



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

**ESTUDIO DE APLICACIONES DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL
DESARROLLO DE PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

BENJAMÍN ANDRÉS CARO MORENO

PROFESOR GUÍA:
ALEJANDRO POLANCO CARRASCO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RICARDO ROJAS PIZARRO
LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ

SANTIAGO DE CHILE
2021

ESTUDIO DE APLICACIONES DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL

En el sector de ingeniería y construcción se han experimentado múltiples avances tecnológicos como por ejemplo la metodología BIM, el uso de drones, la impresión 3D, la realidad virtual y aumentada, internet de las cosas, analítica avanzada de datos e incluso aplicaciones de inteligencia artificial. Esto último en algoritmos para la automatización de actividades o para asistir la toma de decisiones en la gestión de proyectos de ingeniería y construcción.

Estos cambios tecnológicos se enmarcan en la llamada *Construcción 4.0*, parte de la Transformación Digital, la cual se forma a partir de la implementación y agregación de las tecnologías que han surgido en las últimas décadas como la automatización robótica de procesos (RPA), el internet de las cosas (IoT), el Big Data, la computación en la nube y la simulación de procesos. La *Construcción 4.0* es un desarrollo clave para lograr la ejecución industrializada en el sector de ingeniería y construcción, y así dar solución a los problemas de productividad de las actividades en los proyectos. En este sentido, el desarrollo de algoritmos de inteligencia artificial juega un papel fundamental para hacer posibles los desafíos de la Construcción 4.0.

A modo de antecedente, ya hay aplicaciones de la inteligencia artificial en toda la variedad de sectores como la industrias manufactureras, los servicios financieros, las empresas de alta tecnología, así como en medicina y salud. De la misma forma las universidades ya están aportando a la difusión del desarrollo de teoría y aplicaciones. Tal es el caso del *Instituto de Datos e Inteligencia Artificial* de la *FCFM* de la Universidad de Chile fundado en 2020.

En el presente trabajo de título se hace un estudio de las aplicaciones actuales y potenciales de Inteligencia Artificial en proyectos de ingeniería civil, para lo cual se lleva a cabo una revisión exhaustiva de la bibliografía sobre inteligencia artificial aplicada a ingeniería civil y construcción que se complementa con una encuesta y entrevistas a profesionales del sector.

Las principales conclusiones de este trabajo son: Que ya se ha comenzado a implementar inteligencia artificial en proyectos de ingeniería civil; que se han desarrollado aplicaciones que apoyan tanto las actividades de diseño, cómo de planificación, gestión, y de construcción (esta última apoyando directamente la mano de obra). La mayoría aplicaciones aprovechan del *Machine Learning* ya sea para hacer pronósticos sobre cumplimiento de plazo y costo de la planificación, o aplicando *visión artificial* para el control de seguridad, medición de avance y de productividad, o detección de daños en estructuras.

También se han identificado las principales aplicaciones potenciales de la Inteligencia Artificial, donde el enfoque está en la integración de las demás tecnologías de la construcción 4.0, como el desarrollo de gemelos digitales, y el apoyo a la gestión centralizada de la información mediante la integración de BIM y la Inteligencia Artificial.

Este trabajo lo dedico a mi familia, a mis seres queridos y amigos. Pero sobre todo a mi madre, mi padre, mis hermanos, y mis mascotas, les amo con mi alma.

Gracias por siempre estar

Agradecimientos

El primer agradecimiento que debo es sin duda a mi familia. Ustedes más allá de su apoyo en mis decisiones, en mis aciertos y mis errores, son quienes me han hecho ser quien soy. Si quiero esforzarme en ser una mejor persona para este planeta es gracias a ustedes, sus experiencias, sus batallas, su compañía, su afecto. Se que para ustedes puede ser importante que les agradezca aquí, pero para mi no basta con aquello. Sepan que estaré para ustedes siempre, nunca lo duden, y no porque sean mi familia, sino porque son personas que lo merecen.

La vida siempre ha sido y siempre será compleja, y por tanto muchas veces difícil, más de las veces que quisiéramos contar. De la misma forma esta etapa de mi vida ha sido complicada y agotadora, pero al mismo tiempo reconfortante en cuanto a desarrollo personal. Tampoco nunca sabremos si fue necesario tanto lo bueno como lo malo por lo que he pasado. Sólo se muy bien que tengo la opción de elegir qué hacer con todo lo que he aprendido en esta etapa. Es por esto que quiero agradecer a todas las personas que conocí a lo largo de la universidad, tanto amig@s y cercan@s, como profesoras y profesores que han generado impacto en mi forma de ver y entender el mundo. Estoy agradecido por lo desaprendido, lo aprendido, y por tener la oportunidad de madurar como persona aquí.

También quiero agradecer a todos aquellos quienes han hecho posible la realización de este trabajo. Gracias al profesor Alejandro Polanco por proponer este tema de memoria que personalmente me causó mucho interés y el cuál disfrute descubriendo, agradezco además por la información facilitada, sus sugerencias, su tiempo dispuesto y colaboración. A los profesores Ricardo Rojas y Leonardo Massone quienes aceptaron formar parte de la comisión y de tal forma ayudaron a seguir avanzando sobre este trabajo. Finalmente, doy las gracias a los entrevistados por su disposición y por compartir su valioso conocimiento, y a todos l@s profesionales quienes participaron de la encuesta por su tiempo y disposición.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Motivación	2
1.3. Contexto	2
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo General	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
1.5. Metodología	4
1.5.1. Revisión Bibliográfica	4
1.5.2. Entrevistas	4
1.5.3. Estudio de Proyectos	4
1.5.4. Análisis de la información y resultados	4
1.6. Resultados esperados	4
2. Marco Conceptual	5
2.1. Introducción a la Inteligencia Artificial	5
2.1.1. ¿Qué es la inteligencia artificial?	5
2.1.2. Objetivo del desarrollo de la inteligencia artificial	5
2.1.3. Inteligencia Artificial como agentes computacionales y su tarea a resolver	6
2.1.4. Definición y tipos de solución	7
2.1.5. Mapa Conceptual de IA	8
2.2. Machine Learning	12
2.2.1. Tipos de Aprendizaje	12
2.2.2. Etapas y conceptos en la práctica de ML	14
2.2.2.1. Feature Eningeering o ingeniería de factores	14
2.2.2.2. Los 3 Sets para hacer un modelo de ML	15
2.2.2.3. Evaluación de desempeño de un modelo	15
2.3. Inteligencia Artificial en la industria	18
2.3.1. Ejemplos de aplicaciones	18
2.4. Inteligencia Artificial en la ingeniería	21
2.5. Inteligencia Artificial en la construcción	24
3. Metodología	27
3.1. Revisión Bibliográfica	27
3.1.1. Estrategia de búsqueda	28
3.1.2. Criterios de inclusión y exclusión	28
3.1.3. Extracción de la información	28

3.2.	Entrevistas	29
3.2.1.	Perfil de profesionales a entrevistar.	29
3.3.	Encuestas	30
3.4.	Estudio de Proyectos	30
3.5.	Análisis de la información y resultados	30
4.	Desarrollo y resultados	32
4.1.	Resultados de la revisión bibliográfica	32
4.1.1.	Artículos y fuentes de la web	32
4.1.2.	Publicaciones Académicas	33
4.1.3.	Herramientas en el mercado que asisten procesos y actividades en proyectos de ingeniería civil mediante Inteligencia Artificial	37
4.2.	Aplicaciones de Inteligencia Artificial en Proyectos de Ingeniería Civil.	39
4.2.1.	Herramientas de Inteligencia Artificial para la planificación y Gestión de proyectos	39
4.2.2.	Monitoreo del personal de la obra mediante <i>Computer Vision</i>	47
	Caso de estudio: Newmetrix / Smartvid.io	48
4.2.3.	Control de Calidad y cumplimiento del subcontrato	57
4.2.4.	Monitoreo de salud estructural	58
4.2.5.	Automatización de maquinaria y asistencia a la mano de obra	61
4.2.6.	Digital Twins	63
4.2.7.	Integración de aplicaciones IA con software BIM	64
4.3.	Resultados de las entrevistas	65
4.3.1.	Observaciones generales	65
4.4.	Resultados de la encuesta	67
5.	Análisis de resultados	72
6.	Conclusiones	77
6.1.	Conclusiones principales	77
6.1.1.	Desarrollos de la IA en ingeniería y construcción	80
6.1.2.	Construcción e industria 4.0	80
	Bibliografía	82
	Bibliografía	83
	Anexo A. Infografía Encuesta	112

Índice de Tablas

2.1.	Matriz de confusión para clasificación binaria.	16
2.2.	Matriz de confusión para clasificación multiclase.	16
3.1.	Metodología necesaria para el cumplimiento de los objetivos. Fuente: Elaboración propia.	27
4.1.	Categorías de fuentes bibliográficas. Fuente: Elaboración Propia.	31
4.2.	Links de la web por temática. Fuente: Elaboración propia,	32
4.3.	Documentos académicos consultados para revisión bibliográfica. Fuente:Elaboración Propia	33
4.4.	Servicios en el mercado orientados a proyectos de ingeniería civil y construcción que basan su funcionamiento en inteligencia artificial.	37
4.5.	Caso de estudio Alice Technologies, comparación alternativas.	40
4.6.	Caso de estudio Alice Technologies, comparación alternativas de planificación. Fuente: Alice Technologies.	41
4.7.	Caso de estudio Alice Technologies, Adaptando planificación a la pandemia. Fuente: Alice Technologies.	42
4.8.	Caso de estudio Alice Technologies, planificación de edificios residenciales de gran altura. Fuente: Alice Technologies.	43
4.9.	Caso de estudio Alice Technologies, planificación de aeropuerto. Fuente: Alice Technologies.	44
4.10.	Caso de estudio Alice Technologies, planificación para ofertas de licitación. Fuente: Alice Technologies.	45
4.11.	Caso de estudio NewMetrix / Smartvid. Fuente: Newmetrix.	49
4.12.	Caso de estudio NewMetrix / Smartvid. Fuente: Newmetrix.	50
4.13.	Caso de estudio NewMetrix / Smartvid integrado con BIM 360. Fuente: Newmetrix.	51
4.14.	Caso de estudio NewMetrix / Smartvid para análisis predictivo de seguridad. Fuente: Newmetrix.	52
4.15.	Caso de estudio NewMetrix / Smartvid para Dashboarding. Fuente: Newmetrix.	53
4.16.	Caso de estudio NewMetrix / Smartvid dentro del flujo de trabajo. Fuente: Newmetrix.	54
4.17.	Proyectos que han utilizado OxBlue. Fuente: OxBlue	55
4.18.	Proyectos que han utilizado OxBlue (2). Fuente: OxBlue	56
4.19.	Aplicaciones de IA asociada a proyectos de ingeniería civil mencionadas por entrevistados.	67
4.20.	Posibles ventajas de usar IA en proyectos de ingeniería civil mencionadas por entrevistados.	67
4.21.	Posibles desventajas de usar IA en proyectos de ingeniería civil mencionadas por entrevistados.	68

5.1.	Experiencia de los entrevistados con la Inteligencia Artificial aplicada en proyectos de ingeniería civil.	76
6.1.	Conclusiones, aplicaciones de Inteligencia Artificial orientadas a proyectos de ingeniería civil. Fuente: Elaboración Propia.	81

Índice de Ilustraciones

1.1.	Tecnologías de la industria 4.0. Fuente: Clase ejecutiva UC. Qué es la industria 4.0.	2
1.2.	Objetivos del trabajo de investigación.	3
2.1.	Ilustración de la interrelación de diferentes técnicas computacionales. Fuente: <i>Emerging artificial intelligence methods in structural engineering.</i>	8
2.2.	Esquema sobre las principales ramas de la inteligencia artificial. Fuente: Elaboración propia.	10
2.3.	Ramas del Machine Learning y modelos originados de este. Fuente: <i>Emerging artificial intelligence methods in structural engineering.</i>	11
2.4.	Espectro RGB en eje coordenado.	12
2.5.	Ejemplos de codificación RGB decimal.	13
2.6.	Aprendizaje No Supervisado para Clusterización.	14
2.7.	Aplicaciones de la IA en distintas industrias. Fuente: <i>McKinsey & Company</i> [?].	19
2.8.	Esquema de "Robotic Process Automation" (RPA).	20
2.9.	Funcionalidades comunes entre el IoT y la IA. Fuente:[?].	22
2.10.	Funcionalidades del IoT en conjunto con la IA. Fuente:[?].	22
2.11.	Nivel de adopción de IA en distintos sectores y demanda futura (al año 2021). Fuente : McKinsey Global Institute Analysis.	24
2.12.	Algoritmos de Machine Learning con potencial uso en ingeniería y construcción. Fuente: McKinsey & Company	26
4.1.	Clasificación de artículos académicos según área de aplicación en el proyecto (1). Fuente: elaboración propia.	34
4.2.	Clasificación de artículos académicos según área de aplicación en el proyecto (2). Fuente: elaboración propia.	34
4.3.	Clasificación de artículos académicos según área de aplicación en el proyecto (3). Fuente: elaboración propia.	35
4.4.	Bibliografía asociada a aplicaciones de inteligencia artificial en proyectos de ingeniería civil.	36
4.5.	Computer vision aplicado para el monitoreo de actividades en obra.	47
4.6.	Esquema orgnizacional de la plataforma Smartvid.io. Fuente: https://www.newmetrix.com/our-platform	48
4.7.	Trimble XR10, imagen referencial. Fuente: Trimble Field Technology.	57
4.8.	Trimble SiteVision, imagen referencial. Fuente:Trimble Field Technology.	58
4.9.	Aplicaciones de PR, ML y DL en ingeniería estructural. Fuente: Hadi Salehia , Rigoberto Burgueño. "Emerging artificial intelligence methods in structural engineering" [?]	59
4.10.	Clasificación de grietas en pavimentos mediante escáner láser. Fuente: [?]	59
4.11.	Identificación de grietas en estructuras de homrigrón. Fuente: [?].	60

4.12.	Sistema de grúas autónomas	63
4.13.	MULE - Construction Robotics	63
4.14.	Spot - Boston Dynamics	63
4.15.	Uso de robots en el sitio de construcción.	63
4.16.	Ilustración de un gemelo digital. Fuente: Ferrovia	65
4.17.	Caracterización de los encuestados	70
4.18.	Resultados de la encuesta (1)	71
4.19.	Resultados de la encuesta (2)	72
4.20.	Resultados de la encuesta (3)	73
4.21.	Resultados de la encuesta (4)	74
5.1.	Diagrama de Aplicaciones de Inteligencia Artificial aplicables a proyectos de ingeniería civil en base a las distintas metodologías. Fuente: Elaboración propia.	79

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

Dentro de la industria de ingeniería y construcción, en concreto en proyectos de ingeniería civil, se ha comenzado a estudiar la implementación de tecnologías de inteligencia artificial con el objeto de optimizar la planificación y el monitoreo de proyectos. Existen en la actualidad tecnologías en el mercado encargadas de automatizar tareas, mitigar accidentes en obra y prever sobre-costos en proyectos de construcción, y estas son posibles gracias al desarrollo del aprendizaje de máquina y a la recopilación de información de experiencias pasadas. Sin embargo, para su aplicación real es necesario considerar el contexto de la industria a nivel país, como de América Latina y el mundo, donde se evidencian oportunidades, diferencias y dificultades existentes para su implementación según sea el caso.

El término 'Inteligencia Artificial' fue acuñado formalmente por primera vez en la conferencia *Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence* el año 1956 en la universidad de Dartmouth, EEUU; por lo que no es nuevo en la historia. Sin embargo, la sociedad ha sido testigo de la enorme variedad de aplicaciones de ésta en el día a día dentro del último decenio. Existen ambigüedades sobre qué es realmente 'Inteligencia Artificial' y sobre los usos provechosos y apropiados que se les podría dar. Es innegable de todos modos el valor que ha aportado esta tecnología¹, así como las oportunidades que presenta y sus ventajas en cuanto a productividad y control. Los beneficios que promete el desarrollo de la inteligencia artificial son aplicables a toda industria, incluyendo el campo de la ingeniería civil y la construcción.

Si bien se abordó formalmente el campo de la inteligencia artificial en 1956, en la década de 1940 ya se había comenzado a investigar sobre ésta. En 1950 se dio uno de los puntos de inflexión en la historia de la inteligencia artificial con la aparición del *test de Turing*, una examen de la capacidad que posee una máquina para imitar el comportamiento humano y la cual ha tenido gran influencia en el campo hasta la actualidad. La definición que entregó John McCarthy en 1956 se refiere a la inteligencia artificial como “la ciencia e ingeniería de hacer máquinas inteligentes, especialmente programas computacionales inteligentes”. Un sistema de IA combina el aprendizaje de máquina así como otros métodos de análisis de datos para adquirir distintas capacidades.

¹ Véase 6.1.2

1.2. Motivación

La principal motivación de este trabajo se origina en la necesidad de industrialización de los proyectos de ingeniería civil en Chile. La inteligencia artificial es uno de los principales propulsores para el desarrollo de la industria 4.0, y por tanto, una herramienta importante para los procesos de industrialización. A diferencia de otras industrias, el sector de la ingeniería civil y construcción ha sido de los que han quedado rezagados en cuanto al aprovechamiento de las innovaciones tecnológicas y donde su implementación se restringe a las grandes empresas del rubro. Los distintos niveles de inteligencia artificial y su creciente oferta presentan una oportunidad de impactar en la práctica tanto en cuanto a productividad, seguridad, como calidad de los proyectos de ingeniería civil. Es por esto la importancia de conocer las herramientas desarrolladas a la actualidad que aportan a llevar mejores prácticas y desarrollo de proyectos de ingeniería civil.

1.3. Contexto

Ante los avances tecnológicos y desarrollo continuo de nuevas herramientas computacionales es que se presenta la oportunidad para los proyectos de ingeniería civil y construcción de desarrollarse como una industria 4.0. Dentro de las nuevas herramientas, el desarrollo de la inteligencia artificial juega un rol importante en el proceso de industrialización de los proyectos de ingeniería civil. Es por esto la importancia de conocer y comprender el desarrollo de esta herramienta en la industria.



Figura 1.1: Tecnologías de la industria 4.0. Fuente: Clase ejecutiva UC. Qué es la industria 4.0.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

El objetivo general de este trabajo de investigación es estudiar, en el contexto de la industria 4.0, cómo la ingeniería civil y construcción es, y será afectado a futuro, por el desarrollo de tecnologías basadas en inteligencia artificial orientadas a los proyectos de ingeniería civil. Así como sus implicancias a nivel país.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Conocer el desarrollo de las tecnologías con inteligencia artificial aplicadas al desarrollo de proyectos de ingeniería civil.
2. Estudiar casos de aplicación de IA en proyectos de ingeniería civil.
3. Estudiar potenciales aplicaciones de IA en proyectos de ingeniería civil.

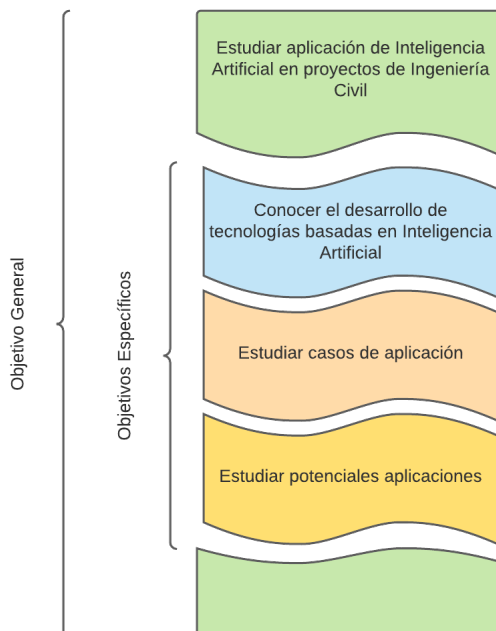


Figura 1.2: Objetivos del trabajo de investigación.

1.5. Metodología

1.5.1. Revisión Bibliográfica

Se recopilará información proveniente de publicaciones de distintos autores competentes en cuanto al desarrollo e implementación de inteligencia artificial orientada a proyectos de ingeniería civil y construcción, así como publicaciones sobre las últimas tecnologías utilizadas en estos proyectos.

1.5.2. Entrevistas

Se entrevistará personal de empresas desarrolladoras de inteligencia artificial orientada a la ingeniería civil y construcción, así como a encargados de proyectos de ingeniería y construcción donde se haya implementado estas tecnologías.

1.5.3. Estudio de Proyectos

Se hará un estudio de casos en los que se haya implementado inteligencia artificial para las distintas actividades de ingeniería civil y construcción.

1.5.4. Análisis de la información y resultados

Con la información recopilada se analizarán los efectos que tiene el desarrollo de inteligencia artificial en los proyectos de ingeniería civil y construcción.

1.6. Resultados esperados

- Conocer el desarrollo de las tecnologías con inteligencia artificial aplicadas al desarrollo de proyectos de ingeniería civil.
- Estudiar casos de aplicación de IA en proyectos de ingeniería civil.
- Estudiar potenciales aplicaciones de IA en proyectos de ingeniería civil.

Capítulo 2

Marco Conceptual

2.1. Introducción a la Inteligencia Artificial

2.1.1. ¿Qué es la inteligencia artificial?

Previo al desarrollo propiamente de la teoría de la cual nacen las herramientas de inteligencia artificial (IA), es necesario dar una definición de esta misma. En términos simples, se conoce como inteligencia artificial al campo de la ciencia que estudia la *síntesis y análisis de agentes computacionales que operan 'inteligentemente'*. Para efectos del caso de estudio consideramos que un agente actúa inteligentemente cuando:

- Lo que hace es apropiado bajo los objetivos que tiene y las circunstancias en que se encuentra, considerando efectos en el corto y largo plazo.
- Es flexible ante cambios en el entorno y en los objetivos.
- Aprende de experiencias pasadas.
- Toma decisiones apropiadas según las limitaciones computacionales y de percepción.

Existen percepciones posiblemente equivocadas sobre el desarrollo de la inteligencia artificial en la actualidad, ya que el término que se conoce como *Inteligencia Artificial* corresponde a dos ideas independientes. Las dos grandes corrientes del concepto IA corresponden a la *Inteligencia Artificial Estrecha*¹ (IAE) y la *Inteligencia Artificial General*² (IAG). El término IAE hace se refiere a IA's diseñadas para una única tarea específica, y las cuales han tenido un auge en los últimos años. Por otro lado, IAG hace referencia a IA's capaces de imitar el razonamiento humano y de la cual se han visto significativamente menos avances a la fecha. En este documento se hará mención al término inteligencia artificial refiriéndose únicamente a aplicaciones de inteligencia artificial estrecha.

2.1.2. Objetivo del desarrollo de la inteligencia artificial

Un objetivo específico de la IA es comprender los principios que hacen el *comportamiento inteligente* posible en un sistema, mediante:

¹ Artificial narrow intelligence.

² Artificial general intelligence.

- análisis de agentes naturales y artificiales.
- prueba de hipótesis sobre qué es necesario para la construcción de un agente inteligente.
- diseño, construcción y experimentación de sistemas o modelos computacionales que lleven a cabo tareas las cuales comúnmente se considera que requieren de inteligencia.

El objetivo ingenieril de la IA es diseñar y crear sistemas que operen inteligentemente y que sean de utilidad en variadas aplicaciones.

2.1.3. Inteligencia Artificial como agentes computacionales y su tarea a resolver

Una forma en que un programa de IA difiere de uno convencional es que para un programa de IA se especifica *qué* calcular o qué tarea cumplir, mas no *cómo* hacerlo. Gran parte del razonamiento de la IA consiste en buscar una solución dentro del espacio de posibilidades dadas. Generalmente las tareas se asignan informalmente para luego hacer una representación bajo la cual el agente computacional logre interpretar el problema.

Por lo tanto, para resolver una tarea quien diseñe el agente de IA debe:

- Determinar qué constituye una solución.
- Representar la tarea de forma interpretable para un computador.
- Calcular un valor de salida, presentado como respuesta al usuario o como una acción del agente en su entorno.
- Interpretar la salida del programa como solución a la tarea.

Una representación de la tarea debe ser:

- Suficientemente abundante y rica para expresar el conocimiento necesario para resolver la tarea.
- Compacta, natural y mantenible. Con tal de que sea clara la relación entre la representación y el dominio que representa.
- Manejable para un cálculo eficiente por parte del agente computacional
- Capaz de ser adquirida a partir de datos y experiencias anteriores.

Además es importante considerar la diferencia de lo que es conocimiento para el agente computacional de lo que es conocimiento para la persona que lo diseña. La relación entre estos caracteriza la complejidad del agente computacional y se pueden presentar dos extremos que reflejan esto:

- **Agente altamente especializado en entorno simplificado.** Cuando un agente es diseñado para realizar tareas altamente específicas, pero que fuera del entorno para el cual fue diseñado carece de utilidad.

- **Agente simple y flexible en entorno arbitrario.** El caso de un agente flexible a su entorno y condiciones, pero que realiza tareas relativamente sencillas y que requieren poco cálculo.

Dicho esto, en aspectos generales existen dos estrategias para llevar a cabo la construcción de un agente computacional en primera instancia.

1. Aplicando entornos simplificados con sistemas de razonamiento complejo, lo cual facilita la optimización del agente ante situaciones particulares.
2. Aplicando agentes simples en entornos naturales y de alta complejidad, los cuales son (en un comienzo) donde se desea que actúen los agentes.

Cabe considerar que estos son solamente casos extremos y que situaciones intermedias si se dan en la práctica.

2.1.4. Definición y tipos de solución

Dada la descripción informal de una tarea para una IA es necesario, antes de redactar código, tener claridad de cuál es la solución esperada del programa. Esto aplica no solo para un programa de IA, sino para cualquier software o programa computacional. El/la ingeniero de software es quien se encarga de refinar la especificidad de las tareas que debe cumplir el programa para que se obtenga la solución esperada.

La etapa de definir una solución es importante para decretar qué variables y datos de entrada considerará el programa, así como su posterior optimización del tiempo de cálculo. Por ejemplo, imaginemos un robot encargado de echar la basura del hogar en el tarro de la basura. Si bien podría botar cada objeto que encuentre en el hogar, y así cumplir con su tarea, esta solución carece de sentido común. Se espera que una IA llegue a soluciones con sentido común sobre supuestos no declarados.

La solución entregada por una IA posiblemente podría estar incorrecta o incompleta, por lo que es necesario definir un criterio para esto ¿esperamos que la IA nos entregue todas las respuestas posibles? solo la más acertada? Es por esto que se clasifican soluciones comúnmente en los siguientes 4 tipos:

- **Solución óptima** Corresponde a la mejor solución según algún indicador o medidor de la calidad de la solución. La solución óptima a la tarea asignada estará sujeta a las restricciones que considere el problema, así como una compensación entre beneficiar una condición impuesta respecto a otra. Por ejemplo, un robot encargado de recolectar basura podría tener el objetivo de recoger la mayor cantidad de basura en un sector minimizando la distancia de traslado al depósito, como también considerar un costo por reconocer objetos como "basura" de forma errónea.
- **Solución satisfactoria** A menudo podríamos necesitar no *la* mejor solución, sino que *alguna* solución. Una solución satisfactoria es suficientemente buena para considerarse una solución adecuada según algún criterio descrito.
- **Solución aproximadamente óptima** Es aquella cuya medición de calidad es cercana a la de la mejor solución teórica. En muchas ocasiones no es necesario llevar a cabo la

solución óptima, sino estar en un rango lo suficientemente cercano a ésta. Esto ya que para algunas tareas conseguir una solución cercana a la óptima es computacionalmente mucho más fácil que conseguir la solución óptima.

- Solución probable Es aquella que puede no ser una solución, sin embargo, es probable que lo sea. A menudo es importante la relación entre los *falsos-positivos* (las soluciones incorrectas) y los *falsos negativos* (las respuestas que no se consideraron como solución cuando si lo eran). Según el tipo de aplicación que se desarrolle cambiará la tolerancia a estos errores.

2.1.5. Mapa Conceptual de IA

La Inteligencia Artificial, si bien lleva desarrollándose como campo de las ciencias de la computación hace considerables años, abarca variadas técnicas, algoritmos y campos de aplicación. En la actualidad no hay un consenso único sobre la taxonomía de la inteligencia artificial y sus derivados.

A pesar de las distintas técnicas, algoritmos de aprendizaje y campos de aplicación dentro de la IA, uno de los aspectos que se ha clarificado con el desarrollo de la industria 4.0 es la relación entre la inteligencia artificial y técnicas computacionales propias de la nueva revolución industrial: el Big Data, la Ciencia de Datos y la Minería de Datos. Se muestra en la figura 2.1 la relación entre los distintos campos mencionados.

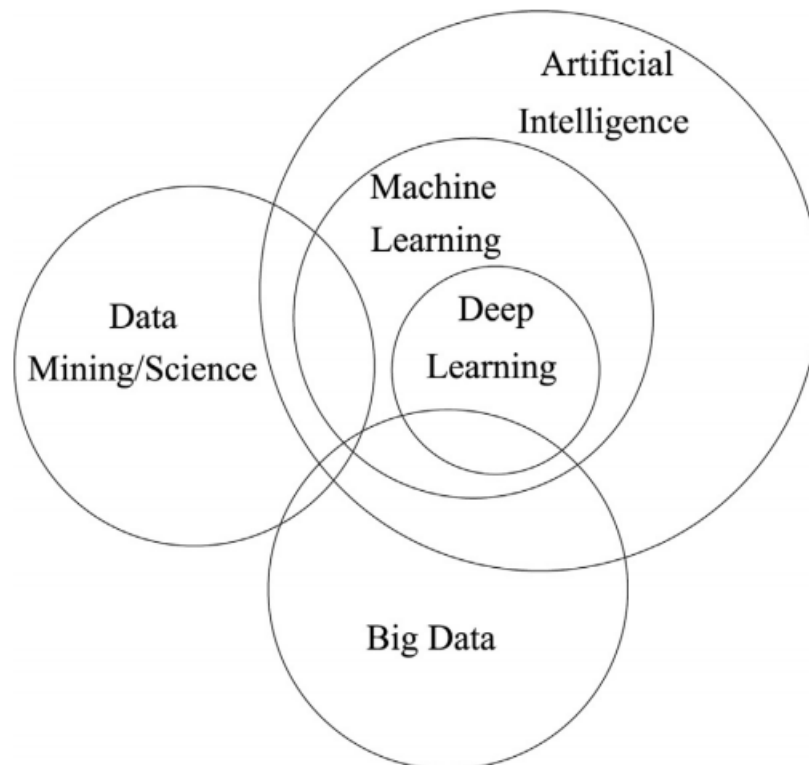


Figura 2.1: Ilustración de la interrelación de diferentes técnicas computacionales. Fuente: *Emerging artificial intelligence methods in structural engineering*.

La inteligencia Artificial en la actualidad es en su mayoría "estrecha" (*Narrow Artificial Intelligence*), diseñada para cumplir tareas específicas y con poca flexibilidad. Es posible diferenciar esta IA en dos grandes ramas: la IA simbólica y el Machine Learning.

La IA simbólica por un lado busca representar explícitamente el conocimiento humano a través de símbolos legibles por humanos. Por otro lado, el Machine Learning, o aprendizaje de máquina, funciona en base a modelos estadísticos basados en datos de experiencias previas que resuelven problemas de optimización. A su vez, el desarrollo de Machine Learning se puede dividir según la capacidad de cómputo en aprendizaje estadístico y aprendizaje profundo ('Deep Learning'). En la figura 2.2 se muestra esquemáticamente estos campos de la IA así como la principal aplicación de estos.

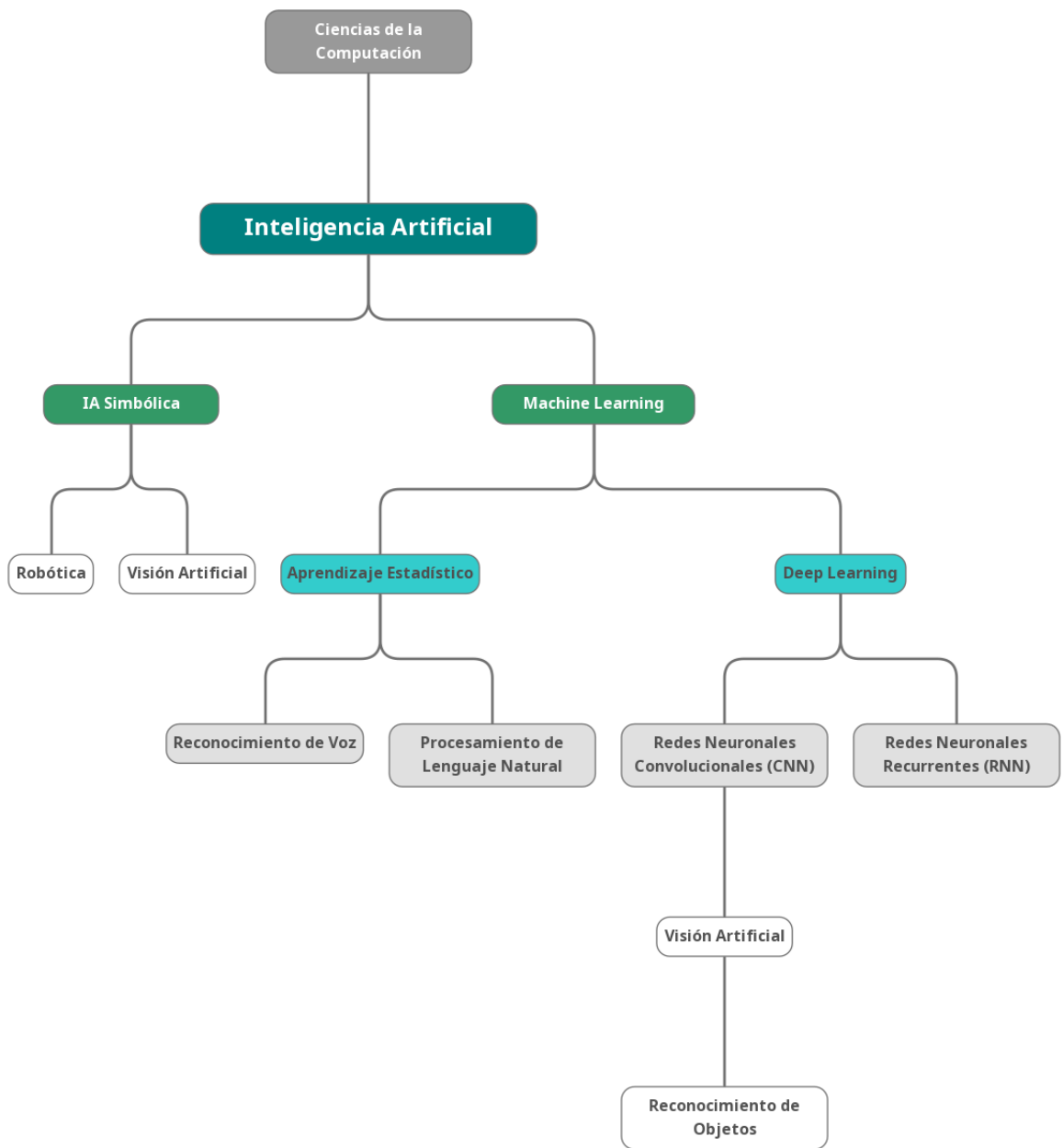


Figura 2.2: Esquema sobre las principales ramas de la inteligencia artificial.
Fuente: Elaboración propia.

El Machine Learning (ML) es una de las técnicas que mayor repercusión ha tenido el desarrollo de la IA en los últimos años [9]. Junto al desarrollo del ML se han desarrollado y modificado numerosos algoritmos de aprendizaje y técnicas de ML. Se presentan en la figura 2.3 distintas técnicas de Machine Learning orientadas tanto a problemas de regresión como de clasificación.

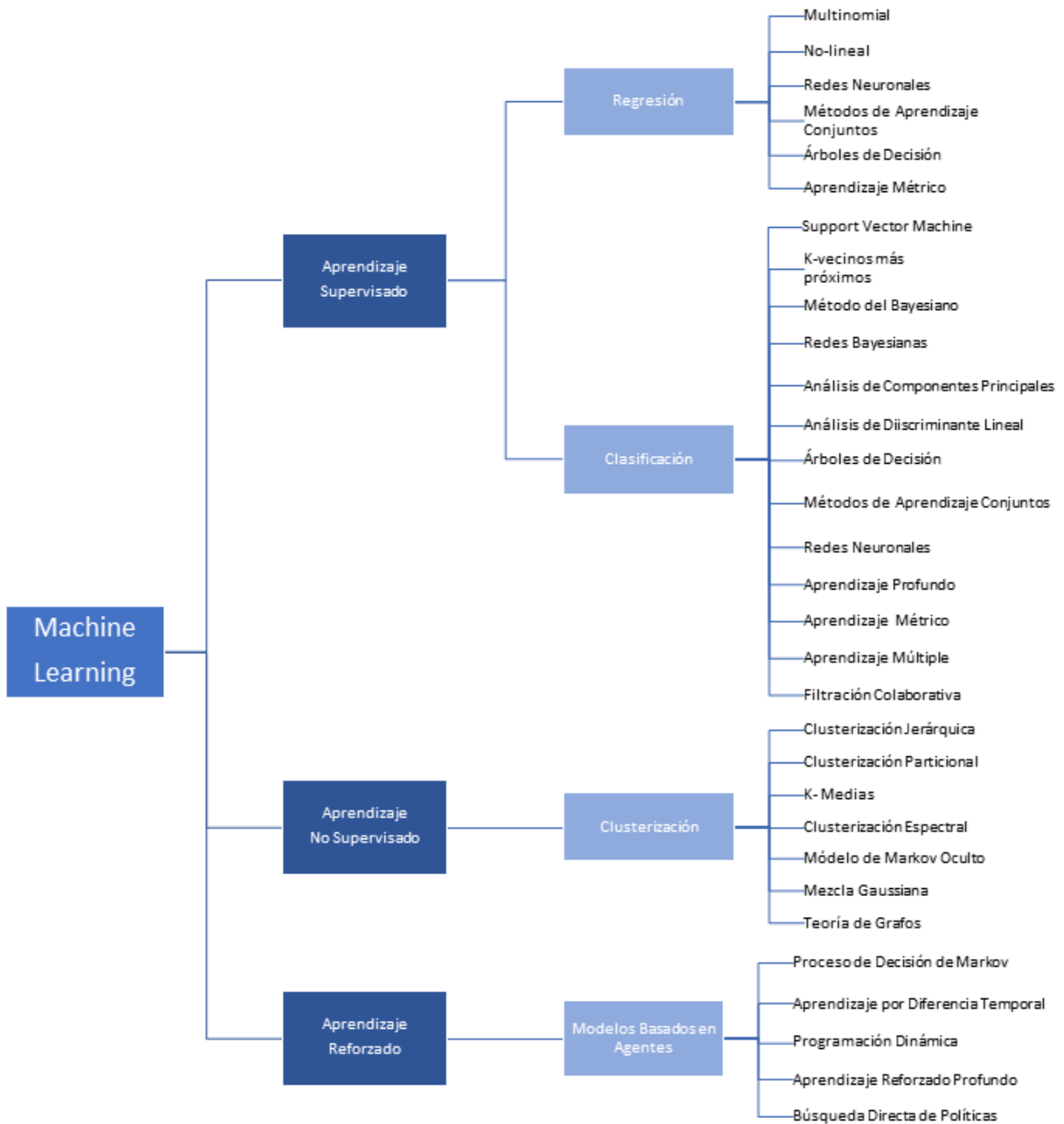


Figura 2.3: Ramas del Machine Learning y modelos originados de este. Fuente: *Emerging artificial intelligence methods in structural engineering*.

2.2. Machine Learning

Una de las principales diferencias entre un programa de machine learning y otro programa computacional convencional es que un programa de machine learning cumple con una o varias tareas sin haber sido programado explícitamente para esto.

Machine Learning es un campo de las Ciencias de la Computación dedicado a la construcción de algoritmos los cuales se basan en una colección de ejemplos de algún fenómeno. Machine Learning consiste en el proceso para resolver un problema práctico mediante dos etapas principales:

1. Recolectar un conjunto de datos (de ahora en adelante *dataset*).
2. Construcción de un modelo estadístico basado en el dataset mediante un algoritmo.

2.2.1. Tipos de Aprendizaje

Aprendizaje Supervisado En el aprendizaje supervisado el dataset corresponde a una colección de ejemplos **etiquetados**. En la colección de N ejemplos $(x_i, y_i)_{i=1}^N$ a cada x_i se le conoce como un *vector de características*; donde para cada dimensión $j = 1, \dots, d$ $x^{(j)}$ representa una característica; mientras que la etiqueta y_i puede ser una estructura variada complejidad, pudiendo ser un número real, un elemento perteneciente a una colección de clases³⁴ o una estructura más compleja.

Por ejemplo, podemos contar con un dataset con la codificación de colores RGB decimal de los píxeles de una imagen, donde nuestro vector de características es de la forma $[R, G, B]$ representando la intensidad de luz roja (R), verde (G) y azul (B), y donde cada y_i será un vector con valores enteros entre 0 y 255. En cada ejemplo del dataset la primera característica contiene información de la luz roja del píxel en cuestión, lo cual ocurre análogamente para los colores verde y azul.

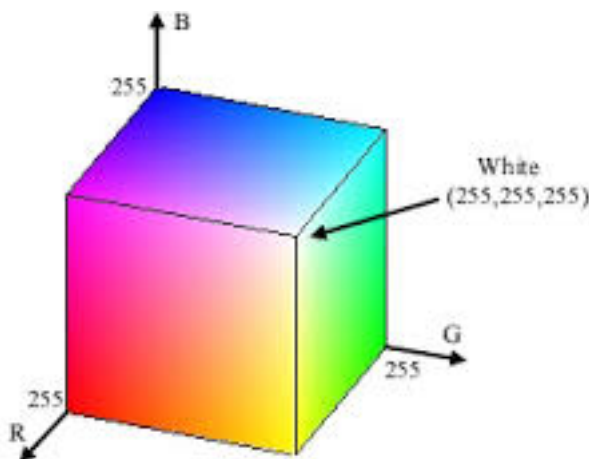


Figura 2.4: Espectro RGB en eje coordenado.

³ Ejemplo práctico: mails clase spam y no-spam

⁴ Clase: en teoría de conjuntos, una familia o colección de conjuntos que comparten cierta propiedad

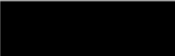















Color	HTML / CSS Name	Hex Code #RRGGBB	Decimal Code (R,G,B)
	Black	#000000	(0,0,0)
	White	#FFFFFF	(255,255,255)
	Red	#FF0000	(255,0,0)
	Lime	#00FF00	(0,255,0)
	Blue	#0000FF	(0,0,255)
	Yellow	#FFFF00	(255,255,0)
	Cyan / Aqua	#00FFFF	(0,255,255)
	Magenta / Fuchsia	#FF00FF	(255,0,255)
	Silver	#C0C0C0	(192,192,192)
	Gray	#808080	(128,128,128)
	Maroon	#800000	(128,0,0)
	Olive	#808000	(128,128,0)
	Green	#008000	(0,128,0)
	Purple	#800080	(128,0,128)
	Teal	#008080	(0,128,128)
	Navy	#000080	(0,0,128)

Figura 2.5: Ejemplos de codificación RGB decimal.

El objetivo del aprendizaje supervisado es producir un modelo que al ingresar un vector de características nos entregue la etiqueta 'y' asociada al vector. Por ejemplo, un modelo al cual entregar características de una persona nos entregue como resultado la probabilidad de que ésta tenga cáncer.

Aprendizaje No supervisado El aprendizaje no supervisado se caracteriza por trabajar con de ejemplos no etiquetados. El objetivo de un algoritmo de aprendizaje no supervisado es crear un modelo para convertir vectores característicos a otros vectores o en un valor que sea utilizado para resolver un problema práctico.

Algunos usos comunes de algoritmos de este tipo son el análisis de grupos por similitud, reducción de dimensiones (disminuir el número de características de un vector de entrada) y detección de datos anómalos dentro de un dataset.

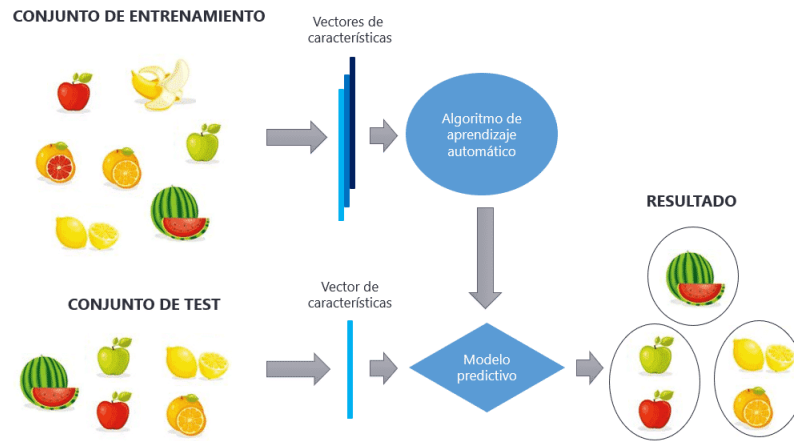


Figura 2.6: Aprendizaje No Supervisado para Clusterización.

Aprendizaje Semi-Supervisado El aprendizaje semi supervisado nace debido a que usualmente se cuenta con más información sin etiquetar que etiquetada. Al igual que el aprendizaje supervisado, el objetivo de los algoritmos semi-supervisados es generar un modelo que entregue información sobre la etiqueta los datos de entrada, pero considerando los datos sin etiquetar.

Si bien puede sonar contraproducente que al agregar información sin etiquetar el modelo puede ser menos certero, al agregar más información sobre el problema a resolver se espera una mejor distribución de probabilidad del dataset (siempre que la información sin etiquetar sea en efecto útil para el problema).

Aprendizaje Reforzado El aprendizaje reforzado consiste en que un *agente* logre aprender de su *entorno*, donde es capaz de observar el *estado* del entorno como vectores de características. El agente cuenta con acciones que puede realizar en cada estado, las cuales pueden llevar a cambiar el estado. La serie de acciones llevará al agente a obtener una *recompensa*. El objetivo del aprendizaje reforzado es maximizar la recompensa del agente, de tal forma que con cada repetición se mejore la recompensa respecto a la anterior. Se dice que una acción es óptima si maximiza la recompensa promedio esperada.

El aprendizaje reforzado es especialmente útil para problemas donde se debe *elegir soluciones secuencialmente* para un objetivo en el 'largo plazo', por ejemplo problemas de logística, manejo de recursos, partidas de un juego, entre otros.

2.2.2. Etapas y conceptos en la práctica de ML

2.2.2.1. Feature Engineering o ingeniería de factores

Consiste en el proceso de convertir los datos brutos (sin ningún procesamiento) en un dataset. En este proceso el/la analista de datos tiene la tarea de armar un dataset donde los vectores tengan características útiles para el modelo, a estas características se les conoce como "informativas". Las características altamente informativas se dice que tienen un alto "poder predictivo" para el modelo. A su vez, se dice que un modelo tiene "poco sesgo" cuando predice bien los datos de entrenamiento.

2.2.2.2. Los 3 Sets para hacer un modelo de ML

En la práctica se trabaja con tres sets: de entrenamiento, de validación y de prueba. Una vez listo el dataset este se "baraja" y se divide este en estos tres grupos.

1. *Test de entrenamiento*: Con los cuales se entrenará y optimizará el modelo. En caso de ser un modelo paramétrico es el dataset bajo el cual se optimizan los parámetros.
2. *Test de validación*: Es utilizado para la elección del algoritmo de aprendizaje y encontrar los mejores valores para los hiper-parámetros.
3. *Test de prueba*: Se usa para evaluar el modelo antes de comenzar a utilizarlo en la práctica y/o lanzar el producto al mercado.

Comúnmente se utiliza un mayor número de ejemplos para el entrenamiento del modelo, mientras el número de ejemplos para la validación y testeo es similar y mucho menor. No existe una proporción óptima para la división de los 3 sets, pero como regla de oro se suele considerar un 70 % de los ejemplos para el entrenamiento y un 15 % tanto para la validación y para la prueba del modelo. Sin embargo, esto puede variar en gran magnitud según el caso. En la actualidad nos encontramos en la era del *Big Data*, por lo que si se cuenta con un número muy grande de ejemplos podría destinarse el 95 % únicamente para el entrenamiento del modelo.

2.2.2.3. Evaluación de desempeño de un modelo

Se dice que un modelo de ML tiene buen desempeño cuando logra predecir las etiquetas con cierta precisión y es generalizable para más ejemplos (i.e. su desempeño varía poco ante nuevos datasets).

La evaluación de un modelo de ML se hace mediante la comparación entre los resultados del dataset de prueba y los resultados obtenidos con el dataset de entrenamiento. Existen métricas y herramientas formales que son utilizadas para la evaluación de modelos de ML, sin embargo la elección depende del tipo de problema que resuelve el modelo: de regresión o de clasificación.

Para el caso de problemas de regresión se espera que el modelo de como resultado valores pronosticados cercanos a los valores de los datos observados. La métrica más común es el error cuadrático medio (EMS), por lo que se compara el EMS del entrenamientos y el EMS de la prueba del modelo. Si el MSE del conjunto de prueba es significativamente mayor al del set de entrenamiento es un de que el modelo está sobre-ajustado y por tanto no generaliza bien para nuevos datasets. El sobre ajuste se puede tratar mediante regularización o ajuste de hiper-parámetros.

Para el caso de problemas de clasificación, la evaluación de desempeño es menos simple y existen distintas métricas y herramientas para esto. Las más usadas son las siguientes:

Matriz de confusión

Es una tabla que resume que tan bien ha hecho el modelo las predicciones. Las columnas indican las clases reales a las que corresponden los datos, mientras las filas corresponden a las

clases predichas (también funciona en viceversa). Mediante la matriz de confusión se reflejan las predicciones erradas del modelo.

Tabla 2.1: Matriz de confusión para clasificación binaria.

		Predicción	
		Positivo	Negativo
Valor real	Positivo	TP	FN
	Negativo	FP	TN

Tabla 2.2: Matriz de confusión para clasificación multiclase.

		Predicción			
		clase 1	...	clase n	
Valor Real	clase 1	T	F	F	F
	⋮	F	T	F	F
	⋮	F	F	T	F
	clase n	F	F	F	T

Precisión/ Recall

Estas son las métricas más comunes para evaluar el desempeño de los modelos de clasificación. La precisión es la proporción entre las predicciones positivas acertadas (*true positive (TP)*) y la suma de todas las predicciones positivas, sumando acertadas y no acertadas (FP).

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

Por otro lado se le llama recall a la proporción entre los positivos acertados (TP) y la suma de estos más los que se etiquetaron erróneamente como negativos (FN).

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

La mayoría de los casos se debe escoger entre una mayor precisión o un mayor recall en el modelo. La compensación entre estos se realiza de distintas formas, como el ajuste de hiper-parámetros en el modelo o ajustando el umbral para la probabilidad requerida para obtener una clase (por ejemplo considerar que si la probabilidad es mayor a 0.8 se asigna la clase negativa). Para aplicar estos indicadores a clasificación multi-clase se mide la precisión y recall individualmente para cada clase.

Accuracy o Exactitud

El nivel de exactitud o "accuracy" del modelo es la proporción entre las precisiones correctas y el total de predicciones.

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

Exactitud sensible al costo

En los casos donde no a todas las clases se les da igual importancia se aplica un factor de sensibilidad al costo, por lo que se asigna un costo (número positivo) a cometer cada tipo de error (FP y FN). Se multiplica los valores FP y FN por los costos y luego se calcula la exactitud de la misma forma.

Área bajo curva ROC

La curva ROC usa una combinación de la tasa de verdaderos positivos (TPR) y la tasa de falsos negativos (FPR). Este método es utilizado para modelos clasificadores hechos para entregar probabilidad de pertenecer a cierta clase. Mientras más cercana a 1 sea el área bajo la curva ROC mejor será el clasificador.

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \text{ y } FPR = \frac{FP}{TN + FP}$$

2.3. Inteligencia Artificial en la industria

Es indispensable hablar de las aplicaciones de inteligencia artificial orientadas a las industrias sin mencionar el desarrollo de la *industria 4.0*. El desarrollo de la industria 4.0 representa históricamente una nueva revolución industrial enfocada en la interconectividad, la automatización, y el manejo de gran número de datos. El desarrollo de la inteligencia artificial es una de las bases para llevar a cabo estos avances.

El crecimiento de la IA y la aparición de herramientas basadas en Machine Learning tienen como principales efectos el aumento de la productividad mediante automatización de procesos, ahorro en tiempo y costes de producción, y un mejor suministro y disponibilidad de los productos. Por otro lado para que la implementación de la IA en la industria 4.0 sea efectiva se debe recordar un requisito esencial, la digitalización integral de las cadenas de valor en aquellas empresas partícipes.

La IA y el procesamiento de grandes cantidades de datos (desarrollo del *Big-Data*) dan un gran impulso de la industria 4.0 ya que gracias a nuevas soluciones de software se puede aprovechar los datos generados durante la operación de una fábrica (a modo de ejemplo) y así identificar tendencias y patrones en base a los cuales se puede mejorar la eficiencia en operaciones y disminuir el consumo de energía. De esta forma una planta productora pueden adaptarse constantemente a distintas circunstancias mediante optimización de los procesos.

Una encuesta llevada a cabo por *McKinsey & Company* el año 2020 a nivel global muestra el estado de la implementación de IA en las distintas industrias y en distintos países. De este estudio se desprende que para las empresas con oficinas centrales en Latinoamérica y otros países en vías de desarrollo era menos probable que se haya implementado IA en algún proceso o producto. De la misma encuesta se aprecia que los sectores de alta tecnología y de telecomunicaciones son los con mayor porcentaje de empresas que han implementado IA, seguido del sector automotriz y de ensamblaje. Los resultados de la implementación de IA según sectores se han mantenido similares respecto al año anterior, así como los sectores de mayor adopción también se han mantenido en los últimos años.

Los principales beneficios que han presentado las empresas han sido el aumento de ingresos y la disminución de costos. El **aumento de ingresos** se debe en la mayoría de casos debido a la optimización de piezas e inventarios, análisis del servicio al cliente, designación de precios y promoción, y la previsión de venta y demanda. Por otro lado la mayoría de empresas registra **reducción de costos** lograda mediante la optimización de la gestión del talento, la automatización del centro de contacto y la automatización de operaciones en centros de almacenamiento.

2.3.1. Ejemplos de aplicaciones

Al año 2020 el área donde mayor número de aplicaciones de IA se informaron fue en las áreas de *desarrollo de productos/servicios* y *operaciones de servicios*. En la tabla de la figura 2.7 se presentan las principales áreas de aplicación para las distintas industrias [1].

Desarrollo/ mejora de productos o servicios	Mejora de productos basada en IA	24
	Optimización de características	21
Operación de Servicios	Optimización de operación de servicios	24
	Servicio predictivo e Intervenciones	19
Ventas y Marketing	Analítica del servicio al cliente	17
	Segmentación de clientes	14
Riesgo	Modelamiento y análisis del riesgo	16
	Análisis de fraudes y deudas	12
Manufactura	Optimización de producción, energía, rendimiento	15
	Mantenimiento Predictivo	12
Recursos Humanos	Optimización de la gestión del talento	10
	Gestión del rendimiento	7
Gestión de la Cadena de Suministro	Optimización de la red logística	9
	Optimización de inventario y partes/piezas	9
Estrategia y Finanzas Corporativas	Asignación del Capital	8
	Soporte fusiones y adquisiciones	6

Figura 2.7: Aplicaciones de la IA en distintas industrias. Fuente: *McKinsey & Company* [1].

Mantenimiento predictivo.

El mantenimiento predictivo utiliza el aprendizaje automático (ML) para anticipar posibles errores o incidencias de una máquina, componente de esta y/o proceso. Con esto se logra prevenir fallos de manera temprana para lograr una intervención a tiempo, y con esto obtener una mayor eficiencia y productividad de los procesos. En el contexto de la industria 4.0 existen distintas metodologías de mantenimiento predictivo, ya sea mediante métodos específicos; como modelos matemáticos, de distribución de probabilidad; o mediante métodos híbridos basados en análisis de datos. Esta última metodología es la incluye la aplicación de algoritmos de aprendizaje, principalmente supervisado, mediante modelos de regresión y clasificación [11].

Diseño generativo.

Mediante el diseño generativo se pueden reproducir de forma autónoma distintos diseño para un producto en base a un número de restricciones en base a la cual se obtiene un diseño *óptimo*. Un ejemplo concreto de esto puede darse en el modelamiento de una pieza mediante elementos finitos, donde la restricción sería tener una mayor densidad de elementos resistentes en las zonas que exigen mayor esfuerzo.

Además del diseño de piezas, se ha estudiado la aplicabilidad del diseño generativo para la planificación del diseño de fábricas, considerando la disponibilidad y distribución espacial

acorde con las operaciones que se llevarán en las instalaciones.

Automatización Robótica de Procesos (RPA).

La Automatización Robótica de Procesos tiene numerosas ventajas en cuanto a la automatización de procesos organizacionales y comerciales. La implementación de técnicas y algoritmos de IA y ML permiten mejorar la precisión y ejecución de los procesos de RPA en la extracción de información, reconocimiento, clasificación, previsión y optimización de procesos. El uso de sistemas robóticos flexibles combinados con IA facilita la manufactura de distintos productos, reduciendo costos y mejorando la calidad de bienes y servicios. [7]

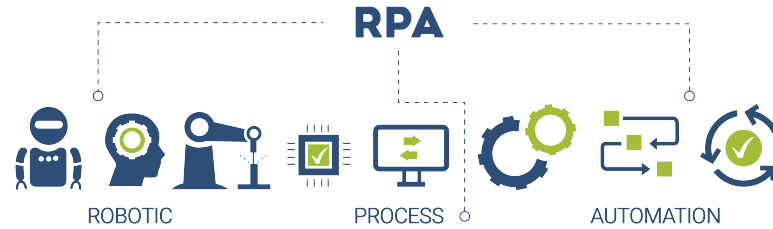


Figura 2.8: Esquema de "Robotic Process Automation" (RPA).

Industria Agrícola

Uno de los variados proyectos desarrollado durante el año 2021 por el *Centro Alemán de Investigación para la Inteligencia Artificial (DFKI)* junto a socios en la industria e investigación busca estudiar **sistemas de asistencia inteligente y maquinas automatizadas** para mejorar la eficiencia y sostenibilidad en la agricultura. El trabajo llevado a cabo en este proyecto consiste en desarrollar sistemas de sensores seguros y certificables para la **percepción ambiental semántica**, y de esta forma se espera poder mapear las condiciones ambientales para desarrollar algoritmos de IA que interpreten y evalúen los datos sistemáticamente.

La metodología para la recolección de datos consiste en hacer que un vehículo equipado de distintos sensores recorra el entorno del campo. La base de datos bajo la cual operan los algoritmos cuentan con los datos obtenidos sin procesar, los metadatos de encuestas, condiciones meteorológicas y hora del día.

2.4. Inteligencia Artificial en la ingeniería

El desarrollo de la inteligencia artificial ha estado ligado desde sus inicios con el desarrollo de la ciencia e ingeniería. El estudio bibliométrico desarrollado por Amit K. et al., 2019 [4] hace un análisis de los últimos 30 años (entre 1982 y 2018) sobre los trabajos de investigación relacionados con aplicaciones de inteligencia artificial en ingeniería, haciendo revisión de los principales tópicos, instituciones, autores y países involucrados dentro de las dos bases de datos más extensas a la fecha. Como resultado se obtuvo que los principales tópicos que se han investigado en aplicaciones de IA en ingeniería durante el periodo de estudio son: *redes neuronales, algoritmos genéticos, inteligencia artificial, minería de datos, optimización multi-objetivo*.

A continuación se presentan algunos casos de estudio sobre aplicaciones de IA en distintas disciplinas ligadas a la ingeniería en los últimos años.

IA en la ingeniería biomédica.

El procesamiento de imágenes es la aplicación más común cuando se trata de las redes neuronales convolucionales (CNN) y ya se ha implementado esta técnica para facilitar los diagnósticos médicos. Al año 2021 ya se han desarrollado numerosas técnicas de IA y ML para la detección temprana de distintos tipos de cáncer, como por ejemplo el cáncer de pulmón o cerebral. La IA tiene la capacidad esencial de procesar una gran cantidad de imágenes médicas en poco tiempo y, por lo tanto, de identificar características de la enfermedad que no se pueden apreciar a simple vista [3].

A su vez el procesamiento de imagen ha sido y busca ser implementado otros diagnósticos médicos como es el caso del proyecto "*Oftalmo-IA*" que se lleva a cabo en Alemania con la colaboración del DFKI y el Instituto Fraunhofer de Tecnología Biomédica IBMT y que busca implementar un sistema de asistencia de inteligencia artificial para hacer diagnósticos basados en los datos de las imágenes y datos clínicos para decidir sobre la mejor opción de terapia posible.

IA en la ingeniería en computación.

La aparición y desarrollo del *Internet of Things (IoT)* ha traído consigo una mayor demanda de ciberseguridad. La implementación de sistemas de IoT trae desafíos en cuanto a seguridad y privacidad debido a que los protocolos de seguridad tradicionales no se adecúan a los nuevos dispositivos IoT. En este aspecto, mediante la inteligencia artificial (IA), el machine learning (ML), y el Blockchain se han estudiado y desarrollado soluciones a estas problemáticas.

El machine learning es una herramienta útil para la predicción y prevención de situaciones riesgosas en el uso de sistemas inteligentes, como por ejemplo la presencia de fuego en una cocina o en un área industrial que provoque una alarma. Además se busca actualmente abordar el problema de seguridad de hacer un sistema a prueba de manipulaciones utilizando machine learning.

Dadas las amplias funcionalidades que se le puede dar al IoT y al gran número de dispositivos conectados a la red, se obtiene un inmenso volumen de datos que requieren de procesamiento. Procesar y operar cálculos con el volumen de datos existentes es una tarea difícil en el ambiente IoT, por lo que es pertinente utilizar IA para trabajar con gran cantidad de datos no estructurados y heterogéneos en tiempo real gracias a la eficiencia capaz de lograr con IA. Se muestran en la figura 2.9 algunas funcionalidades que comparten la IA y los sistemas IoT y en la figura 2.10 algunas funcionalidades básicas que se pueden lograr en conjunto.

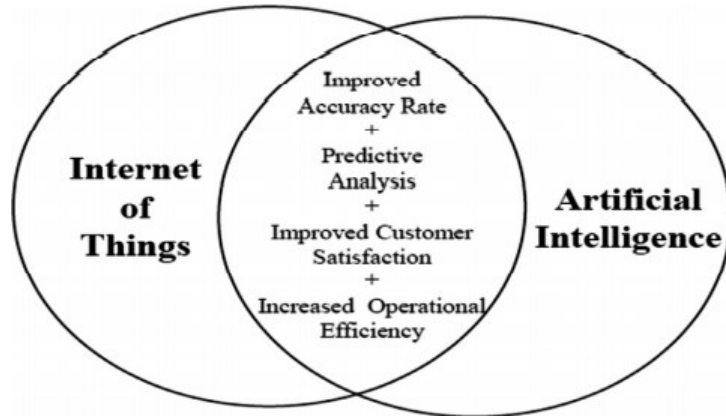


Figura 2.9: Funcionalidades comunes entre el IoT y la IA. Fuente:[5].

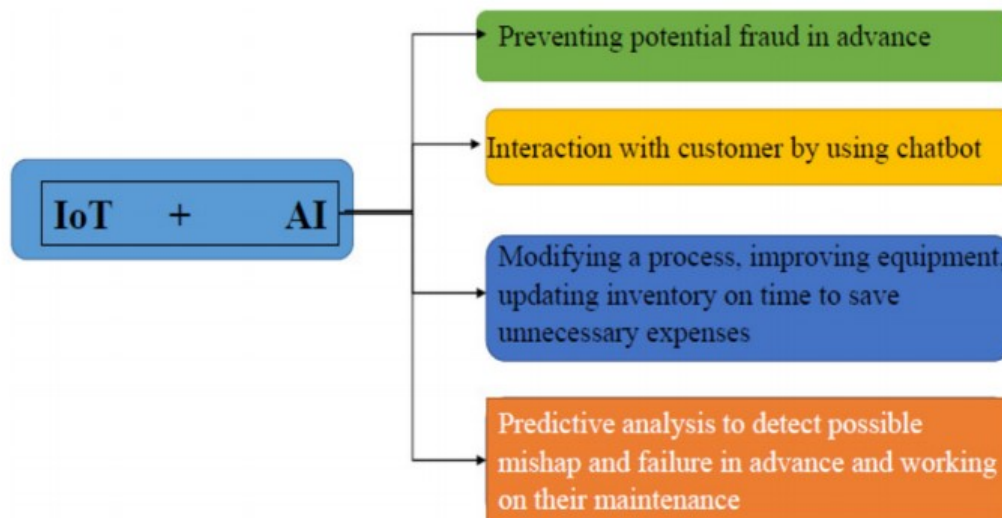


Figura 2.10: Funcionalidades del IoT en conjunto con la IA. Fuente:[5].

Machine Learning en la Astronomía

El año 2019 fue un año que marca la historia en la astronomía con la primera fotografía de un agujero negro como parte del proyecto *Event Horizon Telescope*. La imagen resultante se obtuvo mediante el procesamiento de millones de fotografías obtenidas desde 8 telescopios dispuestos alrededor del mundo y cuyo procesamiento se hizo mediante algoritmos de machine learning, como métodos de máxima verosimilitud regularizada (*RML*), algoritmo *CLEAN*

y operaciones inversas a las de las redes convolucionales (sin embargo, no utilizando ANN's) como técnicas de interferometría para lograr la imagen resultante.

IA en la Ingeniería Aeroespacial.

El desarrollo de robots autónomos junto al aprendizaje reforzado ha sido fundamental para hacer posible las misiones aeroespaciales en el último tiempo. La exploración tanto en la luna como en Marte utilizan robots autónomos para obtener información valiosa sobre organismos y superficies extraterrestres, y así evitar los riesgos que implicaría explorar con personas. La exploración con instrumentos autónomos ayuda a evaluar y facilitar la posibilidad de que el humano colonice Marte.

La misión Marte 2020, en concreto la misión del *Perseverance rover* es investigar la astrobiología en Marte para averiguar si hubo vida en el planeta. El *Perseverance* guarda similitudes con el robot autónomo predecesor *Curiosity*, pero con un nuevo set de sensores específicos para captar marcas biológicas. Además de estar presente en el funcionamiento del *Perseverance*, la IA también ha sido necesaria en el aterrizaje en Marte, dado que el sistema **Terrain Relative Navigation** implementado aumenta las posibilidades de un aterrizaje exitoso del 80 % al 99 % al ser capaz de: 1) observar hacia donde se dirige y 2) desviarse hacia un lugar más seguro en caso de dirigirse a un terreno peligroso.

En el caso de la exploración en la luna, el *DFKI* ha impulsado un proyecto de la Unión Europea para explorar cuevas de lava a través de rovers **autónomos colaborantes**. Con el fin de investigar potenciales viajes espaciales en el futuro, las cuevas de lava son lugares de interés debido a sus condiciones de temperatura disponibilidad de agua y protección. Para esto en el proyecto "CoRob-X" se investiga cómo un equipo de varios robots pueden explorar las cuevas de la forma lo más autónoma y colaborativa posible. En la actualidad se realizan las pruebas de los robots realizando misiones análogas en la Tierra para estudiar la viabilidad de su implementación en misiones futuras a la luna. Existen además numerosos proyectos de investigación relacionados que forman parte del proyecto *Horizonte 2020* de la Unión Europea.

2.5. Inteligencia Artificial en la construcción

Dentro de las aplicaciones que se han estudiado para el uso de IA en el desarrollo de la construcción se encuentran estudios realizados en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile. Uno de los casos de estudio ha sido construir una metodología para la confección de un modelo para la estimación temprana costos de obra gruesa de un proyecto basado en redes neuronales. Otro de los usos potenciales usos de las ANN's estudiados en el mismo departamento es la aplicación de estas redes para la estructuración de un edificio, como parte del diseño y de las etapas tempranas de un proyecto de construcción.

Como se aprecia en la figura 2.11, un estudio realizado por *McKinsey & Company* muestra que el sector construcción es de los con menor porcentaje de empresas que han implementado inteligencia artificial, al mismo tiempo que es el sector con menor variación de inversión en esta tecnología [14].

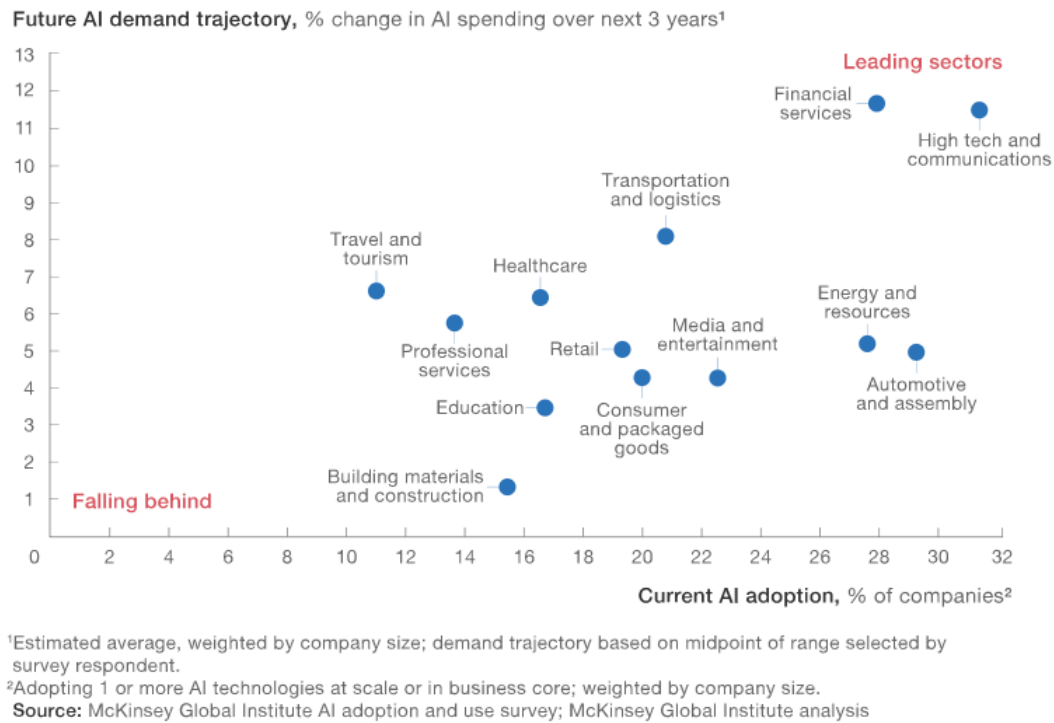


Figura 2.11: Nivel de adopción de IA en distintos sectores y demanda futura (al año 2021). Fuente : McKinsey Global Institute Analysis.

Sin embargo, se han propuesto aplicaciones de la IA con potenciales beneficios para el sector de la ingeniería civil y construcción. En la actualidad ya existen casos de implementación de IA como herramienta facilitadora en el desarrollo de ese tipo de proyectos. Algunas de las aplicaciones de IA que se han desarrollado en los últimos años están orientadas a la planificación y control de proyectos, al monitoreo de personal en obra y al monitoreo de la salud y desempeño de estructuras (véase [12], [13] y [17]).

En la actualidad se señala a la inteligencia artificial como la próxima frontera de la tec-

nología en la construcción. La consultora *McKinsey & Company* presenta 5 aplicaciones de IA utilizadas en otros sectores que tienen aplicaciones directas en la construcción [13].

1. Algoritmos de optimización de rutas de transporte para la optimización de la planificación de proyecto.
2. Aplicaciones predictivas que pueden pronosticar los riesgos de un proyecto, la constructividad y la estabilidad estructural de la obra.
3. Optimización de la cadena de suministro minorista para materiales y gestión de inventarios a medida que la modularización y la prefabricación sean más frecuentes.
4. Robótica para la construcción modular o de prefabricados e impresión 3D.
5. Reconocimiento de imágenes para gestión de riesgos y seguridad. Con tal de mejorar el control de calidad así como la detección temprana de eventos críticos como una falla en la estructura.

Además, se proponen distintos algoritmos de Machine Learning (ML) con potenciales aplicaciones en el sector de ingeniería y construcción. Los principales usos que se esperan para estos son:

1. Refinación de control de calidad y gestión de reclamaciones: Con Deep learning, redes neuronales, evaluar imágenes recopiladas por drones para comparar defectos de construcción. Ayudar a los propietarios y empresas por igual a comprender la probabilidad de que un contratista o subcontratista presente una reclamación, lo que permite a los propietarios y empresas asignar proactivamente contingencias e implementar planes de mitigación específicos.
2. Aumento de la retención y el desarrollo del talento: Mediante aprendizaje automático no supervisado (*modelos de mezcla gaussiana*). Segmentar personal de la obra en función de la probabilidad de desgaste. Localizar y predecir puntos débiles de talento generales como rotación, escasez de habilidades o mano de obra, y fallas en el diseño organizacional.
3. Impulsar el seguimiento de proyectos y la gestión de riesgos: Utilizar ANN's para procesar imágenes del progreso del proyecto generadas por drones y así crear un "gemelo digital" de la obra en 3D para que coincidan con los modelos generados por BIM. Al contar con un "digital twin" de la obra se tiene una revisión constante de la obra y se puede reducir los ciclos de toma de decisiones para así tomar medidas en plazos de un día en vez de semanas o meses.
4. Optimización constante del diseño: Los propietarios y contratistas pueden aprovechar los análisis de grupos (por clusterización). Mediante un sistema recomendador (aprendizaje supervisado) se puede identificar los datos importantes necesarios para hacer una recomendación a los ingenieros y arquitectos de un diseño específico o soluciones estructurales (por ejemplo, tipo de conexiones o acabados arquitectónicos como muros cortina o ventana) basado en varios criterios relevantes para los propietarios y contratistas (por ejemplo, costo total de propiedad, línea de tiempo para completar la ejecución, probabilidad de errores de construcciones defectuosas durante la ejecución).

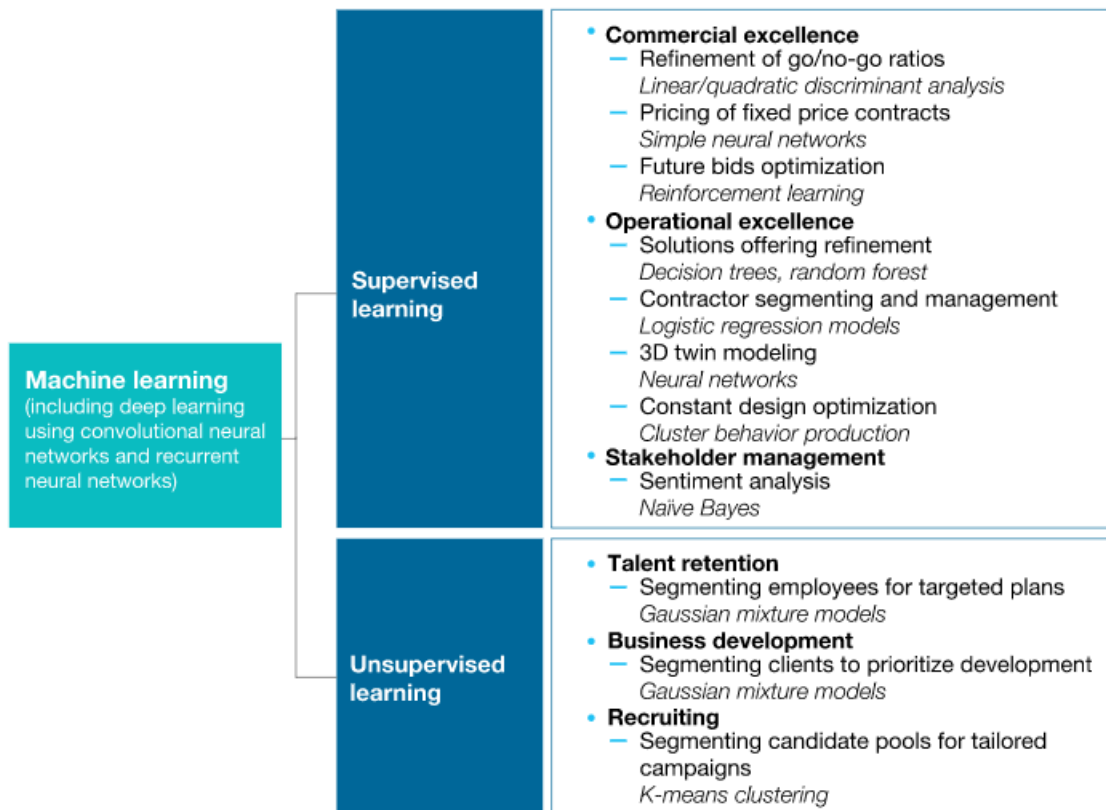


Figura 2.12: Algoritmos de Machine Learning con potencial uso en ingeniería y construcción. Fuente: McKinsey & Company .

Capítulo 3

Metodología

Para conseguir los objetivos propuestos en el comienzo de este documento se seguirá la metodología descrita en el este capítulo. La tabla 3.1 presenta las herramientas a utilizar para el cumplimiento de los objetivos específicos de este trabajo y bajo las cuales se implementará la metodología detallada a continuación.

Tabla 3.1: Metodología necesaria para el cumplimiento de los objetivos.
Fuente: Elaboración propia.

	Objetivo Específico	Herramienta
1	Conocer el desarrollo de IA enfocada en proyectos de ingeniería civil.	Artículos de memorias y revistas.
2	Estudiar casos de éxito de aplicación de IA en proyectos de ingeniería civil.	Entrevista a personal de empresas de ingeniería y/o construcción.
3	Estudiar potenciales beneficios de IA en proyectos de ingeniería civil.	Artículos de investigación y contacto con empresas desarrolladoras.

3.1. Revisión Bibliográfica

Se realizará una revisión bibliográfica de casos de aplicación de inteligencia artificial en ingeniería civil, lo que incluye tanto aplicaciones en ingeniería estructural como en ingeniería civil y construcción. Las palabras clave usadas para la búsqueda de artículos de revista electrónica en la plataforma *Science Direct: artificial intelligence, civil engineering, construction industry, engineering & construction*.

En esta revisión bibliográfica se recopilará tanto técnicas y algoritmos de IA revisados en publicaciones científicas y artículos de la web, así como tecnologías y aplicaciones de IA de propietarios que ya se encuentren presentes en el mercado.

Los documentos y artículos obtenidos de la recopilación de bibliografía se categorizarán según:

3.1.1. Estrategia de búsqueda

Se hizo una búsqueda manual exhaustiva de publicaciones que relacionen las temáticas inteligencia artificial e ingeniería civil, siendo las principales fuentes publicaciones revistas científicas así como **literatura gris** como artículos de la web y registro audiovisual de seminarios.

En el caso de publicaciones de revistas científicas se buscaron artículos en las bases de datos de Scopus (mediante la plataforma Science Direct, a la cual se tiene acceso como estudiante de la Universidad de Chile), y mediante búsqueda en Google Scholar con las siguientes palabras clave: *inteligencia artificial*, *ingeniería civil*, *ingeniería estructural*, *construcción*, *deep learning*, *machine learning*.

Para esta búsqueda, no se consideró límite de fecha y se consideraron artículos escritos tanto en inglés como en español.

Además de este método, se incluyeron tanto artículos de revista científica, contenido audiovisual de seminarios de la industria de la ingeniería y construcción, así como páginas web de empresas que aplican IA en el rubro; facilitados por los profesores integrantes de la comisión.

3.1.2. Criterios de inclusión y exclusión

Dado que la inteligencia artificial es un término amplio y sin una definición consensuada, se ha tenido que revisar que las metodologías abordadas para los estudios en cuestión sean efectivamente en base a *algoritmos de inteligencia artificial*. En este aspecto la revisión y desarrollo del marco contextual ayuda a tener una base general de técnicas de inteligencia artificial.

En el caso de material audiovisual encontrado, el primer filtro será que el título contenga combinaciones de las palabras clave usadas para la búsqueda de publicaciones científicas añadiendo también las opciones: 'automatización', 'construcción', 'construcción 4.0'.

3.1.3. Extracción de la información

La extracción de la información presentada en artículos de revista científica será dividida según la accesibilidad que se tenga a las versiones completas de dichas publicaciones, dado que muchas veces la versión completa tiene restricciones de visualización.

Para proceder a la selección se revisaron los abstracts y en caso necesario los artículos completos con el fin de decidir si la información que contenían estaba o no relacionada con nuestro objetivo.

3.2. Entrevistas

Las entrevistas a desarrollar se enfocarán en distintos aspectos relacionados al desarrollo de la IA y su aplicación en proyectos de ingeniería civil y construcción.

Se deberá, en primera instancia, averiguar sobre el conocimiento de casos de aplicación de IA en proyectos construcción, averiguar qué entienden l@s entrevistad@s por inteligencia artificial en la ingeniería y construcción, consultar si ven un potencial de las herramientas de IA que han ido apareciendo y si creen que sea algo conveniente para la empresas del rubro, abordar también cuestiones sobre los antecedentes sobre la transformación digital (si usan alguna aplicación IoT o qué tecnologías han sido las últimas que han implementado).

Temas a abordar:

- Conocimiento y experiencia con la inteligencia artificial.
- Conocimiento y experiencia transformación digital.
- Conocimiento y experiencia con metodologías de trabajo BIM.
- Inteligencia Artificial en Chile.
- Uso y aplicación de IA en ingeniería y construcción.

Las entrevistas ayudarán a identificar qué tanto conocen las y los profesionales del sector ingeniería y construcción en particular en Chile.

3.2.1. Perfil de profesionales a entrevistar.

Las personas a entrevistar deben en lo posible ajustarse al perfil de entrevistad@s objetivo con tal de poder formar una visión general con información suficiente sobre la percepción y estado actual de la IA en los proyectos de ingeniería civil para la posterior análisis y revisión de estas.

Los perfiles de profesionales deseados para las encuestas deben contar con experiencia en alguna de las siguientes áreas:

- jef@ de proyecto
- jef@ de calidad del proyecto
- gestión y planificación de proyectos.
- investigación y divulgación científica en ingeniería civil
- académico en cursos de ingeniería civil

3.3. Encuestas

La elaboración de encuestas busca complementar los resultados y la información obtenida de las entrevistas. Se recuerda que los objetivos de la encuesta son conocer el estado de conocimiento respecto al uso de inteligencia artificial en proyectos de ingeniería civil, incluyéndose las distintas ramas y disciplinas que se originan de esta. Además, el desarrollo de encuestas ayudará a generalizar observaciones hechas a partir de las entrevistas.

Las encuestas a realizar tendrán como participantes a profesionales de la ingeniería civil, así como profesionales ligados a proyectos de ingeniería civil y construcción (por ejemplo, encargados de T.I., arquitectos y profesionales de otras ingenierías), además de estudiantes de ingeniería civil.

Para redactar las preguntas de la encuesta se utilizará la escala de Likert, una escala de calificación para evaluar el nivel de acuerdo o desacuerdo de una persona sobre una declaración. Es por esto que se emplearán preguntas de alternativa en base a variables ordinales, las cuales presentan un orden entre dos posturas opuestas con la posibilidad de respuestas intermedias que, sin embargo, la distancia entre ellas no es necesariamente uniforme.

3.4. Estudio de Proyectos

Se hará revisión de casos de estudio de proyectos donde se hayan implementado las distintas alternativas presentes en el mercado. Estas se obtienen por lo general en las mismas plataformas comerciales de las aplicaciones y presentan resultados deseados y esperables de la implementación. Cabe mencionar que dado lo reciente de estas aplicaciones, la información sobre casos de estudio es escasa y su totalidad proviene de las mismas empresas que ofrecen las aplicaciones de IA.

3.5. Análisis de la información y resultados

El análisis de información recopilada y los resultados obtenidos mediante las distintas herramientas permitirá generar conocimiento sobre el estado actual de la inteligencia artificial en el desarrollo de proyectos de ingeniería civil, visto desde distintas áreas de la misma, como la ingeniería de estructuras o la planificación y gestión de proyectos de construcción.

A partir de la revisión bibliográfica se logrará identificar las principales líneas de investigación desarrolladas en la actualidad sobre la inteligencia artificial aplicada a la ingeniería civil. De esta forma se identificarán las aplicaciones que ya están siendo utilizadas, así como las aplicaciones esperables a futuro.

Mediante la encuesta se logrará tener un panorama del estado de conocimiento del desarrollo de IA en el proyectos de ingeniería civil, el cuál ayudará a comparar el paradigma de los y las profesionales respecto al desarrollo de nuevas técnicas e innovaciones basadas en IA.

Las entrevistas por su parte complementarían los resultados y análisis obtenidos de la re-

visión bibliográfica y de la encuesta, puesto que se podrá conocer el estado de conocimiento de los entrevistados así como posibles aplicaciones o líneas de investigación desconocidas.

Lo anterior posibilitará lograr los objetivos planteados en primera instancia y al mismo tiempo reconocer ventajas y desventajas del uso de IA, identificar experiencias de uso así como posibles impactos e implicancias en proyectos de ingeniería civil a futuro.

Capítulo 4

Desarrollo y resultados

4.1. Resultados de la revisión bibliográfica

Los resultados de revisión bibliográfica a lo largo de este trabajo reúne toda la información obtenida tanto para los primeros capítulos¹ cómo para la búsqueda de aplicaciones de Inteligencia Artificial en proyectos de ingeniería civil.

Se ha clasificado las publicaciones consideradas según tipo, teniéndose las siguientes categorías:

Tabla 4.1: Categorías de fuentes bibliográficas. Fuente: Elaboración Propia.

Fuentes académicas			Fuentes de la web	
Publicación de revista de investigación científica	Memoria de Pregrado	Tesis de Magister	Artículo/ revista web	Página web (comercial)

4.1.1. Artículos y fuentes de la web

Se recurrió a la búsqueda web para la búsqueda de aplicaciones de Inteligencia Artificial en distintas industrias y campos de aplicación. Se consideró como fuentes confiables sitios web reconocidos ya sea en el ámbito de las comunicaciones, la divulgación científica, páginas oficiales de empresas y organizaciones. Las fuentes utilizadas se presentan en la tabla 4.2:

¹ Introducción y Marco Conceptual

Tabla 4.2: Links de la web por temática. Fuente: Elaboración propia,

Nombre Artículo	Tema	hipervínculo
Inteligencia Artificial, el motor detrás de la Industria 4.0	marco conceptual	link
¿Qué es la Industria 4.0: la Internet Industrial de las Cosas (IIoT)?	marco conceptual	link
Caminar con éxito hacia la Industria 4.0: Capítulo 22 – Inteligencia Artificial. Cámara Valencia	marco conceptual	link
Las promesas y los desafíos de la era de la inteligencia artificial	marco conceptual	link
La cuarta revolución industrial llega al sector construcción en Chile. Construye2025.	marco conceptual	link
Symbolic AI. Inbenta.	marco conceptual	link
Mars Technologies. (2021)	IA ingeniería	link
AI vs. Cybercrime	IA ingeniería	link
QUIPOS DE ROBOTS PARA LA LUNA: DFKI	IA ingeniería	link
primera foto de un agujero negro, captada por el Event Horizon Telescope	IA ingeniería	link
Mission Overview. (2021)	IA ingeniería	link
BMBF OPHTHALMO-AI Centro Alemán de Investigación en Inteligencia Artificial	IA ingeniería	link
Inteligencia Artificial aplicada a las Estructuras. Estructurando	IA ing. civil y construcción	link
How much photo documentation is necessary on jobsites?	IA ing. civil y construcción	link
Inteligencia Artificial en la Gestión de Proyectos de Construcción	IA ing. civil y construcción	link
Smart Construction Drone	IA ing. civil y construcción	link
Construction Verification - ClearEdge3D.	IA ing. civil y construcción	link
Construction Robotics.	IA ing. civil y construcción	link
Built Robotics transforms heavy equipment into autonomous robots for. . .	IA ing. civil y construcción	link
CORE studio Thornton Tomasetti	IA ing. civil y construcción	link
BIMTRAZER - Gestión de obra.	IA ing. civil y construcción	link
Machine Learning y Computer Vision en sondeos geológicos	IA ing. civil y construcción	link
Inteligencia Artificial en el diseño estructural: Desentrañando el ADN de la edificación chilena	IA ing. civil y construcción	link
Enoba Smart Construction: holistic solutions for the building construction industry	IA ing. civil y construcción	link
Newmetrix Resources Expand your knowledge of AI in construction	IA ing. civil y construcción	link
Artificial intelligence: Construction technology's next frontier	IA ing. civil y construcción	link
Alice Technologies. Stop scheduling. Start optimizing.	IA ing. civil y construcción	link
The Rise of AI and Machine Learning in Construction.	IA ing. civil y construcción	link
intelligent Machine Control Komatsu	IA ing. civil y construcción	link
Odd Vision - Odd Industries	IA ing. civil y construcción	link
PERCEPCIÓN AMBIENTAL CONFIABLE PARA MAQUINARIA AGRÍCOLA: DFKI INICIA OTRO PROYECTO AGRÍCOLA CON AI-TEST-FIELD	IA industrias, IA ingeniería	link
Top 12 Use Cases / Applications of AI in Manufacturing	IA industrias, IA ingeniería	link
GenMEP – Route MEP Systems Without Clashes	IA industrias, IA ing. civil y construcción	link
Sentando las bases de la IA en Chile. Negocio & Construcción	IA industrias, IA ing. civil y construcción	link
TestFit Solve site plans instantly with the Ultimate Building Configurator	IA industrias, IA ing. civil y construcción	link

4.1.2. Publicaciones Académicas

En cuanto a aplicación de IA específicamente para proyectos de ingeniería civil, se han recopilado distintos artículos provenientes en su mayoría de la base de datos de *Scopus*, a través de la plataforma *Science Direct*. Una vez terminada la búsqueda (junto a una revisión de la atingencia con el tema de este trabajo) los documentos revisados son los presentados en la tabla 4.3.

Luego de seleccionados los documentos académicos se procede a revisar y analizar en mayor detalle estos mismos para así capturar la información más relevante, resumirla y analizarla.

Tabla 4.3: Documentos académicos consultados para revisión bibliográfica. Fuente:Elaboración Propia

	Título	Tipo	Año	Procedencia	Tema
1	Uso de modelos de análisis estructural para la estimación temprana de costos de obra gruesa utilizando modelos de Redes Neuronales.	Memoria Pregrado	2015	Chile	Redes Neuronales
2	ANÁLISIS DE ESTRUCTURACIÓN EN PLANTA A PARTIR DE PLANOS DE ARQUITECTURA E INGENIERÍA PARA EDIFICIOS CON MUROS DE HORMIGÓN ARMADO EN CHILE MEMORIA	Memoria Pregrado	2020	Chile	Aprendizaje Automático
3	Artificial intelligence-empowered pipeline for image-based inspection of concrete structures	Artículo	2020	China	Pattern Recognition
4	Deep learning-based roadway crack classification using laser-scanned range images: A comparative study of hyperparameter selection	Artículo	2020	EEUU	CNN. Crack Clasificación
5	Human-object interaction recognition for automatic construction site safety inspection	Artículo	2020	EEUU	Deep Learning, CNN, Monitoreo de seguridad en obra
6	Emerging artificial intelligence methods in structural engineering	Artículo	2018	EEUU	Detección de patrones, ML, Deep learning, CNN
7	Semi-automatic detection of buried rebar in GPR data using a genetic algorithm	Artículo	2020	China	Algoritmo genético, Automatización de diseño
8	Una revisión de plataformas robóticas para el sector de la construcción	Artículo	2019	Colombia	Automatización
9	Building applications for smart and safe construction with the DECENTER Fog Computing and Brokerage Platform	Artículo	2021	Slovenia	
10	Modelo de aprendizaje para la selección de un proyecto diseño-construcción (llave en mano) en el sector público	Artículo	2010	Chile, USA	Redes Neuronales
11	TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL APLICADAS A PROBLEMAS DE INGENIERÍA CIVIL	Artículo	2017	Cuba	Redes Neuronales, Sistemas Expertos, Algoritmos Genéticos, Sistemas Difusos (Fuzzy Systems)
12	Evolutionary computation and structural design: A survey of the state-of-the-art	Artículo	2005	EEUU	Computación Evolutiva
13	Artificial Intelligence in Civil Engineering	Artículo	2012	China	Computación Evolutiva, Redes Neuronales, Sistemas Difusos (Fuzzy Systems), Sistemas Expertos
14	Artificial Intelligence in Geotechnical Engineering: Applications, Modeling Aspects, and Future Direction	Artículo	2013	Australia	Redes Neuronales, Algoritmos Genéticos, Evolutionary Polynomial Regression (EPR)
15	Evaluation of the use of Cascade Detection algorithms based on Machine Learning for Crack Detection in asphalt Pavements	Artículo	2021	Chile	Machine Learning, Convolutional Neural Networks (CNN)
16	Advances in optimization of highrise buildings structures	Artículo	2014	EEUU	Neural Dynamics Model
17	Conceptual Structural Design of Shear Wall Buildings Layout based on Artificial Neural Networks	Tesis de Magíster	2021	Chile	Redes Neuronales

Luego de revisar las fuentes bibliográficas es posible dividir las aplicaciones de Inteligencia Artificial estudiadas para ingeniería civil en 3 categorías (no excluyentes entre sí): planificación y gestión, actividades de diseño y asistencia en actividades en obra.

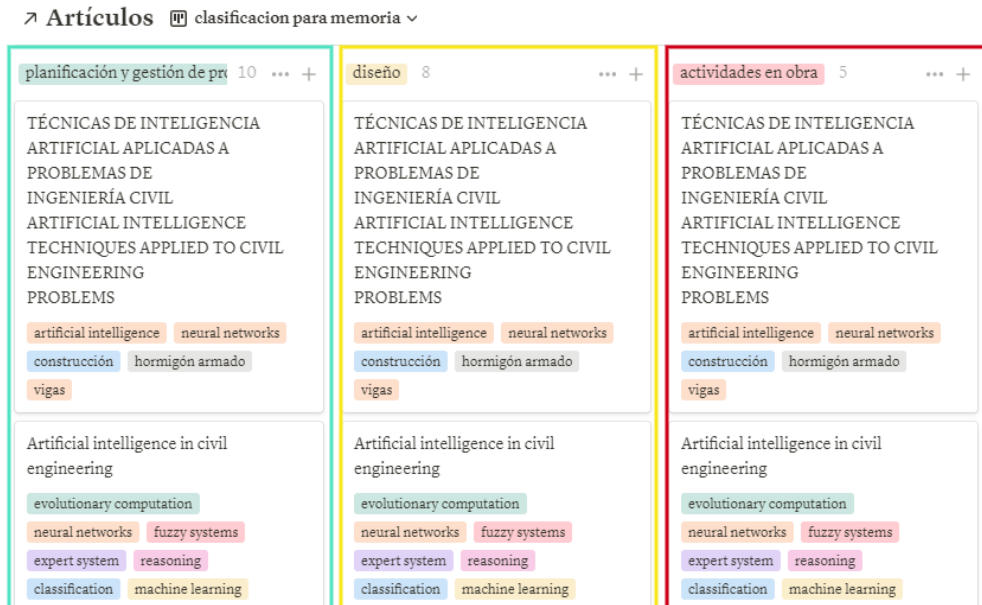


Figura 4.1: Clasificación de artículos académicos según área de aplicación en el proyecto (1). Fuente: elaboración propia.

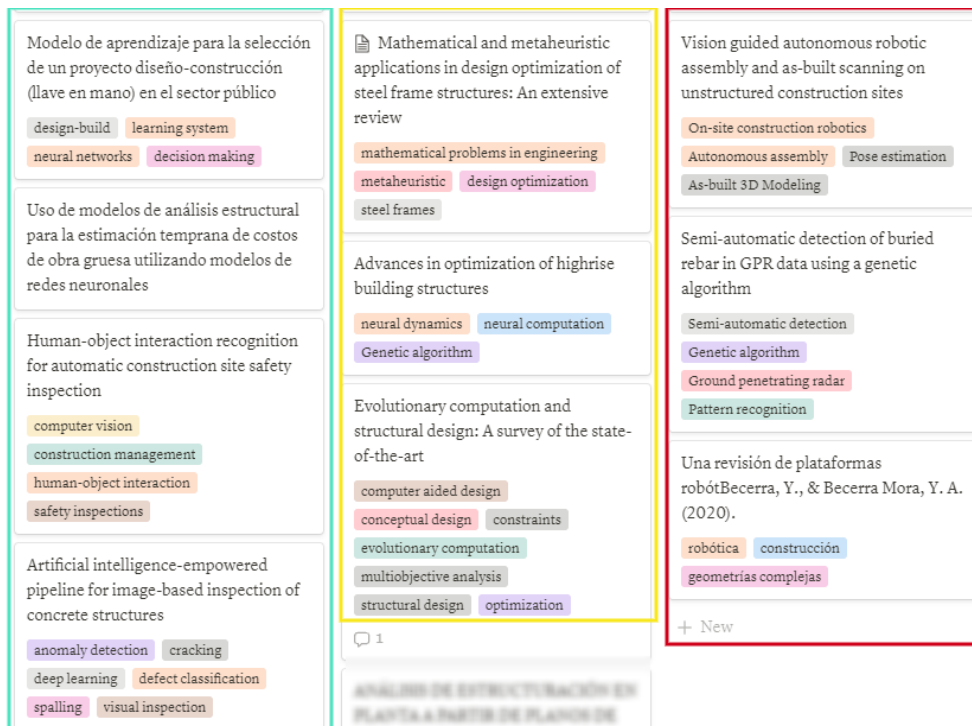


Figura 4.2: Clasificación de artículos académicos según área de aplicación en el proyecto (2). Fuente: elaboración propia.

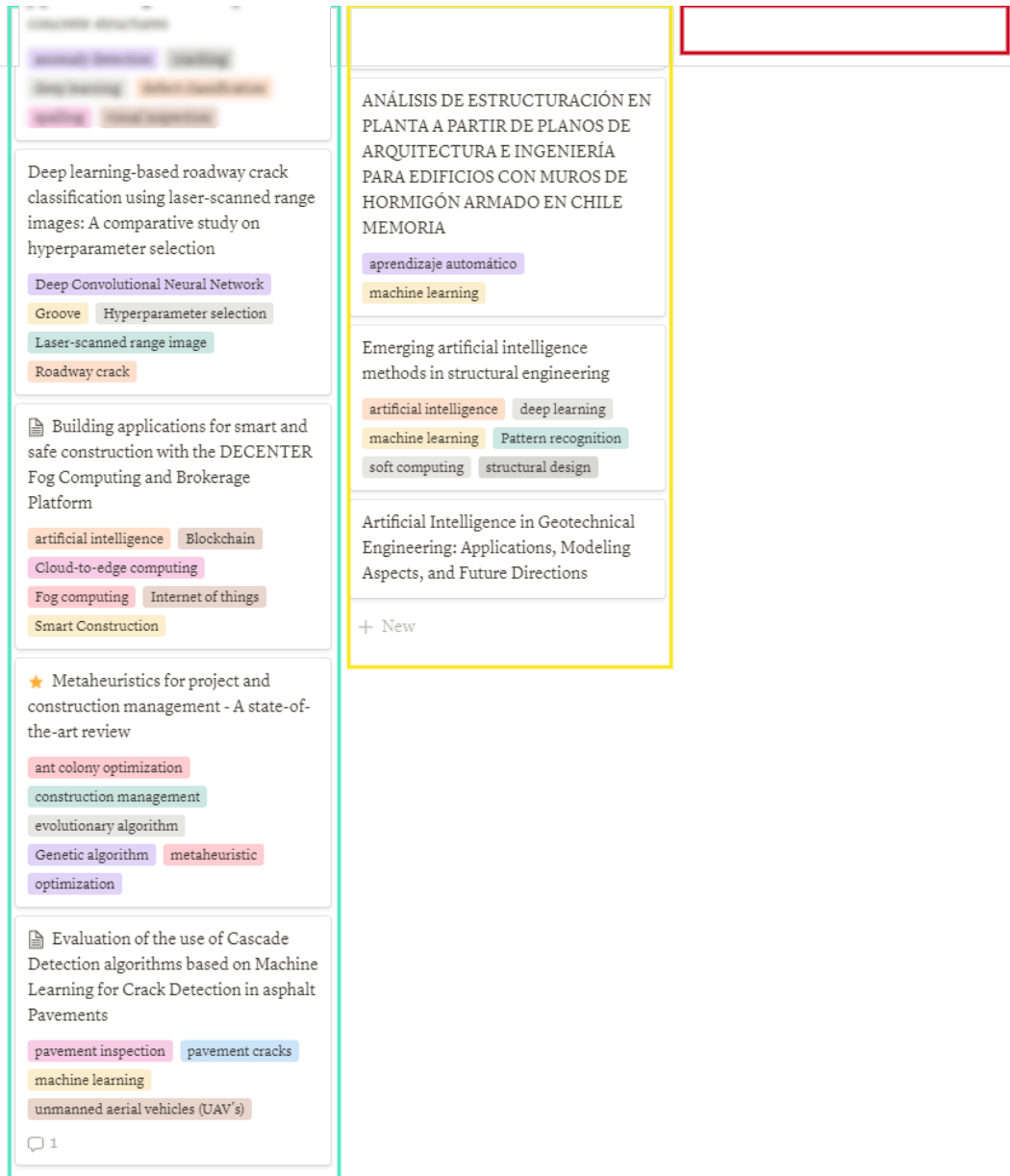


Figura 4.3: Clasificación de artículos académicos según área de aplicación en el proyecto (3). Fuente: elaboración propia.

A modo de resumen se presenta en la figura 4.4 de dónde se han obtenido las aplicaciones de IA aplicables a ingeniería civil abordadas en este trabajo de título.

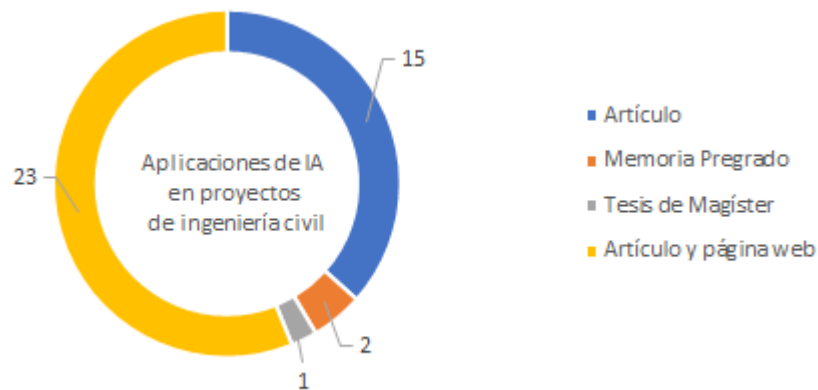


Figura 4.4: Bibliografía asociada a aplicaciones de inteligencia artificial en proyectos de ingeniería civil.

Luego de analizar en mayor detalle cada uno de los artículos (tanto fuentes web como académicas), es conveniente la clasificación de las aplicaciones existentes según qué tipo de proceso asisten en el proyecto de ingeniería civil. En este caso se han dividido las aplicaciones en las siguientes 3 categorías:

1. Asistencia en planificación y gestión de proyectos
2. Asistencia de actividades en obra
3. Asistencia de actividades de diseño

4.1.3. Herramientas en el mercado que asisten procesos y actividades en proyectos de ingeniería civil mediante Inteligencia Artificial

Mediante los distintos artículos de la web, así como las publicaciones de investigación y la búsqueda manual en la web, se han recopilado distintas herramientas y empresas **en el mercado** cuyo servicio basa parte de su funcionamiento en el uso de programas de Inteligencia Artificial para proyectos de ingeniería civil. Se presentan éstas y su principal función en la tabla 4.4:

Tabla 4.4: Servicios en el mercado orientados a proyectos de ingeniería civil y construcción que basan su funcionamiento en inteligencia artificial.

	Empresa/ Servicio	Función
1	Alice Technologies	Uso de IA para generar distintas alternativas de planificación, modificando la distribución de mano de obra, equipos, entre otros. Se integra con BIM
2	Enoba	Generar soluciones holísticas para los sitios de construcción (monitoreo del flujo de trabajo, cumplimiento de actividades, optimizar recursos en tiempo y costo)
3	Intsite - ForeSite	Automatización de Maquinaria pesada. Torres grúas (ForeSite 100) y excavadoras (ForeSite200) asistidas.
4	Intsite - AutoSite	Automatización de Maquinaria pesada. Torres Grúas autónomas y sistemas de torres grúas sincronizados
5	Smartvid.io / Newmetrix	Computer Vision para medir, prevenir y predecir incidentes de seguridad utilizando Inteligencia Artificial
6	Thornton Thomasetti - Core Studio	Suit de herramientas para usar con software BIM Incluye herramienta para Diseño Generativo
7	Testfit	Herramienta para evaluar distintas configuraciones de construcción. Útil para estudios de factibilidad y planeamiento urbano
8	ClearEdge 3D	Herramienta de identificación estructural mediante IA. Escanea ductos y los transfiere a modelo BIM (casos As-Built)
9	GenMEP	Plugin para Revit que utiliza Diseño generativo para diseñar redes (eléctricas, sanitarias) evitando interferencias entre ellas en el modelo BIM.
10	OddVision	Computer Vision para el monitoreo en obra (Por ejemplo: productividad mano de obra y cumplimiento horarios)
11	Komatsu Intelligent Machine Control	Maquinaria pesada inteligente. Automatización de excavadoras y dozers
12	Gauss Control	Predicción y gestión de errores y accidentes con Internet de las Cosas (IoT) e inteligencia artificial.
13	Pavemetrics	Inspección visual de pavimentos usando Sistema Láser de Medición de Grietas (LCMS)
14	BIMTrazer	Distribuye trabajo, detecta desvíos en cronograma y detecta riesgos críticos. Integra IA, BIM y Blockchain en la gestión del proyecto.
15	Vista Data Vision	Herramienta estructural y geotécnica para monitoreo de infraestructura mediante sensores
16	IPSUM - ProPlanner	Aplicación para gestión del proyecto utilizando planificación LEAN y LastPlanner Uso de Machine Learning (ML) para procesamiento de datos
17	nPlan	Uso de IA para el análisis y aseguramiento de riesgos basados en datos históricos de planificación. Pronóstico de plazos
18	INDUS.AI / Procore Indus.ai	Computer Vision integrado sistemas de cámaras en obra y con reporte automático de productividad
19	OxBlue	Servicio Profesional de Cámaras en la construcción. Datos visuales de construcción en tiempo real
20	RiskX.global	Gestión del riesgo en proyectos usando ML y asistiendo la toma de decisiones
21	DECENTER	Digital Twin. Sitios de Construcción Inteligentes y Seguros mediante mecanismos de recopilación de información.
22	Trimble XR10 con HoloLens 2	Casco de seguridad equipado con lentes de realidad mixta (aumentada y virtual). Compatible con Trimble Connect
23	Trimble SiteVision	Instrumento de realidad aumentada. Para visualizar modelos BIM 2D y 3D en el sitio de emplazamiento de forma precisa
24	Spot - Boston Dynamics	Robot asistente que automatiza la captura de datos y las inspecciones de obra Cuenta con modo manual, semi- automático y automático.
25	Mule - Construction Robotics	Robot para la asistencia de construcción en mampostería. Aliviana la carga a maestros albañiles y mejora la precisión de colocación
26	PLC Next - Phoenix Contact	Sensores PLC (controlador lógico programable) para el monitoreo de estructuras integrando IoT (Internet of Things)
27	Bentley	Sensores PLC (controlador lógico programable) para el monitoreo de estructuras integrando IoT (Internet of Things)

4.2. Aplicaciones de Inteligencia Artificial en Proyectos de Ingeniería Civil.

Realizada la revisión bibliográfica e identificada distintas herramientas y servicios en el mercado se presenta a continuación aplicaciones de Inteligencia Artificial orientadas a asistir proyectos de ingeniería civil.

4.2.1. Herramientas de Inteligencia Artificial para la planificación y Gestión de proyectos

Unas de las principales características de los proyectos de ingeniería civil son su dinamismo, incerteza y complejidad [6]. El project management se encarga de lidiar con los obstáculos que propone la naturaleza de los proyectos de ingeniería civil y para cumplir con los plazos es importante contar con una buena planificación. Sin embargo, la planificación muchas veces es modificada debido a variados factores que afectan la ejecución del proyecto, por lo que es de gran apoyo y utilidad las herramientas que ayudan a predecir atrasos, probar escenarios y distintas rutas y estudiar cómo se ve afectado el plazo y el costo al hacer ciertas modificaciones en la planificación como número de jornales o número de horas extra.

Aplicaciones como *Alice Technologies*, *BIMTrazer* y *Nplan* tienen estas características, se encuentran en el mercado y ya se han implementado en proyectos de forma exitosa.

Alice Technologies.

Alice Technologies es una plataforma para la optimización y simulación de proyectos, en concreto de la planificación y gestión de estos. Esta herramienta opera con una inteligencia artificial que simula el proyecto en millones de iteraciones. Su funcionamiento se basa en 4 etapas:

- **Planificación:**

Para esto se debe subir un modelo 3D de la obra o un diagrama de precedencia. Luego se debe definir la disponibilidad de mano de obra y equipos, tasa de producción o rendimientos, localización de grúa(s), calendarios, y restricciones adicionales. Por último se definen los métodos constructivos (los cuales la plataforma llama 'recipes'). Las 'recipes' o recetas contienen las tareas requeridas, los recursos y la logística para completar un elemento dentro del proyecto. Estas recetas se pueden reutilizar en distintos proyectos y también mejorar según disponga el usuario.

Alice es una plataforma que funciona de forma paramétrica, por lo que es posible cambiar parámetros de entrada durante el proceso ante algún cambio que se requiera hacer en tanto en la planificación como en los recursos.

- **Simulación:**

La aplicación Alice simulará la planificación iterando 'millones' de veces entregando soluciones que hayan satisfagan las restricciones definidas en la etapa de planificación y presentando la secuencia de trabajo óptima. Además se pueden añadir y analizar al instante el impacto en costo y tiempo de ciertas tomas de decisiones como añadir una grúa o hacer que una cuadrilla trabaje horas extra.

- Análisis de Soluciones:

La aplicación genera para cada solución entregada un modelo 4D (modelos 3D+ avance en el tiempo) con la programación de actividades el cual puede ser exportado en formato P6. (Lo cual puede ser limitante ya que restringe el uso a usuarios que utilicen software Primavera).

- Gestión:

Alice puede ser utilizado para la visualización del progreso del proyecto además de ajustar según el control y seguimiento que se ha llevado en obra, dando la posibilidad de recalcular rápidamente la solución óptima en costo y plazo.

Otras aplicaciones que también se encuentran en el mercado son textitISPUM Proplanner, *RiskX* y *nPlan* las cuales no son predictivas en cuanto a tiempo y costo del proyecto, pero que facilitan otras áreas de la dirección del proyecto como la generación de indicadores de avance y KPI's, y el análisis de riesgo basándose en datos.

Se presenta a continuación fichas resumen de casos de proyectos de ingeniería civil donde se han implementado Alice Technologies:

Tabla 4.5: Caso de estudio Alice Technologies, comparación alternativas.

Alice Technologies, comparación alternativas construcción	
Caso Estudio:	Desarrollador testea impacto de los costos con ALICE
Empresas colaboradoras:	Alice Technologies, (confidencial)
Ubicación:	Astana, Kazakhstan
Área asistida:	Planificación y gestión del proyecto
Descripción:	<p>Durante la etapa de planificación para un edificio residencial de 13 pisos, una empresa inmobiliaria quería comparar los efectos en costo y tiempo de utilizar hormigón de fraguado rápido, versus hormigón convencional.</p> <p>La empresa inmobiliaria desarrolló planes para su construcción, junto con los costos y tiempos de curado para el concreto tradicional y de fraguado rápido. Luego se analizó los resultados con ALICE.</p>
Resultado:	<p>Se determinó que el proyecto se completaría 50 días más rápido usando concreto de fraguado rápido, disminuyendo el tiempo total de construcción de 176 días a 126 días, permitiendo al contratista desplegar cuadrillas en otros proyectos antes. Aunque el hormigón de fraguado rápido era más caro, ALICE calculó que esta elección reduciría los costes del proyecto en un 3,5 %.</p> <p>Una vez entregada la planificación a la plataforma de ALICE los resultados se encontraban listos en una tarde. Esto fue un en tiempo significativo para la empresa ya que se estima que una asesoría tradicional hubiese demorado entre 3 y 4 meses.</p>

Tabla 4.6: Caso de estudio Alice Technologies, comparación alternativas de planificación. Fuente: Alice Technologies.

Alice Technologies, alternativas de planificación	
Caso Estudio:	Reducción costos y duración de proyecto de mediana altura
Empresas colaboradoras:	Alice Technologies, AF Group
Ubicación:	Oslo, Noruega
Área asistida:	Planificación del proyecto
Descripción:	<ul style="list-style-type: none"> • AF Gruppen es una de las empresas de ingeniería civil y construcción más grandes de Noruega. La empresa buscaba mejorar la rentabilidad de un proyecto de 9 edificios residenciales de mediana altura. • La planificación original se desarrolló utilizando Touchplan (herramienta no basada en IA) y tomó 4 meses en realizarse. • AF Gruppen quería evaluar los efectos en tiempo y costo de hacer variaciones en las cuadrillas y materiales (encofrados estándar vs reutilizables).
Resultado:	<ul style="list-style-type: none"> • AF, utilizando ALICE, creó más de 300 cronogramas, de los cuales 7 eran 'superiores' al plan original • El cronograma paso de una duración de 500 días a 396, reduciendo la duración en un 18 %. • Utilizar encofrado reutilizable junto a una redistribución las cuadrillas resultó en una reducción total del proyecto en un 15 %.

Tabla 4.7: Caso de estudio Alice Technologies, Adaptando planificación a la pandemia. Fuente: Alice Technologies.

Alice Technologies, adaptación de la planificación a las circunstancias	
Caso Estudio:	Reducción costos y duración de proyecto de mediana altura
Empresas colaboradoras:	Alice Technologies, Build Group
Ubicación:	San Francisco, California, USA
Área asistida:	Planificación del proyecto
Descripción:	<p>El Proyecto 5M se ubica en una zona urbana densa. El proyecto haría la transición del sitio de una combinación de edificios de oficinas y estacionamientos en superficie a un equilibrio de espacios residenciales, culturales, comerciales, de oficinas y espacios abiertos.</p> <p>Además de buscar una mejor planificación el proyecto tuvo que enfrentar las restricciones de espacio debido a la pandemia del COVID-19.</p> <p>La empresa requería evaluar múltiples opciones de planificación, lo cual no se lograba con herramientas tradicionales de planificación. Esto sin embargo si es posible utilizando la IA de ALICE.</p>
Resultado:	<p>Al buscar alternativas a la planificación original mediante ALICE, Build Group creó un cronograma de producción mejorado que permitió a la empresa ahorrar varias semanas y millones de dólares en el desarrollo del proyecto.</p> <p>Incluso ante las restricciones debido a la pandemia, la planificación se pudo modificar y finalmente se logró llevar a cabo el proyecto a antes de lo previsto y por debajo del presupuesto estimado.</p>

Tabla 4.8: Caso de estudio Alice Technologies, planificación de edificios residenciales de gran altura. Fuente: Alice Technologies.

Alice Technologies aplicada a proyecto de gran altura	
Caso Estudio:	Uso de horas extras para planificación óptima
Empresas colaboradoras:	Alice Technologies, Ananda Development PLC
Ubicación:	Bangkok, Tailandia
Área asistida:	Planificación del proyecto
Descripción:	<p>Ananda se asoció con ALICE Technologies para explorar diferentes escenarios de construcción para el proyecto e identificar las mejores vías posibles.</p> <p>Utilizando ALICE y la potencia de su IA computacional, Ananda experimentó con una serie de variables mientras buscaba la forma más eficiente de construir Elio Del Nest. Por ejemplo, cuestionó sus propios supuestos básicos sobre el encofrado y buscó posibles cuellos de botella. Comprobó lo que podía ocurrir si se empleaba un número variable de cuadrillas, y si éstas hacían horas extras. También probó un plan de construcción estrictamente secuenciado frente a una secuencia de construcción relajada que permitiera el libre flujo de trabajo de las cuadrillas.</p>
Resultado:	<p>Los resultados de Ananda fueron informativos y aparentemente contradictorios.</p> <p>La variable que más afectó a los resultados de Ananda fueron las horas extras. Pagando a los miembros de su equipo las horas extras a partir de un mes después del inicio del proyecto, Ananda pudo reducir la duración de su proyecto en 208 días. Y al hacerlo, reduciría los costes en un 32 %.</p>

Tabla 4.9: Caso de estudio Alice Technologies, planificación de aeropuerto.
Fuente: Alice Technologies.

Alice Technologies aplicada a Planificación de proyecto da aeropuerto	
Caso Estudio:	Uso de Alice Technologies para generar oferta en licitación de infraestructura
Empresas colaboradoras:	Alice Technologies, Contratista (confidencial)
Ubicación:	Japón
Área asistida:	Planificación del proyecto
Descripción:	Un contratista japonés se encargaba en la ampliación de un importante aeropuerto en Asia. El contratista comenzó a implementar ALICE en busca de aumentar la eficiencia y la rentabilidad.
Resultado:	Utilizando ALICE, el contratista desarrolló un nuevo calendario que era un 10,2% más rápido que el original, un cambio que supondría un ahorro de decenas de millones de dólares en costes. Este nuevo calendario también requería menos tiempo de grúa, lo que supuso un ahorro adicional para el proyecto.

Tabla 4.10: Caso de estudio Alice Technologies, planificación para ofertas de licitación. Fuente: Alice Technologies.

Alice Technologies, oferta para licitación	
Caso Estudio:	Uso de Alice Technologies para generar oferta en licitación de infraestructura pública
Empresas colaboradoras:	Alice Technologies, Parsons Corporation
Ubicación:	Edmonton, Canada
Área asistida:	Planificación del proyecto
Descripción:	<p>Parsons utilizó ALICE para desarrollar un cronograma de construcción competitivo en su oferta para el proceso de licitación de la extensión de la red de transporte público.</p> <p>Con ALICE, Parsons exploró opciones de programación que tenían en cuenta una serie de factores que podían influir en los plazos, como las dificultades de construcción basadas en el clima invernal. Además era especialmente importante para evitar posibles daños y perjuicios por una entrega posterior</p>
Resultado:	<p>Parsons fue capaz de crear programas que requerían menos personal y menos equipos, como bombas de hormigón, utilizando ALICE. Y pudo determinar la cantidad óptima de encofrado requerido para acelerar el desarrollo de la porción de riel elevado del proyecto.</p> <p>Parsons desarrolló un cronograma riguroso y creativo mediante ALICE que hizo a la compañía ganar la licitación para la extensión de 14 estaciones de tren ligero.</p>

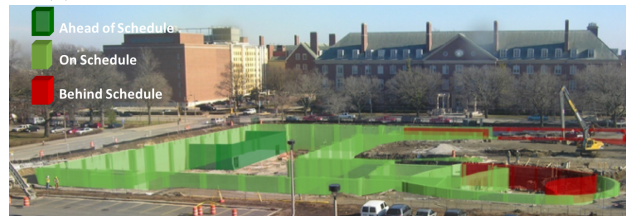
4.2.2. Monitoreo del personal de la obra mediante *Computer Vision*

El uso de *Computer Vision* es quizás una de las técnicas de Deep Learning más conocidas y aplicadas en todo tipo de industria. En el caso de los proyectos de ingeniería civil son especialmente útiles para el monitoreo del sitio de construcción. Existen distintas aplicaciones de *Computer Vision* como se verá a lo largo de este trabajo, pero su aplicación para el monitoreo del personal es de los cuales se encuentran más casos en que se haya puesto en práctica. Es más en 2019 se creó *Odd Industries - Odd Vision*, una empresa chilena que implementa visión artificial para el monitoreo de los procesos de construcción en obra.

La aplicación de visión artificial para el monitoreo en obra es de utilidad para: medir rendimientos de la mano de obra, asegurar el cumplimiento de protocolos de seguridad al detectar la interacción de las personas con los equipos de seguridad, identificar situaciones de riesgo y para calificar la calidad del cumplimiento de actividades.



(a) Detección de maquinaria y personal Fuente: Indus.ai



(b) Medición de avance con visión artificial Fuente: Medium



(c) Detección de EPP's Fuente: Agmis

Figura 4.5: Computer vision aplicado para el monitoreo de actividades en obra.

Caso de estudio: Newmetrix / Smartvid.io

Smartvid, o Smartvid.io, es una plataforma enfocada en el manejo de riesgos en el sitio de trabajo. Esta herramienta permite monitorear y predecir riesgo en las áreas de seguridad, calidad y productividad dentro del proyecto aplicando el *Aprendizaje Supervisado*.

Esta plataforma funciona a través del almacenamiento de imágenes y videos de los distintos proyectos de la empresa usuaria, los cuales se pueden obtener desde distintas fuentes de almacenamiento en la nube del sector construcción². Luego, el motor de inteligencia artificial se encarga de encontrar indicadores de riesgo en seguridad, calidad y productividad, con lo cual se generan automáticamente paneles e informes que clasifican al proyecto según riesgo potencial de seguridad. La IA con que opera la plataforma es capaz de hacer observaciones en sobre seguridad (como uso de EPPs o condiciones de riesgo de caída), productividad (n° de trabajadores en sitio, control horario y fases de construcción) y calidad (detección de defectos específicos como grietas).

Smartvid.io opera bajo 3 módulos:

- *Módulo de observaciones de seguridad*: donde se muestran las distintas observaciones generadas para implementar medidas en los equipos de trabajo
- *Módulo de monitoreo de seguridad*: mediante el cual se identifican las condiciones de riesgo actualizadas para así enfocar medidas tomadas.
- *Módulo de análisis predictivo*: donde se identifican los proyectos de alto riesgo mediante un *Sistema de Alerta Temprana* específico para el cliente basándose en un historial de proyectos y reportes.

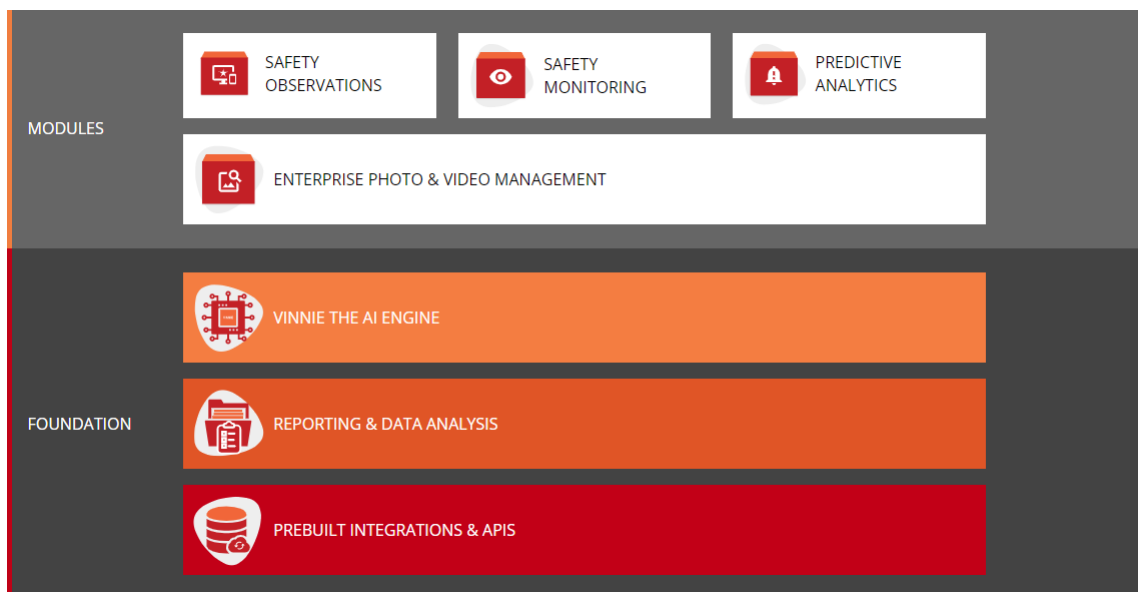


Figura 4.6: Esquema organizacional de la plataforma Smartvid.io. Fuente: <https://www.smartvid.io/our-platform>.

² Autodesk BIM 360, Procore, Oracle Aconex, OxBlue site cameras, StructionSite, Box, entre otras.

Se presenta a continuación fichas donde se presenta el desempeño de Newmetrix/ Smartvid.io en distinto proyectos:

Tabla 4.11: Caso de estudio NewMetrix / Smartvid. Fuente: Newmetrix.

Caso de estudio NewMetrix / Smartvid	
Caso Estudio:	Artificial Intelligence for Construction Safety Demonstration, The 2016 AI for Construction Safety
Empresas colaboradoras:	SMARTVID, Engineering-News-Record, Suffolk Construction, SKANSKA, Rogers O'Brien Construction, Mortenson Construction, otros colaboradoras anónimas.
Año:	2016
Área asistida:	Gestión del proyecto
Descripción:	<p>La revista Engineering News Record celebra un concurso anual de fotografía sobre el año en la construcción.</p> <p>Las etiquetas se basan en el contenido de cada imagen y son impulsadas por las señales de la narración de audio durante el rodaje.</p> <p>VINNIE (nombre de la IA de NewMetrix) analizó las 1080 imágenes del concurso de 2016 junto con los expertos tradicionales en seguridad humana para comparar la misma tarea hecha manualmente.</p> <p>Se chequearon 2 tipos de condiciones riesgosas para los trabajadores: sin casco de seguridad, y sin chalecos reflectantes.</p>
Resultado:	<p>El tiempo requerido para completar la revisión fue de:</p> <ul style="list-style-type: none"> • mediante IA: 10 minutos • revisión manual: 270 minutos <p>Imágenes con personas detectadas correctamente:</p> <ul style="list-style-type: none"> • mediante IA: 446 • manualmente: 414 <p>IA detecto 32 imágenes con trabajadores sin casco de seguridad y 106 de trabajadores sin chaleco reflectante.</p> <p>Los jurados acordaron que usar una herramienta como VINNIE, es más rápido, preciso, y con cobertura más amplia de casos.</p>

Dentro de los proyectos de ingeniería civil que se han desarrollado y que han implementado IA, se encuentra el historial de proyectos que han implementado *Computer Vision* mediante la herramienta entregada por *OxBlue*. Se presentan dichos proyectos a continuación.

Tabla 4.12: Caso de estudio NewMetrix / Smartvid. Fuente: Newmetrix.

Caso de estudio NewMetrix / Smartvid	
Caso Estudio:	Integración de Smartvid.io-Procore
Empresas colaboradoras:	Stiles Construction, SMARTVID, Procore
Año:	
Área asistida:	Gestión del proyecto
Descripción:	Clasificación de imágenes mediante técnicas de Machine Learning. Al implementar Smartvid.io se logra reunir imágenes y video desde distintas fuentes, lo cual previamente no era posible únicamente con Procore
Resultado:	<p>La integración estrecha de Smartvid a Procore ha hecho el manejo de los medios de comunicación de Stile más automatizado.</p> <ul style="list-style-type: none"> • El personal aprovechó la mejora del proceso y tomó más fotografías, lo que llevó a una mejor documentación y reducción del riesgo. • Se centralizó y facilitó el acceso al contenido nuevo y existente independiente del origen se ha centralizado y más fácil de encontrar, con todas las imágenes del proyecto agregado en un solo lugar. • Una mejor documentación condujo a una mejor ubicación de infracciones de seguridad, mejor cumplimiento y reducción del riesgo.

Tabla 4.13: Caso de estudio NewMetrix / Smartvid integrado con BIM 360.

Fuente: Newmetrix.

NewMetrix / Smartvid integrado en BIM 360	
Caso Estudio:	Disminuyendo el riesgo, mejorando la seguridad con Smartvid.io, Autodesk's BIM 360 y Machine Learning
Empresas colaboradoras:	SVANSKA, Smartvid, Autodesk
Año:	2016
Área asistida:	Gestión del proyecto
Descripción:	<p>Skanska es una de las compañías de construcción líderes a nivel mundial con una enfoque en la seguridad en los proyectos. Previo a implementar Smartvid.io, Skanska utilizaba Autodesk BIM 360 para el manejo centralizado de la información de los proyectos.</p> <p>Mediante Smartvid.io, los safety managers de sitio comenzaron a capturan videos con una cámara GoPro o con un smartphone utilizando la aplicación de Smartvid.io donde narran ejemplos observados de mejores prácticas de seguridad y peligros potenciales.</p>
Resultado:	<ul style="list-style-type: none"> • Una vez integrados los softwares las fotos almacenadas en la base de datos de BIM 360 se sincronizaron automáticamente a Smartvid.io dividida por proyecto. • Las fotos existentes en BIM 360 fueron agregadas y etiquetadas automáticamente, ahorrando tiempo en la recuperación y organización manual. • Los directores de seguridad utilizaron etiquetas mediante audio para extraer imágenes específicas del sitio como ejemplo de riesgos y mejores prácticas. Con estos nuevos casos también se logra entrenar el etiquetado en procesos futuros con más ejemplos.

Tabla 4.14: Caso de estudio NewMetrix / Smartvid para análisis predictivo de seguridad. Fuente: Newmetrix.

NewMetrix / Smartvid para Alertas Tempranas	
Caso Estudio:	Cómo Suffolk y Newmetrix aprendieron a predecir y prevenir incidentes en la construcción
Empresas colaboradoras:	Suffolk, Newmetrix, Autodesk, Procore, OxBlue
Año:	2018
Área asistida:	Gestión del proyecto
Descripción:	<p>Los datos provenientes de las plataformas Autodesk, Procore, OxBlue alimentan modelos de IA que predicen incidentes con costos de entre los 1.4M a 3.6M.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Los datos reunidos para el entrenamiento de la IA de Newmetrix consta de datos de un periodo de 10 años pertenecientes a las empresas colaboradoras. Estos fueron suficientes para elaborar un sistema predictivo. • El Sistema de Alerta Temprana de Incidentes fue probado para un dataset equivalente a 3 años de datos de proyectos, fotos e incidentes con los que la IA no había sido entrenada.
Resultado:	<ul style="list-style-type: none"> • El modelo predijo 20 % de los incidentes en ese periodo de 3 años con una precisión del 80 %. Lo que equivale a 4 alertas anuales, correspondiendo una a una falsa alarma. • Desde el punto de vista conservador, con evitar el 25 % de los accidentes previstos una compañía con 50 proyectos por año se evitarían entre 40 a 100 accidentes, esto equivaldría aproximadamente a \$1.4M a \$3.4M por año (en 2018).

Tabla 4.15: Caso de estudio NewMetrix / Smartvid para Dashboarding.
Fuente: Newmetrix.

NewMetrix / Smartvid para Dashboarding	
Caso Estudio:	Uso de IA para gestionar el riesgo del proyecto a escala
Empresas colaboradoras:	Shawmut Design and Construction, Newmetrix, Autodesk, Procore, OxBlue, Microsoft
Año:	2018
Área asistida:	Gestión del proyecto
Descripción:	Shawmut utiliza la IA de Newmetrix para el análisis del riesgo en conjunto a otras herramientas de la pila de tecnologías para el riesgo de seguridad: Procore, ConstructSecure, OxBlue y Microsoft PowerBI.
Resultado:	<ul style="list-style-type: none"> • Creación dashboards que ayudan a clasificar los proyectos según los posibles factores de riesgo. • Complementar la observación humana con la perspectiva de la IA ayuda a entender el riesgo y decidir donde concentrar la atención. • Las proporciones de observaciones riesgosas y no riesgosas son útiles para resaltar el comportamiento positivo.

Tabla 4.16: Caso de estudio NewMetrix / Smartvid dentro del flujo de trabajo. Fuente: Newmetrix.

NewMetrix / Smartvid + Egnyte + StructionSite	
Caso Estudio:	Marcando el comienzo de un paradigma de seguridad basado en predicciones
Empresas colaboradoras:	Hawaiian Dredging Construction Company, Newmetrix, Struction Site, Egnyte
Año:	2020
Área asistida:	Gestión del proyecto
Descripción:	La compañía cuenta con un flujo de trabajo integrado simplificado mediante el uso de las aplicaciones: StructionSite (seguimiento de proyecto), Egnyte (almacenamiento de imágenes y archivos compartidos) y Newmetrix. Estas aplicaciones se integran correctamente y sincronizan la información de manera rápida.
Resultado:	<ul style="list-style-type: none"> • El BIM Manager de Hawaiian Dredging declara que la IA de Newmetrix está entrenada para reconocer riesgos del sitio de construcción de manera no sesgada. De esta forma se generan evaluaciones automáticas del riesgo, logrando que los equipos tengan mejor visibilidad del riesgo. • El sistema implementa un algoritmo que logra destacar dónde y cuándo es probable que se produzcan incidentes.

Tabla 4.17: Proyectos que han utilizado OxBlue. Fuente: OxBlue

	Proyecto	Ubicación	Tipo
1	Bridges to Prosperity	Kigali, Rwanda	Infrastructure
2	Frontier II	Newkirk, OK	Commercial
3	Booth Theatre Production Center	Boston, MA	Higher Education
4	Cross Village	Norman, OK	Higher Education
5	Avenue C Apartments	Billings, MT	Multi-family
6	Salesforce Tower	San Francisco, CA	Commercial
7	McCormick Place	Chicago, IL	Hospitality
8	UGA-Sanford Stadium	Athens, GA	Stadiums
9	Broetje Orchards	Prescott, WA	Industrial
10	Davita's Worldwide HQ	Denver, CO	Commercial
11	College Stadium Compilation	USA	Stadiums
12	Plymouth Harbor on Sarasota Bay	Sarasota, FL	Multi-family
13	Chinook Pedestrian Bridge	Calgary, AB	Infrastructure
14	360 Market Square	Indianapolis, IN	Mixed-Use
15	Toyota Dealership	Los Angeles, CA	Commercial
16	SAMTECH	Jahor Bahru, Malaysia	Commercial
17	Steel House	Palm Springs, CA	Multi-family
18	Bertha Disassembly	Seattle, WA	Government
19	Lifeway HQ	Nashville, TN	Mixed-Use
20	I-85 Bridge Rebuild	Atlanta, GA	Infrastructure
21	Cityscape Flats	Fort Wayne, IN	Multi-family
22	WSU Cultural Center	Pullman, WA	Higher Education
23	309 East Paces	Atlanta, GA	Mixed-Use
24	609 Main	Houston, TX	Commercial

Tabla 4.18: Proyectos que han utilizado OxBlue (2). Fuente: OxBlue

	Proyecto	Ubicación	Tipo
25	455 Eye Street	Washington D.C.	Multi-family
26	Fremont Station	Fremont, CA	Government
27	Arts Center	Houston, TX	Education
28	HD Supply HQ	Atlanta, GA	Commercial
29	Braves Stadium	Atlanta, GA	Stadiums
30	Sixers Training Complex	Camden, NJ	Hospitality
31	Saints Superdome	New Orleans, LA	Stadiums
32	National's Park	Washington D.C.	Stadiums
33	Habitat for Humanity	Atlanta, GA	Nonprofit
34	MSU Stadium	Starkville, MS	Stadiums
35	Husky Stadium	Seattle, WA	Stadiums
36	Williams-Brice Stadium	Columbia, SC	Stadiums
37	Galaxie Apartments	Madison, WI	Multi-family
38	DND Ventures	Cincinnati, OH	Commercial
39	DCT Jurupa Logistics	Fontana, CA	Industrial
40	Avalon Baker Ranch	Lake Forest, CA	Multi-family
41	Hampton Inn	Washington D.C.	Hospitality
42	ATL International School	Atlanta, GA	Education
43	Pedestrian Bridge	Louisville, KY	Infrastructure
44	Hampton Inn	Minneapolis, MN	Hospitality
45	JW Marriott	Austin, TX	Hospitality
46	Iowa Children's Hospital	Iowa City, IA	Healthcare
47	Swedish Orthopedic Center	Seattle, WA	Healthcare

4.2.3. Control de Calidad y cumplimiento del subcontrato

Una de las aplicaciones recientes y de las cuales no se han encontrado evaluaciones e investigaciones sobre sus resultado, son las herramientas de realidad mixta (realidad aumentada y realidad virtual). Hoy en día ya existe en mercado las herramientas de *Trimble* que emplea estas tecnologías. Los

- **Trimble XR10:**

Trimble XR10 es una herramienta de hardware con realidad mixta (i.e. combina realidad virtual con realidad aumentada) la cual funciona con los *Hololens 2* desarrollados por *Microsoft*. Mediante esta herramienta se puede integrar el modelo BIM del proyecto (de 2D a 5D) y así visualizar los planos en obra mediante realidad mixta. De esta forma se agiliza la toma de decisiones aportando con el contexto real al modelo BIM. El potencial beneficio que ofrece esta herramienta es el aumento de productividad al evitar demoras y errores mediante la colaboración y transparencia en tiempo real de los colaboradores.



Figura 4.7: Trimble XR10, imagen referencial. Fuente: Trimble Field Technology.

- **Trimble SiteVision:**

SiteVision es un instrumento de realidad aumentada para visualizar con precisión modelos BIM de la obra a construir en su lugar de emplazamiento. Este instrumento tiene incorporado un Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS), lo que permite visualizar el modelo BIM de la obra posicionado en las coordenadas del proyecto antes de la etapa de construcción y con una precisión de 1 a 2 cm. Esta herramienta tiene como potenciales beneficios identificar con antelación problemas en el modelo (como interferencia de elementos) o en la metodología de construcción, optimizar la comunicación mediante informes de campo levantados a través de la herramienta, y maximizar la inversión BIM al aumentar la eficiencia del trabajo y prevenir errores.



Figura 4.8: Trimble SiteVision, imagen referencial. Fuente: Trimble Field Technology.

- **Trimble Connect:**

Trimble Connect corresponde al software con el cual trabajan los *Hololens* y los *Trimble XR10* para la visualización del modelo 3D. Es un software de realidad mixta el cual busca facilitar la coordinación, la colaboración y la gestión en los proyectos, así como facilitar la comprensión de secuencias constructivas.

4.2.4. Monitoreo de salud estructural

Dentro de Las aplicaciones relacionadas a la ingeniería estructural, una de las mayormente investigadas ha sido el uso de visión artificial para la detección de daños y grietas en estructuras. En este trabajo de título en concreto se han recopilado investigaciones aplicadas a la detección de grietas en estructuras de hormigón (mediante fotografías) y pavimentos (mediante escáner láser). Otras formas de automatizar el monitoreo de salud estructural ha sido mediante el uso de sensores que utilizan tecnología *PLC (Controlador Lógico Programable)* y que actualmente se pueden integrar con *IoT (Internet of Things)* para procesar datos y acceder de instantáneamente.

Por otro lado en el mercado ya existen aplicaciones para detección de daños tanto para *estructuras de hormigón* cómo para *obras geotécnicas* y estos son los casos de *Pavmetrics* y *Vista Data Vision* respectivamente. La medición de

En resumen, el *Monitoreo de Salud Estructural (SHM)* principalmente para estructuras de hormigón y obras geotécnicas (muros de empréstito, embalses o presas de relave) ha sido la principal aplicación de Inteligencia Artificial en el área de ingeniería estructural. Esto se refleja en la figura 4.9 donde SHM es la aplicación que más se repite tanto en las aplicaciones en actuales como emergentes.

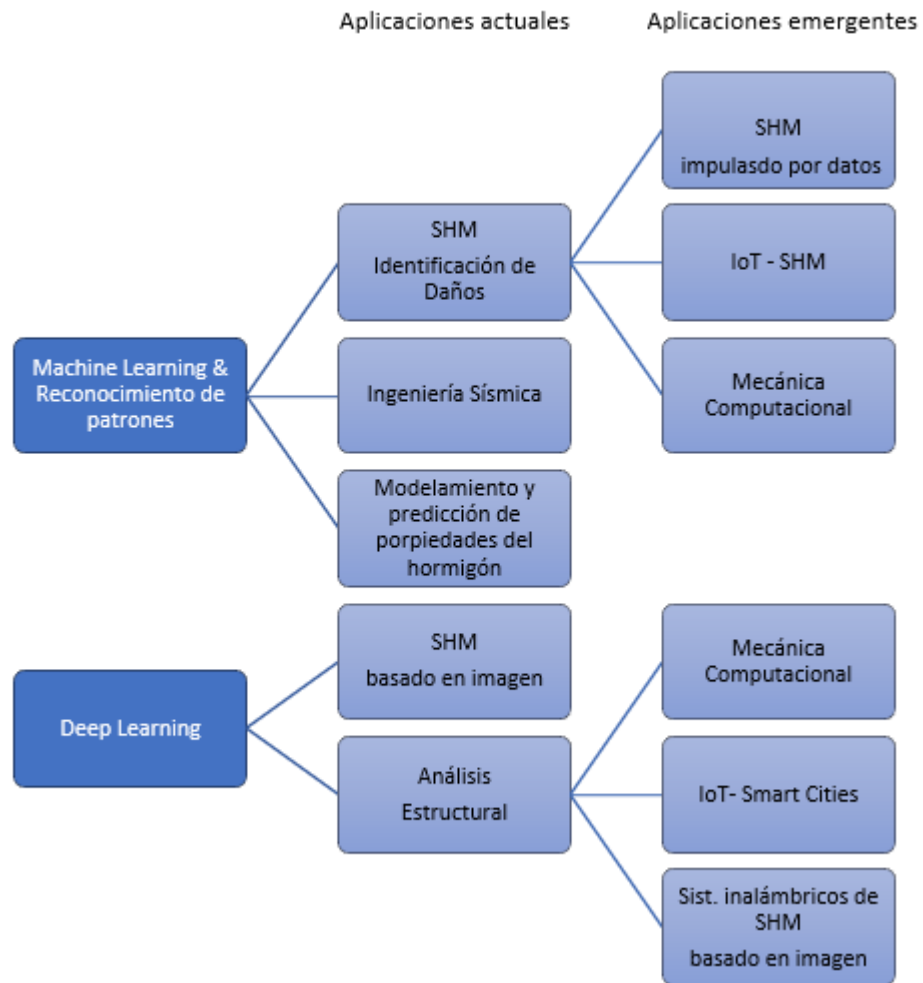


Figura 4.9: Aplicaciones de PR, ML y DL en ingeniería estructural. Fuente: Hadi Salehia , Rigoberto Burgueño. "Emerging artificial intelligence methods in structural engineering" [10]

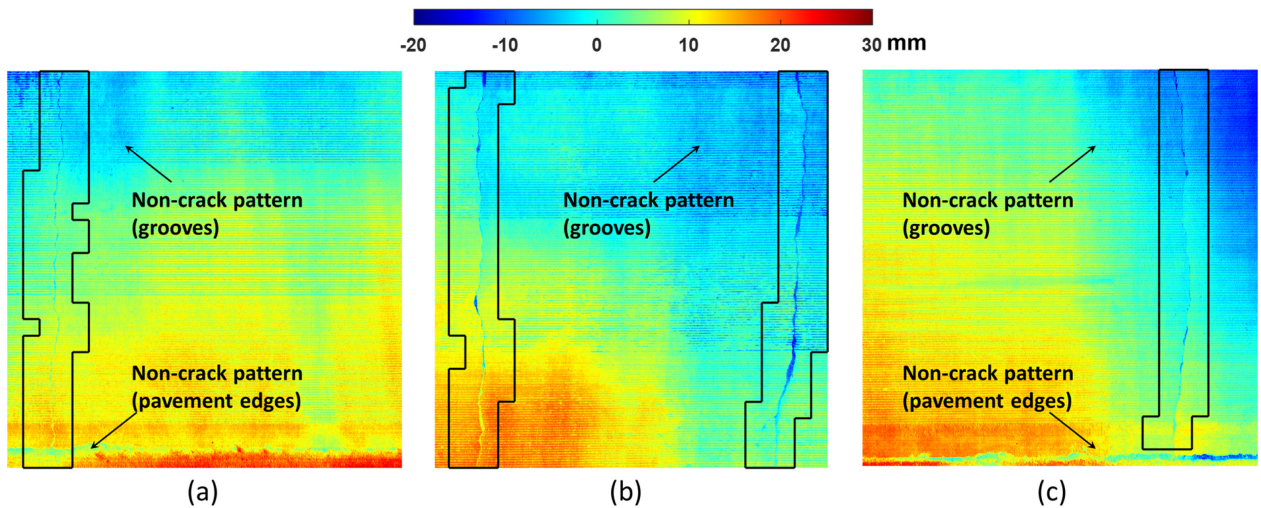


Figura 4.10: Clasificación de grietas en pavimentos mediante escáner láser. Fuente: [10]

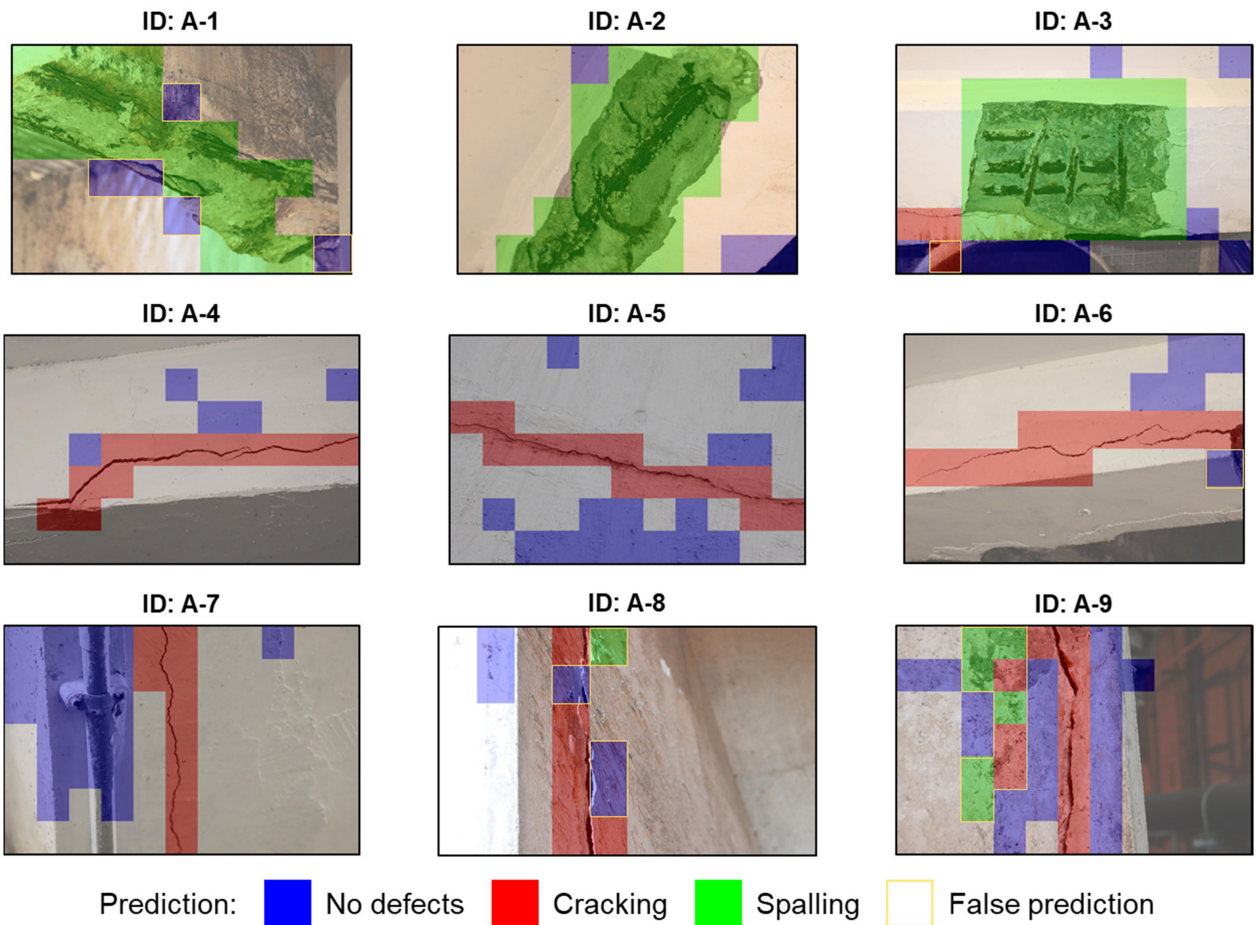


Figura 4.11: Identificación de grietas en estructuras de homrigón. Fuente: [2].

4.2.5. Automatización de maquinaria y asistencia a la mano de obra

INTSITE es una empresa que produce herramientas que emplean IA y Deep Learning para optimizar y automatizar la maquinaria en el centro de un lugar de trabajo. De esta manera la herramienta busca mejorar significativamente el desempeño de industrias que requieren de maquinaria pesada como son la construcción y la minería.

Toda la maquinaria de INTSITE están *conectadas en la nube*, por lo que se mantiene en creación una red global de maquinaria pesada que permite la toma de decisiones basada en los datos y el monitoreo en tiempo real de la actividad en el lugar de trabajo.

Existen en la actualidad 2 tecnologías desarrolladas por INTSITE que se encuentran en el mercado:

- **ForeSite:** Sistema de asistencia para operadores de maquinaria. Esta tecnología funciona en base a un Sistema Avanzado de Asistencia al Conductor (*ADAS*) para un manejo seguro, y está complementado con algoritmos de ML para movimiento óptimo. De esta forma el/la operador de la maquina sigue la trayectoria más eficiente contando con alertas de seguridad de ser necesario. Este sistema se implementa en grúas torre y excavadoras.
- **AutoSite:** Maquinarias autónomas que permiten seguridad y eficiencia de operación. En lugar de alertas de seguridad y recomendaciones de orientación, el sistema toma decisiones autónomas para dar movimiento real a la maquinaria. En la actualidad este sistema se ha implementado únicamente en **grúas torre** que son capaces de operar continuamente 24/7 y de coordinar sus maniobras con otras grúas en el espacio de trabajo.

La implementación de estas tecnologías refleja resultados en productividad y eficiencia de la obra. Estos se reflejan en múltiples casos de estudios, en especial en el país donde se origina la empresa: Israel.

La creación de robots automáticos también ha sido una línea de investigación dentro de las aplicaciones de IA para ingeniería civil y construcción, y es que hay industrias manufactureras (como los automóviles) donde la *Automatización robótica de procesos (RPA)* ha tenido efectos importantes en cuanto a productividad, número de trabajadores necesarios y capacidades requeridas.

Empresas que ya se han creado recientemente y que impulsan la incorporación de robots en los procesos constructivos son *Boston Dynamics* y *Construction Robotics*. En concreto sus productos que operan mediante inteligencia artificial son:

- **Spot-** Boston Dynamics: Spot es un perro robot que busca ayudar al humano en distintas tareas. Últimamente se ha implementado para inspección y recolección de datos. Este robot cuenta con una cámara de visión en 360° y tiene una autonomía de 90 minutos en movimiento. Requiere de la compañía de un operario, pero pueden programarse rutas para que las realice de forma autónoma. Este robot destaca por sus movimientos

naturales y flexibilidad de movimiento en comparación con otros robots, por lo que es útil para la recolectar datos en sitios de construcción variados y entornos peligrosos.

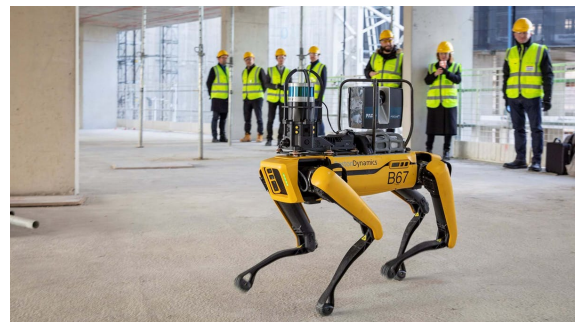
- *Mule*- Construction Robotics: Mule es un equipo de asistencia de elevación diseñado para manejar y posicionar material pesado en la construcción en mampostería. Tiene una capacidad de carga de 150lb (68kg) y permite el aumento de eficiencia y seguridad del levantamiento de muros de mampostería.



(a) Sistema de grúas autónomas



(b) MULE - Construction Robotics



(c) Spot - Boston Dynamics

Figura 4.12: Uso de robots en el sitio de construcción.

Todas estas herramientas se encargan de asistir o automatizar tareas que requieren de expertiz humana, aquellas cuyo rendimiento depende en mayor parte de la persona que la ejecuta. La implementación de estas nuevas tecnologías hace estas actividades más seguras, menos agotadoras para las personas, mejor estandarizadas, y con menos variación de productividad.

4.2.6. Digital Twins

Digital Twin (Gemelo Digital) se refiere a una representación virtual de una edificación la cual muestra una representación en tiempo real de la obra (ya sea fábrica, un centro de distribución o infraestructura vial), representando las operaciones que se llevan a cabo mediante la integración de IoT. Esta herramienta es especialmente útil para la operación de las instalaciones. En el caso de la construcción, son distintos los artículos proponen los potenciales beneficios de contar con un gemelo digital de la obra, ya que estos pueden potenciar el monitoreo del proyecto y el manejo de los riesgos al tener una visión completa del proyecto facilitando la toma de decisiones.

Si bien este marco de trabajo está pensado principalmente para la operación y mantenimiento de instalaciones industriales ya se ha implementado en infraestructura civil. *Bentley* ha sido de las empresas que ha implementado esta tecnología para monitorear el desempeño de el viaducto de Paul Severa y en puentes en el estado de Minesota, EEUU.

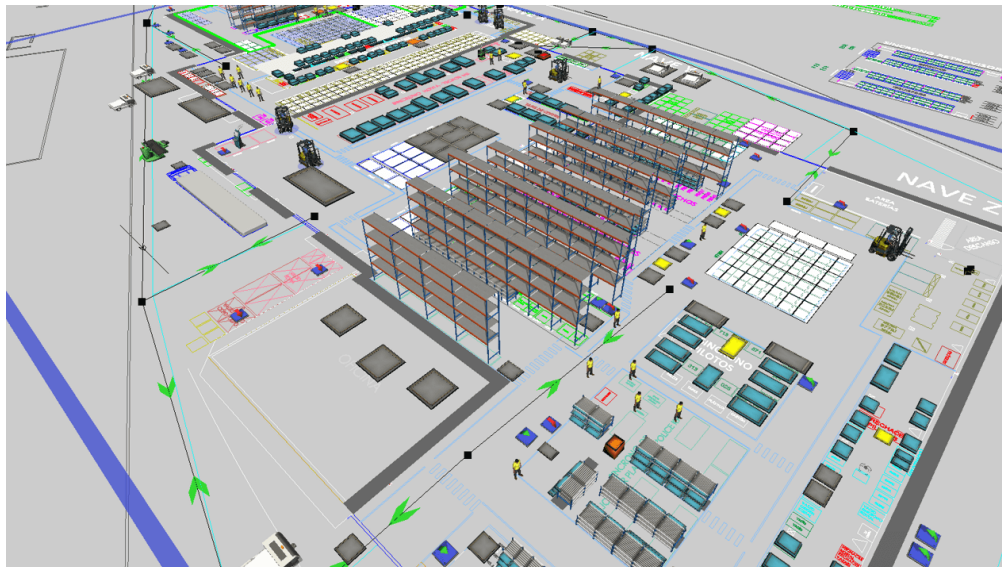


Figura 4.13: Ilustración de un gemelo digital. Fuente: [Ferrovial](#).

4.2.7. Integración de aplicaciones IA con software BIM

La metodología BIM ha tenido importantes esfuerzos tanto en iniciativas para impulsar su implementación (**Plan BIM**) así como numerosas investigaciones para su correcta implementación. BIM se considera hoy en día una herramienta base tanto para la industrialización de los proyectos de ingeniería civil como para la digitalización de los procesos que ocurren dentro de estos proyectos.

Los softwares que facilitan la metodología BIM (conocidos como *softwares BIM*) además de utilizarse en modelar en 3D el detalle de la obra a construir, facilitan la gestión de la información del proyecto de forma centralizada. Esto a su vez impulsa una mejor comunicación entre los distintos actores de un proyecto de ingeniería civil y entre las distintas profesiones que se contienen en cada uno de estos, como constructores civiles, ingenieros en distintas áreas, profesionales de arquitectura, etcétera. Es por esto que hoy en día BIM muchas veces se le considera como la **columna vertebral** de la digitalización de la construcción [6].

La implementación de Inteligencia Artificial vista como un proceso de digitalización de proyectos de ingeniería civil tiene la oportunidad de basarse en BIM cómo fuente continua de datos e información útil para generar más y mejores modelos de Machine Learning. Es por esto que distintas aplicaciones de IA para proyectos, tanto en desarrollo cómo en, consideran la importancia del software BIM en la actualidad. Algunas de las aplicaciones estudiadas que ya se encuentran en el mercado cuentan con integración BIM, ya sea mediante la lectura de archivos de modelado 3D (en formatos como RVT o IFC) o como *plugins* para usar directamente en softwares BIM como *Autodesk Revit*.

Además de BIM como una fuente de datos para modelos de IA, además se puede aprovechar el uso del *Natural Language Processing (NLP)* y *Cloud Computing* como herramientas para mejorar y facilitar la experiencia de los usuarios de BIM. De esta forma los usuarios pueden acceder y navegar de manera más fácil y ordenada a la gran cantidad de datos almacenados en un modelo BIM.

4.3. Resultados de las entrevistas

En la sección de anexos se adjuntan las transcripciones de las entrevistas realizadas

4.3.1. Observaciones generales

Tabla 4.19: Aplicaciones de IA asociada a proyectos de ingeniería civil mencionadas por entrevistados.

Entrevistado	Aplicaciones de IA asociadas a proyectos de ingeniería civil
Entrevistado 1 (LM)	Estimación de resistencia en materiales, Diseño estructural conceptual basado en redes neuronales, Computer Vision
Entrevistado 2 (RH)	Estimaciones de resistencias en materiales, Monitoreo mediante imágenes, Análisis de imágenes satelitales para estudios macro, Computer Vision
Entrevistado 3 (DC)	Proyecto SDAC (Smart Design Construction) para disminuir fragmentación de la industria, Monitoreo mediante imágenes, Procesamiento de texto (libros de obra), Generar modelos en base a métricas de Last Planner, Computer Vision
Entrevistado 4 (CL)	Herramientas predictivas para la gestión de construcción, Generar metodologías de decisión validadas con modelos de ML Monitoreo de obra mediante imágenes, Computer Vision

Tabla 4.20: Posibles ventajas de usar IA en proyectos de ingeniería civil mencionadas por entrevistados.

Entrevistado	Ventajas de la IA aplicada a proyectos de ingeniería civil
Entrevistado 1 (LM)	En número de datos generados en la industria de la construcción genera grandes cantidades de datos debido a la cantidad de personal que requiere.
Entrevistado 2 (RH)	Ahorro de tiempo en tareas simples de automatizar y donde no se requiera de mucha intervención/ supervisión humana.
Entrevistado 3 (DC)	Ayuda a desarrollar la interoperabilidad. Mejorar el monitoreo en obra y productividad.
Entrevistado 4 (CL)	Ayuda a apoyar heurísticas de gestión de proyectos en base a modelos validados. Mejor monitoreo de las actividades en obra mediante monitoreo por visión artificial.

Tabla 4.21: Posibles desventajas de usar IA en proyectos de ingeniería civil mencionadas por entrevistados.

Entrevistado	Desventajas del uso de IA en proyectos de ingeniería civil
Entrevistado 1 (LM)	Aún hay pocos casos de estudio de la IA dentro de ingeniería civil. La construcción genera muchos más datos pero no necesariamente los tienen capturados.
Entrevistado 2 (RH)	Llevar los desarrollos más allá de sus límites razonables. Cómo ajustar modelos en base a excesivos parámetros y olvidar las bases teóricas (en caso de ingeniería estructural).
Entrevistado 3 (DC)	Se necesita una base grande de datos, pero si esos datos no están estructurados no sirven para entrenar modelo de Machine Learning o IA. Debe haber un trabajo de procesamientos y estructuración de datos antes de utilizarlos.
Entrevistado 4 (CL)	En el caso de la construcción, el bajo grado de transformación digital. Generamos muchos datos pero de forma poco sistematizada. Para implementar buenos modelos confiables tu paso fundamental es tener muchos datos, muy verídicos, muy sistemáticos. Si no los tienes, tus modelos pueden inducir fácilmente error. Hoy en día, implementar IA en proceso de gestión, en el fondo la gran desventaja que tiene es que te puede llevar muy fácilmente a datos erróneos porque no tienes suficiente información para entrenar.

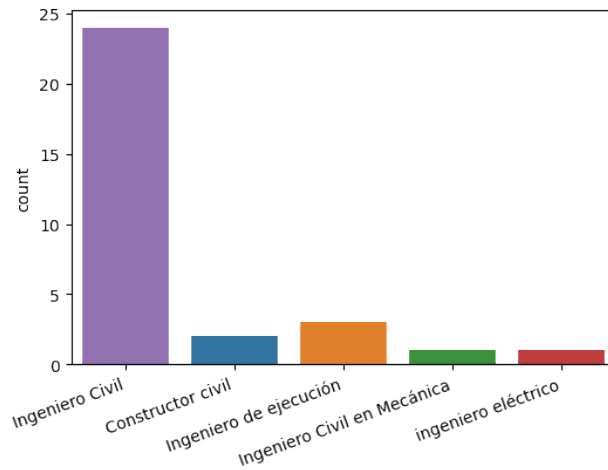
En la sección de Análisis de Resultados se llevará a cabo un análisis más a fondo de lo expuesto por los distintos entrevistados.

4.4. Resultados de la encuesta

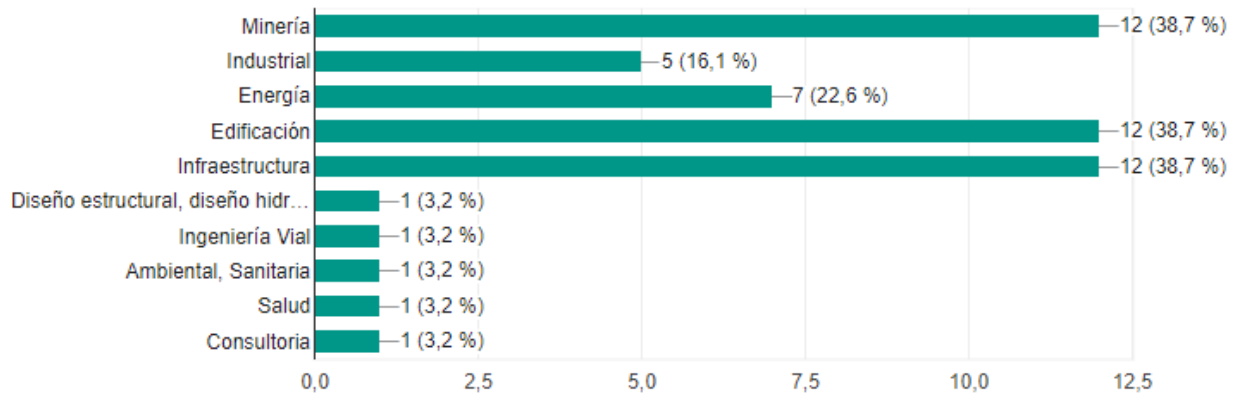
La encuesta realizada para este trabajo fue planteada para obtener el nivel de conocimiento y experiencia de la Inteligencia Artificial de los y las profesionales que se hayan desempeñado en proyectos de ingeniería civil. Con esto se espera saber si los encuestados están familiarizados con la IA como herramienta para las industrias, la ingeniería, y en específico en el sector construcción (donde se incluyen proyectos de ingeniería civil).

La encuesta fue desarrollada mediante la plataforma **Google Forms**. Se comenzó a recibir respuestas desde el 14 de agosto de 2021 y se consideraron para los resultados las respuestas registradas hasta la fecha 20 de septiembre de 2021. En este plazo se consiguió obtener la respuesta de 31 participantes. Se presentan los resultados a continuación.

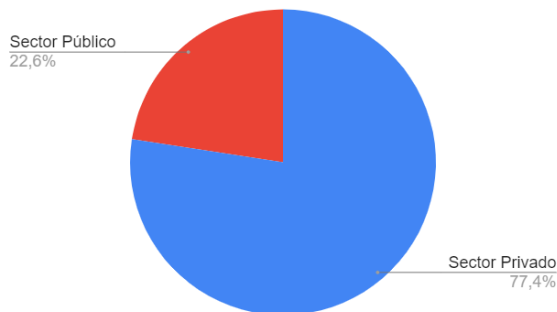
En primer lugar se caracterizó a l@s participantes según su perfil profesional, clasificándolos por sus años de experiencia y registrando los sectores más representativos de los proyectos en los que hayan desempeñado funciones.



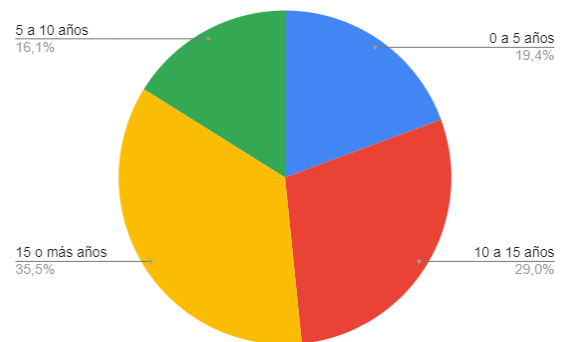
(a) Profesión de los encuestados



(b) p1



(c) En cuál de estos sectores posee mayor experiencia?



(d) Años de experiencia profesional de os encuestados.

Figura 4.14: Caracterización de los encuestados

Luego, se consultó a los encuestados si habían tenido alguna experiencia previa o acercamiento a la Inteligencia Artificial. En concreto se consultó según los campos de aplicación: 1) IA en la industria en general, 2) IA en la ingeniería, 3) IA en la construcción.

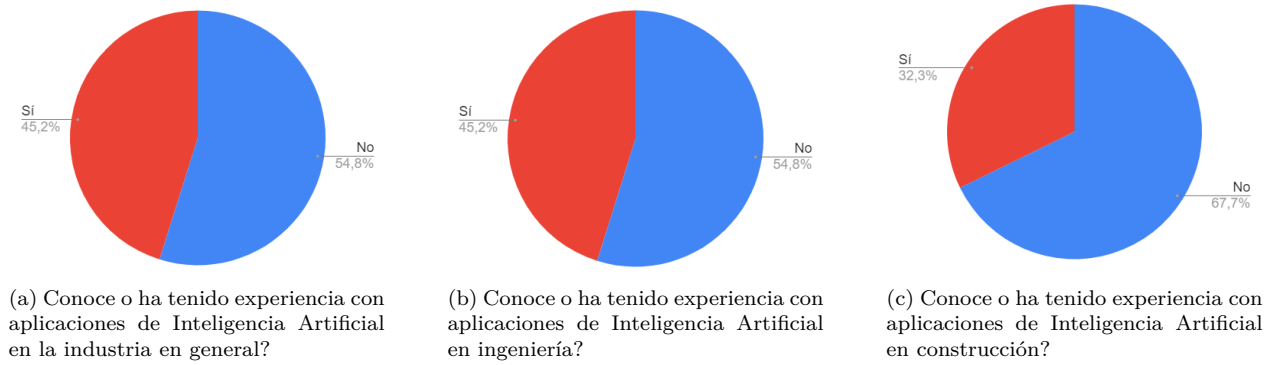


Figura 4.15: Resultados de la encuesta (1)

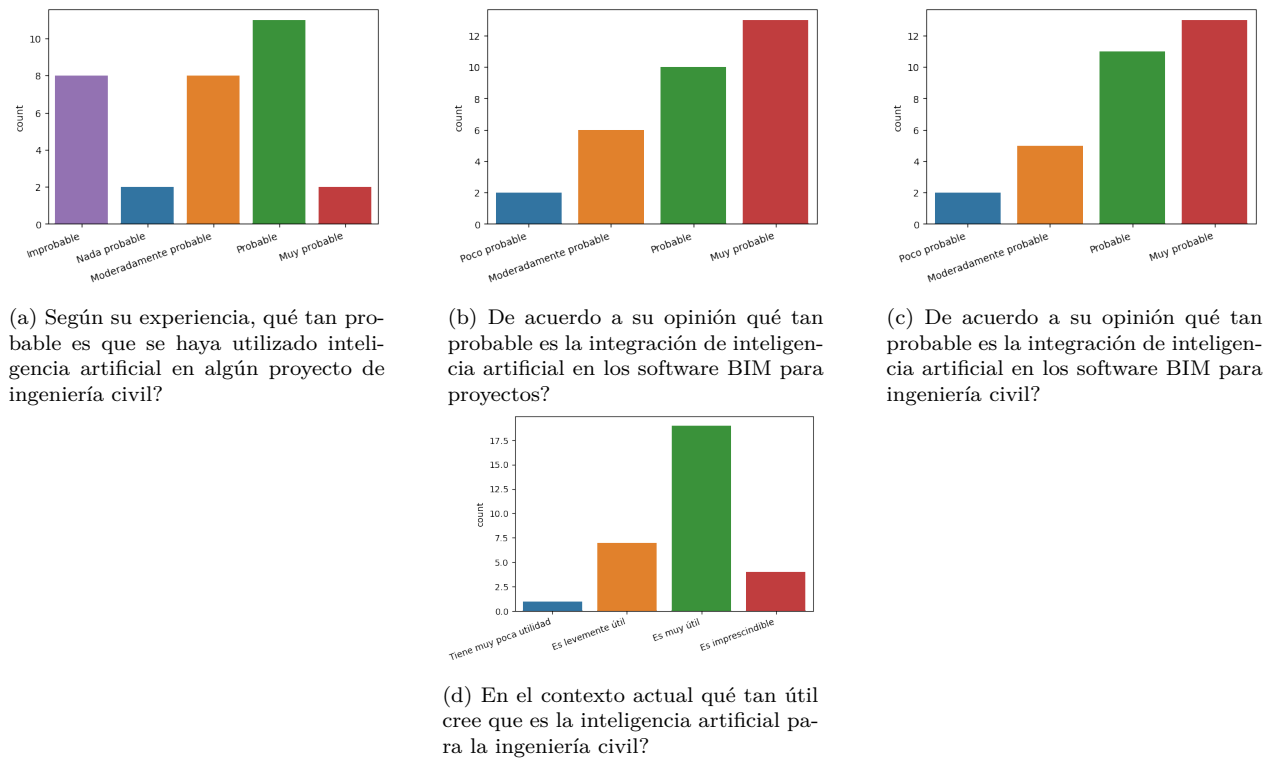
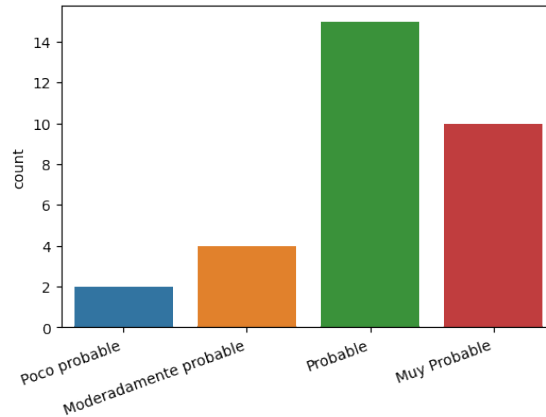
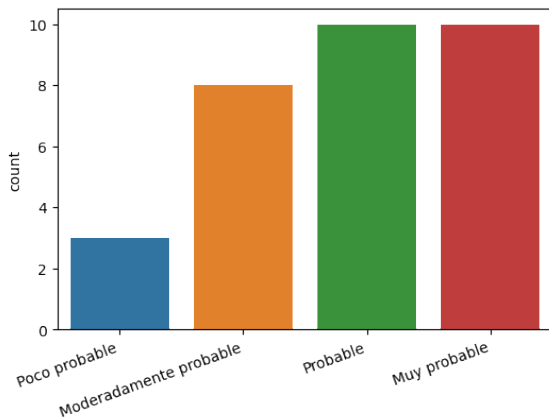


Figura 4.16: Resultados de la encuesta (2)

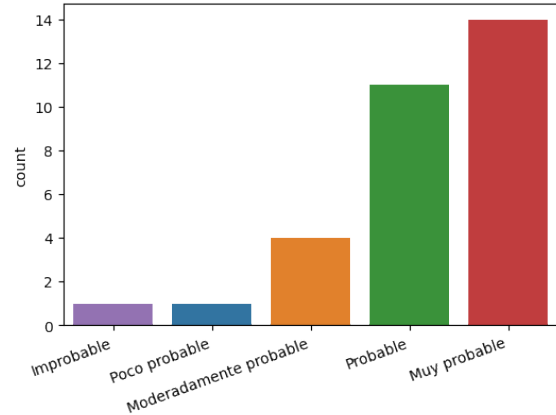
Además se consultó por la percepción de los encuestados sobre el desarrollo futuro de la Inteligencia Artificial para asistir actividades de: 1) planificación y gestión, 2) en obra, 3) diseño, en proyectos de ingeniería civil.



(a) En un contexto futuro, qué tan probable considera que se desarrolle la inteligencia artificial para asistir la PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN de proyectos de ingeniería civil?



(b) En un contexto futuro, qué tan probable considera que se desarrolle la inteligencia artificial para asistir las ACTIVIDADES EN OBRA en proyectos de ingeniería civil?



(c) En un contexto futuro, qué tan probable considera que se desarrolle la inteligencia artificial como herramienta para asistir actividades de DISEÑO en proyectos de ingeniería civil?

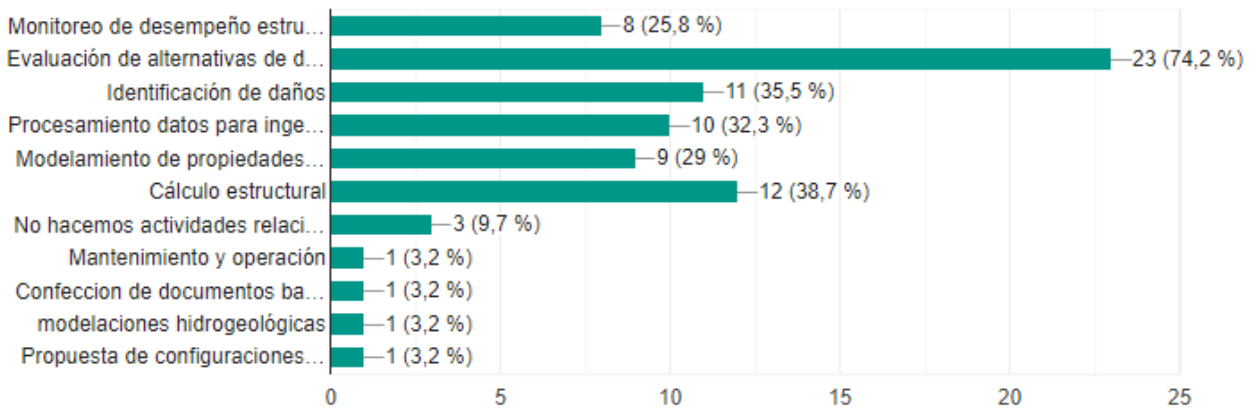
Figura 4.17: Resultados de la encuesta (3)

Finalmente se consultó por cuál(es) la de las siguientes aplicaciones de IA serían útiles en la empresa en que trabajan, aplicadas en los procesos de **diseño** y **construcción** respectivamente.

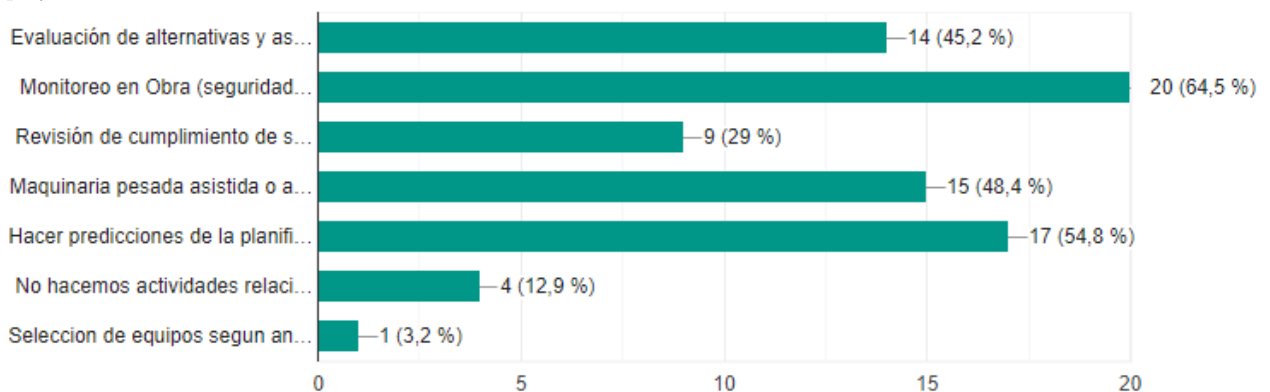
■ Diseño:

- Monitoreo de desempeño estructural mediante sensores
- Evaluación de alternativas de diseño
- Identificación de daños
- Procesamiento datos para ingeniería sísmica
- Modelamiento de propiedades de los materiales
- Cálculo estructural

- No hacemos actividades relacionadas al DISEÑO.
- Construcción:
 - Evaluación de alternativas y asistencia en la toma de decisiones
 - Monitoreo en Obra (seguridad en obra, control del personal, gestión de calidad)
 - Revisión de cumplimiento de subcontrato
 - Maquinaria pesada asistida o autónoma
 - Hacer predicciones de la planificación de la construcción
 - No hacemos actividades relacionadas a la CONSTRUCCIÓN



(a) En su opinión ¿Cuál de las siguientes aplicaciones basadas en IA sería útil en su empresa para procesos de DISEÑO en proyectos?



(b) En su opinión ¿Cuál de las siguientes aplicaciones basadas en IA sería útil en su empresa para actividades de CONSTRUCCIÓN en proyectos?

Figura 4.18: Resultados de la encuesta (4)

Capítulo 5

Análisis de resultados

La totalidad de las herramientas en el mercado presentadas en la tabla 4.4 que aplican Inteligencia Artificial hacen referencia a la IA basada en datos. Es decir, usan datos de experiencias previas para entrenar algoritmos de **Machine Learning**, así como aplicaciones de Deep Learning para el procesamiento de imágenes y vídeo.

Se observa que la mayoría absoluta de la bibliografía revisada es considerablemente reciente. Dentro de las fuentes académicas sólo una fue publicada antes del 2010, mientras que para los años entre 2010 y 2019 sólo se capturó para revisión un artículo por año y múltiples artículos en los años 2020 y 2021.

Como se observó en las figuras 4.1, 4.2 y 4.3 dentro de las publicaciones académicas la **mayoría** de las aplicaciones guardaban mayor relación con la aplicación de Inteligencia Artificial para **asistir la Planificación y Gestión de proyectos de ingeniería civil**. Cabe mencionar que las aplicaciones de detección de grietas en estructuras de hormigón y asfaltos se no consideraron, primero, como actividad en obra ya que ocurre una vez se ha terminado la etapa de construcción, y segundo, como actividad de diseño debido a que no corresponde a la etapa de diseño dentro de un ciclo de vida de un proyecto de ingeniería civil convencional (Diseño, Construcción y Operación respectivamente).

Luego de las aplicaciones en planificación y gestión, las aplicaciones de IA para asistir actividades de Diseño dentro del proyecto son las segundas más numerosas. Principalmente se aplica algoritmos de IA cómo algoritmos genéticos, lógica difusa y computación evolutiva para la optimización del diseño estructural, con la excepción del estudio de aplicación de redes neuronales para la estructuración automática de edificios de hormigón en base a planos de arquitectura e ingeniería de proyectos pasados.

Por último las aplicaciones de IA para asistir las actividades en obra puede considerar la aplicación de detección estructural en proyectos *As-Built* y detección de daños en los materiales, pero únicamente se encontró un artículo académico que abordase la IA como herramienta para automatizar actividades manuales en la etapa de construcción.

En cuanto a la revisión de artículo de la web y herramientas en el mercado ocurre similar que con las publicaciones académicas, encontrándose la mayoría de aplicaciones de Inteligencia Artificial en servicios ofrecidos para asistir el área de Planificación y Gestión de Proyectos. La gran mayoría de las aplicaciones en el mercado aplican **Machine Learning** o bien para la gestión en obra mediante **Computer Vision** o para optimizar la planificación de acti-

vidades mediante **Reconocimiento de Patrones** en base a datos y métricas de proyectos anteriores. En mucho menor medida, se encuentran aplicaciones en el mercado orientadas a las etapas de diseño en los proyectos, teniéndose como principal técnica de IA el *Diseño Generativo* para evaluar alternativas.

Mediante las distintas entrevistas realizadas se ha podido conocer distintas perspectivas en cuanto al conocimiento de la Inteligencia Artificial aplicada a ingeniería civil. Los 4 entrevistados tenían distintos acercamientos hacia el caso de estudio

Tabla 5.1: Experiencia de los entrevistados con la Inteligencia Artificial aplicada en proyectos de ingeniería civil.

Entrevistado	Experiencia con la IA
E1	Investigador y docente del departamento de ingeniería civil en el área de estructuras. Conoce sobre aplicaciones de IA aplicada a las estructuras. Dirigió tesis de maestría para estudiar la estructuración automática de plantas de edificios aplicando redes neuronales usando planos de estructuración de proyecto pasados(publicada el 2021).
E2	Director y docente del departamento ingeniería civil, expositor en seminario del Instituto de Datos & Inteligencia Artificial, presentando distintos estudios realizados dentro del departamento. Declara no tener experiencia personal previa implementando IA.
E3	Investigador del KIT (alemania). Trabaja en el proyecto impulsado por el gobierno alemán SDAC (Smart Design and Construction) mediante el cual se busca crear una plataforma marketplace para desarrolladores y empresas de la construcción donde colaboran para generar aplicaciones para solventar la fragmentación de la industria de la construcción. Esto usando la IA para procesar la información no estructurada generada en la construcción y entrenando algoritmos de ML para aplicaciones IA+ IoT basadas en datos. Al 2021 el proyecto SDAC se encuentra en etapa de pruebas.
E4	Consultor de proyectos y data scientist de la construcción. Se encarga de analizar datos de planificación de proyectos, generando heurísticas para validarlas con algoritmos de Machine Learning y aplicarlas en futuros proyectos.

A cada entrevistado se hizo una entrevista distinta según el campo de aplicación en que desempeñaba y su experiencia previa con la IA en la ingeniería civil. Los 4 entrevistados acordaron en que la ingeniería facilitaría eventualmente las actividades dentro del desarrollo de un proyecto de ingeniería civil. por lo que las actividades de los distintos profesionales podrían modificadas.

En cuanto a desventajas que podría traer la implementación de la IA se distinguen las siguientes:

- Desarrollar herramientas únicamente basada en experiencias y sin fundamentos teóricos

bajos los cuales se sustenten los modelos de IA.

- Los conflictos éticos que podría traer la IA debido a que la aplicación de Redes Neuronales y Deep Learning operan como *cajas negras* y podría desarrollarse *aplicaciones sesgadas* según la calidad de los datos y el manejo que se de a estos.
- Desarrollo de modelos poco confiables debido al bajo grado de digitalización de la construcción que consigo trae la poca sistematización y estructuración al capturar datos.

Dentro de las entrevistas se llegó a mencionar la **digitalización de la construcción** tanto directa como indirectamente, indicando que el grado de digitalización de la industria es muy bajo en comparación con otras industrias. El grado de digitalización afecta directamente el posible desarrollo e implementación de herramientas basadas en inteligencia artificial. Los dos entrevistados con mayor experiencia en el sector de la construcción conocían aplicaciones IA que fuesen implementables en softwares BIM, donde uno de ellos considera a los *software BIM* cómo la columna vertebral de la digitalización en la construcción, y por tanto en los proyectos de ingeniería civil. De esta forma el desarrollo de IA va de la mano con el desarrollo de la digitalización, que a su vez se basa en la implementación de la metodología BIM junto con software BIM.

La realización de la encuesta fue fundamental para comprender el estado de conocimiento de profesionales de Ingeniería Civil sobre la Inteligencia Artificial. Por un lado la mayor parte de los encuestados (64.5 %) poseen más de 10 años de experiencia. La mayor parte los entrevistados pertenecen al sector privado.

A pesar de los años de experiencia de los encuestados, más de la mitad no ha tenido experiencia con el uso de Inteligencia Artificial en general. Sin embargo esto puede deberse a que sólo se asoció a la IA en el ámbito laboral propio o bien debido simplemente a desconocimiento. Lo mismo sucede al momento de preguntar por aplicaciones en ingenierías.

Al preguntar sobre la aplicación de IA en ingeniería civil, más de un cuarto de los encuestados conoce o ha tenido experiencia con herramientas de IA en ingeniería civil. Considerando el bajo grado de digitalización del sector este resultado se encuentra dentro de lo esperado.

Dado lo reciente que es la Inteligencia Artificial aplicada a ingeniería civil, la documentación y casos de estudio es escaso. De todos modos se cuenta con los casos de estudio publicados en las páginas web comerciales de las aplicaciones *Newmetrix / Smartvid* y *Alice Technologies*.

Las compañías que han utilizado exitosamente Alice Technologies han logrado explorar distintas y variadas alternativas de planificación, lo cual mediante softwares convencionales de planificación es complejo debido a que se requiere a la modificación manual de las relaciones entre los hitos y actividades así como un manejo flexible de los recursos. Esto se facilita con la implementación de BIM 4D o BIM 5D ya que se puede relacionar de forma centralizada el modelo 3D, la planificación de actividades y/o costos del proyecto; para así generar distintas alternativas mediante algoritmos de ML y asistir la toma de decisiones.

El trabajo ha tenido distintas limitaciones, donde una de las principales yace en lo general que es la temática abordada y que se trata de una línea de investigación presumiblemente reciente para los proyectos de ingeniería civil.

Dicho esto, al momento de realizar la búsqueda de fuentes bibliográficas cabe mencionar que el concepto *Inteligencia Artificial* carece de una definición única y abarca una amplia

variedad de técnicas computacionales, por lo que son variadas las publicaciones de revista científica pertinentes de estudiar que no contienen cómo palabra clave *'Inteligencia Artificial'*. Por este mismo motivo, la mayor parte los artículos revisados corresponden a fuentes de la web, y en menor medida bases de datos de búsqueda científica.

Las aplicaciones de IA estudiadas se encuentran en etapas de desarrollo aún muy tempranas y no hay una única forma organizada para encontrarlas. Para esto se ha propuesto la clasificación mostrada en 5.1 según planificación y gestión, diseño, y asistencia de actividades en obra.

Otra de las limitaciones del trabajo ha sido el número de entrevistas que se ha logrado concretar, debido a que se esperaba conseguir profesionales de ingeniería civil con entendimiento con cierto grado de conocimiento sobre el tema estudiado y ha sido complejo dar con los perfiles esperados. En la metodología inicialmente no se requería conocer sobre el tema del trabajo, pero se considera que este aspecto en los entrevistados es importante y provechoso ya que así se pudo además de conocer nuevas aplicaciones y retroalimentar la revisión bibliográfica.

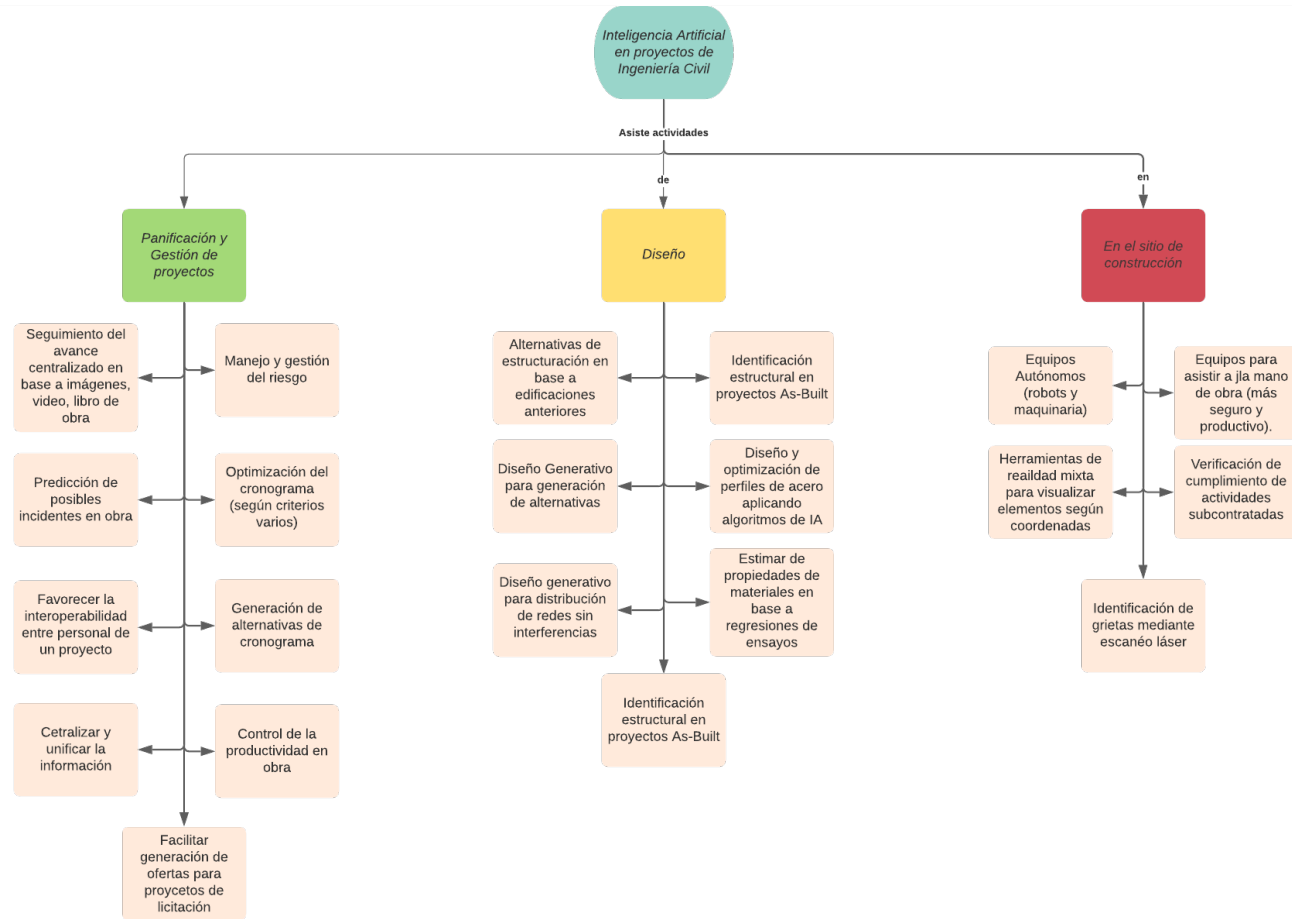


Figura 5.1: Diagrama de Aplicaciones de Inteligencia Artificial aplicables a proyectos de ingeniería civil en base a las distintas metodologías. Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 6

Conclusiones

6.1. Conclusiones principales

En el presente trabajo de título se ha estudiado las distintas aplicaciones de la *Inteligencia Artificial (IA)* en proyectos de ingeniería civil, dado el contexto de desarrollo de la *Construcción 4.0*. La Inteligencia Artificial es una de las bases de la *Construcción 4.0*, un desarrollo esencial para impulsar la industrialización de proyectos de ingeniería civil, por lo que se ha evidenciado a través de este trabajo el creciente interés por el desarrollo de la Inteligencia Artificial y el *Machine Learning (ML)* en proyectos de ingeniería civil.

Los objetivos de conocer las aplicaciones de inteligencia artificial en proyectos de ingeniería civil, estudiar casos de aplicación y potenciales aplicaciones a futuro se han cumplido principalmente mediante la revisión bibliográfica exhaustiva, la cual se basa tanto en numerosos artículos de publicación científica, trabajos de titulación así como artículos de la web relacionados con el desarrollo e innovación de la ingeniería y construcción.

Se concluye que de acuerdo a la revisión bibliográfica que ya se está aplicando inteligencia artificial en proyectos de ingeniería civil, y que ésta se está aplicando mediante distintas técnicas y algoritmos de IA. Se concluye además que las aplicaciones estudiadas que ya se han implementado en proyectos, así como las que se encuentran en desarrollo, se enfocan en las siguientes áreas de los proyectos de ingeniería civil:

- Asistencia en la etapa de diseño de los proyectos.
- Asistencia de la mano de obra y automatización de actividades en obra.
- Asistencia en la planificación y gestión de proyectos de ingeniería civil.

La revisión bibliográfica, en complemento con las entrevistas a profesionales, a llevado a concluir que existen potenciales aplicaciones de inteligencia artificial por estudiar y desarrollar. Estas aplicaciones se enfocan en impulsar las demás tecnologías que componen la *Construcción 4.0* así como la integración de estas, principalmente mediante el uso de BIM.

Se presenta en la tabla 6.1 las aplicaciones de inteligencia artificial orientadas a proyectos de ingeniería civil abordadas en este trabajo de título.

Tabla 6.1: Conclusiones, aplicaciones de Inteligencia Artificial orientadas a proyectos de ingeniería civil. Fuente: Elaboración Propia.

	Aplicación	idea a futuro	en desarrollo	aplicación temprana	en perspectiva	Año en que se aplica	ejemplo(s)	
Planificación y Gestión de Proyectos	1	Seguimiento del avance centralizado, en base a imágenes, video, libro de obra		x		-	Proyecto SDaC KIT	
	2	Manejo y gestión del riesgo			x	2016	Newmetrix	
	3	Predicción de posibles incidentes en obra				x	2016	Newmetrix
	4	Optimización del cronograma				x	2012	Alice Technologies
	5	Favorecer la interoperabilidad entre personal del proyecto	x				-	Proyecto SDaC KIT
	6	Generación de alternativas de cronograma				x	2012	Alice Technologies
	7	Generación de alternativas de distribución de recursos				x	2012	Alice Technologies
	8	Centralizar y unificar la información		x			-	Proyecto SDaC KIT
	9	Control de productividad en obra			x		2012	Odd Vision - Odd Industries
	10	Facilitar generación de ofertas en proyectos de licitación			x		-	Alice Technologies
	11	Uso de Procesamiento de Lenguaje Natural para navegar por modelos BIM	x				-	Proyecto SDaC KIT
	12	Predicción de atrasos del cronograma			x			BIMtrazer
	13	Implementación de Gemelos Digitales			x			Bentley
	14	Evaluación de Heurísticas mediante Machine Learning		x			-	Investigación Entrevistado, Gepro ProPlanner
Diseño	15	Alternativas de estructuración en base a proyectos anteriores		x		-	Memoria Maestría P.Pizarro DIC Universidad de Chile	
	16	Identificación estructural en proyectos As-Built			x	-	Investigación 'Artificial Intelligence emerging methods for structural engineering'	
	17	Diseño Generativo para generación de alternativas de diseño			x	-	Testfit, Thornton Thomasetti - Core Studio	
	18	Diseño y optimización de perfiles de acero aplicando algoritmos de IA		x		2013	publicación. Mathematical Problems in Engineering	
	19	Diseño Generativo para distribución de redes sin interferencias			x	2015	GenMEP	
	20	Estimar propiedades de materiales en base a regresiones de ensayos de resistencia			x	-	Experiencias previas Entrevistado	
Asistencia de actividades en el sitio de construcción	21	Equipos autónomos (robots y maquinaria)			x	2018	Boston Dynamics, IntSite	
	22	Equipos para asistir a mano de obra			x	2021	Construction Robotics	
	23	Herramientas de realidad mixta para visualizar elementos según coordenadas			x		Trimble XR10	
	24	Verificación de cumplimiento de actividades subcontratadas			x		Trimble XR10	
	25	Identificación de grietas mediante fotografías o escáner láser				x	2014	Pavemetrics

Como se observa en la tabla 6.1 la 'planificación y gestión de proyectos' de ingeniería civil es el área donde se encuentran mayor número de aplicaciones para la inteligencia artificial. La totalidad de las aplicaciones presentadas funcionan en base a técnicas de Machine Learning, usándose para generar modelos de optimización y modelos predictivos. Son variados los casos en que se implementa visión artificial para automatizar el monitoreo en obra, que al mismo tiempo permite medir más eficientemente el avance y productividad en obra como se muestra en 4.11. En la actualidad distintas de las aplicaciones listadas son ofrecidas al mismo tiempo por alguna misma herramienta en el mercado, como es el caso de *Alice Technologies* que en base a un modelo BIM permite generar tanto alternativas del cronograma como de la asignación de horas hombre, para así optimizar el proyecto según tiempo y costo. Otras herramientas de la misma área en el mercado son *Odd Vision*, *Newmetrix* y *BIMtrazer*.

Las aplicaciones de IA orientadas a la etapa de diseño son menores en cuanto a herramientas en el mercado como *GenMEP* y *Testfit* que aplican diseño generativo. Por otro lado, la investigación sobre usos de la IA para el diseño, y cálculo estructural han tenido un importante aumento en los últimos años [8].

Las aplicaciones para la automatización de actividades en el sitio de construcción es el área con menos aplicaciones investigadas hasta la fecha, sin embargo ya se han testeado de forma temprana casi la totalidad de las aplicaciones. Casos de herramientas en el mercado para automatizar y asistir las inspecciones de obra son *Spot - Boston Dynamics*, *Trimble RX10* y *Pavemetrics*; mientras que para la ejecución de actividades se encuentran *Construction Robotics* e *Intsite*.

6.1.1. Desarrollos de la IA en ingeniería y construcción

Los resultados obtenidos indican dos tendencias importantes sobre el desarrollo de IA para proyectos de ingeniería civil. Por un lado se encuentra el uso de *visión artificial*¹ aplicado al **monitoreo en obra**. Por otro lado, la otra principal línea de desarrollo son las **herramientas predictivas**. Ambas tendencias apuntan a mejorar y optimizar los proyectos de ingeniería civil apoyando la **planificación y gestión** de los proyectos.

Si bien ya se han desarrollado a la actualidad herramientas que apoyan la **automatización de actividades en obra** cómo la maquinaria pesada autónoma y asistida, o robots para disminuir el esfuerzo físico del personal, no se han encontrado estudios sobre los efectos de estas tecnologías. Esto se debe a que estas herramientas aún se encuentran en una etapa de implementación demasiado temprana y son pocos los proyectos que las han implementado.

En cuanto al área de diseño en ingeniería civil la principal función que ofrece la IA es impulsar la **evaluación de alternativas de diseño**. La tecnología principal hoy en día es el diseño generativo, sin embargo, también se ha comenzado a estudiar la aplicación de redes neuronales, por ejemplo para determinar espesores de muros según proyectos anteriores.

En el área de ingeniería estructural la principal aplicación de Inteligencia Artificial está en la aplicación de algoritmos de Machine Learning para determinar resistencia de materiales mediante modelos de regresión. También se encuentran las aplicaciones de monitoreo de salud estructural e identificación de daños aplicando *visión artificial*. En cuanto al cálculo estructural, los modelos de *Graph Neural Networks* ofrecen nuevas alternativas para resolver estructuras de manera más eficiente.

De los resultados analizados se concluye que la Inteligencia Artificial aplicada a proyectos de ingeniería civil se encuentra en etapa inicial de desarrollo, con algunas implementaciones en la práctica, con un creciente número de investigaciones sobre el Machine Learning aplicado a la ingeniería civil y nuevas innovaciones en desarrollo. Además la percepción de los profesionales encuestados y entrevistados, así como el importante aumento de publicaciones en los últimos años indican que la Inteligencia Artificial en proyectos de Ingeniería Civil continuará desarrollándose en los próximos años.

Es importante recalcar que las herramientas de IA desarrolladas hasta la actualidad no tienen la capacidad de reemplazar la labor de profesionales de ingeniería, ya que estas se basan netamente en lo empírico y no en la teoría científica. Por lo tanto se seguirá demandando de las aptitudes y conocimientos profesionales.

¹ o *computer vision*

6.1.2. Construcción e industria 4.0

De acuerdo a la encuesta y las entrevistas realizadas a profesionales de proyectos de ingeniería civil se concluye que la Inteligencia Artificial tiene gran utilidad en los proyectos, pero que sin embargo son pocos quienes la han aplicado a los proyectos en la actualidad. En este sentido, para lograr la industrialización de los proyectos de ingeniería civil usando la IA como base, es necesario lograr primero una *transformación digital* de la construcción, lo cual requiere de cambios de la cultura de la digitalización en la construcción.

El creciente desarrollo tecnológico en las industrias, y el rezago que este tiene en el caso de la construcción indica que la IA aún tiene un largo camino para implementarse en los proyectos de ingeniería civil, por lo que se propone desarrollar estudios en las siguientes líneas de investigación:

- En cuanto a implementación de IA en proyectos de ingeniería civil, en especial en la etapa de construcción, uno de las principales problemáticas y barreras identificadas durante las entrevistas es la poca captura de datos y la poca estructuración de estos. Esto es esencial para implementar las herramientas que se encuentran en auge en la actualidad, que aplican Machine Learning y procesan datos de experiencias pasadas, ya que el desempeño de los modelos de ML dependen principalmente de la calidad de los datos.
- Dado que recientemente se ha publicado el **borrador** de la *Política Nacional de Inteligencia Artificial* desarrollada por el *Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación* se propone analizar los lineamientos propuestos desde la perspectiva de los proyectos de ingeniería civil y realizar propuestas de modificación.
- Se recomienda en largo plazo estudiar el grado de implementación de la inteligencia artificial en proyectos de ingeniería civil. Ya que como se ha dicho, se espera un aumento sostenido de desarrollo de esta tecnología.
- Continuando con la motivación de este trabajo sobre el desarrollo de la industria 4.0 en proyectos de ingeniería civil y construcción se propone estudiar en profundidad la implementación de los Gemelos Digitales (Digital Twin Framework) en los ciclos de proyectos de ingeniería civil, ya que estos son un modelo digital cual aplica tecnologías propias de la industria 4.0 como son el *Cloud Computing Blockchain* e *Inteligencia Artificial* funcionando en conjunto, y tiene el potencial de mejorar en eficiencia y eficacia la toma en los procesos.
- Dado los esfuerzos por la implementación de BIM en proyectos públicos (véase **planBIM**) se propone estudiar en mayor profundidad la integración de la Inteligencia Artificial con la metodología y softwares BIM.
- Es importante seguir estudiando y desarrollando estrategias para la digitalización de la construcción dentro de los proyectos de ingeniería civil, ya que sin esta los desarrollos tecnológicos estudiados sólo llegarán a la minoría de empresas de ingeniería civil y construcción.

Bibliografía

- [1] Tara Balakrishnan, Micahel Chui, Bryce Hall, and Nicolaus Henke. Global survey: The state of AI in 2020. *Mckinsey Analytics*, (November):13, 2020. URL <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/BusinessFunctions/McKinseyAnalytics/OurInsights/GlobalSurveyTheStateofAIin2020/Global-survey-The-state-of-AI-in-2020.pdf>.
- [2] Jun Kang Chow, Zhaoyu Su, Jimmy Wu, Zhaofeng Li, Pin Siang Tan, Kuan fu Liu, Xin Mao, and Yu Hsing Wang. Artificial intelligence-empowered pipeline for image-based inspection of concrete structures. *Automation in Construction*, 120(November 2019):103372, 2020. ISSN 09265805. doi: 10.1016/j.autcon.2020.103372. URL <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103372>.
- [3] Charnpreet Kaur and Urvashi Garg. Artificial intelligence techniques for cancer detection in medical image processing: A review. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, 12(2):2667–2673, 2021. ISSN 13094653. doi: 10.17762/turcomat.v12i2.2286. URL <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.241>.
- [4] Xiuquan Li and Hongling Jiang. Artificial intelligence technology & engineering applications. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 32(5):381–388, 2017. ISSN 10544887.
- [5] Bhabendu Kumar Mohanta, Debasish Jena, Utkalika Satapathy, and Srikanta Patnaik. Survey on IoT security: Challenges and solution using machine learning, artificial intelligence and blockchain technology. *Internet of Things*, 11:100227, 2020. ISSN 25426605. doi: 10.1016/j.iot.2020.100227. URL <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100227>.
- [6] Yue Pan and Limao Zhang. Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends. *Automation in Construction*, 122(November 2020):103517, 2021. ISSN 09265805. doi: 10.1016/j.autcon.2020.103517. URL <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103517>.
- [7] Jorge Ribeiro, Rui Lima, Tiago Eckhardt, and Sara Paiva. Robotic Process Automation and Artificial Intelligence in Industry 4.0 – A Literature review. *Procedia Computer Science*, 181(2019):51–58, 2021. ISSN 18770509. doi: 10.1016/j.procs.2021.01.104. URL <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.104>.
- [8] Hadi Salehi and Rigoberto Burgueño. Emerging artificial intelligence methods in structural engineering. *Engineering Structures*, 171(May):170–189, 2018. ISSN 18737323. doi: 10.1016/j.engstruct.2018.05.084. URL <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.084>.

- [9] Amit K. Shukla, Manvendra Janmajaya, Ajith Abraham, and Pranab K. Muhuri. Engineering applications of artificial intelligence: A bibliometric analysis of 30 years (1988–2018). *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 85(July):517–532, 2019. ISSN 09521976. doi: 10.1016/j.engappai.2019.06.010. URL <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.06.010>.
- [10] Shanglian Zhou and Wei Song. Deep learning-based roadway crack classification using laser-scanned range images: A comparative study on hyperparameter selection. *Automation in Construction*, 114(March):103171, 2020. ISSN 09265805. doi: 10.1016/j.autcon.2020.103171. URL <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103171>.
- [11] Tiago Zonta, Cristiano André da Costa, Rodrigo da Rosa Righi, Miromar José de Lima, Eduardo Silveira da Trindade, and Guann Pyng Li. Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 150(August):106889, 12 2020. ISSN 03608352. doi: 10.1016/j.cie.2020.106889. URL <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106889><https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360835220305787>.
- [12] Guridi, J.A. (septiembre, 2020) Sentando las bases de la IA en Chile. *Negocio & Construcción*, (9), 70-72. Recuperado de <https://negocioyconstruccion.cl/revista-2/>.
- [13] Blanco J.L., Fuchs S., Parsons M.& Ribeirinho M.J. (abril, 2018). Artificial Intelligence: Construction technology’s next frontier. McKinsey & Company. Recuperado de: <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/artificial-intelligence-construction-technologys-next-frontier#>
- [14] Manyika, J. and Bughin, J., 2021. Las promesas y los desafíos de la era de la inteligencia artificial. [online] McKinsey Global Institute. Recuperado de: <https://www.mckinsey.com/featured-insights/artificial-intelligence/the-promise-and-challenge-of-the-age-of-artificial-intelligence/es-cl> [marzo 2021].

Artículos de la web

- [15] Hormigonaldia.ich.cl. 2021. Inteligencia Artificial en el diseño estructural: Desentrañando el ADN de la edificación chilena – Hormigón al Día. [online] Recuperado de: <https://hormigonaldia.ich.cl/novedades-tecnologicas/inteligencia-artificial-en-el-diseno-estructural-desentrañando-el-adn-de-la-edificacion-chilena/> [marzo, 2021].
- [16] Alicetechnologies.com. 2021. Meet ALICE, the AI-powered platform for construction optimization. [online] Available at: <https://www.alicetechnologies.com/home> [abril, 2021].
- [17] Rajagopal A., Tetrick C. Kanner J. The Rise of AI and Machine Learning in Construction. Autodesk. Recuperado de: <https://www.autodesk.com/autodesk-university/es/node/662> [octubre, 2020].
- [18] Caminar con éxito hacia la Industria 4.0: Capítulo 22 – Inteligencia Artificial. Cámara Valencia. Recuperado de: <https://ticnegocios.camaravalencia.com/servicios/tendencias/>

[caminar-con-exito-hacia-la-industria-4-0-capitulo-22-inteligencia-artificial/](#) [octubre, 2020].

- [19] Aguirre M. (noviembre, 2018). La cuarta revolución industrial llega al sector construcción en Chile. Construye2025. Recuperado de: <https://construye2025.cl/2018/11/26/la-cuarta-revolucion-industrial-llega-al-sector-construccion-en-chile/>. [marzo, 2021]
- [20] Agudelo Zapata J.A. (mayo, 2012). Inteligencia Artificial aplicada a las Estructuras. Estructurando. Recuperado de: <https://estructurando.net/2012/05/03/inteligencia-artificial-aplicada-a-las-estructuras-otras-bestias-parte-ii/>
- [21] BMBF-Verbundprojekt Ophthalgo-AI gestartet - Intelligente, kooperative Diagnose- und Therapieunterstützung in der Augenheilkunde. (2021). Retrieved 27 May 2021, recuperado de: <https://www.dfki.de/web/news/detail/News/ophthalgo-ai/>.
- [22] "Un absoluto monstruo": así es la primera foto de un agujero negro, 3 millones de veces más grande que la Tierra - BBC News Mundo. (2021). Retrieved 27 May 2021, recuperado de: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-47880446>.
- [23] Enoba Smart Construction: holistic solutions for the building construction industry. (2021). Retrieved 27 May 2021, recuperado de: <https://www.eitdigital.eu/newsroom/news/archive/article/enoba-smart-construction-holistic-solutions-for-the-building-construction-industry/>.
- [24] Gracia, M. (2021). Mantenimiento predictivo mediante Inteligencia Artificial y algoritmos de Deep Learning. Retrieved 27 May 2021, recuperado de: <https://www.itainnova.es/blog/big-data-y-sistemas-cognitivos/mantenimiento-predictivo-mediante-inteligencia-artificial-y-algoritmos-de-deep-learning/>.
- [25] Inteligencia Artificial, el motor detrás de la Industria 4.0 | SII Concatel. (2021). Retrieved 27 May 2021, recuperado de: <https://sii-concatel.com/inteligencia-artificial-motor-detras-de-la-industria-4-0/>.
- [26] KI vs. Cybercrime: Forschungskoooperation mit BKA und LKA gestartet. (2021). Retrieved 27 May 2021, recuperado de: <https://www.dfki.de/web/news/detail/News/forschungskoooperation-bka-lka/>.
- [27] Mars Technologies. (2021). Retrieved 27 May 2021, recuperado de: <https://mars.nasa.gov/mars2020/mission/technology/>.
- [28] Mission Overview. (2021). Retrieved 27 May 2021, recuperado de: <https://mars.nasa.gov/mars2020/mission/overview/>.

- [29] Pampliega, C. (2021). Inteligencia Artificial en la Gestión de Proyectos de Construcción - SALINERO PAMPLIEGA. Retrieved 27 May 2021, recuperado de: <https://salineropampliega.com/2019/09/inteligencia-artificial-en-la-gestion-de-proyectos-de-construccion.html>.
- [30] Roboter-Teams für den Mond: DFKI startet EU-Projekt zur Erkundung von Lava-Höhlen durch kooperierende autonome Rover. (2021). Retrieved 27 May 2021, recuperado de: <https://www.dfki.de/web/news/detail/News/roboter-teams-fuer-den-mond-dfki-startet-eu-projekt-zur-erkundung-von-lava-hoehlen-durch-kooperieren/>.
- [31] Verlässliche Umgebungswahrnehmung für Landmaschinen – DFKI startet mit AI-TEST-FIELD weiteres Agrar-Projekt. (2021). Retrieved 27 May 2021, recuperado de: <https://www.dfki.de/web/news/detail/News/verlaessliche-umgebungswahrnehmung-fuer-landmaschinen-dfki-startet-mit-ai-test-field-weiteres-agrar/>.
- [32] ¿Qué es la Industria 4.0: la Internet Industrial de las Cosas (IIoT)?. Epicor.com. (2021). Retrieved 15 September 2021, recuperado de: <https://www.epicor.com/es-mx/resource-center/articles/what-is-industry-4-0/>.
- [33] Built Robotics transforms heavy equipment into autonomous robots for... Built Robotics. (2021). Retrieved 15 September 2021, recuperado de: <https://www.builtrobotics.com/>.
- [34] Construction Verification - ClearEdge3D. ClearEdge3D. (2021). Retrieved 15 September 2021, recuperado de: <https://www.clearedge3d.com/construction-verification/>.
- [35] CORE studio | Thornton Tomasetti. Thorntontomasetti.com. (2021). Retrieved 15 September 2021, recuperado de: <https://www.thorntontomasetti.com/core-studio>.
- [36] Gattie, T. (2021). How much photo documentation is necessary on jobsites?. Newmetrix.com. Retrieved 15 September 2021, recuperado de: <https://www.newmetrix.com/ai-in-construction-blog/how-much-photo-documentation-is-necessary-on-jobsites>.
- [37] GenMEP – Route MEP Systems Without Clashes, I., & Grimm, T. (2021). GenMEP – Route MEP Systems Without Clashes, Including in Point Clouds. Revitaddons.blogspot.com. Retrieved 15 September 2021, recuperado de: <http://revitaddons.blogspot.com/2016/12/genmep-route-mep-systems-without-clashes.html>.
- [38] Graiph.ai. (2021). Retrieved 15 September 2021, recuperado de: <https://www.graiph.ai/>.
- [39] Home. Construction Robotics. (2021). Retrieved 15 September 2021, recuperado de: <https://www.construction-robotics.com/>.

- [40] intelligent Machine Control | Komatsu. Komatsu.com. (2021). Retrieved 15 September 2021, recuperado de: <https://www.komatsu.com/en/site-optimization/smart-construction/intelligent-machine-control/>.
- [41] Newmetrix Resources | Expand your knowledge of AI in construction | Case Study. Newmetrix.com. (2021). Retrieved 15 September 2021, recuperado de: https://www.newmetrix.com/resources/tag/case-study?utm_campaign=Learn-More&utm_source=Case-Studies&__hstc=88853124.690e607243532e276bbc632526193b99.1631744360329.1631744360329.1631744360329.1&__hssc=88853124.2.1631744360330&__hsfp=2487162251.
- [42] Odd Vision - Odd Industries. Odd Industries. (2021). Retrieved 15 September 2021, recuperado de: <https://odd.co/es/vision/>.
- [43] Smart Construction Drone. Komatsu.com. (2021). Retrieved 15 September 2021, recuperado de: <https://www.komatsu.com/en/site-optimization/smart-construction/drone/>.
- [44] Symbolic AI. Inbenta. (2021). Retrieved 15 September 2021, recuperado de: <https://www.inbenta.com/es/sectores/tecnologia/symbolic-ai/>.
- [45] TestFit | Solve site plans instantly with the Ultimate Building Configurator. Testfit. (2021). Retrieved 15 September 2021, recuperado de: <https://testfit.io/>.
- [46] Top 12 Use Cases / Applications of AI in Manufacturing. AIMultiple. (2021). Retrieved 15 September 2021, recuperado de: <https://research.aimultiple.com/manufacturing-ai/>.
- [47] Bimtrazer. (2021, 30 marzo). BIMTRAZER - Gestión de obra. <https://bimtrazer.com/> (<https://bimtrazer.com/>).
- [48] Live High-Resolution Construction Camera | View Job Sites in Real-time. OxBlue. (2021). Retrieved 25 September 2021, from <https://www.oxblue.com/projects/time-lapses/>.
- [49] (2021). Corporación de Desarrollo Tecnológico. 'Las posibilidades de la impresión 4D' Retrieved 22 October 2021, from <https://www.cdt.cl/las-posibilidades-de-la-impresion-4d/>.
- Publicaciones revistas académicas.**
- [50] Salehi, H. and Burgueño, R., 2018. Emerging artificial intelligence methods in structural engineering. *Engineering Structures*, 171, pp.170-189.
- [51] Kapliński, O., Košleva, N. and Ropaité, G., 2016. BIG DATA IN CIVIL ENGINEERING: A STATE-OF-THE-ART SURVEY. *Engineering Structures and Technologies*, 8(4), pp.165-175.

- [52] Chow, J., Su, Z., Wu, J., Li, Z., Tan, P., Liu, K., Mao, X. and Wang, Y., 2020. Artificial intelligence-empowered pipeline for image-based inspection of concrete structures. *Automation in Construction*, 120.
- [53] Zhou, S. and Song, W., 2020. Deep learning-based roadway crack classification using laser-scanned range images: A comparative study on hyperparameter selection. *Automation in Construction*, 114.
- [54] Tang, S., Roberts, D. and Golparvar-Fard, M., 2020. Human-object interaction recognition for automatic construction site safety inspection. *Automation in Construction*, 120.

Libros.

- [55] Burkov, A., 2019. The hundred-page machine learning book. [S.l.]: Andriy Burkov.

Transcripción entrevista 1

LM: académico, investigador y Jefe Área Estructuras-Geotecnia del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

Benjamín Caro (BC): memorista del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

BC: (sobre el artículo con Pablo Pizarro de la estructuración 'automática' en base a planos de arquitectura)

¿Consideraría que el uso de IA en la ingeniería civil apunta hacia esos usos?

LM: En la medida que tienes datos y quieres ver patrones o hacer una predicción, esta 'de cajón' hacer eso.

BC: ¿Eso alivianaría la carga de trabajo de ingeniería?

LM: En una reunión junto a una empresa de ingeniería conversamos sobre qué usos podríamos darle a este tipo de estudios. La idea del proyecto en un comienzo era darle una mano al ingeniero, porque lo primero que hace es decidir qué es y qué no es muro, después determinar el espesor de esos muros. Por lo tanto, como esta aplicación (trabajo con Pablo Pizarro) da una predicción instantánea, entregando una primera recomendación. Esto debería de alguna manera acelerar el proceso de diseño, NO cambiarlo, o darle una sugerencia pronta al ingeniero para tomar decisiones. Por otro lado otra línea en que uno puede ver esto, más allá de acelerar el proceso de diseño, es que permite chequear alternativas de diseño. Ya que uno podría preferir cierta configuración, pero podría aprovechar que probar la sugerencia y ver cual anda mejor.

BC: (Sobre la aplicación en estructuras metálicas, si se diferencia respecto de estructuras de hormigón).

LM: No sabría responder a eso. Las aplicaciones generales que he visto son conceptuales, que apuntan o a resistencia o a monitoreo. Probablemente si se aplica para estimación de resistencia de vigas de hormigón de seguro hay casos parecidos en vigas de acero, no veo una razón de que sea mejor para uno o para otro. (En términos de datos).

Por otro lado en el caso de estudio con Pablo, obviamente no vamos a encontrar la misma cantidad de datos dado que en Chile no se construyen edificios de acero. Pero en el caso de

galpones o estructuraciones de pisos industriales probablemente hay muchos más datos de acero que de hormigón.

BC: ¿sabe si se estudian estas aplicaciones en otras universidades en Chile?

LM: En el caso del estudio junto a Pablo dudo que haya un trabajo en el mundo. De seguro en otras universidades hay casos de estudio, pero dentro de ingeniería civil diría que aún hay pocos. Dentro de Ingeniería Civil en Chile probablemente haya un par de trabajos, que apunten a estimación de resistencia o temas del estilo.

BC: ¿Cree que el crecimiento de la IA en ingeniería civil va a ser un proceso rápido o lento?

LM: Yo creo que va a ir rápido. En la medida en que la gente que se da cuenta que los datos son valiosos y permiten hacer estimaciones. En ingeniería civil creo que va a ser un poco más difícil en el área estructural, desarrollos como los que estamos haciendo (junto a Pablo Pizarro) puede que tengan un impacto importante. En la industria de la construcción debería impactar mucho más porque tienen muchos datos. No necesariamente los tienen capturados o almacenados, pero tienen más datos. Puesto en números un edificio diseñado mueve un par de ingenieros y un par de arquitectos, un edificio construido mueve cientos de funcionarios, desde ingenieros, jornales, prof. intermedios, gente del área eléctrica, hay miles de personas involucradas por lo que hay miles de datos ligados a las labores, el tiempo de ejecución, los costos.

Se tienen fotos, se tienen datos numéricos. Se puede hacer de todo. Si le sacas fotos a la obra y mides el progreso,... con fotos hoy en día podrías estimar volumen de suelo extraído. Con imágenes mediante drones podrías plotear el sitio de excavación y procesarlo para medir el avance en volumen excavado. Estas son aplicaciones que podrían aparecer rápido debido a lo fácil que es obtener imágenes.

BC: (Sobre el estudio de IA en pregrado).

LM: La IA se refiere a métodos numéricos. tal como hoy en día se cursan métodos numéricos puede que un día sea necesario debido a lo masivo que sea la aplicación de estos métodos. EN la medida que se masifique probablemente sea necesario que la gente lo conozca mucho más de cerca.

LM: Mi recomendación es buscar a Henry Burton (UCLA), también habla de las aplicaciones de IA en estructuras.

Transcripción Entrevista 2

RH: académico y Director del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

Benjamín Caro (BC): memorista del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

BC: En que cree usted que podría apoyar la inteligencia artificial al diseño y modelamiento? Hemos visto aplicaciones de esto pero en cuales usted cree que podría apoyarnos la IA.

RH: Como te dije yo no tengo mucha experiencia en el tema, no es algo con lo que yo haya trabajado y lo que conozco es lo que vimos en el seminario (Instituto de Datos e IA), la cual es información que me pasaron mis colegas.

Mi impresión es que en tareas mas o menos rutinarias, donde uno efectivamente cuente con un montón de información y mucha historia. Como lo que se mostró ahí (en el seminario) que se quería tratar de hacer estructuración en función de las estructuraciones que se han hecho antes en todos los proyectos. Ahí tal vez uno tendría un espacio de aplicación. No se si en temas más de detalle, dimensionamiento, uno podría pensar yo puedo usar esto para asignar cantidades de refuerzo en muros o en vigas pensando en la luz del elemento, la carga aplicada.

BC: ¿Como automatizar aspectos de resistencia de los elementos?

Claro. Pero, **donde haya mucha experiencia previa y donde además se base en la física del problema.**

BC: ¿Donde complemente la experiencia pasado con la teoría dice usted?

RH: Claro. Y siempre va a necesitar eso la revisión del resultado por parte de una persona.

BC: ¿Usted ve alguna desventaja de usar inteligencia artificial en estos casos que usted me menciona?

RH: Más que desventaja es el problema con los desarrollos, que es llevarlos más allá de sus límites razonables. Por ejemplo, me contaba un colega de otra universidad (de otro país) que veía gente, que para calcular las tensiones de una viga flexión tu tienes una fórmula (suponiendo que las secciones planas permanecen planas) y tu sacas el valor de la sección en función del momento... y había gente que lo que estaba haciendo era por ejemplo tomar un montón de resultados numéricos de tensiones en vigas de flexión(para ilustrar el punto) ajustar un modelo numérico de alguna forma, y **resultaba que el modelo numérico tenía 20 parámetros que ajustar versus la ecuación teórica que funciona en base a un solo parámetro.** Y además no

tienes ideas de lo que estas haciendo, porque no es así que un ajuste de puntos. Entonces ese es el riesgo, el olvidarse del problema real mirando solamente la ecuación.

BC: Y sobre los datos que se utilizarían para esto usted cree que habría alguna diferencia según los tipos de estructura, los materiales? de que estructuras tenemos más datos? Por ejemplo comparando estructuras de acero y estructuras de hormigón.

RH: Más que diferencias entre estructuras de acero y hormigón sería más fácil dividir entre estructuras urbanas como edificios de oficina y de habitación, que son bien parecidos unos con otros (no hay mucha variación en el nivel de carga) versus estructuras industriales que son bien únicas en general, son mucho más irregulares, muchas veces no tienen pisos bien definidos, ahí sería mucho más complicado de hacer, en el caso de edificios es más sencillo, donde las alturas de pisos son similares, los tamaños de las vigas, muros y columnas son más parecidos.

BC: ¿Entonces dependería más del uso que se le da a la estructura?

RH: Si, aunque indirectamente del uso. Tiene que ver más con la variabilidad de estructuración que tu puedas tener en función del uso. Como te digo en los edificios los muros están más menos en los mismos lugares, con tamaños parecidos, al igual que con las vigas, son variaciones menores con respecto a lo que encuentras en estructuras industriales.

BC: Pasando al área de la construcción, desconozco su experiencia respecto a esta ¿Conoce algún caso en que se aplique IA, independiente ya sea como método numérico o como aplicaciones como reconocimiento facial, de patrones.

RH: No es mi área, lo desconozco, te convendría. Te convendría hablar con la gente de la CDT. Que yo sepa, aplicaciones en obra no se han hecho, pero puedo estar equivocado Hay ciertas constructoras que tienen sus áreas de desarrollo e innovación, no son muchas. No se si en el área inmobiliaria se aplicaría, tu viste la aplicación que mostró el decano sobre la predicción del precio de las viviendas, aunque eso es una área que ya no es construcción sino el desarrollo económico de los proyectos.

BC: Considera que la implementación de IA reduzca la carga de trabajo, tanto en el área de construcción como de estructuras? Podría facilitar tanto tiempo invertido como eficiencia.

RH: La norma general aquí es que esto requiere menos intervención humana y por lo tanto serían menos horas de trabajo, siempre que la automatización termina eliminando puestos de trabajo. Entonces a lo mejor va a haber que reorientar lo que hace una persona que se dedica al diseño o a la construcción, porque justamente van a haber cosas que se harán de forma automatizada y eso va a ser tiempo que ya no se va a usar. Ahora si, lo que ha aparecido en otras industrias es que hay que dedicar tiempo a mantener estos sistemas, ya que no son a prueba de fallas y

eventualmente tienen que ir incorporando información nueva. Ahí va a haber unas horas de dedicación extra que además van a requerir un grado de formación adicional que no se obtiene.

BC: Tomándome de lo que acaba de decir ¿Usted considera que en la formación de pregrado haya que pasar estos temas a los alumnos? como métodos numéricos o como una introducción de cómo funciona la Inteligencia Artificial?

RH: Antiguamente se tenía un curso de métodos numéricos en la malla de ing civil, se salió con el tema de que nos han pujado a acortar cada vez más las carreras. En ese sentido yo creo que no hay espacio para verlo en profundidad, tal vez se puede mostrar las potencialidades, pero no es algo que crea que se pueda meter en currículum, hay otros conceptos básicos que es necesarios que estén. A medida que se están acortando las carreras veo difícil incorporar cosas nuevas.

BC: Entonces daría más como para incorporarlo a lo más como un capítulo dentro de un ramo? no daría para un curso completo?

RH: No, no hay espacio para hacerlo como un curso completo.

BC: Sobre los impactos a futuro ¿usted cree que dentro del corto plazo, de aquí a cinco años más, cree que tenga efectos importantes la IA dentro de ing civil tanto en estructuras como construcción?

RH: No lo creo. No creo que hayan cosas a un nivel de desarrollo suficientes como para generar un cambio en cinco años.

BC: Eso considerando tanto Chile como el mundo?

RH: Si, dentro de la experiencia que tengo

BC: Y más a futuro que esperaría? que se siga desarrollando o que lleguemos a un límite en el que nos quedemos como estamos?

RH: Lo que si se va a desarrollado harto es todo aquello que está basado en el análisis de imágenes porque ahí uno obtiene un montón de información de una foto pro decirlo en términos simples. Por ese lado, bueno tu hablabas de reconocimiento facial a lo mejor, pueden desarrollar cosas que tengan que ver con seguridad en obra, monitoreo de estructuras utilizando sistemas automáticos, drones o estudios más macro utilizando imágenes satelitales. Eso yo creo que puede tener un desarrollo más rápido.

BC: Exagerando un poco, podría llegar al punto en que no se requiera de mano de obra humana por ejemplo, que el personal sea remplazado por robots?

RH: Eventualmente podría pasar eso, pero no puede desaparecer completamente. Siempre tiene que haber una supervisión humana porque tiene que haber un responsable.

BC: Estaría la máquina, pero también la persona a cargo de que funcione correctamente-

RH: Sí. Mira uno de los ejemplos es la operación de puertos automatizados, que a pesar de que disminuye un montón la cantidad de gente que necesitas dentro del puerto, igual necesitas un operador que sea responsable de la estabilidad del sistema y de resolver problemas que se produzcan eventualmente. Si tu piensas en el caso de los vehículos autónomos, de alguna manera va a tener que haber algún control, a lo mejor no va haber un conductor por cada vehículo pero tiene que haber alguien en caso de que se produzca algún problema. Estos algoritmos no son a prueba de falla.

Transcripción Entrevistado 3

(DC): Ingeniero civil de la Universidad de Chile e investigador asociado del Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Alemania.

Benjamín Caro (BC): memorista del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

DC: ¿cuál es el objetivo de tu tesis? ¿Cuál es la pregunta de investigación que quiere responder?

BC: La principal pregunta es saber si la IA tiene aplicaciones en los proyectos y si estas se están utilizando.

DC: Tu estas haciendo un mapeo en el fondo. Estás viendo el mercado, los proyectos. Estás viendo qué algoritmos están utilizando, que empresas lo están utilizando, qué países lo están utilizando, esa es tu pregunta a responder?

BC: No necesariamente que países, sino para qué se está utilizando, qué técnicas los las principales y qué actividades son las que más apoya.

DC: Okay, entonces qué tipo de modelos son lo que te interesa saber, cierto?

BC: Si o por ejemplo, lo que yo más espero hasta ahora es que una de las cosas que más se esté utilizando es la visión artificial dentro de la construcción. O por ejemplo predicciones para apoyar la planificación de los proyectos. O por ejemplo la inspección de las estructuras para predecir si estas van a fallar o no. Esas son las principales cosas que yo he visto.

DC: Mantenimiento predictivo, todo eso cierto.

DC: Mira tienes suerte porque justo @August 26, 2021 mañana un alumno mío va a presentar su tesis de maestría sobre lo mismo. Lo hicimos que investigara empresas que utilizan IA en el mundo y en qué tipo de proceso o fase constructiva lo están utilizando. Entonces el hizo un catastro de más de 100 empresas alrededor del mundo, las analizó una por una y fue averiguando qué tipo de modelo están utilizando, qué tipo de aplicación generan y el servicio que ofrecen. Por ejemplo si generan un servicio software As A Service, si generan un servicio de consultoría con el producto, etc. También investigó cuanto eran las utilidades que generan estas empresas, cuantos trabajadores tenían, incluso cuantos seguidores en las redes sociales tenían para saber qué tan conocidas son las empresas. Y así luego hizo un test estadístico con estas variables y detectó si eran independientes o dependientes con el **test chi cuadrado**. Entonces planteó varias hipótesis y verificó qué variables influían directamente en el éxito de la empresa,

o en el éxito del modelo de IA. Entonces con el chi cuadrado dijo por ejemplo 'utilidades y tipo de modelo de megocio', 'utilidades y la cantidad de trabajadores', o por ejemplo el modelo de AI con las utilidades y luego los pares que pasan el test los rankeó e identificó cuales son los modelos de negocios más utilizados.

Te voy a mostrar un poco de que trata el proyecto.

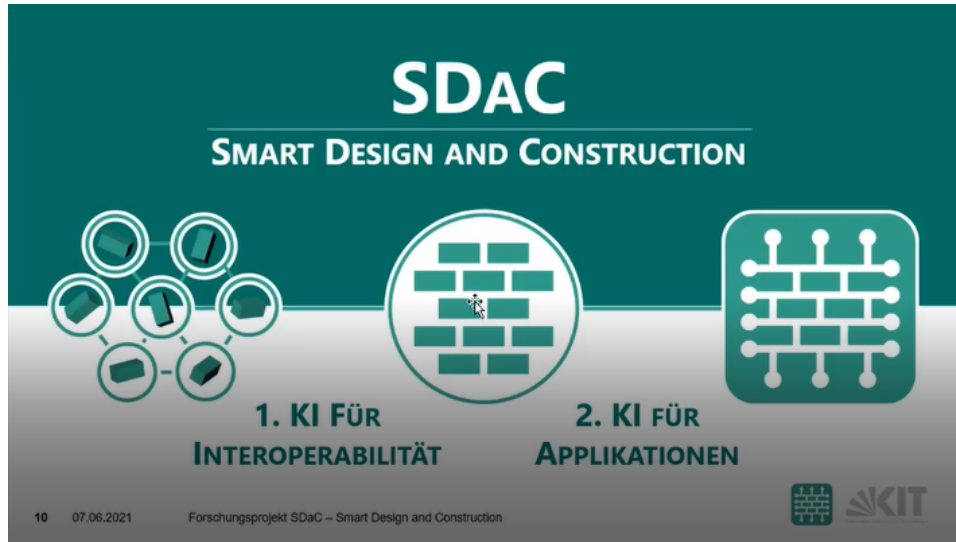
SDAC significa Smart Design & Construction y es un proyecto que fue financiado por el ministerio de economía alemán con un presupuesto de 9 millones de euros, o sea es un proyecto bien grande. El presupuesto está repartido en un consorcio de empresas donde el KIT es el organizador de este consorcio, quienes hacen el project management y la coordinación del proyecto. Existen socios 'partners' que son los marcados en verde y socios externos marcados en gris que son los que nos prestan sus experiencias para testear las aplicaciones.



Por qué se hizo este proyecto? el fundamento es que la fases típicas de un proyecto de construcción (Licitación, Diseño, Oferta, Ganar proyecto, llevar a cabo el proyecto, entrega) tienen muchos stakeholders alrededor, como abogados, bancos, empresas constructoras, cliente, calculistas, arquitectos etc.

Como tu dijiste se necesita interoperabilidad para trabajar en un proyecto. Entonces, todos estos actores generan archivos digitales para comunicarse que están en distintos formatos (archivos de excel, word, DWG para los planos, para BIM, de paginas web, archivos de nubes de puntos). Lo

que busca este proyecto es utilizar Inteligencia Artificial en dos etapas. Una es porque tenemos esta 'ensalada' de diferentes archivos, entonces lo que busca es con inteligencia artificial tratar de ordenarlos, esquematizarlos de manera que los datos puedan ser utilizados para entrenar modelos de inteligencia artificial. Y luego va el segundo paso donde van a ser utilizados estos modelos en el desarrollo de aplicaciones, y aquí los datos se transforman en una aplicación.



O sea, de los datos desordenados, primero con IA los ordena, y después de nuevo con IA genera diferentes tipos de aplicaciones. Entonces con esto nosotros queremos crear una plataforma, donde los actores principales van a ser las empresas constructoras por un lado, y por el otro lado empresas de desarrollo de software. Por ejemplo, tu sabes que la plataforma siempre tienen dos partes por ejemplo la plataforma Uber, tiene una parte que son los conductores y otra parte que son los pasajeros esos son los 2 tipos de cliente, y los dos aportan a la plataforma. La plataforma lo que hace es lo mismo. Entonces lo que nosotros queremos es unir a las empresas constructoras con las empresas digitales. Porque las empresas digitales (desarrolladoras) no saben el negocio de la construcción y no conocen los dolores o pains que tiene la construcción. Entonces nosotros somos como el nexo entre ellos, nosotros decimos 'mira, esto hay que solucionar, y aparte nosotros les entregamos los datos estructurados'.

Tu sabes que para inteligencia artificial tu necesitas un set de datos muy grande para entrenar modelos, pero si estos no están estructurados no te sirven de nada. O sea que debe haber un

trabajo antes para utilizar los datos. Tu no puedes llegar y utilizar fotos por ejemplo, tienes que primero etiquetarlas hacer el proceso de 'labelling'. Lo mismo pasa con contratos, archivos de texto, archivos BIM, de cálculo.

BC: Tengo la duda sobre eso. La AI ahí que hace con los datos, clasifica? hace regresiones?

DC: Depende del tipo de archivo. Por ejemplo, hay documentos que 'documentan' fallas constructivas, por ejemplo va un inspector al sitio documenta, 'aquí hay un nicho de piedras', 'acá una grieta, una mancha de humedad'...

BC: entonces habría que procesar el texto

DC: entonces lo que nosotros hacemos aquí es procesar los documentos de muchas empresas que vienen en diferentes formatos. Porque una empresa quizás hace esos reportes en un excel, otra quizás usa un software, otra quizás usa papel manual. Entonces ahí primero tenemos que hacer un OCR (Reconocimiento Óptico de Caracteres) para escanear el papel, leer la información que está escrita a mano, entenderla, procesarla, enviarla a una base de datos. Y ahí está estructurado. Así pasas de un documento manual, de un pdf, de un excel a una base de datos.

Y después cuando ya tenemos todo en una base de datos. Tenemos que 'todas estas son las típicas fallas constructivas' podemos crear una aplicación que pueda utilizar esa base de datos para, por ejemplo, 'predecir esas fallas constructivas'.

Por ejemplo si mezclamos estos datos con los reportes de tiempo, podrías hacer una correlación y ahí podría entrar otro algoritmo de inteligencia artificial que haga regresiones, correlaciones. Eso es un ejemplo. Otro ejemplo son las fotos, porque estas fallas o accidentes documentados con fotos por ejemplo. La idea es recopilar las fotos de muchas empresas, etiquetarlas y añadirla a una base de datos para disponerla a programadores. Así los programadores podrían usar las bases de datos como sus dataset para entrenar modelos.

Una empresa podría desarrollar un software que analice los peligros de la construcción, los accidentes, otras fotos se podrían utilizar para medir el avance de un proyecto. O quizás otra las querría utilizar para hacer telegramearía para generar modelos 3D a partir de fotos 2D. Entonces nosotros en esta plataforma queremos ofrecer aplicaciones.

SDAC Store son las aplicaciones que estamos desarrollando. **Vamos a comenzar esta plataforma con 9 aplicaciones**, por ejemplo la aplicación de peligros, de documentación de avance, de cadena de suministros, de la entrega, pronóstico de e término de obra, predicción de fallas constructivas, detección de objetos en planos (Para ubicar, por ejemplo si no tienes un modelo BIM, esta se hace a mano, queremos con AI hacer el proceso más fácil ubicando a través de reconocimiento de objetos. También en base a un plano se una aplicación podría

generar una propuesta de planificación mediante carta Gantt). Todas estas aplicaciones están en desarrollo.

El proyecto dura 3 años. Nosotros ahora estamos ahora en fase de testeo, vamos a comenzar a testear prototipo en setiembre. Todo este año y medio ha sido en términos de interfaz de usuario, experiencia de usuario. Cuando desarrollar una aplicación tienes que pensar en términos de lo que los usuarios quieren. Ahora estamos generando recién los primeros prototipos técnicos.

A parte de estas aplicaciones ofreceremos a los programadores módulos. Que por ejemplo anonimicen las caras de las personas en las fotos o videos.

BC: O sea la van a facilitar un poco el trabajo a los programadores.

DC: Otro modulo de word embeddings, un servicio que pueda leer **en contexto de la construcción**, porque es diferente leer un documento de construcción a leer un documento de leyes por ejemplo, es otro lenguaje. Entonces tu necesitas entrenar tu algoritmo al contexto.

También habrá un módulo de fotogrametría, un módulo de escaneado de imágenes por ejemplo. De modo que así dentro de 3 años cuando esta plataforma esté lista nosotros queremos ofrecer por lo menos 9 aplicaciones a las compañías constructoras y un pa de módulos a los desarrolladores para así comenzar esta plataforma. Así las empresas constructoras van a poder descargar estas aplicaciones que les van a ayudar a mejorar su producción. En el fondo las vamos a vender como en una appstore. Y por otro lado los desarrolladores también, van a poder publicar sus aplicaciones en la misma plataforma.

BC: Y una pregunta sobre eso. Los datos que ustedes tienen ¿hay mucho conflicto con quien tiene los datos? Por ejemplo, las empresas que participan accedieron o comúnmente no hay tanto 'atado' en que te entreguen los datos los privados?

DC: Mucho, mucho conflicto. Acá sobre todo en Alemania el tema de protección de datos es super fuerte, es mucho más fuerte que en Chile. Con decirte por ejemplo acá a la gente no le gusta usar tarjeta de crédito porque dicen que le van a trackear los datos y van a saber lo que compran, por ejemplo. Olvídate de un RUT, acá no se ocupa un RUT. Acá eso prohibido porque no te pueden identificar con un número para después tener en una base de datos toda tu información. Ahí entra el tema de la ética en la inteligencia artificial, que eso es lo que quieren regular acá en la Unión Europea y nosotros estamos metidos en varios grupos por ejemplo de **tratar de prohibir algoritmos que sean BlackBox**. Porque ahí tu no puedes saber si el algoritmo está con *BIAS* (sesgado). Un ejemplo es que un algoritmo en un aeropuerto empezó con detección de caras a decir que personas negras o de aspecto latino tenían que ser revisadas más frecuente que las personas de tez blanca. Estamos hablando de un sesgo que quizás por

estadística el algoritmo estaba bien en que esas personas cometían más delitos, pero eso es antiético. Acá eso está muy regulado.

Entonces las empresas dicen ' okay, yo puedo entregar datos, pero hay que anonimizarlos muy profundamente'. Entonces ahí se ocupan técnicas de tokens, de borrado automático. Por ejemplo acá es super difícil poner una cámara dentro de un sitio de construcción.

Entonces las empresas que integran este consorcio están entregando sus datos para empezar la plataforma. Hay empresas constructoras como GOLDBECK, que es una empresa super grande (similar a SalfaCorp en Chile) y está Steuer Tiefbau que es una empresa chica que es una empresa chica. Los demás son institutos de investigación de inteligencia artificial, universidades. Para empezar vamos a usar esos datos. Con el pasar del tiempo vamos a ir recopilando más datos a medida que vayan utilizando esas aplicaciones. Entonces, quizás vamos a ofrecer descuentos para las empresas si es que ellos ponen a disposición sus datos, por ejemplo ' ocupe la aplicación gratis si es que usted nos entrega las fotos que está subiendo'. Entonces eso es como un modo para empezar a entrenar y mejorar los algoritmos y para hacer nuevas aplicaciones.

Si te fijas en las aplicaciones que mostramos aquí (presentación proyecto SDAC) no hay nada con relación a diseño estructural. No estamos viendo ese tema, pero no se si escuchaste de las **redes neuronales para grafos (GNN)**.

(Sobre: OddIndustries. 'Igual ahora se metieron un poco a sustentabilidad porque los compró Arauco y están trabajando con Inteligencia Artificial para medir los bosques por medio de imágenes satelitales, entonces se salieron un poco de construcción).

| ...

| Acá hay una presentación. Nosotros hacemos un curso de inteligencia artificial básica. Esto es un buen ejemplo de que la gente igual le tiene miedo a la inteligencia artificial, que es un robot que los viene a sustituir. La gente piensa que va a perder el trabajo. Primero hay que decirle a la gente que la IA no es tan avanzada como para ser tan inteligente como para sustituir un humano. Lo único que puede hacer es apoyarnos en sistemas, entonces a lo que se apunta es a una relación de cooperación entre humano y máquina, donde se compara mucho a la revolución industrial donde la máquina de vapor que hizo un cambio grande.

| ...

35:53

Las Graphical Neural Networks son redes especializadas en grafos. Los grafos son una entidad matemática que es bien especial porque está unida con vecindades. Con los grafos puedes crear redes sociales, calcular densidades, largos de red, caminos óptimos, etc. Incluso las fotos se pueden representar como grafos. Entonces esta red especializada porque está basada en un algoritmo que analiza toda la vecindad, el valor del nodo está basado en una matriz que ve toda la vecindad. Así es cómo google pudo mejorar las predicciones de tiempo de llegada en google maps.

... (min 37:30 al 38:00 aparecen cortados)

Este año está en borrador la nueva ley de protección en Chile, donde se van a tratar todos estos temas. Probablemente después no va a ser legal dar tu RUT y que te trackeen con este.

BC: Sobre lo que me estabas mostrando recién. Me imagino que tu consideras que la IA podría ayudar a la coordinación en los proyectos, como coordinando la etapa de diseño con la etapa de construcción, los distintos stakeholders?

DC: Totalmente, tu ya lo viste acá al mostrarte el proyecto SDAC. Se puede mejorar la interoperabilidad mediante la estandarización y la estructuración de los datos.

BC: Y eso también reduciría la carga de trabajo en general?

DC: Totalmente, reduciría el re-trabajo.

BC: Como tener un ciclo de revisión constante? alivianar ese trabajo?

DC: Claro. El re-trabajo lo puedes eliminar y también la reconversión. Imagínate que te entregan datos en distintos formatos. Si necesitas editar un archivo. Si todos ya puede estar estructurado mediante un asistente que te esté ayudando a eso, y no te digo solamente en archivos pdf que los puedas convertirlo y editar en word, estoy hablando más profundamente en el tema BIM por ejemplo.

BC: Como los estándares IFC

DC: Claro. Y poder generar que el modelo los eléctricos converse con un modelo arquitectónico y juntarlos.

BC: Y a eso estaría apuntando la AI entonces, como tu me mostraste.

DC: Claro. También por ejemplo, quieres hacer un modelo as built, de un edificio que está construido, que nunca fue modelado en BIM, y tu en vez de hacerlo totalmente manual puedes sacar fotos con un dron por fuera, hacer fotogrametría, hacer un modelo en 3D y ese modelo en 3D lo puedes transformar después en un archivo BIM.

DC: Y sobre eso mismo, el uso de BIM va muy ligado con el auge de la AI en ingeniería civil.

DC: Totalmente. BIM es la columna vertebral de la digitalización en la construcción. Todo lo demás son cómo 'ramitas' que se van uniendo a esta columna vertebral.

BC: Te entiendo. Que bueno porque al menos los proyectos que yo había visto como investigaciones no se hablaba tanto del BIM. Bueno, la mayoría de las cosas que encontré eran memorias o tesis donde se aplicaban algoritmos de Inteligencia Artificial, pero no se hablaba como de su aplicación en la vida cotidiana, donde si se está necesitando mucho del BIM. Aquí en Chile aún se está intentando que crezca el uso del BIM, pero aún sigue siendo más 'investigar métodos numéricos' que su integración en el workflow de la construcción.

DC: Justamente el BIM te apoya en el workflow, el BIM digo que es columna vertebral porque te puede conectar diferentes equipos de trabajo, por ejemplo los arquitectos con los ingenieros, genera un lenguaje de comunicación entre ellos dos.

Actualmente, claro se están generando muchas aplicaciones y softwares que te están ayudando a hacer tareas pequeñas, y también se están generando aplicaciones que ocupan inteligencia artificial como dijiste tu, ocupan algoritmos para hacer una tarea pequeñita. A futuro esto se debería integrar a todo el sistema BIM de un proyecto. Es como decir que BIM va a ser como el *Sistema Operativo* de un computador y todas las demás aplicaciones tanto normales como las de inteligencia artificial deberían ser compatibles al sistema operativo, como las aplicaciones son compatibles con Windows, para luego entrar en todo esto del proyecto.

DC: Y tu conoces proyectos en concreto donde se haya utilizado inteligencia artificial. Que ya se haya utilizado? O aún es algo que está como en proceso de prueba?

DC: Está en proceso de prueba, generalmente. Nosotros todavía no lo ocupamos en ningún proyecto concreto. Conocemos empresas que si lo han hecho, pero no te podría decir algo que yo lo haya hecho de primera mano. Para tener eso podrías hablar con OddIndustries porque ellos si lo hicieron y son un caso bien cercano.

BC: Crees que alguna metodología o filosofía sea más compatible con la inteligencia artificial? ME imagino que la metodología BIM ya está clara, pero por ejemplo, ya sea como LEAN, Last Planner o distintas metodologías? Hay alguna que se te ocurra que sea acorde para esto?

DC: Cualquier metodología que te permita generar datos estructurados es buena. Por ejemplo Last Planner system, te genera semanalmente indicadores de estado de proyecto, indicador de avance, indicador de costo, de performance. Entonces Last Planner system es un sistema ideal para después hacer inteligencia artificial porque después vas a tener una base de datos de todos los proyectos y lo puedes contrastar con cualquier otro tipo de variable. Lo puedes contrastar con clima, cantidad de trabajadores en la obra, con hechos políticos que pasaron en el tiempo y puedes entrenar así un algoritmo para que pueda predecir por ejemplo 'en invierno cómo es la performance del proyecto en general, cómo tengo que planificar cuánto tengo que esperar avanzar en invierno en comparación a verano'.

BC: O también como para solventar las causas de no cumplimiento más comunes.


DC: Exactamente, y ahí meter un algoritmo de reconocimiento de texto (NPL)

Es un ex-colega. Él está haciendo su doctorado en Inteligencia Artificial y está justamente analizando eso. Datos de Last Planner System que fueron recopilados con el software IMPERA

IMPERA - GEPRO

IMPERA es una plataforma digital de gestión, planificación y control de proyectos basada en Last Planner ® System, que permite reducir la variabilidad en la planificación de forma ágil y colaborativa, mejorando el

<https://www.gepro.cl/impera>



y este software es del GEPUC de la Católica, que ahora se llama GEPRO. Y él está haciendo regresiones para predecir cosas con estos indicadores.

(49:20 Me presenta el word de su alumno de doctorado)

Empresas que utilizan AI. La mayor de empresas que recopiló son de recopilación de datos, seguido de softwares de calidad. La mayoría está en Estados Unidos.

Encontró 50 de USA, 18 de Alemania, 17 de Inglaterra. De Chile encontró 1 que fue OddIndustries. Recopiló 116 empresas alrededor del mundo que están utilizando AI, indicando sus respectivos métodos.

Hay otra empresa chilena que se llama BIM-Trazer (empresa argentina-chilena).

(... Sobre Diseño generativo)

En el futuro eso se espera, que los humanos hagan tareas comunicacionales y creativas, y los computadores todo lo lógico.

Los que si van a tener menos 'pega' van a ser los calculistas, los ingenieros estructurales porque cada vez, con diseño generativo, vas a poder también calcular la estructura. Esa es la otra parte donde se puede aplicar diseño generativo, como lo es la impresión 3D, porque el diseño generativo te puede ayudar, por ejemplo, a generar la misma resistencia a la compresión de un muro con menos material. Esto se combina con impresión 3D, porque hacer una estructura de forma complicada con moldaje, imposible, pero con impresoras 3D si se podría.

BC: Y apuntando a eso, tanto al diseño generativo como al resto de aplicaciones en cuánto tiempo ocurriría eso? Porque eso es una visión más a futuro, me imagino que al menos 15 años ¿cuántos años crees tu?

DC: ¿Para que el diseño generativo se aplique? ¿o para que llegue al mercado?

BC: O como para que lleguemos a utilizar una impresora 3D para construir un edificio.

DC: No te puedo dar una fecha exacta, pero te puedo dar un ejemplo. Yo recuerdo que estaba en la universidad alrededor del 2008, y apareció la noticia de que iban a existir impresoras 3D. Yo le conté a una amiga y ella no me podía creer, que 'era imposible, cómo'. Era algo muy irreal. Del 2008 a ahora a pasado un poco más de una década, y las impresoras 3D ya son un hecho aunque aún no están expandidas a todo el mercado, falta. No es que todos tengan una impresora 3D en su casa. Ahora el diseño generativo cuándo empezó? no es algo tan nuevo, llevará unos 5 años. En 10 años más quizás va a estar ahí como ahora están las impresoras 3D, pero ya para que abarque el mercado y llegue a una madurez total, yo diría unos 15 años.

BC: Para que alcance ya al menos su madurez?

DC: Si, yo diría. Analiza cuanto demoraron los smartphone también.

BC: Igual son industrias distintas, entonces por eso mi pregunta, aparte de cómo cuántos años, es si vamos a llegar a un límite dentro de estas innovaciones. Porque se me imagina que puede que llegue el diseño generativo en la construcción, pero también va a ser algo de las empresas con más recursos.

DC: Exacto. Y eso es lo que queremos en SDAC combatir. Este proyecto fue financiado por el gobierno con tanta plata porque ellos quieren apoyar la pequeña empresa. Porque saben que las grandes empresas pueden pagar software, programadores, data scientists, y se pueden digitalizar. Pero las grandes empresas (constructoras) en Alemania, y en todo el mundo casi, son el 2%, o sea 98% son mediana y pequeñas empresas. En Chile debe ser algo parecido, deben haber 2 o 3 empresas constructoras grandes y el resto son todas pequeñas y medianas constructoras,

subcontratistas, etcétera. Entonces cómo se digitalizan ellos? es caro comprar un software. El diseño generativo más reconocido ahora el de Autodesk, pero es carísimo. Por eso el gobierno alemán quiere hacer esta plataforma, para generar que los desarrolladores de software vean en la construcción un mercado atractivo y desarrollen estos softwares. Si hay más oferta bajarán los precios, entonces así se pueden podría generar aplicaciones a bajo costo para las empresas. Y las pequeñas empresas van a pagar no solo con dinero sino que también con datos. Con ello vas a poder alimentar más aplicaciones y con mejores resultados.

Entonces respondiendo a tu pregunta, lo más probable es que se genere una madurez en el mercado, como lo que ocurrió con excel, que antes no era un estándar.

Escribí también un paper sobre cuáles son los impulsores de la inteligencia artificial y cuáles son los detractores, que se publicará en septiembre. Uno de los impulsores es el cambio generacional.

BC: Diego y ahora ya en el corto plazo, cómo ves que van a evolucionar las cosas? dentro de 5 años? en concreto en la ingeniería civil.

DC: En que sentido?

BC: En implementación o desarrollo, si es que va a haber más gente desarrollando. Tanto lo que puedas ver tu en el caso de Alemania cómo en el caso de Chile, o cualquier caso que conozcas.

DC: Lo que veo es que se están generando muchas start-ups para la industria de la construcción. Y la generación de estas y que estén muchos intentando genera y 'caldo de cultivo', porque la digitalización es super exponencial, pero necesita llegar a ese punto de inflexión. Yo creo que se está generando recién este 'caldo de cultivo', puede que en 5 años más esto vaya a explotar.

Acá en Alemania veo muchas start-ups en construcción, en Chile también, lo que me alegra. Hay muchas empresas en el mundo que también están trabajando con esto. Y para muchos tipos de aplicaciones, no solamente para cálculo estructural, hay millones de aplicaciones de diferentes tipos.

BC: Entonces los nuevos ingenieros, y también los que están ejerciendo hoy en día tendrían que aprender sobre esto dentro del corto plazo?

DC: Totalmente.

BC: Sobre cómo funciona la AI

DC: Yo creo que el usuario final no necesita aprender a programar ni entrenar algoritmos. Por ejemplo tu ocupas Siri, o google fotos, te selecciona todas las fotos mediante computer vision. Pero tu no aprendiste a programar. Entonces los ingenieros civiles o arquitectos no necesitan

saber de inteligencia artificial, ellos van a ser los usuarios. Los que si necesitan saber son los programadores de software, pero eso es otro tema.

BC: Me queda la duda porque un profesor que entrevisté pasó que él decía que había que tener el sustento teórico, en el caso de las aplicaciones orientada al área estructural, que por ejemplo había que combinar la visión artificial con la teoría de la mecánica de sólidos. Entonces ahí tenía la duda si era necesario que los ingenieros en el futuro tengan que aprender sobre esto, más allá de que seamos usuarios.

DC: Pero mira, se necesita ese conocimiento solamente al momento de crear la aplicación, o sea que los que ahí deberían aprender de sólidos son los programadores de software porque ellos van a vender el software después, entonces ellos tendrían que tener en su equipo un ingeniero estructural que les explique cómo funciona, pero ese ingeniero estructural no necesita saber de inteligencia artificial. Él va a entregar sus conocimientos, su experiencia, y los programadores lo van a transformar en un modelo AI que va a aprender y va a emular lo que hace este ingeniero. Para la concepción se crea el software, se vende y después lo van a utilizar ingenieros estructurales a los que les van a simplificar sus tareas.

Por ejemplo, un módulo que te genera la enfierradura de una planta automáticamente, tu lo único que tienes que hacer es apretar un botón y revisar que estén bien los cálculos, porque después va a ir tu firma puesta.

(...1:09:00 Sobre el estudio de Pablo Pizarro con profesor Massone y cómo podría aprovechar el proyecto SDAC para implementar su estudio de aplicación)

Transcripción entrevista 4

C): Ph.D.(c), Master of Sciences, Consultor de Proyectos en GEPRO.

Benjamín Caro (BC): memorista del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

BC: Bueno, yo entrevisté a Diego Cisterna y él me contó que tú estabas haciendo un trabajo respecto a este tema. Si me pudieras contar un poco sobre este trabajo.

CL: Bueno... Básicamente yo trabajo con datos de gestión de proyectos, entonces yo tengo la historia de un proyecto en el tiempo. Tengo muchos proyectos en una base de datos relacional. Entonces lo que yo hago es trabajar primero con datos relacionales que tienen una componente longitudinal, porque cada proyecto tiene una evolución en el tiempo, y una componente transversal porque tengo muchos proyectos.

Yo estoy trabajando con aprendizaje supervisado y aprendizaje no supervisado para distintas fases de como yo quiero evaluar los proyectos. Yo he trabajado en aprendizaje no supervisado en entender por ejemplo grupos de proyectos que tienen características comunes (como datos de entrada), y grupos de proyectos que pertenecen a clases de desempeño final que también están categorizadas mediante aprendizaje no-supervisado. Y luego hay una serie de herramientas de ciencia de datos, determino **qué variables son discriminantes, qué variables son representativas, cómo se conectan las variables, sus correlacionan**. Y así empezar a entender un poco el mapa de todos los procesos que hay en esta bolsa de *inputs - process - outputs*, cómo se conectan. Ahí hago obviamente análisis que son más estadísticos que se ocupan mucho en machine learning, como PCA (para poder encontrar componentes que estén delimitados y separados entre ellos), LDA cuando quiero encontrar vectores discriminantes y hacer reducción dimensional, evaluación de constructos, dependiendo del caso (si no me interesa la correlación y me interesa causalidad) puedo utilizar ecuaciones estructurales.

Y una vez que tengo ya el mapa de cómo están constituidos mis procesos utilizo herramientas de aprendizaje supervisado para darle el resultado de proyectos a un algoritmo y empezar cómo puedo crear predictores de esos proyectos.

Dentro de esos predictores estoy trabajando con herramientas interpretables, como por ejemplo árboles de decisión, semi-interpretables, como por ejemplo regresión logística binaria (donde ya se empieza a complejizar porque puede que dentro de eso no me entra una variable conocida sino que entra un *PCA*). Y los no interpretables estoy tratando de evitarlos, pero en algunos casos

estoy trabajando con redes neuronales, SVM, ya que cuando trabajas con dimensiones muy grandes dejas de interpretar qué es lo que está pasando adentro.

(3:23) Como yo lo utilizo de esta forma es porque estoy tratando de agarrar **Machine Learning como herramienta para estructurar reglas de decisión y después llevarlas a una metodología de decisión**, es decir bajar el nivel. No me interesa tanto el resultado del algoritmo como si me interesa poder interpretar las reglas que está usando el algoritmo y entregar esas reglas para que el usuario del proyecto pueda evaluar su desempeño.

BC: ¿Entonces en el fondo no buscas hacer una herramienta predictiva?

CL: O sea, trabajo haciendo herramientas predictivas, y trabajo haciendo minería de datos y clusters, etcétera. Pero al final del día lo que quiero, o la brecha que estoy abordando yo es que el machine learning funciona muy bien cuando tienes 10 mil datos y una red neuronal que no vas a saber interpretar, predecir comportamiento de retail por ejemplo. Pero cuando estas en gestión, sobre todo gestión de la construcción que es un poco más arcaico. Más que a la herramienta tu le vas a crear a las reglas de decisión.

Yo estoy trabajando **cómo establecer reglas que sean interpretables, que sean validadas por algoritmos de Machine Learning.**

BC: Yo tenía entendido que ocupabas Last Planner para esto. No es así entonces?

CL: Claro, el caso de estudio son datos de proyectos de Last Planner. Los datos son ponte tu el PPC (Porcentaje del Plan Completado) de un proyecto de construcción durante su fase de ejecución.

Ahora estoy trabajando en un proyecto que vamos a partir con el Departamento de Transportes de Colorado y ellos no tienen Last Planner, las variables son otras, pero la metodología es la misma, input-process-output, graficar que es lo que hay dentro de los process, cómo se relacionan, si es que hay alguna causalidad que se pueda detectar con SEM, y ya después de eso decir "Bueno okay, ahora ya tengo todo y se cómo meterlo a la juguera, lo meto a la juguera, creo un algoritmo de ML que prediga, que clasifique, o que evalúe; y después cómo de la aplicación de ese algoritmo voy entendiendo reglas que le puedo entregar a ellos sin que tengan que estar corriendo modelos de ML todo el rato. Y esto por qué? porque la transformación digital de la industria de la construcción es super baja, entonces tu generas una herramienta tecnológica que requiere, ponte tu, corras un programa en **Jupyter** con tus datos no lo van a poder a hacer en construcción. Versus si tu les entregas una metodología que tiene el respaldo de un modelo que ya fue validado es mucho más simple.

BC: Y tu conoces alguna otra metodología aparte de Last Planner que se adecúe a esto? En ingeniería civil en general, ya sea en ingeniería en estructuras o en el área de construcción.

CL: Yo he trabajado con modelos de optimización paramétrica, por ejemplo, para desarrollos BIM que corren **Fast Measurement algorithms** que lo que hacen es decir "cuál es la mejor forma de llegar a una heurística de optimización sin tener que correr toda la combinatoria de elementos posibles porque si no me vuelvo loco en un BIM.

Por ejemplo donde ocupas algoritmos genéticos para poder hacer estas pruebas.

También he trabajado con datos donde tu tienes características que son más cualitativas, donde tienen grados. No necesariamente tienes una muestra lo suficientemente grande para entrenar un algoritmo de ML, pero si para testear hipótesis expertas. Y ahí he utilizado mucho Fuzzy Logic.

También he trabajado con modelos que parten del Data Science pero después la red neuronal, en vez de pedirle al computador 'créamela tu', tu elaboras constructos con expertos y lo que haces después es parametrizar el modelo de tal forma que el resultado le esté dando correcto, entonces vas ajustando los pesos de estas reglas de te crearon los expertos. Es bien parecido a la lógica difusa, pero usa otra metodología que se llama **General Performance Modelling (GPM)**.

BC: Con expertos te refieres a profesionales o a sistemas expertos?

CL: No mira. Imagínate el caso siguiente. Yo hago una especie de diagrama de decisión o un diagrama de procesos donde tengo un problema secuencial. Tengo horas de estudio, cursos que estoy tomando, capacidades de machine learning, condiciones del caso, capacidades de que entregue un buen resultado. Esos constructos me los dio un experto, es como el experto del problema. EL experto parte estableciendo ciertas reglas 'Si es que el caso es tanto le pega tanto este otro, etcétera' y cada uno de esos temas tiene una distribución de Montecarlo -(cómo en un árbol de decisión)-. Lo que tu haces es, a través de data science le otorgas pesos a esos constructos y entiendes cual es el resultado, lo calibras hasta que el modelo se optimizó para entregarte el resultado hoy. Entonces tu después haces *juegos de escenarios con expertos*. Que pasa si ahora hay un caso que no tengo, donde todo está más alto y mejor cómo me influye en mi capacidad. Data science va a entregarte cuanto tienes que moverte dentro de la curva de distribución de tu resultado, dado este caso, y el experto va a calibrar cuanto tu te pasaste, por ejemplo, de las reglas (te dice 'en tal caso estas siendo muy pesimista') entonces ajusto.

Entonces es combinación de expertos, expertos personas, con el fondo pesos o heurísticas expertas de Machine Learning, y es bien entretenido porque es la mezcla entre estos dos mundos. A esto se le llama General Performance Modelling.

BC: Eso no lo conocía, yo aún soy un novato en estos temas de IA. Comencé cuando comencé con este trabajo.

Otras cosas que hemos hecho que te pueden interesar es Computer Vision para entrenar algoritmos que detecten personas y comportamientos de personas y lo asocian a productividad, que funcionan con redes neuronales y con probabilidades bayesianas. Entonces la red neuronal la ocupas para detectar donde hay una persona. La gracia está en que después tu entrenas una capa dentro de esa red neuronal que toma como insumo los resultados de muchas redes neuronales que detectaron personas y dicen cual es el grado de cercanía de estas dos personas a un determinado objeto y dado eso cuál es la probabilidad de que estén trabajando. Eso requiere de aprendizaje no supervisado para detectar personas y aprendizaje supervisado donde le estas diciendo 'aca están siendo productivo o no', y el sistema empieza a asociar características de la imagen a comportamiento, y eso lo hace con probabilidades bayesianas.

BC: Esos casos que tu me mencionaste recién son casos que están en desarrollo, que ya los investigaron, que están en el mercado o dentro de alguna aplicación (app)?

CL: Computer Vision por ejemplo está en el mercado. Leonardo Prieto desarrollo **Odd-Vision** y están ocupando compute-vision para monitoreo de personas. Hay otro software que se llama **Quintun**, la empresa se llama DataCiencia, ellos también están utilizando computer visión pero para monitoreo de en fondo movimiento de personas en el tiempo y además uso de EPPs. Otro sistema que está operando con IA en construcción se llama Co-Watch de la empresa VigaLab, ellos tienen un sistema que monitorea distanciamiento de personas y además parámetros de salud. Y esos datos los han estado utilizando, los han ido validando con casos realmente positivos de Covid, que se está entrenando a través de las heurísticas de predicción de riesgos de contagio. VigaLab también trabaja con IoT (Internet of Things) y también hace modelos de mantención predictiva con sus *bibots*.

BC: TU consideras que hay alguna desventaja de la inteligencia artificial en la ingeniería civil?

CL: Yo creo que la desventaja en el caso del rubro de la construcción está principalmente por el grado de transformación digital que tiene. Somos arcaicos en cuanto a la captura de la información. Generamos muchos datos, pero sistematizamos muy pocos datos. El grueso de las obras hace un registro de entrada con un libro de asistencia y firma, y si tu te pusieras a traducir todo ese libro tendrías la hora en que llego y salió cada persona y si es que firmó realmente el o no pudieras saber por la tinta cuando firmo. O podrías hacer algo mucho más fácil como usar un sistema biométrico de control de entrada y salida. El tema es que nuestros procesos generan

mucha información, pero esto es un embudo, tienes muchísima información que se está generando que se está perdiendo y es muy poca la que llega a estar disponible para que tu la uses.

BC: Pero eso es mas bien una barrera a la implementación o no? más que una desventaja intrínseca de la IA funcionando?

CL: No, yo lo veo al revés. O sea, claramente es una barrera, pero para implementar buenos modelos confiables tu paso fundamental es tener muchos datos, muy verídicos, muy sistemáticos. Si tu no los tienes tus modelos **pueden inducir fácilmente error**. Hoy en día implementar IA en proceso de gestión, en el fondo la gran desventaja que tiene es que te puede llevar muy fácilmente a datos erróneos porque no tienes suficiente información para entrenar. Versus en temas como materiales, diseño, ingeniería de materiales, donde ya tienes BIM. Una foto de una grieta 'es, o no es' por ejemplo. Ahí no le veo ninguna desventaja porque el modelo si te va a entregar un resultado confiable, tu tienes un millón de grietas en un muro para poder entrenar. Pero la gestión tiene estos componentes más cualitativos y estas pérdidas de información que hoy en día si tu llegas y te saltas a inteligencia artificial sin haber pasado por la **digitalización, la sistematización de procesos** antes, vas a estar entregando modelos que probablemente están sesgados o tienen en el fondo sobre-entrenamiento.

BC: Camilo y ya como últimas preguntas, tu qué esperas dentro del futuro, qué pronosticas para la inteligencia artificial en ingeniería civil? Dentro de un plazo corto, ya sea de aquí a 5 años, qué esperas de su implementación o bien desarrollo?

CL: Yo creo que por ahora por... Haber, lo voy a separar en tres:

Por el lado de ciencia de materiales e incluso producción. Creo que todo lo que tiene que ver con inteligencia artificial asociado a robotización y automatización de procesos o de análisis de calidad, eso va a ser lo primero en explotar pensando en como está creciendo la industrialización.

Segundo, yo creo que ahora que se están masificando las librerías más estandarizadas de BIM y de diseño, el diseño paramétrico y la optimización de de diseño también va a ser algo fuerte con inteligencia artificial.

Y creo que va a andar más lento, y lamentablemente es la parte que tiene que ver con gestión, la parte que hago yo. Creo que estamos en un proceso donde primeros vamos hacia Business Intelligence hacia obtener qué datos tenemos y como podemos usarlos para tomar decisiones. Después hacia Data Science, y después hacia vamos a llegar a Machine Learning. Entonces no veo un cambio fuerte, no creo que vayamos a estar utilizando algoritmos de IA de toma de decisiones de gestión de aquí a cinco años.

Anexo A

Infografía Encuesta



Figura A.1: Infografía de aplicaciones de IA en proyectos de ingeniería civil.
Fuente: Elaboración propia