc[0])

    print("Valores actualizados:")
    print("dni:", feature['properties'][['dni']])
    print("owner:", feature['properties'][['owner']])
    print("floors:", feature['properties'][['floors']])
    print("areaConstruction:", feature['properties'][['areaConstruction']])
    print("Coincidencia encontrada")
else:
    print("No se encontró coincidencia")

```

3. Despues de la ejecución del script, se obtiene como resultado un nuevo archivo Excel que contiene la información combinada. Este archivo Excel actualizado se utilizó posteriormente para obtener una representación 3D actualizada del catastro. Para lograr esto, se hizo uso de la herramienta de "Excel a tabla", la cual permitió convertir el archivo Excel en una capa que incorpora la información actualizada.
4. Se creo un campo adicional en la tabla de atributos. Este nuevo campo fue denominado "altura". Para calcular su valor, se multiplicó el número de pisos de cada lote por 2.70, considerando este último como una estimación del

promedio de altura por piso en metros. De esta manera, se obtuvo un atributo que serviría como base para la generación de las geometrías 3D de las construcciones presentes en cada lote.

Figura 52

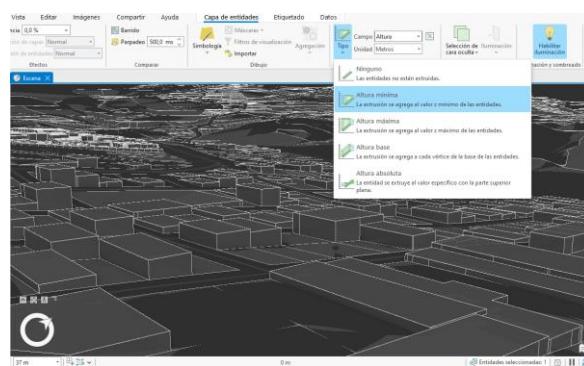
Creación del campo 'altura' y cálculo de valores en la tabla de atributos en ArcGIS



5. Para generar las geometrías 3D de las construcciones existentes en cada lote, se utilizó la herramienta de extrusión de ArcGIS. Se hizo uso del campo "altura" previamente calculado como parámetro para esta herramienta. Al aplicarla, se logró dar volumen y forma tridimensional a las construcciones representadas en el modelo.

Figura 53

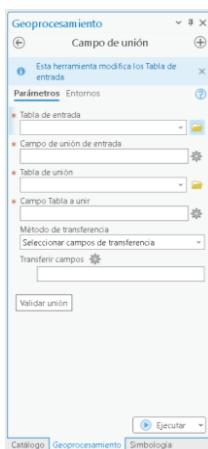
Uso de la herramienta de extrusión en ArcGIS para generar geometrías 3D de las construcciones existentes en cada lote



Otra alternativa eficiente es recurrir a ArcGIS Pro y su herramienta de geoprocесamiento "Campo de unión", como se muestra en la Figura 54. Diseñada específicamente para fusionar información de distintas fuentes mediante campos comunes, esto nos permite integrar los conjuntos de datos, utilizando el campo común denominado "clave catastral". Esta acción asegura una unificación coherente de la información catastral y del GIM en un único conjunto de datos, optimizando el análisis y garantizando una representación precisa y detallada.

Figura 54

Ventana de geoprocесamiento



Tras haber abordado la integración de datos, es esencial profundizar en cómo se almacenan, procesan e interpretan estos datos.

5.3. Almacenamiento, Procesamiento e Interpretación de los datos

Durante esta etapa del modelo operativo, se lleva a cabo la transformación de los datos recolectados en la etapa anterior para convertirlos en información útil y prepararlos para su posterior uso y visualización. Para facilitar este proceso, se emplea un Data Lake, específicamente el servicio de Azure Data Lake. Este servicio nos brinda la capacidad de eliminar datos irrelevantes o duplicados, así como integrar datos provenientes de diversas fuentes. Una vez integrados, los datos se someten a procesos de limpieza, organización y etiquetado adecuados, garantizando su calidad y preparación para ser utilizados en el modelo

semántico. De esta manera, se asegura que los datos sean consistentes, confiables y estén listos para ser aprovechados en análisis posteriores.

En esta etapa también se trabaja con los modelos BIM y GIS obtenidos, los cuales se ajustan a los estándares IFC y CityGML para garantizar la integridad y precisión de la información geométrica recopilada.

5.3.1. Análisis y Procesamiento de Datos usando los Servicios de Azure

Para hacer uso de los recursos, se requiere una suscripción de Azure. Para el desarrollo del gemelo digital, se creó una suscripción a la que llamamos "Suscripción de Azure 1". Con esta suscripción, pudimos crear los diversos recursos y servicios necesarios para el manejo de los datos.

Se creó un Grupo de Recursos con el propósito de centralizar todos los recursos que se crearon dentro de la plataforma de Azure. Para esto, se seleccionó la suscripción que en este caso es la suscripción educativa y se asignó un nombre al recurso, en este caso "Digital_Twin". Además, se eligió la región East US donde se ubicarían los recursos y servicios.

Figura 55

Grupo de recursos Digital_Twin creado en Azure

Nombre	Tipo	Ubicación
digitaltwinsmarcity	Cuenta de almacenamiento	East US
smartcitydt	Factoría de datos (V2)	East US

Comentado [LEOR37]: No usar por ejemplo, sino decir: se le asignó el nombre de "Digital Twin", porque ya lo hicimos

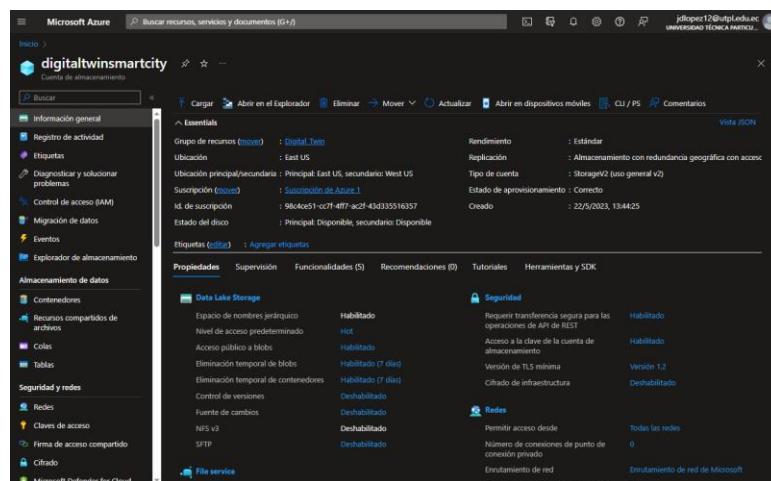
Comentado [LEOR38]: Que región?

Teniendo el Grupo de recursos iniciamos el despliegue de Azure Data Lake Gen2 (ADLS Gen2). Dentro de la plataforma de Azure, procedimos a integrar ADLS y seguir una serie de pasos para su configuración e implementación:

- 1. Creación de la Cuenta de Almacenamiento con Data Lake Gen2:** Se realizó la creación de la Cuenta de Almacenamiento habilitada para el uso de Data Lake Gen2. Durante este proceso, se seleccionó la suscripción "Suscripción de Azure 1" y el Grupo de Recursos "Digital_Twin", donde se alojó la cuenta bajo el nombre "digitaltwinsmartcity", en minúsculas y sin espacios. Además, se activó el espacio de nombres jerárquicos en la configuración avanzada, lo cual permitiría aprovechar todas las funcionalidades del Data Lake Gen2.

Figura 56

Cuenta de almacenamiento digitaltwinsmartcity creada en Azure



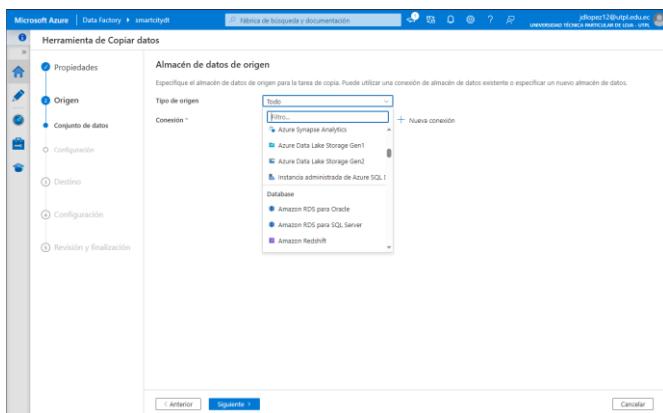
Una vez creado el ADLS Gen2, procedemos a crear un Azure Data Factory, que es un servicio proporcionado por Azure que facilita la integración de diversas fuentes de datos, y que servirá como fuente de ingesta para el ADLS Gen2 (Microsoft Docs, 2021). A continuación, describiremos los pasos realizados para conectar los datos con el Data Lake:

- 1. Configuración de los orígenes de datos:** Se establecieron los orígenes de datos que se deseaban conectar con el ADLS Gen2. Esto podría incluir

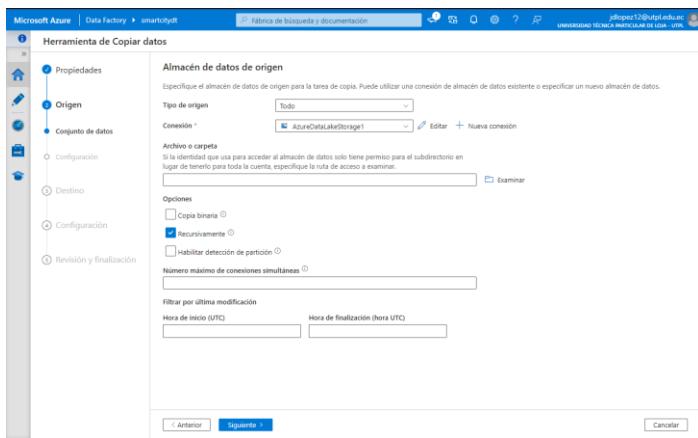
fuentes de datos internas o externas, como bases de datos, servicios en la nube u otros sistemas.

Figura 57

Herramienta de copiado e ingestión de Azure Data Factory



2. **Configuración de los destinos de datos:** Se determinaron los destinos de los datos, es decir, la ubicación dentro del ADLS Gen2 donde se almacenarían los datos provenientes de los diferentes orígenes. Esto permitiría su posterior análisis y procesamiento.

Figura 58**Selección del ADLS Gen2 como destino**

3. **Configuración de los flujos de datos:** Se establecieron los flujos de datos entre los orígenes y los destinos. Esto incluye la definición de transformaciones, filtros y otras operaciones que se deseaban aplicar durante el proceso de integración.
4. **Programación de los flujos de datos:** Se programaron los flujos de datos para que se ejecutaran en momentos específicos o en función de ciertos desencadenantes, como la disponibilidad de nuevos datos o la programación regular.

Con la configuración exitosa del ADLS Gen2 y el Azure Data Factory, ahora estamos preparados para el manejo de datos necesarios para el desarrollo del gemelo digital. La creación del Grupo de Recursos y la suscripción de Azure proporcionan una base sólida para centralizar y administrar todos los recursos en la plataforma de Azure. La Cuenta de Almacenamiento habilitada con ADLS Gen2 nos permitirá almacenar y procesar grandes volúmenes de datos con alta disponibilidad y seguridad. Además, gracias a la integración del Azure Data Factory, contamos con una fuente de ingesta para el ADLS Gen2 y una forma eficiente de integrar diversas fuentes de datos. Ahora estamos listos para conectar,

transformar y almacenar los datos necesarios para el funcionamiento del gemelo digital, lo que nos permitirá llevar a cabo simulaciones, análisis y visualizaciones para mejorar la gestión y toma de decisiones en el contexto de la ciudad inteligente.

5.3.2. Desarrollo del Modelo Semántico 3D

Una vez que los datos han sido almacenados, procesados y etiquetados adecuadamente por el ADLS, avanzamos hacia el desarrollo del modelo semántico. Durante la construcción del modelo, se evaluaron diversas ontologías, incluyendo la "Smart Cities Ontology for Digital Twins" de Microsoft, que abarca modelos en los dominios de movilidad, medio ambiente, estacionamiento y alumbrado eléctrico (Miriam Berhane Russom, 2021).

Sin embargo, no se encontraron ontologías referentes a nuestro caso de estudio. Por lo tanto, se tomó la decisión de desarrollar una ontología propia, incorporando clases y propiedades de otras ontologías relevantes. Esta ontología brindará una representación tridimensional más precisa y organizada de los datos catastrales, facilitando la identificación de parcelas, propiedades y su ubicación en el espacio geográfico. Además, proporcionará una base sólida para la integración de datos y mejorará la interoperabilidad con otras plataformas y sistemas urbanos.

Con esta ontología, buscamos optimizar la gestión catastral en el contexto urbano, brindando una herramienta valiosa para los funcionarios encargados de la administración de tierras, y al mismo tiempo, beneficiando a los ciudadanos al mejorar la planificación y desarrollo de la ciudad.

En nuestra ontología, hemos optado por utilizar el formato JSON-LD para estructurar y representar las entidades. Una de las principales ventajas de JSON-LD es su capacidad para expandir términos JSON a identificadores de recursos uniformes (URI), lo que nos permite emplear vocabularios para definir términos sin ambigüedades. A continuación, se presentan los campos fundamentales utilizados para representar una entidad en JSON-LD:

Tabla 5

Campos de las entidades en JSON-LD

Campo	Descripción
-------	-------------

@context	Este campo se utilizó para establecer el contexto de la entidad, donde se especifican los términos y vocabularios que se utilizan en la entidad. Por lo general, esto incluirá los nombres de las propiedades y clases utilizadas en la entidad, así como las URL de los vocabularios y ontologías que se están utilizando.
@id	Este campo se utilizó para definir el identificador único de la entidad en la ontología, y generalmente se expresa como una URL. Este campo es importante porque permite que diferentes fuentes de datos se integren de manera coherente, siempre y cuando utilicen identificadores únicos y consistentes.
@type	Este campo se utilizó para especificar el tipo de la entidad, que puede ser una clase definida en la ontología o un tipo de entidad estándar.
Name	Este campo se utilizó para definir el nombre de la entidad.
Properties	Este campo se utilizó las propiedades de la entidad, que pueden ser otras entidades o valores simples como números o cadenas de texto.

Nota. Adaptado de JSON-LD Community Group. (2022). Se ha decidido compartir la ontología en un repositorio público en GitHub: <https://github.com/lenoryv/dtwin> para su uso y mejora por parte de la comunidad.

5.3.2.1. Entidades para la representación de objetos espaciales. En el proceso de construcción de una ontología para representar el catastro de la ciudad, es esencial considerar la representación adecuada de objetos espaciales. Para ello, hemos decidido adoptar las clases y propiedades de la ontología GeoSPARQL, dada su relevancia y eficacia en el ámbito urbano. Algunas de las clases y propiedades relevantes que empleamos son las siguientes:

La clase **SpatialObject** es una superclase en nuestra ontología para objetos urbanos. Aunque no tiene atributos específicos, tiene propiedades como **contains** y **within**. Estas indican si un objeto contiene a otro o si está contenido en otro, respectivamente. En la Tabla 6 se detallan estas dos propiedades y se explica su uso en la ontología:

Tabla 6

Propiedades de la clase SpatialObject

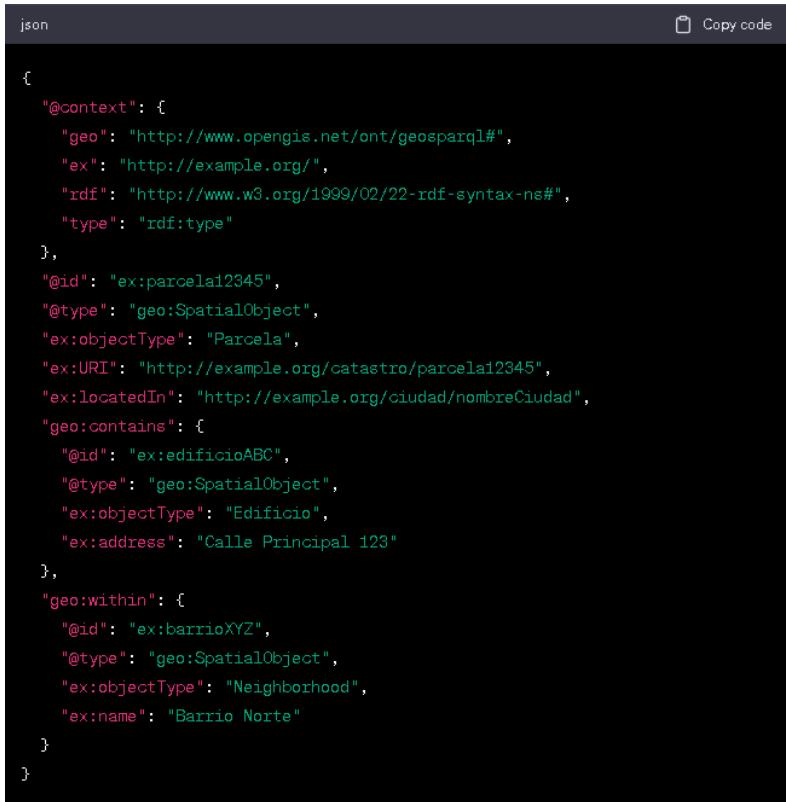
Propiedad	Descripción
-----------	-------------

contains	Nos indica si un objeto espacial contiene a otro objeto espacial. Esta propiedad se aplica a la clase contenedora y se utiliza para representar relaciones jerárquicas entre objetos espaciales.
within	Nos indica si un objeto espacial está dentro de otro objeto espacial. Esta propiedad se aplica a la clase contenida y se utiliza para representar relaciones de inclusión entre objetos espaciales.

La Figura 59 ilustra una instancia de la clase **SpatialObject**. Esta instancia define un objeto de tipo **Parcel** (parcela) con una URI específica situada en una ciudad determinada. La propiedad **contains** se utiliza para indicar que la parcela incluye un objeto de tipo Edificio. Por otro lado, la propiedad **within** muestra que la parcela se encuentra dentro de un objeto de tipo **Neighborhood**, representando un sector o barrio específico de la ciudad.

Figura 59

Ejemplo de instancia de la clase *SpatialObject*



```

json
Copy code

{
  "@context": {
    "geo": "http://www.opengis.net/ont/geosparql#",
    "ex": "http://example.org/",
    "rdf": "http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#",
    "type": "rdf:type"
  },
  "@id": "ex:parcela12345",
  "@type": "geo:SpatialObject",
  "ex:objectType": "Parcela",
  "ex:URI": "http://example.org/catastro/parcela12345",
  "ex:locatedIn": "http://example.org/ciudad/nombreCiudad",
  "geo:contains": {
    "@id": "ex:edificioABC",
    "@type": "geo:SpatialObject",
    "ex:objectType": "Edificio",
    "ex:address": "Calle Principal 123"
  },
  "geo:within": {
    "@id": "ex:barrioXYZ",
    "@type": "geo:SpatialObject",
    "ex:objectType": "Neighborhood",
    "ex:name": "Barrio Norte"
  }
}

```

Nota. En este ejemplo se describe una parcela (con un identificador ex:parcela12345) que contiene un edificio (identificado como ex:edificioABC) y se encuentra dentro de un barrio específico (identificado como ex:barrioXYZ).

Comentado [LEOR39]: Seguir el formato de cursiva para palabras en inglés y nombres propios

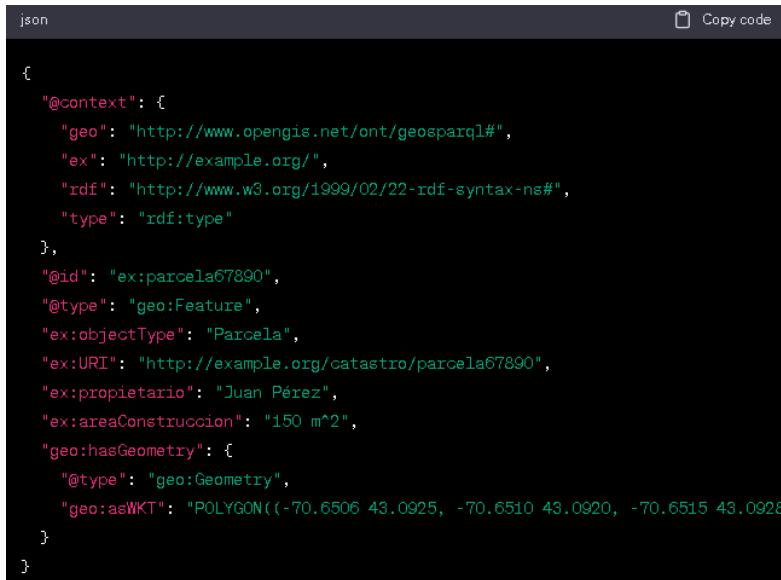
Sin embargo, cuando se trata de representar objetos geoespaciales con atributos específicos, como edificios, calles o plazas, es necesario utilizar una subclase de *SpatialObject* llamada **Feature**. Esta subclase extiende las propiedades y métodos de *SpatialObject* y agrega propiedades adicionales para describir las características y atributos específicos de cada objeto geoespacial.

Dentro de clase **Feature** se incluye la propiedad **hasGeometry**, la cual será utilizada para vincular los objetos espaciales con su geometría y permitir su visualización en 3D, así como para realizar consultas y análisis geoespaciales en bases de datos RDF.

En el ejemplo de la Figura 60, se emplea la clase **Feature** para representar una parcela como un objeto geoespacial. La propiedad **hasGeometry** se utiliza para asociar el objeto espacial con su respectiva geometría, que en este caso es un polígono definido por vértices con coordenadas de longitud y latitud.

Figura 60

Ejemplo de instancia de la clase Feature



```
json
Copy code

{
  "@context": {
    "geo": "http://www.opengis.net/ont/geosparql#",
    "ex": "http://example.org/",
    "rdf": "http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#",
    "type": "rdf:type"
  },
  "@id": "ex:parcela67890",
  "@type": "geo:Feature",
  "ex:objectType": "Parcela",
  "ex:URI": "http://example.org/catastro/parcela67890",
  "ex:propietario": "Juan Pérez",
  "ex:areaConstruccion": "150 m^2",
  "geo:hasGeometry": {
    "@type": "geo:Geometry",
    "geo:asWKT": "POLYGON((-70.6506 43.0925, -70.6510 43.0920, -70.6515 43.0928))"
  }
}
```

Además, se incluyen las propiedades **propietario** y **areaConstruccion** con valores ficticios. El propietario se ha definido como "Juan Pérez" y el área de construcción como "150 m^2 ".

Por último, la clase **Geometry** que también es una subclase de **SpatialObject**, es la que nos permite representar la forma y posición de los objetos geoespaciales con gran precisión y detalle.

Además, la clase **Geometry** permite expresar relaciones espaciales más complejas, como la intersección entre calles o la proximidad de un vehículo a una ubicación determinada. Las propiedades más comunes de la clase **Geometry** utilizadas para nuestra ontología se detallan en la Tabla 7. Adicionalmente, hemos incluido las propiedades *lat* (Latitud) y *long* (Longitud), que provienen de la ontología WGS84 Geo Positioning, y que son ampliamente utilizadas para representar la ubicación geográfica de los objetos.

Tabla 7

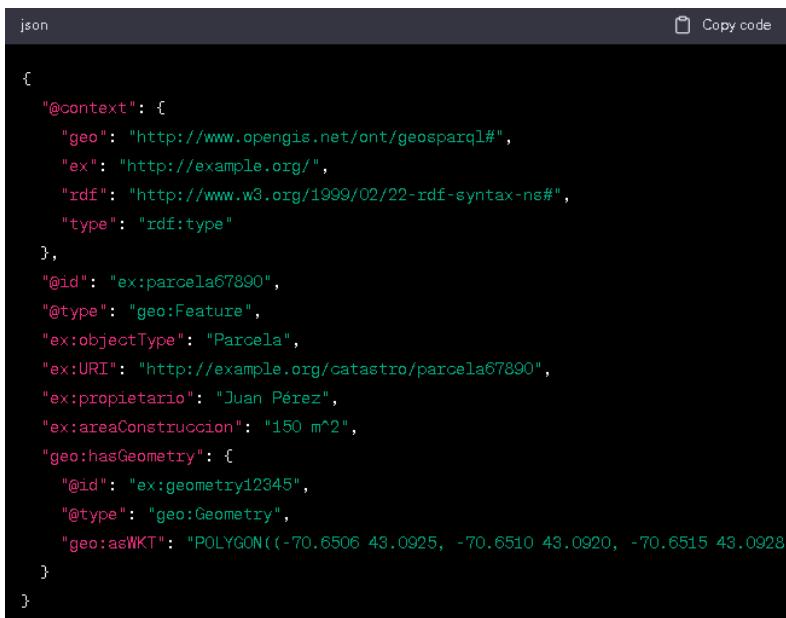
Propiedades de la clase Geometry

Propiedad	Descripción
asWKT	Esta propiedad se utiliza para representar la geometría de un objeto espacial como una cadena de texto en formato WKT. El formato WKT es ampliamente utilizado en GIS y permite describir la geometría de objetos como puntos, líneas y polígonos de manera precisa y estandarizada.
Dimensión	La dimensión topológica de este objeto geométrico, que debe ser menor o igual a la dimensión de coordenadas. En el caso de colecciones de geometrías heterogéneas, se devolverá la dimensión topológica más grande de los objetos contenidos.
coordinateDimension	Esta propiedad se utiliza para especificar la dimensión de las coordenadas que se utilizan para representar la geometría. Por ejemplo, si se utiliza un sistema de coordenadas en dos dimensiones (2D), el valor de coordinateDimension sería 2.
spatialDimension	Esta propiedad se utiliza para especificar la dimensión del espacio en el que se encuentra la geometría. Por ejemplo, si se trata de un objeto espacial en un espacio tridimensional (3D), el valor de spatialDimension sería 3.
lat	Representa la latitud geográfica de la ubicación del objeto. Se utiliza el sistema de coordenadas WGS84 para expresar la latitud en grados decimales.
long	Representa la longitud geográfica de la ubicación del objeto. También utiliza el sistema de coordenadas WGS84 y se expresa en grados decimales.

La Figura 61 ilustra un ejemplo de una instancia de la clase **Geometry** utilizando el tipo **@type** y se especifica la propiedad **asWKT** para definir su forma como una línea (Polygon). También se utiliza la propiedad **hasGeometry** para vincular el objeto geoespacial, en este caso una parcela, con su geometría, que es una instancia de la clase **Polygon**.

Figura 61

Ejemplo de instancia de la clase *Geometry*



```
json
Copy code

{
  "@context": {
    "geo": "http://www.opengis.net/ont/geosparql#",
    "ex": "http://example.org/",
    "rdf": "http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#",
    "type": "rdf:type"
  },
  "@id": "ex:parcela67890",
  "@type": "geo:Feature",
  "ex:objectType": "Parcela",
  "ex:URI": "http://example.org/catastro/parcela67890",
  "ex:proprietario": "Juan Pérez",
  "ex:areaConstruccion": "150 m^2",
  "geo:hasGeometry": {
    "@id": "ex:geometry12345",
    "@type": "geo:Geometry",
    "geo:asWKT": "POLYGON((-70.6506 43.0925, -70.6510 43.0920, -70.6515 43.0928, -70.6506 43.0925))"
  }
}
```

Nota. La propiedad geo:hasGeometry vincula el objeto geoespacial (parcela) con su geometría, que es una instancia de la clase geo:Geometry y tiene una forma definida como un polígono en formato WKT (Well-Known Text).

5.3.2.2. Entidades para la representación del catastro. Con el propósito de almacenar y gestionar la información catastral, hemos creado la clase **Parcel** utilizando nuestro propio prefijo llamado **dtwin** con la URI: github.com/leor/dtwin. Esta clase es una subclase de **Feature** y representa un objeto geoespacial que contiene atributos asociados, mientras emplea la clase **Geometry** para representar la forma y ubicación espacial de cada parcela catastral. En esencia, **Parcel** representa una unidad de terreno o área delimitada dentro del contexto catastral.

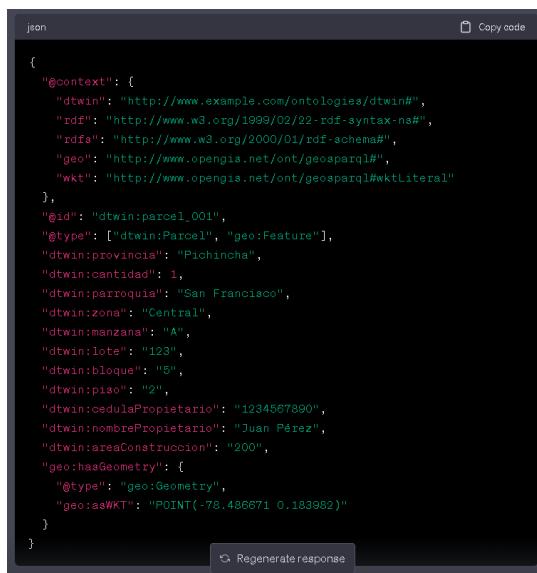
La clase **Parcel** ha sido diseñada con el objetivo de describir de manera exhaustiva una parcela de tierra, identificada por su llave catastral única según el sistema de catastro vigente. Entre la información que contiene, se destacan los datos referentes a la provincia,

parroquia, zona, manzana, lote, bloque, piso, así como detalles relacionados con el propietario, como la cédula y el nombre. Además, se incluye el área de construcción asociada a la parcela.

Cada instancia de la clase ***Parcel*** representa un registro único dentro del sistema catastral. Al abarcar aspectos detallados de la propiedad y su ubicación, esta entidad proporciona información precisa y completa que permite una gestión efectiva de los atributos del terreno o propiedad en cuestión. La Figura 62 muestra un ejemplo de los datos correspondientes a una parcela.

Figura 62

Ejemplo de instancia de la clase Parcel



```

{
  "@context": {
    "dtwin": "http://www.example.com/ontologies/dtwin#",
    "rdfs": "http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#",
    "rdfs": "http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#",
    "geo": "http://www.opengis.net/ont/geosparql#",
    "wkt": "http://www.opengis.net/ont/geosparql#wktLiteral"
  },
  "@id": "dtwin:parcel_001",
  "@type": ["dtwin:Parcel", "geo:Feature"],
  "dtwin:provincia": "Pichincha",
  "dtwin:cantidad": 1,
  "dtwin:parroquia": "San Francisco",
  "dtwin:zona": "Central",
  "dtwin:manzana": "A",
  "dtwin:lot": "123",
  "dtwin:bloque": "5",
  "dtwin:piso": "2",
  "dtwin:cedulaPropietario": "1234567890",
  "dtwin:nombrePropietario": "Juan Pérez",
  "dtwin:areaConstruccion": "200",
  "geo:hasGeometry": {
    "@type": "geo:Geometry",
    "geo:asWKT": "POINT(-78.486671 0.183982)"
  }
}

```

5.3.3. Mapeo de la Ontología a un Modelo de Tablas

El mapeo de la ontología a un modelo de tablas proporciona una estructura organizada y estandarizada para los datos del gemelo digital. Una vez definida nuestra ontología para la representación de objetos urbanos, es importante realizar un mapeo adecuado a un modelo de tablas para su posterior almacenamiento y manipulación en una base de datos relacional.

A continuación, presentaremos el mapeo propuesto para nuestra ontología:

- **Clases de la ontología a tablas:** Cada clase de la ontología se mapeó a una tabla en la base de datos. La tabla tiene columnas que representen las propiedades definidas en la clase, así como columnas adicionales para identificador único (ID) y otras necesidades específicas de la base de datos.
- **Propiedades de la ontología a columnas:** Cada propiedad de la ontología pasó a ser una columna en la tabla correspondiente. El tipo de dato de la columna se determinó según el tipo de dato de la propiedad en la ontología (por ejemplo, texto, número, fecha, etc.). Las restricciones y cardinalidad de las propiedades se reflejarán en las restricciones y reglas de la base de datos.
- **Relaciones entre clases a relaciones entre tablas:** Las relaciones entre clases en la ontología se mapearon a relaciones entre tablas en la base de datos. Esto se logró mediante el uso de claves primarias y claves foráneas para establecer la relación entre las tablas correspondientes.
- **Jerarquía de clases a esquema de tablas:** Para la jerarquía de clases, se utilizó técnicas como la herencia y las claves foráneas para reflejar esta estructura en el esquema de tablas. Se crearon tablas separadas para cada subclase, con columnas adicionales para las propiedades específicas de cada subclase.

Esta traducción nos permite aprovechar las capacidades de ArcGIS Pro para gestionar y analizar los datos, así como prepararlos para la visualización interactiva en ArcGIS Experience Builder. La combinación de la ontología y el modelo de tablas en ArcGIS Pro facilita la representación visual precisa y la manipulación de los objetos urbanos en el gemelo digital.

5.4. Visualización del Gemelo Digital

El proceso de visualización del gemelo digital implica conectar y acceder a los datos del gemelo digital, ya sea mediante servicios de mapas en línea, servicios de entidades espaciales o bases de datos geoespaciales.

Utilizando ArcGIS Experience Builder, se puede configurar y personalizar una página web o aplicación que ofrezca vistas y widgets específicos para mostrar y manipular los datos del gemelo digital. El proceso de creación de un proyecto de visualización del gemelo digital utilizando ArcGIS Experience Builder incluye los siguientes pasos:

5.4.1. Configurar un Proyecto en ArcGIS Experience Builder

1. Iniciar sesión en ArcGIS Online y seleccionar la aplicación Experience Builder.

Ver Figura 63.

Figura 63

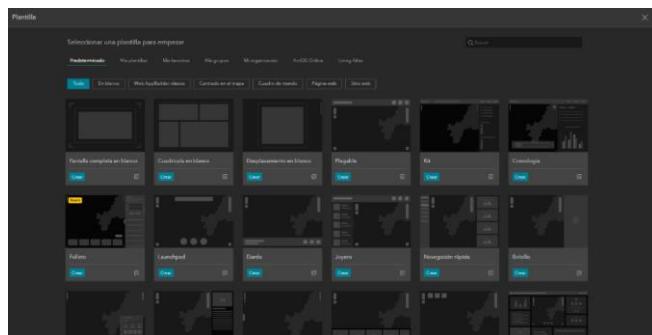
Pantalla de Inicio y herramientas disponibles en ArcGIS Online



2. Crear un nuevo proyecto en ArcGIS Experience Builder, la Figura 64 muestra plantillas predeterminadas con las que se puede empezar.

Figura 64

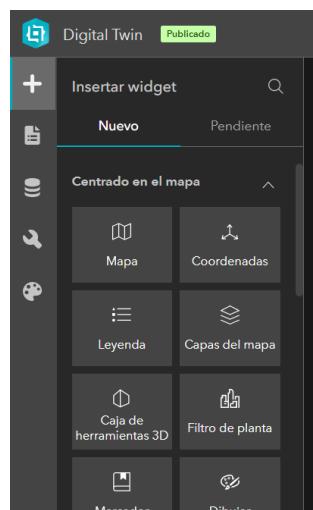
Plantillas para comenzar un proyecto



3. Definir las páginas y widgets necesarios para mostrar e interactuar con los objetos urbanos del gemelo digital, la Figura 65 muestra los widgets disponibles que se pueden utilizar.

Figura 65

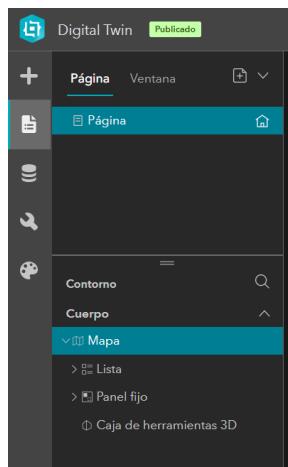
Widgets disponibles en Experience Builder



En la opción de **Página**, que se observa en Figura 66 se define la estructura y contenido para la visualización de los distintos tipos de accidentes o visualizaciones específicas de la ciudad requeridas, ver. En este caso, se han creado dos páginas para este propósito.

Figura 66

Opción Página de Experience Builder



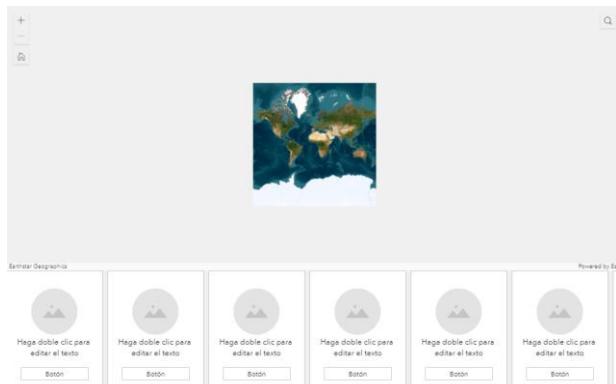
Página inicial: Esta página proporciona una visión general de la ciudad y su entorno urbano. Aquí se pueden mostrar elementos como calles, edificios, infraestructuras y otros objetos urbanos relevantes. La página inicial sirve como punto de partida para la exploración del gemelo digital y permite a los usuarios obtener una vista general del área.

Página de accidentes de tránsito: En esta página se centra en la visualización de accidentes de tránsito, especialmente choques entre autos. Aquí se pueden mostrar de manera interactiva y visualmente atractiva los puntos o áreas donde ocurrieron los accidentes. Además, se pueden proporcionar detalles adicionales, como la fecha, hora y gravedad de los accidentes, para ayudar en el análisis y comprensión de estos.

La opción **Insertar**, nos permite agregar diversos elementos visuales a nuestras páginas. Entre estos elementos se encuentran los mapas, tablas, gráficos y otros recursos útiles para la representación de nuestro gemelo digital. En particular, para nuestro proyecto, optaremos por utilizar el widget **Mapa** y el widget **Lista** como la estructura base de nuestras páginas. Al combinar estas opciones, lograremos obtener un resultado visual similar al que se muestra en la Figura 67. Estos widgets nos brindarán una representación interactiva y eficiente de los objetos urbanos en nuestro gemelo digital.

Figura 67

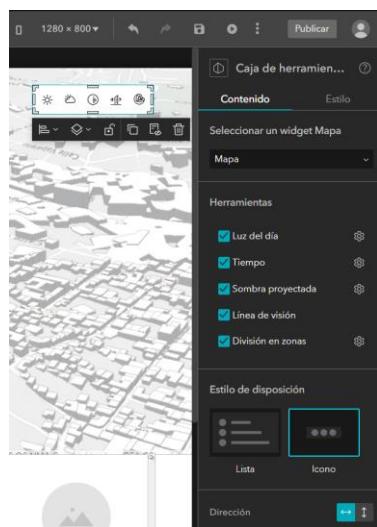
Estructura base de las páginas



Hemos considerado agregar otro widget a nuestras páginas llamado **Caja de herramientas**. Este widget que se muestra en la Figura 68, nos brinda la capacidad de generar efectos 3D en la visualización del gemelo digital. Para utilizar este widget, es necesario establecer una conexión con una fuente de datos 3D, como una escena web global o local.

Figura 68

Widget Caja de Herramientas



La caja de herramientas ofrece diversas funcionalidades que nos permiten mejorar la visualización y la interacción con los elementos 3D en cada página. Algunas de estas herramientas incluyen:

Generación de luz del día: Esta herramienta nos permite simular la iluminación natural en función de la fecha y la hora seleccionadas. Así, podemos obtener sombras proyectadas realistas en los elementos 3D, lo cual mejora la percepción de la escena y añade un mayor nivel derealismo.

Cambio de clima: Esta función nos permite ajustar la vista de la escena 3D para mostrar diferentes ángulos de visión. Podemos rotar, inclinar y acercar o alejar la vista para explorar la escena desde diferentes perspectivas.

Líneas de visión: La caja de herramientas nos ofrece la posibilidad de trazar líneas de visión desde un punto de origen hacia los elementos 3D en la escena. Esto puede ayudarnos a analizar la visibilidad de ciertos objetos o evaluar las rutas de visualización en entornos urbanos.

División de zonas: Esta herramienta nos permite dividir la escena 3D en diferentes zonas o sectores para facilitar el análisis y la organización de los elementos urbanos. Esto puede ser útil para identificar áreas específicas de interés o aplicar análisis espaciales focalizados en determinadas partes de la ciudad.

Después de haber definido la estructura de las páginas, el siguiente paso es establecer la conexión con los datos. Esta etapa implica vincular los widgets de ArcGIS Experience Builder a las fuentes de datos correspondientes para que la visualización del gemelo digital pueda obtener y mostrar la información relevante.

5.4.2. Conexión a los datos

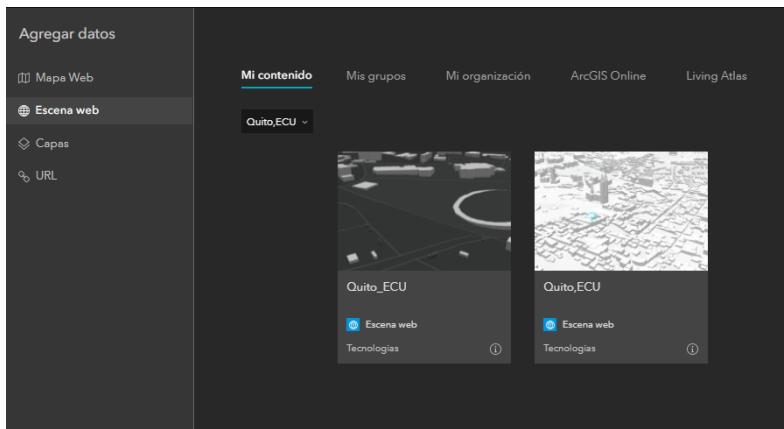
Utilizando las capacidades de ArcGIS Experience Builder de conexión de datos, realizaremos la conexión a servicios de mapas en línea, servicios de entidades espaciales o bases de datos geoespaciales donde se almacenan los datos del gemelo digital.

Dentro de la opción "Datos", procederemos a seleccionar los modelos 3D generados en ArcGIS Pro, los cuales han sido compartidos en ArcGIS Online como escenas web. Estas

escenas web que se muestran en la Figura 69, contienen la representación tridimensional de los objetos urbanos que deseamos visualizar en nuestro gemelo digital.

Figura 69

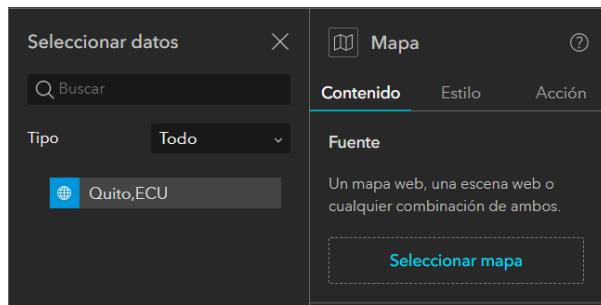
Escenas Web disponibles



A continuación, configuraremos los widgets correspondientes. En el widget de **Mapa**, seleccionaremos la escena web previamente cargada como fuente de datos, ver **Figura 70**. Esto nos permitirá visualizar los modelos 3D y explorar el entorno urbano de manera interactiva.

Figura 70

Selección de datos para el widget Mapa

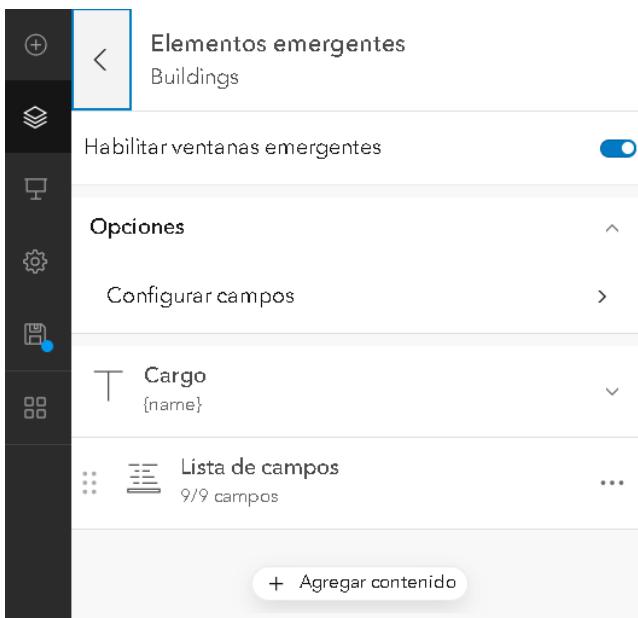


Para definir los atributos que se mostrarán en cada parcela de la ciudad, se puede acceder a las propiedades de la capa y configurar los elementos emergentes que son las ventanas que muestran los campos de cada parcela en forma de tabla, ver **Figura 71**. Esta

opción nos permite seleccionar y configurar los campos específicos de los datos que deseamos visualizar.

Figura 71

Configuración de elementos emergentes de una capa



Una vez que han agregado los widgets a las páginas, se procede a configurar y personalizar cada uno de ellos según tus requerimientos.

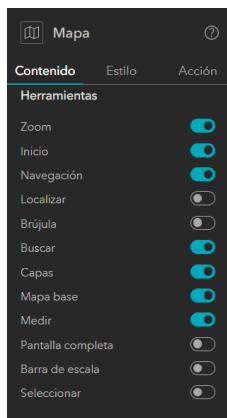
5.4.3. Configurar las Interacciones y Funcionalidades

Para personalizar aún más la interacción y el comportamiento de los elementos de la lista, contamos con las opciones disponibles en el menú lateral derecho correspondiente a cada widget. Desde allí, podemos configurar interacciones como la selección de elementos, acciones al hacer clic, filtros dinámicos y otras funcionalidades que se ajusten a nuestras necesidades específicas.

La **Figura 72**, muestra la configuración de herramientas del mapa establecida para nuestro gemelo digital. En esta configuración, destacamos tres herramientas importantes: Medir, Búsqueda y Capas.

Figura 72

Configuración de herramientas establecida para el mapa



Medir: nos permite obtener mediciones precisas de distancias, áreas y otros atributos dentro del mapa. Esto es útil para realizar análisis cuantitativos y tomar decisiones informadas basadas en medidas concretas.

Búsqueda: facilita la ubicación rápida y precisa de lugares, direcciones o características específicas en el mapa. Esto agiliza la navegación y la búsqueda de información relevante en el contexto del gemelo digital.

Capas: nos permite gestionar las capas de datos presentes en el mapa. Podemos activar, desactivar y configurar las propiedades de las capas para controlar qué información se muestra en la visualización del gemelo digital. Esto nos brinda flexibilidad y personalización en la presentación de los datos.

Estas herramientas seleccionadas son solo ejemplos destacados de la configuración de herramientas del mapa en nuestro gemelo digital. Sin embargo, ArcGIS Experience Builder ofrece una amplia gama de herramientas y opciones personalizables para adaptarse a las necesidades específicas de cualquier proyecto y mejorar la experiencia de visualización y análisis en el entorno urbano.

Una vez finalizada la configuración y personalización del proyecto, pasamos a publicarlo y desplegarlo para que esté accesible a los usuarios.

5.4.4. Publicar y Desplegar el Proyecto

Para llevar a cabo la publicación y despliegue del gemelo digital, aprovecharemos las opciones de alojamiento en la nube proporcionadas por ArcGIS. Estos pasos nos permitirán hacer accesible nuestro proyecto a través de la web:

1. Preparar el proyecto: Antes de la publicación, hay que asegurarnos que el proyecto esté completo y funcional. Verificar que todos los widgets estén configurados correctamente y que la conexión con los datos esté establecida adecuadamente.
2. Configurar el alojamiento en la nube: Utilizamos las opciones de alojamiento en la nube proporcionadas por ArcGIS para cargar y alojar tu proyecto. Estas opciones nos permitirán almacenar los archivos necesarios y establecer la configuración de acceso y seguridad para el despliegue.
3. Publicar el proyecto: Una vez configurado el alojamiento en la nube, procedemos a publicar el proyecto con el botón **publicar** ubicado en la parte superior derecha de nuestro proyecto en Experience Builder, ver **Figura 73**. Esto implica subir los archivos y recursos necesarios, como imágenes, estilos y scripts, a la plataforma de alojamiento en la nube de ArcGIS.

Figura 73

Proyecto en Experience Builder

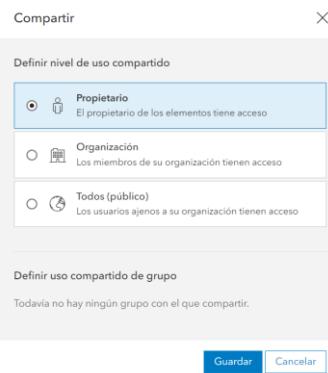


4. Establecer permisos y configuraciones de seguridad: Nos aseguramos de establecer los permisos y configuraciones de seguridad adecuados para el proyecto con el fin de definir quién puede acceder a los datos del gemelo digital,

ver **Figura 74**. En este caso, hemos decidido que el acceso sea público, lo que significa que estará disponible para cualquier persona que acceda a través de la web.

Figura 74

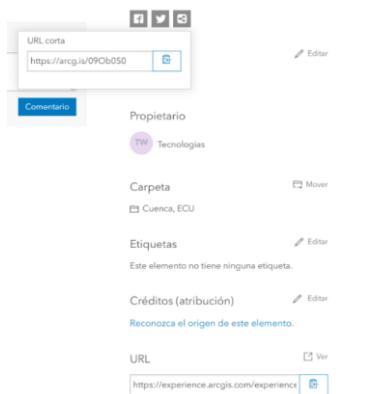
Opciones de uso compartido



- Desplegar y compartir el gemelo digital: Una vez que se ha publicado el proyecto, podremos desplegarlo y hacerlo accesible a través de la web. ArcGIS nos proporciona el enlace o la URL correspondiente para que los usuarios puedan acceder y explorar el gemelo digital desde cualquier dispositivo con conexión a internet. Ver **Figura 75**.

Figura 75

Enlace proporcionado por ArcGIS Online



Al utilizar las opciones de alojamiento en la nube proporcionadas por ArcGIS, aseguramos que nuestro gemelo digital esté disponible y accesible para su visualización y análisis en entornos urbanos. Esto facilitará la colaboración, la toma de decisiones informada y la participación de los interesados en el proyecto.

En este capítulo, se ha abordado el proceso de desarrollo y despliegue del gemelo digital de la ciudad, estableciendo los permisos y configuraciones adecuados. Ahora, es momento de adentrarnos en la etapa crucial de validación del gemelo digital. En este siguiente capítulo, se explorarán las validaciones clave que deben ser consideradas para asegurar la calidad y confiabilidad del gemelo digital en el contexto de la ciudad.

Capítulo seis

Validación y Ejecución

En este capítulo, se presentarán los resultados obtenidos a través de la validación del gemelo digital, el cual fue sometido a pruebas y análisis para evaluar su desempeño y eficacia en la representación de los datos catastrales y la gestión inteligente del territorio.

En primer lugar, se analizará en detalle la precisión espacial y atributiva del gemelo digital. Se realizará una comparación exhaustiva con los datos del sistema de catastro existente, evaluando la coincidencia y calidad de la información geoespacial y los atributos asociados a cada parcela. Se examinará la exactitud de la ubicación de las entidades y la consistencia de los atributos en relación con la realidad del terreno.

Además, se llevará a cabo una evaluación de la usabilidad y satisfacción de los usuarios con la plataforma del gemelo digital. Se recopilarán y analizarán los comentarios y opiniones de los usuarios que han interactuado con la herramienta, con el objetivo de comprender su experiencia, identificar posibles mejoras y determinar la utilidad percibida del gemelo digital en el contexto de la administración de terrenos.

En cada sección, se presentarán los resultados obtenidos, tanto en términos cuantitativos como cualitativos. Se incluirán gráficos, tablas y ejemplos concretos que ilustren los hallazgos más relevantes y permitan una comprensión clara de los resultados. Asimismo, se realizará un análisis profundo de los datos obtenidos, identificando tendencias, patrones y posibles limitaciones o sesgos en la validación.

Finalmente, se presentarán las conclusiones derivadas de la validación del gemelo digital. Se resumirán los hallazgos más significativos y se discutirá su impacto en el contexto de la administración de terrenos y la planificación urbana. Además, se ofrecerán recomendaciones para futuras investigaciones y mejoras en el modelo operativo, con el objetivo de maximizar su sostenibilidad y utilidad a largo plazo.

A través de este capítulo, se pretende brindar una visión integral de la validación del gemelo digital, proporcionando evidencia empírica de su eficacia y aportando conocimientos

valiosos para la comunidad académica y profesional en el campo de la gestión del territorio y los sistemas de información geográfica.

6.1. Representación de Capas GIS y BIM

El propósito de la validación es asegurar la correcta carga de los datos de los modelos GIS y BIM en el gemelo digital, garantizando así la precisión y coherencia de la representación 3D y los atributos asociados.

6.1.1. Metodología de validación

La metodología de validación utilizada consta de los siguientes pasos:

- 1. Preparación de los modelos:** En esta etapa, se realiza la preparación de los modelos GIS y BIM para su carga y visualización en el gemelo digital. Esto implica asegurarse de que los modelos estén en el formato adecuado, como el formato IFC para los modelos BIM. Para los modelos GIS, se utilizan formatos comunes como el Shapefile, GeoJSON o GML, que permiten representar y almacenar datos geoespaciales.
- 2. Carga de los modelos:** En esta fase, se realiza la carga de los modelos GIS y BIM en el gemelo digital. Se utiliza una herramienta de importación o carga específica para cargar los archivos en su formato correspondiente dentro de ArcGIS Pro. Durante este proceso, se verifica que la carga se realice sin errores y que los datos de los modelos GIS y BIM se mapeen correctamente en el gemelo digital.
- 3. Validación de la geometría y atributos:** Una vez que los modelos GIS y BIM están cargados en el gemelo digital, se lleva a cabo una validación exhaustiva de la geometría y los atributos de los elementos constructivos. Se comparan los datos del modelo BIM con la representación 3D y los atributos asociados en el gemelo digital para asegurarse de que sean consistentes y precisos. Cualquier discrepancia o desviación se registra y se corrige en consecuencia.
- 4. Pruebas de funcionalidad y visualización:** Además de la validación de los datos, se realizan pruebas de funcionalidad para garantizar que los modelos BIM se

puedan visualizar correctamente en el entorno del gemelo digital. Se verifica que los usuarios puedan acceder a los modelos, explorarlos, aplicar filtros y realizar análisis espaciales según sea necesario. Cualquier problema o dificultad en la visualización se identifica y se aborda para mejorar la experiencia del usuario.

5. Documentación de resultados: Finalmente, se documentan los resultados de la validación de carga de modelos BIM. Se registran todas las discrepancias, correcciones y mejoras realizadas durante el proceso de validación. Esta documentación servirá como referencia para futuras actualizaciones y mejoras en la carga de modelos BIM en el gemelo digital.

6.1.2. Carga de Modelos GIS y BIM

Para cargar distintos modelos en el gemelo digital, utilizamos los estándares de interoperabilidad. En el caso específico de representar el modelo GIS del catastro de la ciudad, hemos utilizado el formato Shapefile, que es compatible con la herramienta ArcGIS Pro. Sin embargo, para asegurarnos de abrir correctamente un Shapefile en ArcGIS Pro, es imprescindible contar con al menos tres archivos principales, los cuales se detallan en la Tabla 8.

Tabla 8

Archivos Principales para la Representación del Modelo GIS del Catastro de la Ciudad en Formato Shapefile

Formato	Descripción
.shp	Este archivo contiene la geometría (puntos, líneas o polígonos) de las parcelas u objetos geoespaciales.
.shx	Este archivo es el índice espacial y es necesario para acceder y asociar las geometrías almacenadas en el archivo .shp.
.dbf	Este archivo contiene los datos de atributos asociados a las geometrías en el archivo .shp. Los atributos pueden ser información tabular, como nombres de parcelas, áreas, propietarios, etc.

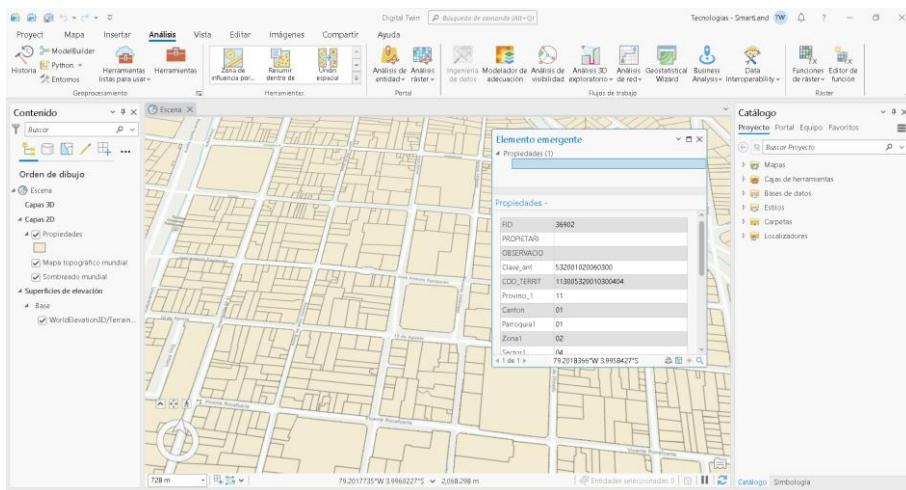
Al asegurarnos de tener estos tres archivos en la misma ubicación y con los nombres correctos, garantizamos que ArcGIS Pro pueda cargar el modelo GIS del catastro de la ciudad

de manera exitosa y que podamos acceder a la geometría y a los atributos de los datos contenidos en el Shapefile para su análisis y visualización en el gemelo digital.

El resultado es una capa 2D que representa los datos del modelo GIS, permitiendo visualizar cada parcela con sus atributos correspondientes. Se puede apreciar esta representación en la Figura 76.

Figura 76

Representación 2D del Modelo GIS con Parcelas y Atributos



Durante la validación de carga de un modelo BIM, se encontró la ausencia del modelo CAD de algunos edificios de la ciudad, lo que dificultó su representación en el gemelo digital. Sin embargo, es relevante destacar que ArcGIS Pro, según la documentación oficial de Esri, permite representar modelos BIM como capas utilizando el estándar IFC. Además, se identificó que algunas herramientas CAD, como Revit, ya ofrecen la capacidad de exportar modelos en dicho formato.

Comentado [LEOR40]: Cita: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/data/revit/what-is-bim-data-.htm#:~:text=El%20modelado%20de%20informaci%C3%B3n%20de%20reteras%2C%20vias%20f%C3%ADreas%20y%20puentes.>

Comentado [LEOR41]: Imagen de Revit: <https://www.autodesk.es/support/technical/article/caas/sfdarticles/sfdarticles/ESP/How-to-set-template-for-IFC-import-Revit.html>

Comentado [LEOR42]: Imagen: <https://resource.esriuk.com/blog/building-scene-layers-the-key-to-integrating-bim-and-gis/>

Figura 77

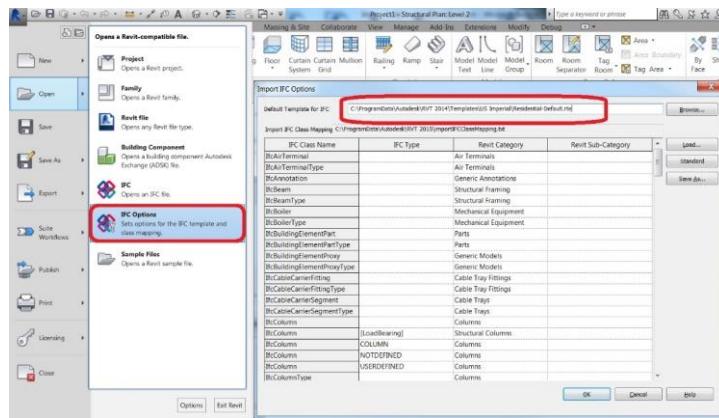
Representación de modelos BIM como Capas IFC en ArcGIS Pro



Nota. Tomado de *Building Scene Layers the key to integrating BIM and GIS* por (Satchell, 2020).

Figura 78

Interfaz de Revit muestra la opción para el uso del estándar IFC



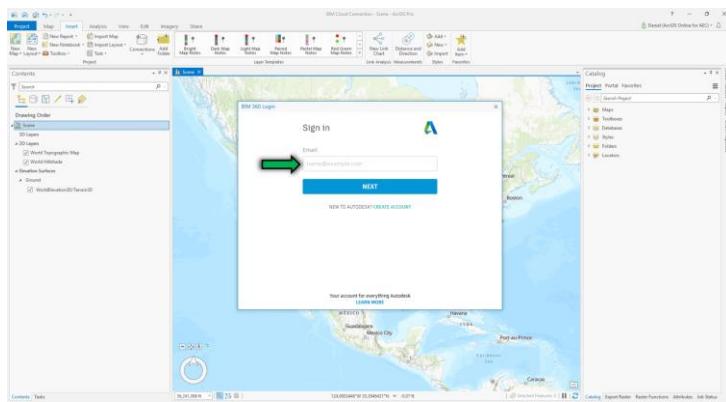
Nota. Tomado de ¿Qué son los datos BIM? por (Esri, s/f-c).

ArcGIS Pro no se limita únicamente al formato IFC para la representación de modelos BIM, sino que también ofrece compatibilidad con una variedad de otros formatos CAD, como .dwg, .dxf, .dgn, .rvt, entre otros. Esta amplia gama de formatos soportados amplía las opciones para importar y visualizar datos geoespaciales dentro del proyecto, brindando mayor flexibilidad en la integración de información geoespacial.

Además, cabe destacar la colaboración entre Esri y la empresa AutoDesk. Esta asociación permite una integración más estrecha entre las herramientas ofrecidas por ambas compañías. Los usuarios pueden aprovechar conjuntamente las capacidades y funcionalidades de las herramientas AutoDesk y Esri, lo que mejora significativamente la experiencia de trabajo y la interoperabilidad de datos.

Figura 79

Interfaz de ArcGIS en la que se permite la autenticación de usuario con una cuenta de Autodesk

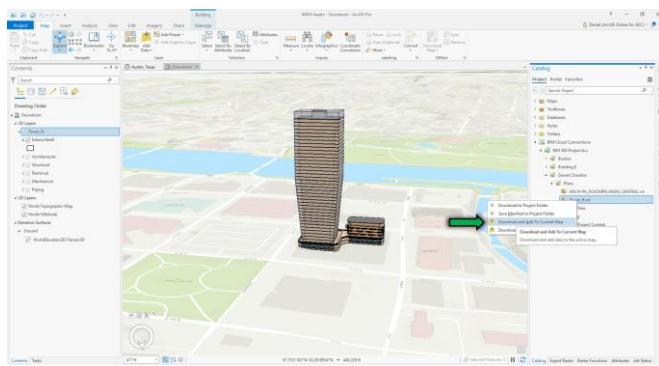


Comentado [LEOR43]: Imagen: <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/arcgis-pro/3d-gis/how-to-connect-arcgis-pro-to-autodesk-bim-360/>

Nota. Tomado de *How to Connect ArcGIS Pro to Autodesk BIM 360* por (Chantlos & Chantlos, 2020).

Figura 80

Modelo BIM importado desde Autodesk hacia ArcGisPro

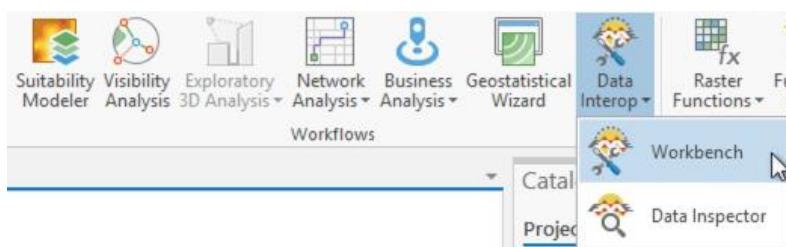


Nota. Tomado de *How to Connect ArcGIS Pro to Autodesk BIM 360* por (Chantlos & Chantlos, 2020).

Finalmente, ArcGIS Pro incorpora la herramienta FME Safe Software, la cual desempeña un papel fundamental al permitir la creación de flujos de trabajo para la transformación de datos entre diferentes formatos. Gracias a esta funcionalidad, los datos pueden ser visualizados con facilidad dentro de la herramienta, mejorando así la interoperabilidad y el análisis de información en el gemelo digital.

Figura 81

Herramientas en la plataforma de ArcGis Pro



Nota. Tomado de *Differences between FME Desktop/Server and ArcGIS Server/Data Interoperability Extension* por (Safe Softwar, 2020).

6.1.3. Análisis de Resultados

El análisis revela que la herramienta ArcGIS Pro integra exitosamente las capas GIS y BIM en el gemelo digital, cumpliendo con el objetivo de este trabajo. La elección de esta herramienta fue el resultado de la previa definición del modelo operativo, donde se identificó la necesidad de una solución que permita la integración de capas GIS y BIM, incluyendo una comunicación fluida entre las distintas herramientas.

La validación ha demostrado la posibilidad de representar diversas capas GIS y BIM utilizando estándares de interoperabilidad. Al adoptar estos formatos estándar, logramos representar de manera precisa los datos de los modelos GIS y BIM, evitando pérdida de información al trabajar con diferentes modelos.

6.2. Precisión Espacial del Gemelo Digital

La validación de precisión espacial se centra en la evaluación de la precisión de la ubicación de las entidades o capas representadas en el gemelo digital. En esta sección, se

Comentado [LEOR44]: Imagen:
<https://community.safe.com/s/article/differences-between-fme-desktopserver-and-arcgis-s>

describirá la metodología utilizada para llevar a cabo la evaluación y se presentarán los resultados y análisis correspondientes.

El objetivo principal de esta evaluación es determinar qué tan precisa es la representación espacial del gemelo digital en comparación con el sistema de catastro existente. Se analizará la coincidencia entre las ubicaciones de las entidades en el gemelo digital y las ubicaciones registradas en el sistema de catastro, utilizando métricas de precisión espacial.

6.2.1. Metodología de Validación

Para evaluar la precisión espacial del gemelo digital, se realizó una metodología, la cual incluye los siguientes pasos:

- 1. Definición de puntos de referencia:** Se seleccionó un conjunto de puntos de referencia reconocidos en el área de estudio. Estos puntos fueron elegidos por su ubicación establecida y reconocible, como esquinas de calles, monumentos o edificios bien conocidos. Estos puntos de referencia sirvieron como base para comparar la ubicación de las entidades en el gemelo digital.
- 2. Obtención de coordenadas de referencia:** Las coordenadas de referencia de cada punto de referencia se obtuvieron utilizando Google Maps u otras fuentes confiables de información geográfica. Se registraron las coordenadas de latitud y longitud para cada punto de referencia seleccionado.
- 3. Localización de los puntos de referencia en el gemelo digital:** Utilizando ArcGIS Pro, se ubicaron los puntos de referencia en el gemelo digital de la ciudad. Se utilizó la herramienta de búsqueda o navegación del gemelo digital para encontrar las ubicaciones correspondientes a los puntos de referencia seleccionados y copiar sus coordenadas.
- 4. Comparación de coordenadas:** Se compararon las coordenadas de referencia obtenidas en el paso 2 con las coordenadas correspondientes a los puntos de referencia en el gemelo digital. Se calculó la diferencia entre las coordenadas de referencia y las coordenadas del gemelo digital para cada punto de referencia.

- 5. Medición de parcelas:** Utilizando la herramienta de medir disponible en ArcGIS Pro, se realizaron las mediciones de longitud y área de las parcelas en el gemelo digital. Se tomaron medidas precisas directamente en el gemelo digital, registrando los resultados obtenidos.
- 6. Análisis de resultados:** Se evaluó la precisión espacial del gemelo digital analizando las diferencias entre las coordenadas de referencia y las coordenadas del gemelo digital. Se determinó la magnitud de las diferencias y se examinó si estas diferencias eran aceptables en términos de la precisión requerida para el proyecto.
- 7. Conclusiones:** Con base en los resultados de la comparación y análisis de las coordenadas, se llegó a conclusiones sobre la precisión espacial del gemelo digital. Se evaluó si el gemelo digital cumplía con los estándares de precisión requeridos y si era adecuado para su uso en la representación de la ubicación de las entidades en el área de estudio.

6.2.2. Puntos de referencia

El punto de referencia seleccionado como ejemplo para la evaluación de la precisión espacial del gemelo digital es el Parque Central de Loja. El Parque Central es un lugar reconocido y ampliamente conocido en la ciudad, lo que lo convierte en un punto de referencia confiable y estable para comparar la ubicación de las entidades representadas en el gemelo digital.

Para llevar a cabo la comparación, se tomaron las coordenadas geográficas del Parque Central proporcionadas por fuentes confiables, como Google Maps o equipos de posicionamiento global (GPS, siglas en inglés). Estas coordenadas se introdujeron en ArcGIS Pro para identificar y ubicar de manera precisa el Parque Central en el gemelo digital.

A continuación, se realizó una verificación visual y espacial de las entidades representadas en el gemelo digital en relación con la ubicación del Parque Central. Se compararon las coordenadas espaciales de las entidades con las coordenadas del Parque

Central, permitiendo identificar cualquier desviación o discrepancia en la ubicación. Ver la Tabla 9.

Tabla 9

Comparación de Coordenadas de Referencia

Entidad/Terreno	Coordenadas de referencia	Coordenadas del gemelo digital	Diferencia de coordenadas
Parque Central	Latitud: -3.9965141191397793	Latitud: -3.9967269	Latitud: ≈ 0.00000075
de Loja	Longitud: -79.20160414037478	Longitud: -79.2015592	Longitud: ≈ 0.00000001
Municipio de Loja	Latitud: -3.996130 Longitud: -79.201989	Latitud: -3.9961128 Longitud: -79.2018891	Latitud: ≈ 0.0000172 Longitud: ≈ 0.0001009

Nota. Las coordenadas de referencia son tomadas Google Maps (Google, s/f).

6.2.3. Medición de Parcelas

Dentro del proceso de evaluación de la precisión espacial del gemelo digital, se utilizó la herramienta de medición disponible en ArcGIS para realizar la medición de las parcelas. Esta herramienta permite tomar medidas precisas de longitud y área directamente en el gemelo digital. Durante la medición, se seleccionaron varias parcelas de muestra, representativas de diferentes tamaños y formas en el área de estudio. Se realizaron las mediciones correspondientes y se compararon con el área real de los terrenos según el sistema de catastro existente. Los resultados de estas mediciones se presentan en la Tabla 10, donde se muestran las medidas obtenidas en el gemelo digital y se indicará si existe concordancia con el área real del terreno.

Tabla 10

Resultados de Medición de Parcelas en el Gemelo Digital

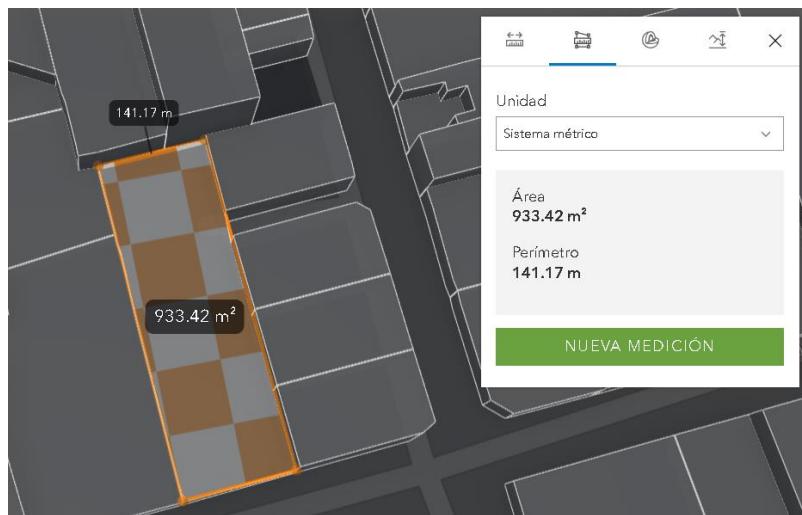
Entidad/Terreno	Área en el Sistema Existente	Área en el gemelo digital	Diferencia de Áreas
Gobernación de Loja	993.4 m ²	933.42 m ²	≈ 0.02 m ²

Municipio de Loja	4023.9 m ²	3,577.57 m ²	≈ 446.33 m ²
----------------------	-----------------------	-------------------------	---------------------------------

A continuación, se presentan imágenes que permiten una mejor visualización y comprensión del proceso de medición de las parcelas en el gemelo digital, proporcionando evidencia visual de la precisión espacial lograda. La Figura 82 muestra la representación de la parcela en el gemelo digital, resaltando el área medida y proporcionando un elemento emergente que muestra las dimensiones obtenidas en el sistema métrico durante el proceso de medición. Esta imagen ilustrativa brinda una representación clara de cómo se llevó a cabo la medición en el gemelo digital.

Figura 82

Parcela medida en el gemelo digital



Nota. La imagen muestra la representación gráfica de una parcela en el gemelo digital que corresponde a la gobernación de Loja, con el área medida y resaltada. El elemento emergente proporciona las dimensiones obtenidas durante el proceso de medición en el sistema métrico, brindando información precisa sobre el tamaño de la parcela en el gemelo digital.

6.2.4. Análisis de resultados

La diferencia entre las coordenadas de Google Maps y las coordenadas del gemelo digital del Parque Central es insignificante, lo que indica una alta precisión espacial del gemelo digital en la representación de la ubicación de este punto de referencia.

En la Figura 83 se muestra una captura de Google Maps del Parque Central de Loja, y en la Figura 84 la representación del Parque Central de Loja en el gemelo digital.

Figura 83

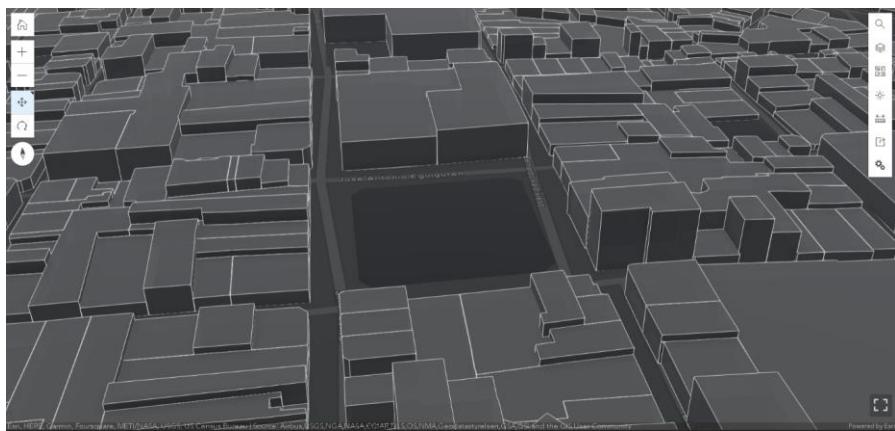
Parque Central de Loja en Google Maps



Nota. La figura muestra una captura de pantalla de Google Maps que proporciona una referencia visual del Parque Central de Loja. Para acceder a la ubicación en Google Maps, sigue el siguiente enlace: <https://goo.gl/maps/274Ufe69KqMKbBHv9>

Figura 84

Parque Central de Loja en el Gemelo Digital



Nota. La figura muestra una representación visual del Parque Central de Loja dentro del entorno del gemelo digital, proporciona una vista más detallada y en 3D de la ubicación.

Los resultados obtenidos en la medición de parcelas en el gemelo digital revelaron que la mayoría de las medidas de las parcelas coincidían de manera precisa con las áreas registradas en el sistema de catastro existente, con un margen de error de solo centímetros. Sin embargo, se identificó una discrepancia significativa en una de las parcelas, donde la medida obtenida en el gemelo digital difería en más de 400 metros cuadrados del área registrada en el sistema de catastro.

Esta discrepancia puede deberse a varias razones. Es posible que el shapefile no refleje de manera precisa las áreas reales de las parcelas en la ciudad de Loja. Otra posibilidad es que la información en el sistema de catastro existente esté desactualizada o contenga errores en el registro de las áreas de las parcelas.

Es importante tener en cuenta que este hallazgo resalta la importancia de mantener una base de datos catastrales actualizada y precisa, así como la necesidad de una constante retroalimentación y actualización de la información en el gemelo digital.

La validación de la precisión espacial del gemelo digital permitió evaluar la exactitud y consistencia de la ubicación de las entidades representadas en comparación con los datos del sistema de catastro existente.

6.3. Precisión de Información del Gemelo Digital

En esta sección, se llevará a cabo la evaluación de la precisión atributiva del gemelo digital, centrándose en la consistencia y calidad de los atributos de las entidades representadas. El objetivo es verificar si la información atributiva del gemelo digital coincide con los datos proporcionados por el sistema de catastro existente.

6.3.1. Metodología de Evaluación

Para llevar a cabo la metodología de evaluación de la precisión atributiva del gemelo digital, se seguirán los siguientes pasos:

- 1. Definición de atributos clave:** Se identificarán los atributos clave que serán objeto de evaluación. Estos atributos deben ser representativos y relevantes para la gestión y administración de los terrenos en el contexto del sistema de catastro.
- 2. Comparación de datos:** Se procederá a comparar los datos atributivos del gemelo digital con los datos proporcionados por el sistema de catastro existente. Para ello, se utilizará una muestra representativa de entidades, seleccionadas aleatoriamente o siguiendo un criterio específico, según corresponda.
- 3. Análisis de consistencia y calidad:** Se evaluará la consistencia y calidad de los atributos mediante la revisión detallada de la coincidencia de datos entre el gemelo digital y el sistema de catastro existente. Se prestará especial atención a posibles discrepancias, errores o inconsistencias en los valores de los atributos.
- 4. Interpretación de resultados:** Se interpretarán los resultados obtenidos de la evaluación de la precisión atributiva. Se analizarán las discrepancias identificadas y se determinará si existen patrones o tendencias en los errores encontrados. También se evaluará la calidad de los datos atributivos en términos de completitud, actualización y fiabilidad.

5. Conclusiones de la precisión atributiva: Se extraerán conclusiones sobre la precisión atributiva del gemelo digital, considerando los resultados de la comparación y análisis realizados. Se discutirán los hallazgos encontrados y se proporcionará una evaluación general de la capacidad del gemelo digital para representar con precisión los atributos de las entidades en relación con el sistema de catastro existente.

6.3.2. Muestra Representativa de Entidades

La muestra representativa de entidades permite obtener una visión general de la consistencia atributiva entre el gemelo digital y el sistema de catastro existente. Cada entidad se ha evaluado cuidadosamente, verificando si los atributos coinciden o no. Esta información es fundamental para determinar la calidad y precisión de los datos atributivos del gemelo digital y su correspondencia con la realidad del sistema de catastro.

La muestra representativa de entidades ha sido seleccionada de forma aleatoria y está compuesta por diversas propiedades ubicadas en diferentes zonas de la ciudad. Cada entidad de la muestra ha sido identificada con un código único (clave catastral) para facilitar su seguimiento y comparación entre el gemelo digital y el sistema de catastro existente.

Los atributos que se han considerado para la evaluación de la consistencia atributiva son los siguientes:

- Propietario
- Número de cédula
- Observación
- Pisos
- Área de construcción
- Clave Catastral
- Provincia
- Cantón
- Parroquia

- Zona
- Sector
- Manzana
- Lote

Estos atributos son de vital importancia para la gestión de terrenos y proporcionan información relevante sobre la propiedad y características de cada entidad. A continuación, se presenta la Tabla 11 con la muestra representativa de entidades y la verificación de la coincidencia de los atributos entre el gemelo digital y el sistema de catastro existente:

Tabla 11

Comparación de Atributos entre el Gemelo Digital y el Sistema de Catastro Existente

Identificador	Existe Coincidencia	Atributos Diferentes
1101010204004004	Si	Ninguno
1101010204004004	Si	Niguno
1101010204004004	Si	Ninguno
1101010204004004	Si	Niguno
1101010204004004	Si	Ninguno
1101010204004004	Si	Niguno

Nota. En esta tabla se muestra un identificador para cada entidad, indicando si existe coincidencia o si hay atributos diferentes entre el gemelo digital y el sistema de catastro existente. Se evitan mostrar los atributos específicos para preservar la privacidad de los datos personales. Esta tabla permitirá tener una visión general sobre la consistencia atributiva entre ambas fuentes de datos.

La información obtenida a partir de esta evaluación permitirá identificar discrepancias o inconsistencias en los atributos de las entidades, así como analizar la calidad de los datos atributivos del gemelo digital en comparación con el sistema de catastro existente.

6.3.3. Análisis de Resultados

Después de realizar la comparación, se encontró que todas las entidades evaluadas presentaron una coincidencia en los atributos. Esto significa que los datos proporcionados

por el gemelo digital concuerdan completamente con los registros del sistema de catastro existente. No se identificaron discrepancias ni diferencias en los atributos evaluados.

Esta consistencia en los datos es de gran importancia, ya que garantiza la confiabilidad y exactitud de la información representada en el gemelo digital. Los usuarios pueden confiar en que los atributos de las entidades mostradas en el gemelo digital reflejan fielmente la información contenida en el sistema de catastro existente.

Este resultado refuerza la validez y la calidad del gemelo digital como una herramienta eficiente y precisa para la representación de datos catastrales. Además, brinda confianza a los usuarios y asegura la integridad de la información utilizada en la gestión y toma de decisiones relacionadas con la administración de terrenos y la planificación urbana.

En la Figura 85, se muestra una captura de la cédula catastral de un edificio correspondiente al municipio de Loja en el sistema existente de catastro. Esta captura muestra los atributos asociados a la propiedad, como el propietario, la clave anterior, el código de terreno, la provincia, el cantón, la parroquia, la zona, el sector, la manzana, el lote, el código catastral, el riesgo, la cédula, los pisos y el área de construcción.

Figura 85

Cédula Catastral en el Sistema de Catastro Existente

Loja
i Con honestidad i

INICIO MUNICIPIO SERVICIOS CIUDAD TRANSPARENCIA CASMUL REGENERAR CONTACTO Buscar

CÉDULA CATASTRAL

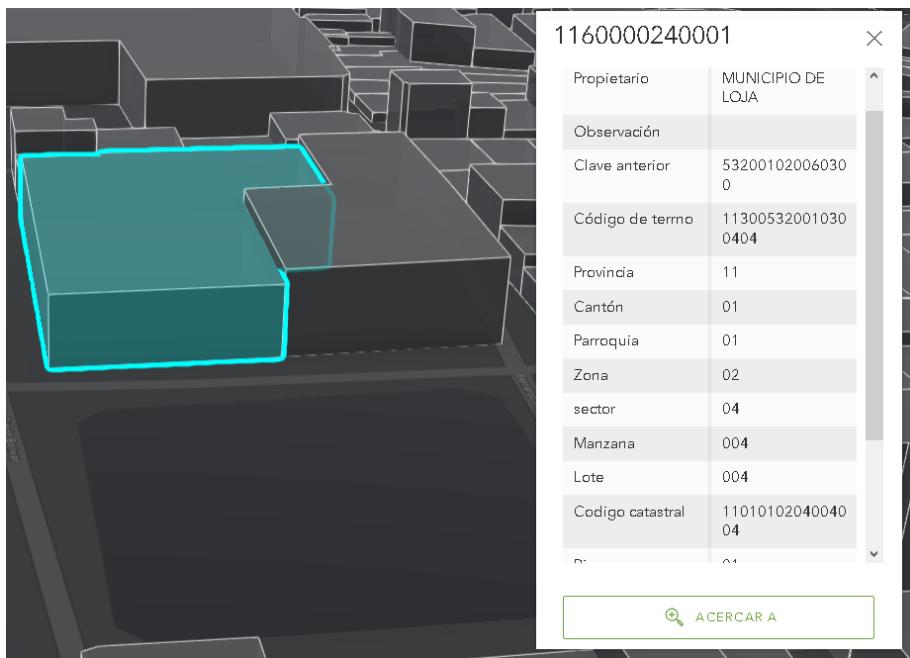
Clave Catastral	11	01	01	02	04	004	004	000	00	000
PROV	CANT	PARR	ZONA	SECT	MANZ	LOT	BLOQ	PISO	UNI	
CONTRIBUYENTE										
Nombres	MUNICIPIO DE LOJA			Apellidos	MUNICIPIO DE LOJA			Cédula	1160000240001	
Ubicación	Eguiguren José Antonio									
Parroquia	EL SAGRARIO									
Barrio	CENTRAL									
Urbanización	N/R									
Manzana	Nº Lote			Nº Casa			13-43			
Fotografía										
Uñideros	Dimensiones (m)			Colindantes						
Norte	Sin definir			Sin definir						
Sur	Sin definir			Sin definir						
Este	Sin definir			Sin definir						
Oeste	Sin definir			Sin definir						
Área total del terreno	8023.9 m ²			Área total de construcción			11869.62 m ²			
CONSTRUCCIONES										
Número Pisos	Año Construcción	Terminada	Equipada	Material Estructura	Material Paredes	Material Cubierta	Acabados Exterior	Estado Edificación		
2	1958	X		HORMIGÓN HIERRO	LADRILLO-BLOQUE	LOSA DE HORMIGÓN	MUY BUENO	BUENO		
5	1958	X		HORMIGÓN HIERRO	LADRILLO-BLOQUE	LOSA DE HORMIGÓN	MUY BUENO	BUENO		
3	1958	X		HORMIGÓN HIERRO	LADRILLO-BLOQUE	LOSA DE HORMIGÓN	MUY BUENO	BUENO		
3	1958	X		HORMIGÓN HIERRO	LADRILLO-BLOQUE	LOSA DE HORMIGÓN	MUY BUENO	BUENO		
4	1958	X		HORMIGÓN HIERRO	LADRILLO-BLOQUE	LOSA DE HORMIGÓN	MUY BUENO	BUENO		

Nota. Esta imagen muestra la cédula catastral de un edificio perteneciente al municipio de Loja en el sistema de catastro existente. Se pueden observar los atributos asociados a la propiedad, como el propietario, la clave anterior, el código de terreno, la provincia, el cantón, la parroquia, la zona, el sector, la manzana, el lote, el código catastral, el riesgo, la cédula, los pisos y el área de construcción.

Por otro lado, en la Figura 86 se muestra la ventana emergente correspondiente al mismo edificio en el gemelo digital. Esta ventana emergente presenta los atributos correspondientes a la propiedad, como el propietario, la clave catastral, la ubicación, los pisos y el área de construcción.

Figura 86

Ventana de Elemento Emergente



Nota. Esta imagen muestra el elemento emergente correspondiente al edificio seleccionado en el gemelo digital. El elemento emergente presenta los atributos de la propiedad, como el propietario, la clave catastral, la ubicación, los pisos y el área de construcción. Esta información se visualiza al hacer clic en la entidad correspondiente en el gemelo digital.

La comparación entre estas dos imágenes permite identificar si existe coincidencia en los atributos entre el gemelo digital y el sistema de catastro existente, así como detectar cualquier diferencia o discrepancia en la información.

En conclusión, la validación de la precisión atributiva del gemelo digital ha revelado que la falta de datos centralizados es un factor determinante en las diferencias observadas entre el shapefile y el GIM. La información catastral dispersa en diferentes fuentes dificulta la actualización y coherencia de los atributos en el gemelo digital.

El gemelo digital refleja de manera precisa la unión de los datos disponibles en el shapefile y el GIM, mostrando una coincidencia en aquellos atributos que pudieron ser comparados. Sin embargo, se evidencia que el GIM cuenta con un mayor volumen de datos y atributos, lo cual indica que se encuentra más actualizado y completo en comparación con el shapefile.

Estos hallazgos destacan la necesidad de establecer un sistema de gestión centralizado y actualizado para la información catastral. La centralización de los datos permitirá una mayor consistencia y coherencia en los atributos del gemelo digital, evitando discrepancias y asegurando la calidad de la información presentada.

Se recomienda a los responsables del catastro y la gestión territorial la implementación de medidas para centralizar y mantener actualizada la información catastral. Esto contribuirá a mejorar la precisión atributiva del gemelo digital y su utilidad en la toma de decisiones y la gestión eficiente del territorio.

Conclusiones

En el desarrollo del gemelo digital para la ciudad de Loja, se implementó un modelo operativo que logró cumplir el objetivo de esta investigación, centrándose en la gestión eficiente de datos urbanos. A continuación, se presentan las principales conclusiones alcanzadas en este estudio:

1. El desarrollo del modelo operativo se logró mediante una exhaustiva investigación de diversos aspectos clave relacionados con la construcción de un gemelo digital de ciudad. Estos aspectos incluyeron la exploración y desarrollo de modelos de datos eficientes y precisos, la creación de modelos semánticos para representar de manera significativa los elementos de la ciudad, la implementación de sistemas digitales avanzados para la gestión de datos y la utilización de modelos tridimensionales para una representación visual y realista. Estos temas fueron abordados y analizados de manera detallada, permitiendo la construcción exitosa de un modelo operativo para el gemelo digital.
2. La implementación de estándares de interoperabilidad ha logrado una integración efectiva entre el modelo semántico y las herramientas GIS y BIM dentro del modelo operativo. Los estándares, como CityGML e IFC, aseguran la compatibilidad de datos espaciales y modelos tridimensionales, facilitando la colaboración entre los componentes del modelo. Como resultado, el gemelo digital puede representar capas GIS y BIM de manera eficiente.
3. La integración de un Data Lake en el núcleo del modelo operativo del gemelo digital, junto con el modelo semántico, ha sido clave para gestionar los datos necesarios en la construcción y actualización del gemelo digital. La presencia del Data Lake garantiza la disponibilidad y accesibilidad de los datos relevantes, permitiendo así una alimentación efectiva del modelo semántico.
4. El proceso de identificación y selección de herramientas se simplifica al enfocarse en aquellas que sean necesarias para representar cada componente del modelo operativo y que sean compatibles con estándares de interoperabilidad. Esta selección

aseguró que las diferentes herramientas del modelo operativo puedan comunicarse y compartir datos de manera efectiva, optimizando así la integración y el flujo de información en el sistema. Al utilizar herramientas compatibles, se evitan obstáculos y se promueve la eficiencia en la gestión y uso de los datos en el gemelo digital.

5. El conjunto de herramientas permitió mejorar el modelado en LoD1 de activos, procesos y actividades de una ciudad, tomando como base datos reales del catastro de la ciudad de Loja.
6. La capacidad del gemelo digital para cargar y visualizar correctamente las capas GIS y BIM, respalda la sostenibilidad del modelo operativo al garantizar la interoperabilidad y compatibilidad con estándares geoespaciales y de modelado de construcción.
7. La validación de la precisión espacial y la integridad de la información real de un catastro fortalece la confiabilidad del gemelo digital. Gracias a esta integración precisa, los usuarios pueden interactuar de manera efectiva con la información geoespacial y explorar los modelos tridimensionales de activos y construcciones de la ciudad.

Recomendaciones

En base al trabajo de titulación realizado, se presentan a continuación las siguientes recomendaciones para mejorar y optimizar el desarrollo y funcionamiento de un gemelo digital de ciudad:

1. Al realizar la investigación sobre los componentes necesarios para el modelo operativo del gemelo digital, se debe tener en cuenta las características y requerimientos específicos de la ciudad. Además, se sugiere adaptar estos componentes en función de los datos disponibles, asegurándose de recopilar y analizar rigurosamente la información necesaria para respaldar la construcción y actualización del gemelo digital.
2. Se recomienda utilizar formatos estándar reconocidos por la comunidad y su campo de aplicación, como GeoJSON, IFC, CityJSON y CityGML, para asegurar la interoperabilidad y compatibilidad con otras herramientas y sistemas. Al utilizar formatos estándar, se evita la pérdida de datos y se promueve una integración eficiente y efectiva en el desarrollo y gestión del gemelo digital.
3. Se recomienda incluir el Data Lake y el Modelo Semántico como componentes fundamentales en el modelo operativo del gemelo digital para un eficiente manejo y gestión de datos.
4. Para asegurar la construcción exitosa del gemelo digital, es fundamental definir un modelo operativo adaptado a los datos disponibles y a los requerimientos específicos de la ciudad. Esto permitirá identificar las herramientas necesarias y adecuadas para su desarrollo.
5. Se debe seleccionar un conjunto de herramientas que permita exportar e importar datos en formatos estándar para garantizar la interoperabilidad y colaboración con otras plataformas. En caso de requerir conversiones de formatos, se sugiere considerar el uso de FME de Safe Software, ya que facilita la conversión de datos y asegura la compatibilidad, maximizando la eficiencia del gemelo digital.

6. Es fundamental establecer un plan integral para la generación y recolección de datos desde el inicio del proyecto de gemelo digital. Esto asegurará la disponibilidad de datos históricos que podrán ser utilizados para realizar simulaciones, análisis y toma de decisiones en el futuro.
7. Se recomienda implementar mecanismos para la actualización y mantenimiento periódico de los datos, garantizando la calidad y relevancia de la información en el gemelo digital a lo largo del tiempo. La generación y recolección constante de datos permitirá que el gemelo digital sea una herramienta cada vez más efectiva y útil para la gestión urbana y la planificación de la ciudad.
8. Considerar la posibilidad de integrar el gemelo digital con otras plataformas y sistemas utilizados en la administración de la ciudad, como sistemas de gestión del territorio, sistemas de información geográfica y sistemas de administración de activos. Esto permitirá una mejor coordinación y colaboración entre diferentes entidades y departamentos involucrados en la gestión y planificación urbana.

Referencias

- Adobe. (2021, abril 19). *Conectar a Azure Data Lake Storage Gen2 y Blob Storage*.
<https://experienceleague.adobe.com/docs/experience-platform/sources/ui-tutorials/create/cloud-storage/adls-gen2.html?lang=es>
- Airaksinen, E., Bergstrom, M., Heinonen, H., Kaisla, K., Lahti, K., & Suomisto, J. (2019). The kalasatama digital twins project. *City of Helsinki: Helsinki, Finland*.
- Anand, A., Murali Prabhu, V., & Technology Solutions, C. (2019). *The 2020 Customer Experience*.
- ArcGIS Pro. (2021). *Building scene layer—ArcGIS Pro | Documentation*.
<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/mapping/layer-properties/building-scene-layer-in-arcgis-pro.htm>
- ArcGIS Resources. (s/f). *Aspectos clave de SIG*.
- Argota Sánchez-Vaquerizo, J. (2021). Getting Real: The Challenge of Building and Validating a Large-Scale Digital Twin of Barcelona's Traffic with Empirical Data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(1), 24. <https://doi.org/10.3390/ijgi11010024>
- Artaker CAD Systems. (2021). *Revit 2021 – Neuerungen und Vorteile | Artaker CAD Systems*. <https://www.artaker.com/de/blogartikel/blog.revit-2021.html>
- Aslett, M., & Kingstone, S. (2017). *REPORT REPRINT Dawn of a new era: Why systems of engagement require systems of intelligence*.
- Autodesk. (2021, abril 6). *Crear una familia de componentes de Revit | Documentación de Revit 2022 | Autodesk Knowledge Network*.
<https://help.autodesk.com/view/RVT/2022/ESP/?guid=GUID-6708CFD6-0AD7-461F-ADE8-6527423EC895>
- Autodesk. (2023, enero). *Software de modelado de información de construcción (BIM) | Autodesk*. <https://latinoamerica.autodesk.com/products/revit/overview?term=1-YEAR&tab=subscription&plc=RVT>

Bagheri, N. (2023). Using mixed methods research with Geographic Information Systems (GIS). En *International Encyclopedia of Education(Fourth Edition)* (pp. 645–654). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818630-5.11065-6>

Biljecki, F., Stoter, J., Ledoux, H., Zlatanova, S., & Çöltekin, A. (2015). Applications of 3D City Models: State of the Art Review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4), 2842–2889. <https://doi.org/10.3390/ijgi4042842>

BIMForum. (2023). *Level of Development (LOD)Specification 2022 Supplement*. https://bimforum.org/resource/lod_level-of-development-lodsSpecification-2022-supplement/

Bocconcino, M. M., & others. (2021). Intelligent Information Systems for the representation and management of the city. Urban survey and design for resilience. *C. Sposito (a cura di). Possible and Preferable Scenarios of a Sustainable Future Towards, 2030*, 90–107.

Borrmann, A., Beetz, J., Koch, C., Liebich, T., & Muhic, S. (2018). Industry Foundation Classes: A Standardized Data Model for the Vendor-Neutral Exchange of Digital Building Models. En *Building Information Modeling* (pp. 81–126). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92862-3_5

Botín-Sanabria, D. M., Miñaita, A.-S., Peimbert-García, R. E., Ramírez-Moreno, M. A., Ramírez-Mendoza, R. A., & Lozoya-Santos, J. de J. (2022). Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review. *Remote Sensing*, 14(6), 1335. <https://doi.org/10.3390/rs14061335>

Centre, E. C.-J. R. (2019). *The future of cities*. <https://urban.jrc.ec.europa.eu/thefutureofcities/what-is-a-city#the-chapter>

Chantlos, D., & Chantlos, D. (2020). How to connect ArcGIS Pro to Autodesk BIM 360. *ArcGIS Blog*. <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/arcgis-pro/3d-gis/how-to-connect-arcgis-pro-to-autodesk-bim-360/>

Cruz, R. J. M. da, & Tonin, L. A. (2022). Systematic review of the literature on Digital Twin: a discussion of contributions and a framework proposal. *Gestão & Produção*, 29. <https://doi.org/10.1590/1806-9649-2022v29e9621>

Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas. (2018). 2018 World Urbanization Prospects: 2.5 billion more people will be living in cities by 2050. *Naciones Unidas*.

Escobar Villanueva, J. (2020). *Contribuciones metodológicas para la obtención de información altimétrica requerida en la evaluación local de amenazas por inundaciones a partir de nuevas tecnologías geoespaciales* [Universidad Politécnica de Madrid]. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.58112>

Esri. (s/f-a). *Crear aplicaciones web con poco o ningún código | ArcGIS Experience Builder*. <https://www.esri.es/es-es/arcgis/productos/arcgis-experience-builder/overview>

Esri. (s/f-b). *Open Data*.

Esri. (s/f-c). *¿Qué son los datos BIM?—ArcGIS Pro | Documentación*. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/data/revit/what-is-bim-data-.htm#:~:text=El%20modelado%20de%20informaci%C3%B3n%20de,carreteras%2C%20v%C3%A9rtices%20y%20puentes>

Esri. (2019). *Understanding ArcGIS Pro*.

Esri. (2021). *Software de representación Cartográfica SIG 2D, 3D y 4D | ArcGIS Pro*. <https://www.esri.com/es-es/arcgis/products/arcgis-pro/overview>

Esri. (2022). *Cloud-Based Mapping Software*. <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-online/overview>

Foley, J. D., Van, F. D., van Dam, A., Feiner, S. K., & Hughes, J. F. (2002). *Computer graphics: principles and practice: Vol. 2nd ed.* Addison-Wesley Professional.

GeOilEnergy. (s/f). *FME* | GeOilEnergy. <https://geoilenergy.com/es/software/geosoluciones/fme>

Google. (s/f). *Google Maps*. <https://www.google.es/maps>

Grieves, M. W. (2005). Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises. *International Journal of Product Development*, 2(1/2), 71. <https://doi.org/10.1504/IJPD.2005.006669>

Grübel, J., Thrash, T., Aguilar, L., Gath-Morad, M., Chatain, J., Sumner, R. W., Hölscher, C., & Schinazi, V. R. (2022). The Hitchhiker's Guide to Fused Twins: A Review of Access to Digital Twins In Situ in Smart Cities. *Remote Sensing*, 14(13), 3095. <https://doi.org/10.3390/rs14133095>

Homes England. (s/f). *Land Hub.*
<https://experience.arcgis.com/experience/c6f225e5589f498fa458f1f7a8bbcb2>

Hu, W., Lim, K. Y. H., & Cai, Y. (2022). Digital Twin and Industry 4.0 Enablers in Building and Construction: A Survey. *Buildings*, 12(11), 2004. <https://doi.org/10.3390/buildings12112004>

Javier García. (2020, noviembre 17). *Análisis avanzado de simulación de tráfico en Infraworks | Autodesk University.* <https://www.autodesk.com/autodesk-university/es/class/Analisis-avanzado-de-simulacion-de-trafico-en-Infraworks-2020>

Jovanović, D., Milovanov, S., Ruskovski, I., Govendarica, M., Sladić, D., Radulović, A., & Pajić, V. (2020). Building Virtual 3D City Model for Smart Cities Applications: A Case Study on Campus Area of the University of Novi Sad. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(8), 476. <https://doi.org/10.3390/ijgi9080476>

Khosakitchalert, C., Yabuki, N., & Fukuda, T. (2020). Development of BIM-based quantity takeoff for light-gauge steel wall framing systems. *Journal of Information Technology in Construction*, 25, 522–544. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2020.030>

Kim, B.-Y., & Son, Y.-H. (2014). The Current Status of BIM in the Field of Landscape Architecture and the Issues on the Adoption of LIM. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*, 42(3), 50–63. <https://doi.org/10.9715/KILA.2014.42.3.050>

Kleemann, J., Zamora, C., Villacis-Chiluisa, A. B., Cuenca, P., Koo, H., Noh, J. K., Fürst, C., & Thiel, M. (2022). Deforestation in Continental Ecuador with a Focus on Protected Areas. *Land*, 11(2), 268. <https://doi.org/10.3390/land11020268>

Kolbe, T. H., Kutzner, T., Smyth, C. S., Nagel, C., Roensdorf, C., & Heazel, C. (2021). *OGC City Geography Markup Language (CityGML) Part 1: Conceptual Model Standard.*

Konde, A., Tauscher, H., Biljecki, F., & Crawford, J. (2018). FLOOR PLANS IN CITYGML. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-4/W6, 25–32. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-4-W6-25-2018>

Lazer, D., Kennedy, R., King, G., & Vespignani, A. (2014). The Parable of Google Flu: Traps in Big Data Analysis. *Science*, 343(6176), 1203–1205. <https://doi.org/10.1126/science.1248506>

Lin, G., Price, J. D., & Srinivas, T. K. (1998). Network information models and onevision® architecture. *Bell Labs Technical Journal*, 3(4), 208–221. <https://doi.org/10.1002/bltj.2137>

Liu, X., Wang, X., Wright, G., Cheng, J., Li, X., & Liu, R. (2017). A State-of-the-Art Review on the Integration of Building Information Modeling (BIM) and Geographic Information System (GIS). *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(2), 53. <https://doi.org/10.3390/ijgi6020053>

Löwner, M.-O., Gröger, G., Benner, J., Biljecki, F., & Nagel, C. (2016). PROPOSAL FOR A NEW LOD AND MULTI-REPRESENTATION CONCEPT FOR CITYGML. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-2/W1, 3–12. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W1-3-2016>

Manville, C., Cochrane, G., Jonathan, C., Millard, J., Pederson, J. K., Thaarup, R. K., WiK, A. L., & WiK, M. W. (2014). *Mapping smart cities in the EU*.

McQueen, B. (2017). *Big Data Analytics for Connected Vehicles and Smart Cities*.

Microsoft Docs. (2021, mayo 29). *Cargar datos en Azure Data Lake Storage Gen2 con Azure Data Factory*. <https://github.com/MicrosoftDocs/azure-docs.es-es/blob/master/articles/data-factory/load-azure-data-lake-storage-gen2.md>

Microsoft Learn. (2020, abril 2). *Introducción a Azure Data Lake Storage Gen2 - Azure Storage*.

Miriam Berhane Russom. (2021). Smart Cities Ontology for Digital Twins. *Internet of Things Blog*.

Mora, L., & Deakin, M. (2019). The first two decades of research on smart city development. En *Untangling Smart Cities* (pp. 57–87). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815477-9.00003-7>

Nakamura Noriyuki. (2017). *Fujitsu's Leading Platform for Digital Business*. 53.

Nations, U. (s/f). *Más de la mitad de la población vive en áreas urbanas y seguirá creciendo | Naciones Unidas*. <https://www.un.org/es/desa/world-urbanization-prospects-2014>

Nazir, S. (2020). How digital twins enable intelligent cities. En *Huawei Enterprise*.

Ontiveros, E., Vizcaíno, D., & Sabater, V. L. (2016). *Las ciudades del futuro: inteligentes, digitales y sostenibles*. Ariel Madrid.

Patrão, C., Moura, P., & Almeida, A. T. de. (2020). Review of Smart City Assessment Tools. *Smart Cities*, 3(4), 1117–1132. <https://doi.org/10.3390/smartcities3040055>

Qian, C., Liu, X., Ripley, C., Qian, M., Liang, F., & Yu, W. (2022). Digital Twin—Cyber Replica of Physical Things: Architecture, Applications and Future Research Directions. *Future Internet*, 14(2), 64. <https://doi.org/10.3390/fi14020064>

Real Academia Española. (2023). *Ciudad*. Diccionario de la lengua española. <https://dle.rae.es/contenido/cita>

Runge, J., & Zmeureanu, R. (2021). A Review of Deep Learning Techniques for Forecasting Energy Use in Buildings. *Energies*, 14(3), 608. <https://doi.org/10.3390/en14030608>

Saeed, Z., Mancini, F., Glusac, T., & Izadpanahi, P. (2022). Future City, Digital Twinning and the Urban Realm: A Systematic Literature Review. *Buildings*, 12(5), 685. <https://doi.org/10.3390/buildings12050685>

Safe Software. (2020). *FME community*. <https://community.safe.com/s/article/differences-between-fme-desktopserver-and-arcgis-s>

Satchell, P. (2020). *Building scene layers: The key to integrating BIM and GIS - Resource Centre | ESRI UK & Ireland*. <https://resource.esriuk.com/blog/building-scene-layers-the-key-to-integrating-bim-and-gis/>

Schleich, B., Anwer, N., Mathieu, L., & Wartzack, S. (2017). Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals*, 66(1), 141–144. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.040>

Shahat, E., Hyun, C. T., & Yeom, C. (2021a). City digital twin potentials: A review and research agenda. *Sustainability*, 13(6), 3386.

Shahat, E., Hyun, C. T., & Yeom, C. (2021b). City digital twin potentials: A review and research agenda. *Sustainability*, 13(6), 3386.

Shahzad, M., Shafiq, M. T., Douglas, D., & Kassem, M. (2022). Digital Twins in Built Environments: An Investigation of the Characteristics, Applications, and Challenges. *Buildings*, 12(2), 120. <https://doi.org/10.3390/buildings12020120>

Shi, W., Goodchild, M. F., Batty, M., Kwan, M.-P., & Zhang, A. (2021a). *Urban Informatics* (W. Shi, M. F. Goodchild, M. Batty, M.-P. Kwan, & A. Zhang, Eds.). Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-8983-6>

Shi, W., Goodchild, M. F., Batty, M., Kwan, M.-P., & Zhang, A. (2021b). *Urban Informatics* (W. Shi, M. F. Goodchild, M. Batty, M.-P. Kwan, & A. Zhang, Eds.). Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-8983-6>

Smith, M. (2016). The Future of Urban Science. *Urban Science*, 1(1), 1. <https://doi.org/10.3390/urbansci1010001>

Souza, L., & Bueno, C. (2022). City Information Modelling as a support decision tool for planning and management of cities: A systematic literature review and bibliometric analysis. *Building and Environment*, 207, 108403. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108403>

Standard, I. S. O. (2010). ISO 29481-1: 2010 (E), Building Information Modeling Information Delivery Manual Part 1: Methodology and Format (2010). *Google Sch.*

Stefan Boeykens. (2022, mayo 15). *What is LOD, or level of detail?* <https://www.engineering.com/story/what-is-lod-or-level-of-detail>

Steindl, G., Stagl, M., Kasper, L., Kastner, W., & Hofmann, R. (2020). Generic Digital Twin Architecture for Industrial Energy Systems. *Applied Sciences*, 10(24), 8903. <https://doi.org/10.3390/app10248903>

Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(9–12), 3563–3576. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>

Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405–2415. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>

Tchana, Y., Duccellier, G., & Remy, S. (2019). Designing a unique Digital Twin for linear infrastructures lifecycle management. *Procedia CIRP*, 84, 545–549. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.176>

Telemática. (2020, marzo 10). ¿Qué hay de nuevo en ArcGIS Pro 2.5? . <https://www.telematica.com.pe/que-hay-de-nuevo-en-arcgis-pro-2-5/>

Tolmer, C.-E., Castaing, C., Diab, Y., & Morand, D. (2013). CityGML and IFC: Going further than LOD. *2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*, 645–648. <https://doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2013.6743808>

Tomasini, M., Mahmood, B., Zambonelli, F., Brayner, A., & Menezes, R. (2017). On the effect of human mobility to the design of metropolitan mobile opportunistic networks of sensors. *Pervasive and Mobile Computing*, 38, 215–232. <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2016.12.007>

Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38, 109–127. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>

White, G., Zink, A., Codecá, L., & Clarke, S. (2021). A digital twin smart city for citizen feedback. *Cities*, 110, 103064. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.103064>

Wolf, K., Dawson, R. J., Mills, J. P., Blythe, P., & Morley, J. (2022). Towards a digital twin for supporting multi-agency incident management in a smart city. *Scientific Reports*, 12(1), 16221. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20178-8>

Wu, B., Liang, H., Shi, Y., & Zhu, J. (2020). Research on the Construction of Construction Engineering Cost construction Information System Based on BIM Technology.

Journal of Physics: Conference Series, 1650(3), 032064. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1650/3/032064>

Xia, H., Liu, Z., Efremochkina, M., Liu, X., & Lin, C. (2022). Study on city digital twin technologies for sustainable smart city design: A review and bibliometric analysis of geographic information system and building information modeling integration. *Sustainable Cities and Society*, 84, 104009. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104009>

Yao, Z., Nagel, C., Kunde, F., Hudra, G., Willkomm, P., Donaubauer, A., Adolphi, T., & Kolbe, T. H. (2018). 3DCityDB - a 3D geodatabase solution for the management, analysis, and visualization of semantic 3D city models based on CityGML. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 3(1), 5. <https://doi.org/10.1186/s40965-018-0046-7>

Yigitcanlar, T., Kamruzzaman, Md., Foth, M., Sabatini-Marques, J., da Costa, E., & Ioppolo, G. (2019). Can cities become smart without being sustainable? A systematic review of the literature. *Sustainable Cities and Society*, 45, 348–365. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.033>

Zhihu. (2020, septiembre 23). Caso BIM - Ingeniería municipal. Columna de Zhihu. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/258389503>