



# CONCURSO DE TESIS DE INTERÉS REGIONAL

2 0 2 5



CONSEJO DE RECTORES DE VALPARAÍSO (COMPILADOR).  
Valparaíso, 2026

Tesistas:  
Janmanuel Jaramillo  
David Ignacio Álvarez Rojas  
Sara Pinilla Yaupe  
Ruy Francisco Muñoz Mateluna

Prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos  
de cada tesis sin el permiso de sus autores.

**CONCURSO**  

---

**DE TESIS**  

---

**DE INTERÉS**  

---

**REGIONAL**  

---

**2 0 2 5**





# Indicadores de intensidad de carbono aplicables a remolcadores portuarios: aporte a la gestión ambiental del sistema marítimo-portuario

**Tesista: Janmanuel Jaramillo**

Profesor guía: Yunesky Masip Macia

Profesor correferente: Joaquín Gutiérrez

Escuela de Ingeniería Mecánica

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso



#### Pertinencia regional del trabajo

Esta tesis constituye un aporte a la Región de Valparaíso porque entrega herramientas cuantitativas para la gestión ambiental de un sistema estratégico para el territorio: el sistema marítimo-portuario. La investigación permite evaluar la intensidad de carbono de remolcadores portuarios, embarcaciones esenciales para la continuidad de las operaciones de atraque, desatraque, carga, descarga y asistencia segura a buques. En una región con vocación portuaria, estos indicadores apoyan el monitoreo de emisiones, la planificación operacional y la toma de decisiones orientadas a reducir impactos ambientales sin debilitar la movilidad, el transporte y la conectividad marítima.

# 1. Marco teórico

La industria marítima enfrenta una presión creciente para reducir su impacto ambiental, particularmente en relación con las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). En este contexto, los remolcadores, esenciales para las operaciones portuarias y terminales, presentan desafíos únicos al establecer un indicador para cuantificar sus emisiones debido a sus patrones de uso altamente variables.

El transporte marítimo es una industria con un potencial significativo de reducción de emisiones. La inversión en energía renovable y sectores marinos es esencial para abordar las preocupaciones ambientales relacionadas con el carbono [1], por lo que los objetivos de reducción de emisiones en el transporte marítimo son ambiciosos. Sin embargo, alcanzar este objetivo requiere superar un desafío significativo: la amplia variedad de tipos, tamaños y usos de embarcaciones exige políticas diferentes, pero con el mismo enfoque: la reducción de emisiones [2]. Dado que las estimaciones de emisiones de GEI deben calcularse sobre la base del consumo de combustible [3], el proceso fue estandarizado, estableciendo que todas las embarcaciones deben medir las emisiones de la misma manera y cuantificar los mismos gases de efecto invernadero, definidos en el Protocolo de Kioto.

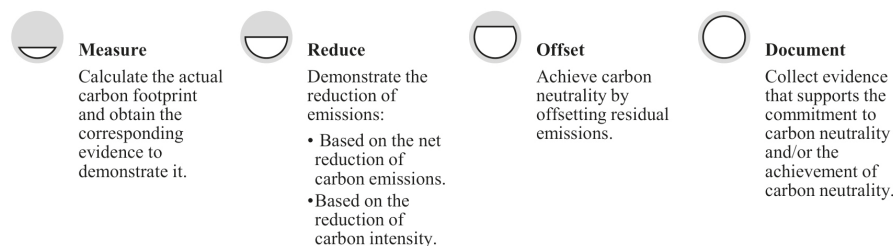
Desde una perspectiva integral de sostenibilidad, una empresa debe asegurar su viabilidad económica mientras minimiza su impacto ambiental. Las organizaciones deben adoptar estrategias para reducir las emisiones en el tiempo, con el objetivo de alcanzar la neutralidad de carbono, es decir, una huella de carbono neta igual a cero. Este proceso puede incluir una combinación de me-

didadas tales como cuantificación, reducción, compensación y verificación de emisiones. En este contexto, la especificación internacional desarrollada por el British Standards Institution para establecer un marco verificable que permita a organizaciones, productos, eventos o proyectos demostrar la neutralidad de carbono (PAS 2060), que se muestra en la Figura 1, surge como una especificación de neutralidad de carbono para la neutralidad climática corporativa [4], proporcionando un marco estandarizado que guía a las empresas en la implementación de estas acciones de manera demostrable y verificable, promoviendo la transparencia y la efectividad en el camino hacia la sostenibilidad [5].

Medir los gases de efecto invernadero es una tarea compleja. Durante las últimas dos décadas se han desarrollado varias metodologías para este propósito. Una de las más establecidas es el Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol), basado en el acuerdo del Protocolo de Kioto firmado en 1997. Esta es la metodología más utilizada para medir la huella de carbono de empresas y organizaciones. Para crear un inventario de emisiones, las fuentes de GEI deben identificarse y clasificarse en tres grupos distintos [6].

La Organización Marítima Internacional (IMO) establece dos enfoques principales para estimar gases contaminantes: uno basado en energía y otro basado en consumo de combustible. Cada método responde a necesidades diferentes y depende de factores como el tipo de gas que se desea estimar y los datos disponibles. En el método basado en energía, las emisiones se calculan con base en la energía generada en la embarcación. En contraste, el método basado en consumo de combustible se utiliza cuando se dispone de datos de consumo de combustible y se deben reportar emisiones [7].

Tanto el método basado en energía como el basado en consumo de combustible son reconocidos por la OIM para calcular emisiones. Sin embargo, el GHG Protocol difiere al referenciar solo uno de estos métodos: el enfoque basado en consumo de combustible, que es el más adoptado internacionalmente. La capacidad de este protocolo para estandarizar y universalizar las estimaciones de emisiones lo hace globalmente comparable entre empresas y sectores. Seguir el GHG Protocol asegura confiabilidad en los procedimientos de cuantificación de emisiones y facilita la integración de datos en reportes globales, como los requeridos por acuerdos internacionales de cambio climático. Además, proporciona principios,



*Figura 1. Etapas para alcanzar la neutralidad de carbono según PAS 2060.*

directrices y herramientas para cálculos y reportes uniformes de emisiones, asegurando estimaciones altamente precisas. De ahí que, el método basado en consumo de combustible fue seleccionado para la evaluación de remolcadores de este estudio sobre estas premisas. Este enfoque es particularmente adecuado para la industria marítima, especialmente de Valparaíso, ya que el consumo de combustible está directamente vinculado con la cantidad de gases contaminantes emitidos por las embarcaciones.

Este método permite evaluar la intensidad de carbono dentro de marcos internacionales, lo que es esencial para comprender las emisiones asociadas con las operaciones de remolcadores y permitir comparaciones bajo estándares establecidos. Los resultados obtenidos siguiendo este método pueden ser particularmente útiles para generar información que impulse estrategias destinadas a reducir la huella de carbono de este sector.

De acuerdo con el protocolo de GEI, existen tres categorías de emisiones, cada una definida por su alcance:

- Emisiones de Alcance 1: Son emisiones directas que una empresa genera al operar sus propios equipos y actividades. Pueden provenir del uso de maquinaria para producción, conducción de vehículos, calefacción de edificios o simplemente del uso de computadores.
- Emisiones de Alcance 2: Corresponden a emisiones indirectas resultantes de la producción de energía que una organización compra. El uso de paneles solares o la adquisición de energía renovable en lugar de electricidad generada a partir de combustibles fósiles reduciría las emisiones de Alcance 2 de una empresa.

- Emisiones de Alcance 3: También son emisiones indirectas, pero a diferencia del Alcance 2, incluyen aquellas generadas por los clientes al usar los productos de la empresa y por proveedores que fabrican los productos de la empresa.

En este sentido, comprender y cuantificar las emisiones en estos tres alcances permite a las empresas identificar las principales fuentes de sus GEI. Esto facilita una evaluación más precisa del impacto ambiental y es crucial para diseñar estrategias de mitigación efectivas.

En el caso del sector marítimo estas emisiones representan aproximadamente el 3% de las emisiones globales anualmente y enfrenta desafíos significativos en la transición hacia la sostenibilidad. Mientras que los esfuerzos regulatorios y la investigación se han centrado predominantemente en embarcaciones de mayor tamaño, como los portacontenedores, embarcaciones más pequeñas pero cruciales, incluidos los remolcadores portuarios, son parte integral de la cadena de valor marítima y cumplen un rol vital en la mitigación de impactos ambientales.

Una de las principales formas de establecer metas dentro de las empresas es mediante la implementación de indicadores clave de desempeño (KPI). La IMO ha desempeñado un papel clave al recomendar KPI para que las empresas los implementen. De ahí que, la variedad de KPI para medir la intensidad de carbono refleja la diversidad de características entre diferentes embarcaciones. En este contexto, los portacontenedores, con KPI de intensidad de carbono más desarrollados, han recibido la mayor atención.

Por otra parte, embarcaciones como los remolcadores portuarios no cuentan con un indicador estándar. Esto no significa que una empresa no pueda implementarlos y establecer metas para reducir emisiones, especialmente considerando que las regulaciones ambientales avanzan cada vez más en esta dirección.

Así como las grandes embarcaciones tienen restricciones asociadas con sus emisiones, los puertos también están siendo regulados, como es el caso del puerto de Valparaíso. Además, se ha demostrado que las regulaciones portuarias actuales son insuficientes para mitigar emisiones, lo que requiere mayores esfuerzos para reducirlas [8]. Por lo tanto, las empresas de remolcadores deben sumarse a estos esfuerzos para reducir emisiones en áreas portuarias. Dentro de un radio de 90 km desde la costa, las concentraciones de material particulado son elevadas y pueden atribuirse al tráfico marítimo [9], lo que se intensifica en ciudades portuarias.

En este contexto, la problemática adquiere especial relevancia para la Región de Valparaíso, debido a su condición de territorio marítimo-portuario y a la estrecha relación entre actividad portuaria, operación logística y entorno urbano costero. La cuantificación de emisiones provenientes de remolcadores permite aportar evidencia técnica para la gestión ambiental de operaciones portuarias, contribuyendo al lineamiento regional de Medio Ambiente y Cambio Climático.

### 1.1. Remolcadores

Un remolcador portuario está diseñado para asistir a grandes buques en sus maniobras, ya sea

remolcándolos o empujándolos, principalmente en puertos, pero también en mar abierto, ríos o canales. Su función principal en los puertos es guiar de manera segura las embarcaciones hacia su sitio de atraque para operaciones de carga y descarga, prevenir accidentes y colisiones con estructuras, tierra u otras embarcaciones, y asegurar la ejecución segura de maniobras de desatraque [10].

A pesar de su tamaño compacto, los remolcadores son notablemente potentes. Los remolcadores modernos operan con motores diésel que generan entre 1000 kW y 4000 kW [10]. Los remolcadores portuarios suelen tener un arqueo bruto (GT) inferior a 500, lo que los clasifica como embarcaciones pequeñas bajo la normativa marítima internacional. Esto a menudo los exime de ciertos requisitos administrativos, tales como metas obligatorias de reducción de gases de efecto invernadero. Sin embargo, empresas ambientalmente conscientes como SAAM Towage, una de las dos divisiones del Grupo SAAM, un conglomerado multinacional [11,12], están adoptando proactivamente medidas de sostenibilidad, incluida la renovación de flota y la planificación operacional, para reducir emisiones y minimizar su impacto ambiental.

Los remolcadores se caracterizan por su excepcional maniobrabilidad, lograda mediante la integración de dos motores que transmiten potencia por medio de un eje a hélices, ya sean convencionales o azimutales. Su diseño incluye sistemas de amortiguación del casco para absorber impactos al asistir a otras embarcaciones empujándolas. Además, el diseño del casco está concebido específicamente para evitar la elevación de la proa con winches durante operaciones de remolque,

asegurando mayor estabilidad. Sin embargo, esta ventaja estructural tiene como desventaja el aumento de la resistencia al arrastre causada por el agua, lo que puede afectar el consumo de combustible al desplazarse entre puntos.

Desde la perspectiva regional, los remolcadores forman parte de la infraestructura operacional que sostiene la movilidad, el transporte y la conectividad marítima. Su desempeño ambiental no solo incide en la eficiencia de una flota, sino también en la sustentabilidad del sistema portuario y en la relación entre puerto, ciudad y territorio. Por ello, contar con indicadores adecuados para medir su intensidad de carbono permite vincular la operación portuaria con metas de gestión ambiental y desarrollo sostenible.

## 1.2. Indicadores de intensidad de carbono en la industria marítima

La industria marítima está comprometida con la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la mejora de la eficiencia energética, con áreas clave como la gestión de operación de motores, la optimización operacional, la optimización de la gestión de flota y la optimización de operaciones de carga [13]. Sin embargo, no todas estas áreas aplican a todas las embarcaciones actualmente en operación. Para apoyar el logro de metas de reducción de emisiones, se han desarrollado varios indicadores para cuantificar la intensidad de carbono según las necesidades específicas de cada sector. Algunos de los indicadores más relevantes actualmente utilizados para medir la intensidad de carbono en el sector marítimo incluyen los siguientes:

- **Energy Efficiency Design Index (EEDI):** El EEDI es un estándar establecido por la Organización Marítima Internacional que mide la eficiencia energética de un buque según su capacidad de transporte de carga. El EEDI es obligatorio para buques nuevos y sirve como referencia para reducciones de emisiones, incentivando el diseño de embarcaciones más eficientes energéticamente [14].
- **Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI):** El EEXI aplica criterios similares al EEDI, pero para buques existentes en lugar de nuevos. Este índice asegura que los buques ya en operación cumplan con estándares de eficiencia energética. El EEXI ayuda a mejorar la eficiencia energética de la flota existente y reduce las emisiones de carbono [15].
- **Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI):** El EEOI mide la eficiencia energética operacional de una embarcación. Se calcula considerando el consumo de combustible y las emisiones correspondientes en relación con la carga transportada y la distancia recorrida. El EEOI permite a los operadores monitorear y mejorar la eficiencia energética de la embarcación durante sus operaciones [7].
- **Annual Efficiency Ratio (AER):** El AER mide la eficiencia energética operacional de una embarcación. Se utiliza para clasificar embarcaciones, incentivar mejoras de eficiencia energética y monitorear el progreso de la industria marítima en la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> [7].
- **Energy Efficiency Performance Indicator (EEPI):** Este indicador es muy similar al AER, pero solo considera la distancia recorrida mientras la embarcación está cargada [7].
- **Distance (DIST):** Se calcula con base en la distancia total recorrida por el buque durante un

año, considerando la cantidad de carga transportada [7].

- Cargo Distance (cDIST): Es una medida de intensidad de carbono donde la capacidad representa la capacidad de transporte de un buque en lugar de su tonelaje de peso muerto, como unidades equivalentes a veinte pies (TEU) para portacontenedores, metros cúbicos para gaseros licuados y arqueo bruto para cruceros y vehículos de transporte. El AER y el cDIST son versiones simplificadas del EEOI, en las que la capacidad del buque reemplaza la carga o pasajeros reales a bordo [7].
- Time: Este método mide las emisiones de carbono con base en el tiempo total de operación de la embarcación. Es particularmente útil para operaciones donde el tiempo en servicio es crítico [16].
- Energy consumption: Este indicador mide las emisiones de carbono de una embarcación pequeña en relación con su potencia total instalada y horas de operación [16].

Cada uno de estos indicadores tiene una ecuación asociada con variables bien definidas. Sin embargo, es importante señalar que los datos de entrada de estos indicadores no son parámetros que se apliquen universalmente a los remolcadores.

Por lo tanto, solo algunos de estos indicadores pueden ser analizados con base en una flota de remolcadores.

Por otra parte, no existen regulaciones de intensidad de carbono de la OIM aplicables a remolcadores. Sin embargo, tales regulaciones sí existen para portacontenedores, donde combustibles como el marine diesel oil (MDO) plantean desafíos para cumplir con estos estándares hacia 2050, salvo que se implementen restricciones de potencia de motor [17]. Identificar el indicador apropiado para este sector portuario permitiría establecer políticas para restringir las emisiones producidas por estas embarcaciones.

Este trabajo explora y compara indicadores de intensidad de carbono (CII) aplicables a remolcadores, evaluándolos en una flota real con características variables. Se obtienen resultados para cada uno de los remolcadores en estos indicadores, y se realiza un análisis para determinar cuál es el indicador más preciso para gestionar y evaluar una flota de remolcadores. Esto se alinea con los objetivos de sostenibilidad de SAAM Towage y su compromiso de contribuir a la mitigación de gases de efecto invernadero globales y reducir el impacto de estas operaciones en el cambio climático.

## 2. Metodología

La metodología de este estudio se basa en el GHG Protocol, un marco internacionalmente reconocido que proporciona directrices estandarizadas para la estimación y reporte de emisiones de gases de efecto invernadero. Para alcanzar el propósito de este estudio, que es analizar la intensidad de carbono de una flota de remolcadores portuarios, se evaluarán cuatro indicadores para medir la cantidad de GEI emitidos por unidad de actividad. Este análisis comparativo buscó identificar qué indicadores representaron mejor el impacto ambiental de los remolcadores.

Para cumplir este objetivo, se integraron datos operacionales y técnicos de la flota de remolcadores de SAAM Towage. La selección de esta flota responde no solo a su relevancia continental, sino también a la disponibilidad de información técnica obtenida mediante los programas de práctica y vinculación de la empresa.

El análisis se centrará en las operaciones durante el año 2023, lo que proporciona un marco temporal suficiente para evaluar las actividades de la flota. Después de la recolección de datos y la estimación de emisiones, se realizará un análisis comparativo entre los diferentes indicadores, evaluando la media aritmética, la desviación estándar, la mediana, el coeficiente de variación y el rango de cada indicador de intensidad de carbono. Posteriormente, se seleccionará una métrica para relacionar estos indicadores, permitiendo un breve análisis de los resultados obtenidos respecto de las operaciones en las que participan este tipo de embarcaciones. Este análisis evaluará el número de emisiones por

unidad de actividad en la flota, así como la variabilidad y consistencia de los datos.

La flota de SAAM Towage está compuesta por más de 200 remolcadores distribuidos en 13 países de las Américas, de los cuales se analizaron 192 remolcadores debido a la disponibilidad de datos. Este tamaño de muestra ofrece suficiente representatividad para este tipo de análisis. Los datos operacionales permiten aplicar las ecuaciones correspondientes a cada indicador, generando un conjunto de resultados de intensidad de carbono basado en las actividades de cada remolcador.

La utilización de datos operacionales reales permite que la metodología sea pertinente para contextos portuarios como el de Valparaíso, donde las maniobras de asistencia, los tiempos de operación, la distancia recorrida, el consumo de combustible y la potencia instalada son variables relevantes para caracterizar el desempeño ambiental de remolcadores. De esta manera, la tesis entrega un enfoque aplicable a la gestión de emisiones en operaciones marítimo-portuarias regionales.

## 2.1. Recolección de datos

Los datos técnicos y operacionales reales fueron recolectados desde las bases de datos de la empresa con el objetivo de estimar emisiones y calcular la intensidad de carbono. Entre los datos se encuentran la distancia anual recorrida por cada remolcador, el consumo de combustible, el tiempo de operación, la potencia nominal de ambos motores de propulsión y la carga promedio demandada de los motores de propulsión durante las operaciones. Estos datos se recopilan continuamente durante 12 meses para reflejar la variabilidad de las operaciones portuarias y ase-

gurar que el análisis incluya todas las condiciones operacionales que ocurren durante el año.

La flota fue clasificada en cuatro grupos con base en la distancia promedio de navegación desde su puerto base hasta el área donde realiza maniobras de asistencia a buques. Este enfoque permitió una segmentación apropiada de las embarcaciones de acuerdo con la distancia recorrida durante sus operaciones. El Grupo 1 incluyó remolcadores que navegan de 0 a 5,6 km; el Grupo 2 incluyó aquellos que recorren de 5,6 a 18,5 km; el Grupo 3 incluyó remolcadores que operan a más de 18,5 km; y el Grupo 4 correspondió a remolcadores dedicados a operaciones offshore.

Posteriormente, la información se recopiló utilizando la plataforma Remote Fleet Vision (RFV), un sistema en línea de Caterpillar (CAT) que permite monitoreo del desempeño del motor en tiempo real. La información recopilada incluyó datos sobre la carga promedio demandada del motor y las revoluciones por minuto (rpm) de los remolcadores equipados con motores Caterpillar integrados a la plataforma CAT RFV, que transmite eficientemente los datos recopilados.

De los 192 remolcadores portuarios analizados, 76 cumplen con estas características. Esta plataforma, que recopila datos históricos del motor, mostró que los remolcadores del Grupo 1 (0 a 5,6 nm) tuvieron una carga promedio de 22,42% y 793 rpm. En el Grupo 2 (5,6 a 18,8 nm), los remolcadores demostraron una carga promedio de 21,18% y 783 rpm. Los remolcadores del Grupo 3 (>18,5 km) mostraron un aumento en la carga promedio, alcanzando 23,87% y 885 rpm. Finalmente, en el Grupo 4 (offshore), los remolcadores operaron con una carga promedio de 21% y

678 rpm. Es importante señalar que los dos motores de propulsión instalados en cada remolcador tienen características prácticamente idénticas. Debido a que sus diferencias son mínimas, se ha supuesto que su comportamiento es equivalente. La Tabla 1 presenta un resumen de estos datos.

**Tabla 1. Porcentaje de carga y RPM para cada grupo.**

|                                       | Grupo 1 | Grupo 2    | Grupo 3     | Grupo 4  |
|---------------------------------------|---------|------------|-------------|----------|
| Distancia promedio de navegación [km] | 0 a 5,6 | 5,6 a 18,5 | Más de 18,5 | Offshore |
| Carga porcentual                      | 22,42%  | 21,18%     | 23,87%      | 21%      |
| RPM                                   | 793     | 783        | 885         | 678      |

Para mantener el estándar de calidad más alto posible, la información recopilada fue revisada utilizando herramientas de software de mantenimiento de SAAM Towage. Esto asegura precisión entre el estudio y las operaciones reales realizadas durante el año.

## 2.2. Cálculo de emisiones

El cálculo de emisiones de GEI basado en el consumo de combustible se realiza utilizando una ecuación reconocida por la industria, siguiendo las directrices de la OIM y el GHG Protocol. A partir de esto se determinan las emisiones para cada uno de los tres gases de interés: CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub>, utilizando factores de emisión disponibles de diversas fuentes, como la IMO y el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). Los factores de emisión para GEI dependen tanto del gas que se desea estimar como del tipo de combustible uti-

lizado por el motor, ya que distintos combustibles tienen composiciones químicas variables y producen proporciones y cantidades distintas de GEI.

El consumo de combustible es un valor obtenido de las operaciones diarias de los remolcadores. Este parámetro puede medirse utilizando dispositivos de monitoreo en tiempo real, como sensores de flujo de combustible, estimarse con base en los reportes operacionales de la flota o medirse mediante sondajes manuales, como en el caso de SAAM. Este parámetro es altamente relevante, ya que está directamente vinculado con la actividad y operación del remolcador. Sin mediciones precisas, se pueden utilizar métodos de estimación basados en datos históricos o consumo promedio por tipo de operación.

## 2.3. Cálculo de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e)

Las emisiones de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub>, fueron calculadas, sin embargo, estos gases no contribuyen de igual manera al calentamiento global. Para evaluar el impacto relativo de las emisiones de GEI de forma estandarizada y facilitar la comparación de resultados, se utiliza el concepto de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e). El CO<sub>2</sub>e es una medida que convierte las emisiones de diversos GEI en una cantidad equivalente de dióxido de carbono, considerando su potencial de calentamiento global (GWP) en un horizonte temporal de 100 años.

El GWP es un factor que mide la capacidad relativa de cada gas para atrapar calor en la atmósfera en comparación con el CO<sub>2</sub>. Este concepto es fundamental para comprender el impacto de gases

como  $\text{N}_2\text{O}$  y  $\text{CH}_4$ , que, aunque se emiten en cantidades menores que el  $\text{CO}_2$ , tienen un impacto climático mucho mayor. Por ejemplo, el  $\text{N}_2\text{O}$  tiene un GWP de 273, lo que significa que una tonelada de  $\text{N}_2\text{O}$  emitida a la atmósfera tiene el mismo impacto en el calentamiento global que 273 toneladas de  $\text{CO}_2$ . De manera similar, el  $\text{CH}_4$  tiene un GWP de 29,8 [18], lo que indica que su impacto es casi 30 veces mayor que el  $\text{CO}_2$  en una escala de 100 años. El  $\text{CO}_2$ , por definición, tiene un GWP de 1.

Estos valores permiten traducir emisiones de diferentes gases a términos de  $\text{CO}_2\text{e}$ , proporcionando una herramienta estandarizada para comparar emisiones y su impacto ambiental. Dichos valores del factor de emisión (EF) son clave para determinar las emisiones generadas por remolcadores y dependen principalmente del tipo de gas de efecto invernadero que se desea estimar y del combustible utilizado, como MDO en esta flota. Cada gas,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  o  $\text{CH}_4$ , tiene un factor de emisión específico: 2,68 kg/L,  $1,5 \times 10^{-4}$  kg/L y  $4,2 \times 10^{-5}$  kg/L, respectivamente [6].

## 2.4. Cálculo de indicadores de intensidad de carbono

Los remolcadores tienen características únicas en comparación con otras embarcaciones, ya que están diseñados para operaciones altamente específicas, como remolcar y empujar grandes buques en áreas portuarias. Estas maniobras requieren energía y potencia significativas, lo que impacta directamente el consumo de combustible y, en consecuencia, las emisiones. Además, la demanda de potencia en los remolcadores es altamente variable, ya que puede cambiar desde baja potencia, a veces incluso en ralentí, hasta picos de potencia

máxima en intervalos cortos durante maniobras de asistencia a buques mercantes. Esta variabilidad es particularmente relevante porque influye en la eficiencia energética y en las fluctuaciones de emisiones durante el ciclo operativo debido al aumento del consumo de combustible en estos momentos. Debido a estas particularidades, muchos indicadores de intensidad de carbono aplicables a otras industrias o tipos de embarcaciones no se ajustan adecuadamente a las características operacionales de los remolcadores.

Este estudio seleccionó cuatro indicadores de intensidad de carbono que presentan características potencialmente aplicables a remolcadores portuarios, mostrados en la Tabla 2. Determinar un indicador de intensidad de carbono para cuantificar el impacto ambiental de los remolcadores permitiría evaluar la eficiencia ambiental de la flota desde diferentes perspectivas métricas, considerando variables como la distancia recorrida, el tiempo de operación, el consumo de energía y la relación entre la demanda de potencia y la potencia nominal del motor durante las operaciones.

**Tabla 2. Indicadores de intensidad de carbono con potencial aplicabilidad a remolcadores.**

| Indicador          | Descripción                                                                                                                             |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Distancia          | Mide las emisiones de GEI relativas a la distancia recorrida [7].                                                                       |
| Tiempo             | Relaciona las emisiones de GEI con el tiempo total de operación [7].                                                                    |
| Energía            | Cuantifica las emisiones con base en la capacidad de potencia nominal de los motores de propulsión y el tiempo total de operación [16]. |
| Demanda de energía | Mide las emisiones con base en la demanda promedio de energía durante las operaciones.                                                  |

Los cuatro indicadores de intensidad de carbono analizados en este estudio tienen características que los hacen particularmente adecuados para evaluar la eficiencia y el impacto ambiental de los remolcadores, dada la naturaleza específica de sus operaciones. Este análisis también evaluará las ventajas y limitaciones de cada indicador.

## 2.5. Análisis estadístico

Para evaluar los resultados de cada indicador de intensidad de carbono para los remolcadores, se realizó un análisis estadístico para todos los cálculos y objetos visuales, permitiendo observar patrones y diferencias en los resultados de la flota. Este análisis incluye la representación esquemática de datos mediante diagramas de dispersión para cada indicador, facilitando la visualización de la variabilidad entre remolcadores y la identificación de valores atípicos o tendencias en los valores calculados.

Los datos de intensidad de carbono calculados para cada remolcador se mostrarán en los diagramas de dispersión para cada indicador de intensidad de carbono (CII). A partir de estos resultados, se aplicaron medidas de tendencia central y dispersión para evaluar los datos objetivamente, tales como, media aritmética, mediana, desviación estándar, coeficiente de variación y rango. Estas medidas estadísticas fueron seleccionadas para asegurar una comprensión objetiva de los datos obtenidos. Este análisis cuantitativo permite evaluar el desempeño de los remolcadores en términos de emisiones y proporcionará un marco analítico válido.

## 2.6. Análisis comparativo

Para comparar los indicadores de intensidad de carbono, se seleccionaron y aplicaron medidas estadísticas con el fin de identificar cuál proporción la mayor representatividad y consistencia en el contexto operacional de los remolcadores. Además, se utilizaron métodos gráficos para visualizar la dispersión y variabilidad de los datos para cada indicador.

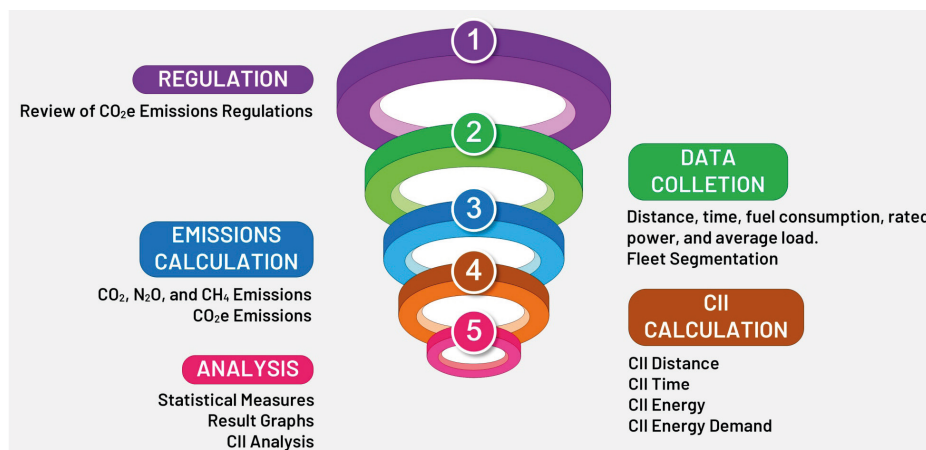
Para cada indicador, se calcularon la media aritmética y la mediana. Esta doble medida de tendencia central permite comparar el comportamiento de los datos y evaluar el impacto de posibles valores atípicos, altos o bajos. La mediana es especialmente útil en casos en que los valores atípicos presentan valores alejados de la tendencia, ya que es menos sensible a valores extremos, proporcionando así una visión más representativa y realista de las emisiones de la flota estudiada. La desviación estándar y el coeficiente de variación se utilizaron para analizar la dispersión de los datos de cada indicador. Estos valores permiten evaluar la estabilidad y variabilidad del indicador. Un indicador con menor desviación estándar y coeficiente de variación demuestra menor variabilidad en la intensidad de carbono, lo que puede ser favorable al buscar una métrica consistente y confiable para su aplicación.

El rango de cada indicador permite evaluar el intervalo completo de valores, desde el mínimo hasta el máximo registrado. Esta medida permite observar la variación dentro de los datos y analizar su comportamiento junto con la desviación estándar y el coeficiente de variación para determinar si el indicador es representativo.

Finalmente, los resultados de cada indicador se evaluaron considerando su aplicabilidad a las operaciones específicas de los remolcadores y su capacidad para reflejar con precisión las condiciones y demandas asociadas con las maniobras que realizan. Al evaluar la representatividad de cada indicador respecto de las actividades portuarias y el desempeño operacional de la flota, el objetivo fue determinar cuál es más efectivo para gestionar la intensidad de carbono y tomar decisiones relativas a la reducción de emisiones. Este enfoque integrado permite comparar los indicadores no solo desde una perspectiva estadística,

sino también en términos de su valor práctico y relevancia para alcanzar objetivos de sostenibilidad dentro de las operaciones de remolcadores. Un diagrama de la metodología utilizada se muestra en la Figura 2.

El diagrama presentado resume gráficamente la metodología empleada en el estudio, estructurada en cinco etapas: regulación, recolección de datos, cálculo de emisiones, cálculo el CII y análisis. Este enfoque jerárquico facilita la comprensión del proceso metodológico, asegurando un flujo sistemático durante el desarrollo del estudio.



**Figura 2.** Diagrama de la metodología utilizada.

### 3. Desarrollo

La evaluación de los diferentes CII revela variaciones significativas entre las métricas. Los resultados obtenidos para cada uno de los indicadores de intensidad de carbono, complementados por las relaciones entre ellos, permiten un análisis comparativo claro de los patrones de emisión de la flota.

La Tabla 3 presenta un detalle de los resultados estadísticos obtenidos para cada CII evaluado, proporcionando una base cuantitativa para comparar la eficiencia ambiental entre los diferentes indicadores. Estos resultados reflejan el comportamiento general de la flota de remolcadores analizada.

Tabla 3. Métricas estadísticas para cada CII analizado.

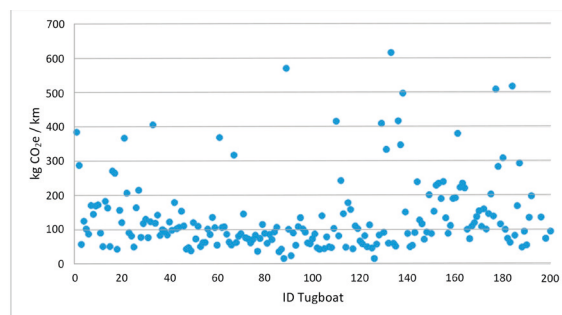
| Métrica                   | CII Distancia<br>[kgCO <sub>2</sub> e/km] | CII Tiempo<br>[kgCO <sub>2</sub> e/h] | CII Energía<br>[gCO <sub>2</sub> e/kWh] | CII Demanda<br>de Energía<br>[gCO <sub>2</sub> e/kWh] |
|---------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Media aritmética          | 138                                       | 468                                   | 134                                     | 596                                                   |
| Mediana                   | 102                                       | 481                                   | 129                                     | 586                                                   |
| Desviación estándar       | 108                                       | 119                                   | 35                                      | 158                                                   |
| Rango                     | 601                                       | 861                                   | 260                                     | 1086                                                  |
| Coefficiente de variación | 79%                                       | 26%                                   | 26%                                     | 27%                                                   |

Si bien los datos estadísticos de la Tabla 3 proporcionan información importante, la representación gráfica individual de cada indicador permite observar

patrones y tendencias, complementando los resultados estadísticos y ofreciendo una visión más completa del análisis para cada remolcador, donde ID Tugboat representa el identificador de cada remolcador, ya que mencionar el nombre de cada embarcación en esta sección no es necesario y ayuda a resguardar los datos confidenciales de la empresa utilizados en este estudio.

El análisis de CII Distancia revela una media aritmética de 138 kgCO<sub>2</sub>e/km, mientras que la mediana es menor, con 102 kgCO<sub>2</sub>e/km. Esta diferencia significativa entre la media y la mediana indica una distribución sesgada, donde menos de la mitad de los valores muestran emisiones altas, creando un sesgo que eleva la media aritmética. La desviación estándar de 108 kgCO<sub>2</sub>e/km y el coeficiente de variación de 79% enfatizan aún más la variabilidad sustancial y la falta de homogeneidad en los datos de emisiones por distancia. Además, el rango de 601 kgCO<sub>2</sub>e/km sugiere diferencias desproporcionadamente grandes en los niveles de intensidad de carbono.

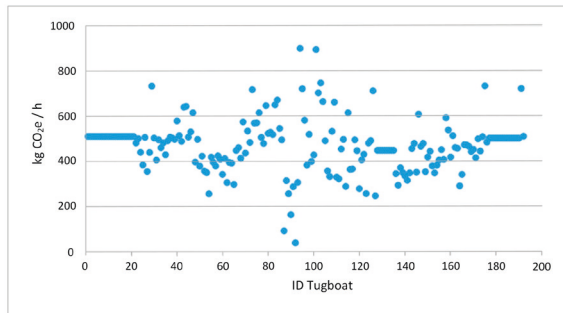
Para una flota diversa, se espera un coeficiente de variación superior a 30%, alineado con la heterogeneidad inherente de la flota de SAAM Towage. Sin embargo, al analizar las medidas estadísticas y el gráfico generado, se destaca la alta sensibilidad del indicador a los datos de entrada, lo que conduce a variaciones significativas. Aunque solo una pequeña proporción de remolcadores supera los 200 kgCO<sub>2</sub>e/km, la mayoría de los valores se agrupa alrededor de 100 kgCO<sub>2</sub>e/km, demostrando una tendencia general hacia niveles más bajos de intensidad de carbono dentro de la flota. Además, en ciertos remolcadores, la mediana y la media aritmética no logran servir como medidas representativas.



*Figura 3. Diagrama de dispersión del CII Distancia.*

La Figura 3 muestra las emisiones de CO<sub>2</sub>e por kilómetro para cada remolcador. Se observa que la mayoría de los valores se concentra en rangos bajos, particularmente por debajo de 200 kgCO<sub>2</sub>e/km, mientras que algunos puntos dispersos alcanzan valores significativamente más altos, incluso superando 600 kgCO<sub>2</sub>e/km. Sin embargo, la Figura 4 presenta un histograma que agrupa los datos de intensidad de emisiones en intervalos y se acompaña de un polígono de frecuencia que traza la tendencia general. La mayoría de los remolcadores tiene emisiones en el rango de 71 a 140 kgCO<sub>2</sub>e/km. A medida que los valores avanzan hacia rangos más altos, la frecuencia de remolcadores cae drásticamente. El polígono de frecuencia no forma una curva perfectamente simétrica, lo que indica una distribución sesgada con una mayor concentración de valores en los rangos inferiores.

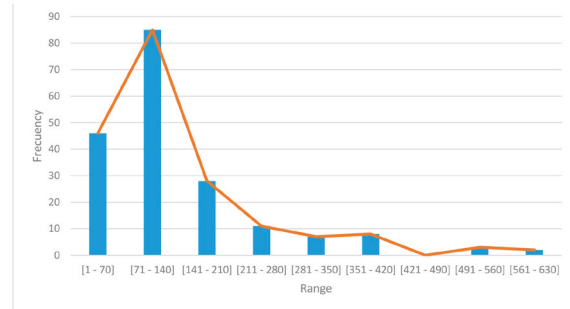
Para CII Tiempo, se obtuvo una media aritmética de 468 kgCO<sub>2</sub>e/h y una mediana de 481 kgCO<sub>2</sub>e/h, lo que sugiere una distribución relativamente simétrica. Sin embargo, la desviación estándar de 119 y el coeficiente de variación de 26% indican que aún existe variabilidad significativa en las emisiones horarias. Además, una variabilidad



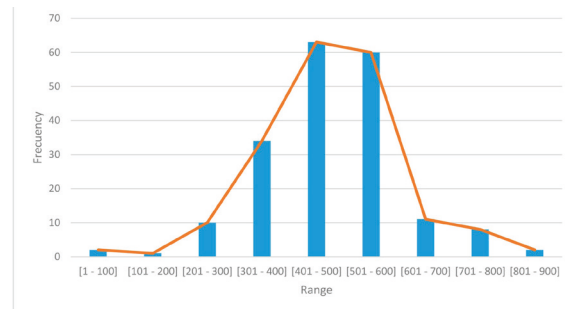
**Figura 4.** Histograma y polígono de frecuencia del CII Distancia.

inferior a 30% se considera aceptable para este estudio. El rango para CII Tiempo es de 861 kg-CO<sub>2</sub>e/h, reflejando un amplio rango de valores en la flota, lo que significa que algunos remolcadores pueden emitir significativamente más gases de efecto invernadero por hora de operación que otros.

Por otro lado, la Figura 5 presenta el diagrama de dispersión de resultados, donde se puede observar una distribución más simétrica, con valores tanto por encima como por debajo del rango que contiene la mayor parte de los datos. Mientras tanto, la Figura 6 muestra una distribución de datos con forma de campana, indicando una clara tendencia hacia valores centrales de emisión, principalmente entre 400 y 600 kgCO<sub>2</sub>e/h. A medida que los valores se alejan de este rango, la probabilidad de encontrar un remolcador con tales intensidades de emisión disminuye significativamente, reflejando la concentración predominante de datos alrededor del valor central. La mayoría de los remolcadores se agrupa dentro del rango de 400 a 600 kgCO<sub>2</sub>e/h, demostrando una concentración significativa de resultados en este intervalo.



**Figura 5.** Diagrama de dispersión del CII Tiempo.



**Figura 6.** Histograma y polígono de frecuencia del CII Tiempo.

Es esencial destacar que la Figura 5 revela un grupo de remolcadores formando una línea constante. Esto ocurre porque tres países almacenaron datos de consumo de combustible y horas operacionales a nivel nacional en lugar de individualmente para cada remolcador. Para este análisis, estos valores fueron distribuidos uniformemente entre los remolcadores que componen la flota en cada país respectivo. Como resultado, no se observa dispersión de datos para estos países.

A pesar de esto, las diferencias entre países son mínimas, lo que sugiere una relación consistente

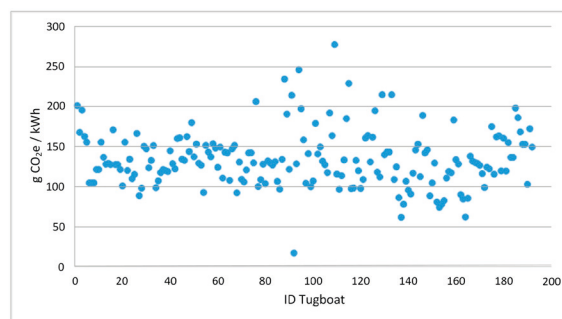
entre horas operacionales y consumo de combustible. Esto refleja una distribución razonable de emisiones basada en las actividades realizadas en cada país.

Para CII Energía, la media aritmética fue de 134 gCO<sub>2</sub>e/kWh y la mediana fue de 129 gCO<sub>2</sub>e/kWh. La desviación estándar fue de 35 y el coeficiente de variación fue de 26%. El rango para este indicador alcanzó 260 gCO<sub>2</sub>e/kWh. Si bien se incorpora una variable adicional en este indicador en comparación con el anterior, se observaron tanto similitudes como diferencias. Una similitud notable es que el coeficiente de variación se mantiene constante y la relación entre el rango y la media aritmética permanece cercana a 2:1, indicando que los valores extremos tienden a distribuirse proporcionalmente respecto de la media en ambos indicadores.

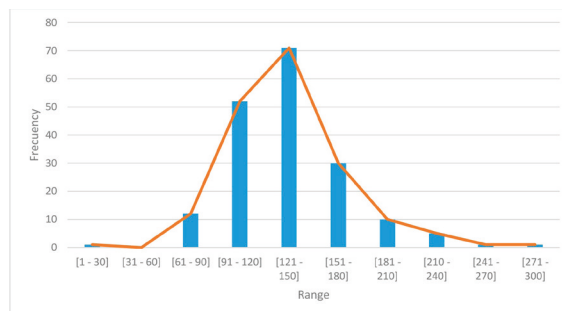
Sin embargo, a diferencia de CII Tiempo, los remolcadores que anteriormente exhibían valores homogéneos muestran dispersión en los resultados. Este resultado se debe al cálculo de este indicador de intensidad de carbono, que incluye la potencia de propulsión instalada, un factor diferenciador entre remolcadores. Incorporar esta variable refleja las características específicas de cada embarcación, destacando cómo las diferencias de capacidad de propulsión influyen en la intensidad de carbono.

En la Figura 7, la distribución cambió notablemente para los remolcadores que previamente habían reportado valores idénticos en CII Tiempo, dispersándose ahora a través del gráfico. Esto era esperado, ya que cada remolcador es distinto y la ecuación asociada con este indicador considera la potencia de cada embarcación.

La distribución de resultados se presenta en la Figura 8, donde el polígono de frecuencia muestra una tendencia con forma de campana, similar al caso anterior. Esta forma refleja la variabilidad esperada para un indicador de esta naturaleza, con una distribución simétrica de la dispersión de resultados. Esto se evidencia tanto en la Figura 8 como en los resultados de la Tabla 3, específicamente en la proximidad entre los valores de mediana y media aritmética.



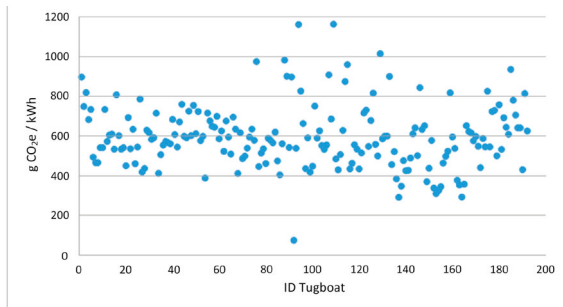
*Figura 7. Diagrama de dispersión del CII Energía.*



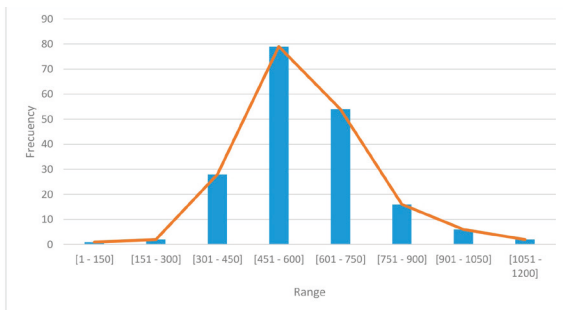
*Figura 8. Histograma y polígono de frecuencia del CII Energía.*

El CII Demanda de Energía tiene una media aritmética de 596 gCO<sub>2</sub>e/kWh y una mediana de 586 gCO<sub>2</sub>e/kWh. La desviación estándar de 158 y un coeficiente de variación de 27% indican una variabilidad aceptable, con un rango de 1086 gCO<sub>2</sub>e/kWh. El comportamiento de este CII es gráficamente muy similar al de CII Energía. Esto puede

observarse en la dispersión de valores mostrada en la Figura 9, donde la principal diferencia se encuentra en la escala del eje vertical, junto con el histograma y el polígono de frecuencia de la Figura 10. Sin embargo, la distribución presenta características específicas que requieren un análisis más detallado, ya que el comportamiento de los resultados individuales no fue el esperado.



**Figura 9.** Diagrama de dispersión del CII Demanda de Energía.



**Figura 10.** Histograma y polígono de frecuencia del CII Demanda de Energía.

Al comparar remolcador por remolcador los resultados de CII Demanda de Energía con los de CII Energía, surge el siguiente comportamiento: un remolcador con una mayor carga promedio tendrá un resultado menor en CII Demanda de Energía, y viceversa. Este comportamiento puede no ser completamente claro, ya que los remolcadores portuarios tienden a operar la mayor parte del

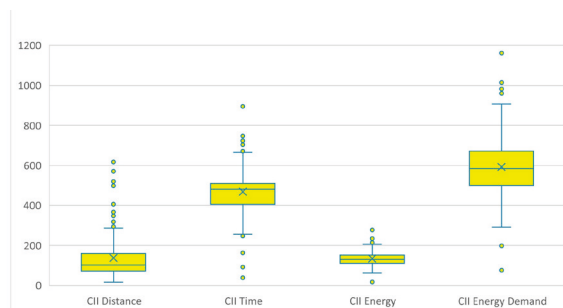
tiempo con bajas demandas de carga, con incrementos significativos de demanda solo durante periodos breves, típicamente en maniobras que requieren mayor potencia, como la asistencia a grandes buques.

Operar a bajas cargas genera variaciones mínimas en los gráficos, lo que no es inmediatamente evidente debido a cómo esta variable es considerada en la ecuación correspondiente. La media aritmética y la mediana de este indicador muestran valores cercanos, sugiriendo que la distribución de datos mantiene cierta simetría central. Sin embargo, la variabilidad es significativamente mayor, como lo demuestra la relación aproximada de 5:1 entre el rango y la media aritmética. Esta relación indica que los valores extremos superan significativamente el promedio, reflejando una alta dispersión de datos, lo que también es evidente en el notable aumento de la desviación estándar.

En este contexto, sería interesante considerar incluir la carga promedio demandada por los motores durante las operaciones como una variable adicional. Sin embargo, esto requeriría una evaluación mediante una ecuación diferente capaz de reflejar con mayor precisión el desempeño ambiental de los remolcadores.

De ahí que, la Figura 11 permite una comparación simultánea de los cuatro indicadores, aunque es esencial señalar que no comparten las mismas unidades de medida. En esta representación, CII Distancia muestra únicamente valores atípicos superiores, con una discrepancia notable entre la mediana y la media aritmética y cuartiles asimétricos. Por otra parte, CII Tiempo muestra una mejora en la distribución, reflejada en los bigotes

y en la presencia de valores atípicos inferiores y superiores; sin embargo, la distribución de los cuartiles sigue siendo asimétrica.



*Figura 11. Diagrama de caja de cada CII.*

Después de revisar la información presentada, el diagrama de caja proporciona una representación adicional, clara y visual para identificar el mejor indicador. El indicador ideal es aquel con pocos valores atípicos y donde la mediana se encuentra lo más cerca posible de la media aritmética.

Respecto de CII Energía, existe una mayor concentración de resultados dentro de un rango más estrecho y una reducción significativa de valores atípicos. Además, la mediana y la media aritmética son valores cercanos, y la distribución de cuartiles puede considerarse simétrica. Finalmente, CII Demanda de Energía también presenta una distribución simétrica de cuartiles y valores similares entre la mediana y la media aritmética; sin embargo, exhibe mayor dispersión y un número más alto de valores atípicos que CII Energía.

En el contexto de CII Distancia, es crucial considerar que los remolcadores no están diseñados para navegación de larga distancia o navegación libre, ya que su propósito principal es asistir a otras em-

barcaciones en puertos o situaciones específicas. Esto sugiere que la eficiencia en navegación de larga distancia no es una característica inherente de su diseño; por lo tanto, una métrica medida bajo este parámetro no sería apropiada.

Respecto de los resultados del coeficiente de variación, los valores más bajos, y por lo tanto los mejores, corresponden a CII Tiempo, CII Energía y CII Demanda de Energía. Sin embargo, el comportamiento gráfico en estos tres indicadores muestra diferencias notables. Es importante enfatizar que estos son los únicos indicadores que alcanzan valores aceptables según esta medida estadística, considerando aceptable una variación de 30% debido a las características diferenciadoras de los remolcadores de la flota.

Por otra parte, CII Energía y CII Demanda de Energía incorporan aspectos únicos de cada remolcador. En general, un remolcador con mayor potencia instalada para propulsión tiende a tener mayor Bollard Pull, lo que lo convierte en una opción más versátil para asistir una mayor variedad de embarcaciones, especialmente aquellas grandes o de alta masa. Este punto es particularmente relevante al considerar que SAAM Towage busca posicionar estratégicamente sus remolcadores de acuerdo con las necesidades específicas de cada puerto.

Estos resultados permiten evaluar, visualizar y analizar la aplicabilidad de estos cuatro indicadores de intensidad de carbono en una flota de remolcadores, proporcionando herramientas cuantitativas para examinar su variabilidad y tendencias de medida central. Desde una perspectiva de tendencia, este enfoque evalúa objetivamente cuán representativa puede ser la medida

central, ya sea mediana o media aritmética, para una empresa que busca evaluar la intensidad de carbono de su flota de remolcadores. Esto facilita la planificación para la integración de nuevos remolcadores o la implementación de tecnologías y combustibles con menor impacto ambiental.

Desde una lectura regional, estos resultados entregan una herramienta para apoyar decisiones en

el sistema marítimo-portuario de Valparaíso. La identificación de un indicador más representativo permite orientar el monitoreo de emisiones, comparar desempeños entre embarcaciones y priorizar medidas de eficiencia energética. Esto aporta al desarrollo económico ambientalmente sostenible, ya que permite mantener la continuidad de la operación portuaria incorporando criterios de reducción de emisiones y gestión ambiental.

## 4. Conclusiones

El análisis comparativo permitió establecer que el CII Distancia no resulta particularmente adecuado para evaluar la intensidad de carbono de una flota de remolcadores, debido a que estas embarcaciones no están diseñadas para navegación de larga distancia, sino para operaciones específicas en áreas portuarias. Asimismo, el CII Demanda de Energía presentó limitaciones, ya que su alta dispersión y sensibilidad frente a variaciones en la carga promedio pueden dificultar la representación efectiva del desempeño ambiental de algunos remolcadores. Por su parte, el CII Tiempo surge como un indicador útil, dado que considera el tiempo de operación de los motores y su relación directa con el consumo de combustible y las emisiones; sin embargo, no incorpora diferencias relevantes entre embarcaciones, como su capacidad o potencia instalada.

El CII Energía se identifica como el indicador más representativo para la evaluación de remolcadores portuarios, ya que relaciona las emisiones con la energía requerida para operar la embarcación e incorpora una variable específica de cada remolcador: su potencia instalada. Esto permite un análisis más ajustado a las características operacionales de la flota. Además, este indicador presentó una desviación estándar relativa adecuada, un coeficiente de variación de 26% y una cercanía entre la mediana y la media aritmética, lo que refuerza su validez como medida representativa del desempeño ambiental. Por ello, el CII Energía constituye una herramienta pertinente para el monitoreo continuo, la planificación estratégica de flota y el desarrollo de políticas de control ambiental orientadas a la reducción de emisiones.

En términos de aporte regional, la tesis contribuye a la Región de Valparaíso al entregar una herramienta aplicable a la gestión ambiental del sistema marítimo-portuario, sector clave para la movilidad, el transporte, la conectividad y el desarrollo económico del territorio. El trabajo contribuye indirectamente a la habitabilidad de ciudades portuarias al generar información útil

para reducir impactos ambientales asociados al tráfico marítimo. Aunque el estudio se limita a remolcadores de una sola empresa, la diversidad de la flota analizada fortalece los resultados; futuras investigaciones podrían ampliar el análisis a otras empresas o incorporar mediciones directas de emisiones en los sistemas de gases de escape.

## 5. Referencias bibliográficas

1. Waheed, R. The Significance of Energy Factors, Green Economic Indicators, Blue Economic Aspects towards Carbon Intensity: A Study of Saudi Vision 2030. *Sustainability* 2022, 14, 6893.
2. European Commission; Joint Research Centre; Institute for Environment and Sustainability. Analytical Framework to Regulate Air Emissions from Maritime Transport; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2010. Available online: <https://data.europa.eu/doi/10.2788/78254> (accessed on 28 August 2024).
3. ISO 14064-2:2019; Part 2: Specification with Guidance at the Project Level for Quantification, Monitoring and Reporting of Greenhouse Gas Emission Reductions or Removal Enhancements. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2019. Available online: <https://www.iso.org/standard/66454.html> (accessed on 28 August 2024).
4. Certificación Neutra de Carbono, TÜV SÜD. Available online: <https://www.tuvsud.com/es-es/servicios/sostenibilidad/soluciones-sostenibilidad-buen-gobierno/sostenibilidad-ambiental/certificacion-neutra-carbono> (accessed on 2 February 2025).
5. NQA. NQA PAS 2060 Implementation Guide Specification for the Demonstration of Carbon Neutrality Implementation Guide 2014. Available online: <https://www.nqa.com/getmedia/b4c2bb85-f725-4ed3-9045-be61aac4428f/NQA-PAS-2060-Implementation-Guide.pdf> (accessed on 17 November 2024).
6. ¿Cuál es la Diferencia Entre las Emisiones de Alcance 1, 2 y 3, y qué Hacen las Empresas para Reducirlas? | Foro Económico Mundial. Available online:

- <https://es.weforum.org/agenda/2022/09/cual-es-la-diferencia-entre-las-emisiones-de-alcance-1-2-y-3-y-que-hacen-las-empresas-para-reducir-las-tres/> (accessed on 28 August 2024).
7. Fourth Greenhouse Gas Study 2020. Available online: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx> (accessed on 30 August 2024).
  8. Freitas, D.; Gervásio, H. The Challenge of Benchmarking Carbon Emissions in Maritime Ports. *Environ. Pollut.* 2024, 363, 125170.
  9. Firląg, S.; Rogulski, M.; Badyda, A. The Influence of Marine Traffic on Particulate Matter (PM) Levels in the Region of Danish Straits, North and Baltic Seas. *Sustainability* 2018, 10, 4231.
  10. Quirós, H. Inspecciones en Pruebas de Muelle y Viaje de Prueba, por Parte del Departamento de Control de Calidad de un Astillero para un Buque de Tipo Remolcador. Available online: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2012/bmfciq.8i/doc/bmfciq.8i.pdf> (accessed on 15 November 2024).
  11. Available online: <https://www.saamtowage.com/history/> (accessed on 2 February 2025).
  12. Available online: <https://www.saamtowage.com/our-impact/> (accessed on 17 November 2024).
  13. Wang, S.; Psaraftis, H.N.; Qi, J. Paradox of International Maritime Organization's Carbon Intensity Indicator. *Commun. Transp. Res.* 2021, 1, 100005.
  14. OMI. 2018 Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships. Available online: [https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.308\(73\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.308(73).pdf) (accessed on 15 November 2024).
  15. OMI. 2021 Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI). Available online: [https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.333\(76\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.333(76).pdf) (accessed on 15 November 2024).
  16. MEPC. Available online: <https://imcaweb.blob.core.windows.net/wp-uploads/2024/01/MEPC-74-6-Transport-work-for-offshore-and-marine-contracting-vessels-Russian-Federation-IMCA.pdf> (accessed on 17 November 2024).
  17. Alshareef, M.H.; Alghanmi, A.F. Optimizing Maritime Energy Efficiency: A Machine Learning Approach Using Deep Reinforcement Learning for EEXI and CII Compliance. *Sustainability* 2024, 16, 10534.
  18. Andersson, K.; Brynolf, S.; Hansson, J.; Grahn, M. Criteria and Decision Support for A Sustainable Choice of Alternative Marine Fuels. *Sustainability* 2020, 12, 3623.



# Diseño de un sistema de detección temprana de incendios forestales para el Gran Valparaíso basada en Internet of Things, Fog Computing y Redes Mesh

**Tesista:** David Ignacio Álvarez Rojas

Profesor guía: Luis Eduardo Bastías Alarcón

Profesora correferente: Luz Mairé Chourio Acevedo

Departamento de Informática

Universidad Técnica Federico Santa María



UNIVERSIDAD TÉCNICA  
FEDERICO SANTA MARÍA



# 1. Introducción y motivación

El 2 de febrero de 2024, el Gran Valparaíso vivió el desastre socionatural más grave desde el terremoto de 2010. En cuestión de horas, el fuego arrasó comunidades en Viña del Mar, Quilpué y Villa Alemana, dejando 135 personas fallecidas, más de 8.000 hogares destruidos y costos directos que superaron los 723 millones de dólares (Gobierno de Chile, 2024; Martínez et al., 2024). El cielo se tiñó de naranja. Las sirenas no pararon. La ventana entre el primer foco de ignición y la catástrofe fue de minutos.

Esa urgencia es el origen de esta investigación. Frente a la impotencia de constatar que los sistemas de detección disponibles —satélites con latencias de 2 a 3 horas, drones restringidos por meteorología, vigilancia humana limitada por la topografía— no estaban a la altura de la velocidad con que el fuego se propaga en las Zonas de Interfaz Urbano-Forestal (ZIUF) del Área Metropolitana de Valparaíso (AMV), esta memoria se propuso una pregunta concreta: ¿es posible diseñar un sistema de alerta que comprima esa ventana de horas a minutos, que funcione sin depender de la infraestructura que el propio desastre destruye, y que sea económicamente viable para su despliegue en las comunidades más vulnerables de la región?

La respuesta propuesta es una arquitectura distribuida que integra sinérgicamente tres tecnologías: Internet de las Cosas (IoT) para la captura hiperlocal de datos ambientales, Fog Computing para el procesamiento en el borde de la red con latencia mínima, y Redes Inalámbricas de Malla (WMNs)

para la comunicación resiliente en topografías complejas. Esta integración constituye la contribución central del trabajo: no la aplicación individual de ninguna de estas tecnologías —cada una existe y está ampliamente documentada en la literatura— sino su diseño conjunto, justificado componente por componente, y especificado para el contexto particular e irrepetible de las ZIUF del AMV.

El presente documento resume los resultados de la memoria de título homónima, aprobada por el Departamento de Informática de la Universidad Técnica Federico Santa María en octubre de 2025, y propuesta por la institución para el 9º Concurso de Tesis de Pregrado de Interés Regional del Consejo de Rectores de Valparaíso, en el área temática de Medio Ambiente, Cambio Climático y Escasez Hídrica.

## 2. Contexto y definición del problema

### 2.1 La Vulnerabilidad Estructural del Gran Valparaíso

El Gran Valparaíso no enfrenta una amenaza nueva ni aislada: la región acumula una historia documentada de eventos de magnitud creciente que evidencia un patrón de vulnerabilidad estructural, no hechos excepcionales aislados. El Gran Incendio de Valparaíso de 2014 afectó a más de 1.000 viviendas en los cerros de la ciudad puerto, exponiendo por primera vez a gran escala la fragilidad de las ZIUF locales ante la combinación de viento, pendiente y construcción informal. La denominada “Tormenta de Fuego” de 2017 amplió la escala del problema a nivel regional, con múltiples focos simultáneos que sobrepasaron la capacidad de respuesta de los organismos de emergencia de la época. El Mega-Incendio de febrero de 2024, con sus 135 víctimas fatales, no fue entonces un evento sin precedentes sino la culminación de una tendencia que la región ya conocía y que no había sido abordada con una solución tecnológica proporcional a su escala (Chávez et al., 2024). Esta progresión —de cientos de viviendas afectadas en 2014, a múltiples comunas en 2017, a más de 8.000 hogares y 135 fallecidos en 2024— constituye en sí misma el argumento histórico más directo a favor de invertir en detección temprana antes de que ocurra un próximo evento de magnitud aún mayor.

Chile enfrenta una amenaza creciente de incendios forestales, intensificada por tres factores convergentes: una megasequía sin precedentes que afecta la zona centro-sur desde 2010 (CR2, 2015), el cambio climático global que intensifica las condiciones meteorológicas críticas conocidas como factor “30-30-30” —temperatura sobre 30°C, humedad relativa bajo 30% y viento sobre 30 km/h— (Cordero

et al., 2024), y la influencia de fenómenos de variabilidad natural como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO).

Las ZIUF del Gran Valparaíso, que incluyen comunas como Valparaíso, Viña del Mar, Quilpué y Villa Alemana, se sitúan entre las zonas más críticamente afectadas a nivel nacional por esta amenaza. A nivel país, las ZIUF ocupan apenas el 5% del territorio pero concentran el 80% de la población y el 60% de los incendios forestales (González et al., 2020). En el AMV específicamente, esta vulnerabilidad se ve amplificada por cuatro condiciones estructurales que se refuerzan entre sí:

- Geomorfología de quebradas y laderas. La topografía abrupta de cerros y quebradas no solo acelera la propagación del fuego al actuar como canales naturales de viento y calor, sino que crea “zonas de sombra” de radiofrecuencia que inutilizan cualquier sistema de comunicación que dependa de línea de visión directa, como las topologías de red centralizadas tipo estrella.
- Vulnerabilidad socioeconómica y urbana. La presencia de asentamientos informales de alta densidad, construcciones de materiales ligeros e inflamables, calles estrechas de trazado irregular, y proximidad crítica entre viviendas y vegetación seca, crean un escenario donde la velocidad de respuesta es tan crítica como la velocidad de detección (Alegría Tardón, 2020; Chávez et al., 2024).
- Megasequía y cambio climático. Las proyecciones climáticas indican que la vulnerabilidad de la región se agravará progresivamente, generando condiciones cada vez más favorables para incendios de gran magnitud (Gil & Cruz Florencia, 2024).

- Colapso documentado de infraestructura durante el desastre. El propio evento de febrero de 2024 dejó 213 antenas de telecomunicaciones fuera de servicio en la Región de Valparaíso (SUBTEL, 2024). Este dato no es anecdótico: es la evidencia empírica de que cualquier sistema de alerta que dependa exclusivamente de conectividad celular fallará exactamente cuando más se necesita.

## 2.2 Consecuencias e Impacto del Problema

Las consecuencias de los incendios en las ZIUF del AMV abarcan tres dimensiones que esta memoria documenta con datos oficiales:

- **Impacto ambiental:** liberación masiva de CO<sub>2</sub> y material particulado fino (PM<sub>2.5</sub>) que degrada la calidad del aire regional, pérdida de biodiversidad y hábitats críticos, erosión y degradación del suelo, y alteración de ciclos hidrológicos que pueden generar inundaciones posteriores (González et al., 2020; Certini et al., 2021).
- **Impacto social:** la pérdida de 135 vidas humanas en el evento de 2024 es la consecuencia más grave documentada. A ello se suman graves problemas respiratorios y cardiovasculares por exposición al humo, impactos profundos en salud mental —estrés postraumático, ansiedad— (OPS/OMS, 2025), y desplazamiento forzado con el consecuente deterioro del tejido comunitario.
- **Impacto económico:** costos directos de supresión, recuperación y reconstrucción que superaron los 723 millones de dólares solo en daños inmediatos, además de pérdidas in-

tangibles en servicios ecosistémicos, daños severos a infraestructura crítica de energía y telecomunicaciones, y pérdida de empleos en negocios locales y turismo (Martínez et al., 2024; SUBTEL, 2024).

## 2.3 Actores Involucrados

La gestión de incendios en la región involucra una red compleja de actores cuya coordinación efectiva es un requisito de diseño en sí mismo. En el ámbito público, CONAF actúa como entidad técnica rectora en materia forestal, con responsabilidad sobre la prevención, la vigilancia y el combate técnico de incendios en terrenos de vocación forestal; SENAPRED, como organismo coordinador nacional de emergencias —sucesor de la antigua ONEMI—, articula la respuesta multisectorial y la declaración de alertas; y las municipalidades de Valparaíso, Viña del Mar, Quilpué y Villa Alemana gestionan el riesgo a nivel local, incluyendo la planificación territorial y la fiscalización de construcciones en zonas de riesgo.

En primera respuesta y seguridad, Bomberos de Chile —organización de voluntarios sin parangón en la región en términos de despliegue territorial—, Carabineros de Chile y, en situaciones de emergencia mayor, las Fuerzas Armadas, constituyen los actores operativos que reciben y ejecutan la respuesta ante una alerta. Es precisamente hacia estos actores que el sistema propuesto dirige sus notificaciones mediante el estándar CAP, bajo la premisa de que una alerta más temprana solo genera valor si llega de forma inmediata e interoperable a quienes pueden actuar sobre ella. Las comunidades locales —residentes, familias afectadas, juntas de vecinos y organizaciones

territoriales— son simultáneamente el sujeto de protección del sistema y un actor activo en su despliegue y mantenimiento, dado que la instalación física de nodos sensores en las ZIUF requiere necesariamente la colaboración y el consentimiento de las comunidades que habitan esas zonas. El sector privado y la sociedad civil —empresas forestales, empresas de servicios básicos como electricidad y telecomunicaciones, y organizaciones no gubernamentales— completan el ecosistema de actores con responsabilidades de mitigación e infraestructura.

Finalmente, instituciones de investigación como el Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN) y el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) aportan el conocimiento científico sobre el comportamiento del fuego y el cambio climático que sustenta buena parte del marco teórico de esta memoria, y representan además socios naturales para la validación científica de los datos que el sistema propuesto generaría en operación real. La gestión efectiva del riesgo de incendio en el AMV requiere superar la fragmentación institucional entre todos estos actores y transitar desde un enfoque predominantemente reactivo hacia uno preventivo y coordinado (Gil & Cruz Florencia, 2024) — un requisito que el sistema propuesto aborda directamente mediante su arquitectura de notificación basada en estándares abiertos e interoperables.

## 2.4 Estado del Arte y Brecha Tecnológica

El análisis comparativo de los sistemas de detección disponibles revela limitaciones específicas

que ningún sistema actual resuelve de manera integral para el contexto de las ZIUF del AMV:

- **Detección satelital (MODIS, VIIRS):** Ofrece cobertura global pero con una latencia de 2 a 3 horas —inviable para una respuesta inicial en zonas donde el fuego se propaga en minutos—, resolución espacial de 375 metros a 1 kilómetro por píxel que impide detectar incendios pequeños, y vulnerabilidad a obstrucciones por nubes o humo denso (González Saggia, 2023; Poblete, 2024).
- **Detección aérea (UAV/drones):** Permite vigilancia dirigida con cámaras térmicas, pero su operatividad está restringida por condiciones meteorológicas y autonomía de vuelo, sus costos operativos para vigilancia continua son elevados, y requiere personal capacitado e infraestructura logística de apoyo.
- **Vigilancia humana y cámaras con visión computacional:** La vigilancia humana tiene alcance limitado por “puntos ciegos” topográficos. Las redes de cámaras con Deep Learning son el campo más activo de investigación actual, pero permanecen vulnerables a la oclusión por niebla o humo denso —precisamente las condiciones en que más se necesita la detección (Özel et al., 2024; Pang et al., 2023).

La brecha tecnológica identificada es la ausencia de un sistema que combine simultáneamente cuatro atributos: respuesta inmediata (baja latencia), alta fiabilidad en cualquier condición de visibilidad, resiliencia operativa en topografías complejas con infraestructura de comunicaciones precaria, y costo-efectividad que permita un despliegue denso en las zonas de mayor riesgo. Esta memoria aborda directamente esa brecha.

## 2.5 Objetivos

### Objetivo General:

Diseñar la arquitectura de un sistema de detección temprana de incendios forestales para las ZIUF del Gran Valparaíso, generando un documento de diseño técnico que especifique sus componentes y sirva de base para un futuro prototipado.

### Objetivos Específicos:

- Especificar los requerimientos funcionales y no funcionales adaptados al contexto de las ZIUF del AMV.
- Elaborar los modelos de arquitectura que definan contenedores, componentes y sus interacciones.
- Definir la selección de componentes tecnológicos que satisfagan los requerimientos del sistema.
- Diseñar el modelo de datos y los flujos de información que materializan la arquitectura.
- Evaluar y proponer una arquitectura conceptual para la lógica de detección, sentando las bases para su futuro desarrollo.

## 2.6 Alcance del Trabajo

El alcance de esta memoria se limita explícitamente al diseño arquitectónico y la especificación técnica del sistema. La implementación física completa y el desarrollo del software quedan fuera de sus objetivos. El trabajo constituye una propuesta de solución desde la ingeniería, enfocada en la fase de diseño, sentando las bases técnicas para una futura implementación piloto.

## 3. Marco teórico y conceptual

### 3.1 Internet de las Cosas y Arquitectura de Referencia

El Internet de las Cosas (IoT) se define como un paradigma en el que objetos físicos equipados con sensores se conectan e intercambian datos a través de una red, habilitando el monitoreo distribuido del mundo físico (Buyya & Dastjerdi, 2016). La mayoría de los sistemas IoT industriales comparten una arquitectura de referencia organizada en cuatro capas funcionales que estructuran el diseño de esta memoria:

- **Capa de Percepción:** nodos sensores que recolectan datos físicos del entorno —temperatura, humedad, gases— constituyendo el puente entre el mundo físico y el digital.
- **Capa de Red:** responsable de la transmisión segura de los datos, abarcando tecnologías de conectividad, topologías de red y protocolos de mensajería.
- **Capa de Procesamiento:** donde los datos se procesan para extraer información de valor, distribuida entre el borde de la red (Edge/Fog Computing) para decisiones de baja latencia, y la nube para análisis masivo.
- **Capa de Aplicación y Persistencia:** presenta la información a usuarios finales, almacena datos a largo plazo, y permite integración con otros sistemas de gestión de emergencias.

### 3.2 Capa de Percepción: Redes de Sensores y Fusión Multi-Firma

Una Red de Sensores Inalámbrica (WSN) consiste en nodos distribuidos espacialmente que recolectan datos y los transmiten colaborativamente hacia una ubicación central (Buyya & Dastjerdi, 2016). Cada nodo consta de cuatro componentes clave: una unidad de procesamiento (MCU), una unidad de sensado, una unidad de comunicación (transceptor de radio), y una unidad de alimentación —siendo esta última el desafío de diseño más crítico dado que los nodos operan en ubicaciones remotas sin mantenimiento (Chan et al., 2024).

El concepto central que sustenta la precisión del sistema propuesto es la fusión de información multisensorial: el proceso de combinar datos de múltiples sensores para obtener una inferencia más precisa y fiable de la que se lograría con cada sensor individualmente (Liang et al., 2024). Esta memoria adopta una fusión a nivel de decisión, donde cada sensor genera una inferencia preliminar que luego se combina mediante un algoritmo para producir una clasificación robusta. Se fundamenta la elección de tres firmas físico-químicas que capturan las tres huellas principales de la combustión de biomasa:

- **Radiación Infrarroja (la llama):** indicador clave para confirmación positiva de presencia de llama, incluso a distancia (Kadir et al., 2023).
- **Anomalías termo-higrométricas (el calor):** un fuego incipiente provoca aumento abrupto de temperatura y descenso de humedad relativa, aunque este indicador por sí solo puede confundirse con condiciones meteorológicas normales (Chan et al., 2024).

- **Productos de combustión (el humo):** material particulado PM<sub>2.5</sub> y gases como monóxido de carbono (CO), cuya correlación mejora drásticamente la fiabilidad ya que la mayoría de fuentes de falsas alarmas —vapor de agua, polvo— no producen CO (Gottuk et al., 2002).

El objetivo doble de esta fusión es aumentar la sensibilidad a eventos reales —detección más rápida— y reducir la susceptibilidad a falsas alarmas. Un sensor de humo puede activarse por vapor; la probabilidad de que ese vapor coincida simultáneamente con un aumento anómalo de temperatura y presencia de CO es extremadamente baja.

### 3.3 Capa de Red: Redes Mesh y Tecnologías LPWAN

Las Redes Inalámbricas de Malla (WMNs) son una topología donde los nodos se conectan dinámicamente entre sí de forma no jerárquica, permitiendo que cada nodo actúe como repetidor para otros (Parvin, 2019). Esta comunicación multi-salto extiende el alcance de la red más allá de un único punto central y crea rutas redundantes. Su ventaja fundamental es la capacidad de auto-reparación (self-healing): si un nodo falla, la red encuentra automáticamente rutas alternativas (Saldamli et al., 2019), característica que la hace ideal para las quebradas y la topografía accidentada del AMV.

Para que los sistemas IoT sean viables en monitoreo de áreas remotas, la tecnología de comunicación debe combinar largo alcance y bajo consumo energético. Las tecnologías LPWAN (Low-Power Wide-Area Network) resuelven este

balance. Dentro de este ecosistema, LoRa opera en la capa física con comunicaciones de varios kilómetros a consumo extremadamente bajo, mientras que protocolos de enrutamiento sobre LoRa —tanto propietarios como Wirepas Mesh, como abiertos como Meshtastic— implementan lógicas de malla multi-salto sobre esa capa física (Wong et al., 2024).

Para la mensajería entre dispositivos, el protocolo MQTT, basado en el patrón publicación/suscripción, se ha consolidado como estándar de facto para IoT, optimizado para redes con ancho de banda limitado y dispositivos con recursos restringidos (Al Enany et al., 2021). Dado que MQTT no cifra por defecto, esta memoria especifica su uso sobre TLS (MQTTs) como requisito de seguridad no negociable para un sistema de misión crítica (Alkhafajee et al., 2021).

### 3.4 Capa de Procesamiento: Fog Computing

Enviar todos los datos brutos a la nube introduce latencia por distancia de comunicación y consume ancho de banda significativo —problemático para una aplicación que requiere respuesta casi en tiempo real (Bonomi et al., 2012; Shi et al., 2016). El Fog Computing extiende la nube creando una capa intermedia de nodos ubicados entre los dispositivos IoT y la nube centralizada. Sus ventajas centrales para este sistema son: baja la-

tencia al procesar cerca del origen de los datos, reducción del tráfico de red al filtrar y agregar localmente, y operación autónoma que permite generar alertas incluso si la conexión a la nube se interrumpe —exactamente el escenario documentado en el evento de 2024 con la caída de antenas (Yi et al., 2015).

### 3.5 Capa de Aplicación y Persistencia

Los datos generados por sensores son, por naturaleza, series temporales. Las Bases de Datos de Series Temporales (TSDB) están optimizadas para el alto volumen de escrituras y consultas por rango temporal que este tipo de dato exige, superando a las bases relacionales tradicionales en este dominio específico (Liu et al., 2024). En paralelo, los metadatos estructurales del sistema —dispositivos, usuarios, alertas, ubicaciones— requieren garantías ACID que solo un sistema relacional robusto puede ofrecer, complementado con capacidades geoespaciales para análisis de proximidad y geo-cercas (Tjukanov, 2018).

Para la difusión de alertas, el estándar internacional Common Alerting Protocol (CAP) permite intercambiar advertencias públicas entre sistemas heterogéneos de forma estructurada, encapsulando qué está sucediendo, dónde, y qué hacer —siendo consumible de forma nativa por plataformas del Sistema Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SINAPRED).

## 4. Metodología

### 4.1 Marco Metodológico Híbrido

El diseño de un sistema distribuido en tres niveles (Edge, Fog, Cloud) con un mandato de seguridad vital constituye un desafío de Sistema Ciberfísico (CPS) que no puede abordarse con una sola metodología (Greer et al., 2019). La arquitectura propuesta se deriva de un enfoque híbrido y multi-paradigma que aplica tres metodologías estándar de la industria en sus respectivos niveles de abstracción:

- **Gobernanza general — Ingeniería de Sistemas Basada en Modelos (MBSE):** rige el ciclo de vida completo del sistema utilizando un modelo digital cohesivo como única fuente de verdad. El proceso sigue el Modelo en V, estándar para sistemas de misión crítica, que impone disciplina de Verificación y Validación paralela a cada fase de diseño, asegurando que la fiabilidad sea una característica diseñada desde el inicio y no un pensamiento tardío (Gräßler et al., 2021).
- **Descomposición del sistema — Diseño Basado en Componentes (CBD):** el sistema se estructura en componentes lógicos y tecnológicamente agnósticos —por ejemplo “Componente de Gestión de Energía” o “Componente de Red de Malla”— permitiendo analizar responsabilidades e interacciones antes de comprometerse con una tecnología específica (Jonsson, 2016).
- **Descomposición del software — Domain-Driven Design (DDD):** para la complejidad del backend, se utilizan patrones de Contextos Delimitados (Bounded Contexts) que identifican y aíslan subdominios de negocio

—“Gestión de Alertas”, “Gestión de Dispositivos”, “Análítica de Riesgo”— definiendo los límites naturales de los microservicios y asegurando alta cohesión con bajo acoplamiento (Laribee, 2009).

## 4.2 Estándar de Justificación de Decisiones

En un sistema de misión crítica, las decisiones arquitectónicas deben ser explícitas, auditables y defendibles. Cada decisión tecnológica presentada se justifica mediante un análisis estructurado de compensaciones (trade-offs), alineado con el estándar ISO/IEC/IEEE 42010, considerando dos preocupaciones principales: Fiabilidad, mediante un Análisis de Modos de Fallo y Efectos (FMEA) aplicado proactivamente a cada componente — por ejemplo, el FMEA de la lógica de detección Gas+IR identificó un punto ciego en la combus-

ción latente, lo que obligó a incluir un sensor de partículas para mitigar ese riesgo—, y Viabilidad Económica, evaluada mediante el Costo Total de Propiedad (TCO) a 10-15 años en lugar del costo de adquisición simple.

## 4.3 Modelo de Visualización: C4

Para comunicar la arquitectura de forma clara y profesional a audiencias técnicas y no técnicas, se adopta el Modelo C4 —Contexto, Contenedores, Componentes, Código— estándar de la industria que permite “hacer zoom” desde la visión general del sistema hasta los módulos internos de cada componente (Brown, s.f.). Los diagramas correspondientes a los cuatro niveles de este modelo, así como el modelo entidad-relación de la base de datos, se adjuntan como anexos visuales independientes a este resumen, conforme a las bases del concurso.

## 5. Desarrollo

### 5.1 Propuesta de Solución

#### 5.1.1 Visión General de la Arquitectura

El sistema se organiza en tres capas funcionales que replican el continuo Edge-Fog-Cloud del paradigma IoT moderno. [Ver Figura 1: Diagrama C4 Nivel 1 — Contexto, adjunto como anexo.]

La capa Edge está compuesta por la red de Nodos Sensores desplegados físicamente en las ZIUF, cada uno capturando la multi-firma del fuego y comunicándose mediante red mesh. La capa Fog está compuesta por Nodos Fog (gateways) que agregan datos de múltiples sensores, ejecutan el algoritmo de detección y gestionan la conectividad hacia la nube. La capa Cloud alberga la Plataforma Backend, responsable del almacenamiento histórico, la visualización geoespacial en tiempo real, y la notificación interoperable hacia los actores externos: SENAPRED, CONAF y Bomberos de Chile, además de servicios meteorológicos externos para el cálculo de índices de riesgo. [Ver Figura 2: Diagrama C4 Nivel 2 — Contenedores, adjunto como anexo.]

#### 5.1.2 Requerimientos del Sistema

El diseño parte de un conjunto de Requerimientos Funcionales (RF) y No Funcionales (RNF) derivados directamente del análisis del problema. Entre los RF más relevantes se especifican: adquisición de datos multi-firma en el

nodo sensor (RF-01), transmisión resiliente vía red mesh (RF-02), operación autónoma del nodo gestionando su propia energía (RF-03), detección de anomalías en el borde (RF-04), procesamiento agregado en la niebla con correlación al índice meteorológico de incendios (RF-05), generación de alertas estructuradas (RF-07), y notificación interoperable a actores externos mediante estándares abiertos (RF-08).

Entre los RNF más críticos, que constituyen las restricciones de diseño centrales del sistema: latencia de alerta inferior a 2 minutos con objetivo de 30 segundos (RNF-01); autonomía energética del nodo sensor de 10 a 15 años sin mantenimiento físico (RNF-02); resiliencia operacional ante fallos de red, hardware e infraestructura terrestre (RNF-04); precisión de detección con tasa de verdaderos positivos superior al 95% y falsos positivos inferiores al 5% (RNF-05); robustez ambiental con encapsulado IP67 mínimo (RNF-06); escalabilidad horizontal del backend para soportar más de 100.000 dispositivos (RNF-07); e interoperabilidad mediante estándares abiertos con agencias nacionales (RNF-09).

### 5.1.3 Nodo Sensor: Captura de la Multi-Firma del Fuego

[Ver Figura 3: Diagrama C4 Nivel 3 — Firmware Nodo Sensor, adjunto como anexo.]

El nodo sensor integra cuatro subsistemas internos: un Controlador Principal que orquesta el ciclo de sueño/despertar del dispositivo; un Gestor de Sensores que encapsula la lógica de lectura de los sensores físicos; un Serializador de Datos que codifica las lecturas en formato binario compacto; y una Interfaz de Comunicación que entrega el

payload al stack de red mesh para su transmisión.

La selección de hardware para el nodo sensor se diferencia entre producción y pruebas de laboratorio, priorizando en el primer caso el TCO a largo plazo y en el segundo la velocidad de desarrollo. Los cuatro componentes críticos son:

- **MCU (Microcontrolador):** se especifica el ESP32-S3-WROOM-1-N8R8, que provee procesamiento de doble núcleo con extensiones de aceleración de IA y modos de ultra bajo consumo (deep sleep del orden de pocos microamperios), esenciales para cumplir el requisito de autonomía energética de una década (Espressif Systems, 2025).
- **Sensores:** la suite de producción combina el sensor de gas Bosch BME688, el sensor de partículas Bosch BMVo80 y el sensor de llama infrarroja KEMET QFCE. Esta combinación de tres factores es una mitigación obligatoria identificada por el análisis FMEA: la detección de partículas es indispensable para cubrir el modo de fallo de “combustión latente” (smoldering), que no produce una firma de llama clara.
- **Alimentación:** el sistema de recolección de energía solar combinado con almacenamiento en supercondensador (EDLC), gestionado por el PMIC de nano-potencia Texas Instruments BQ25570, se selecciona sobre las baterías de litio por su inmunidad a fallos catastróficos a temperaturas bajo cero —un modo de fallo documentado para baterías  $\text{LiFePO}_4$  en ambientes de montaña— y por su vida útil de 10 a 15 años sin necesidad de reemplazo (EATON, 2024; Naumann et al., 2018).
- **Serialización:** se selecciona Protocol Buffers (Protobuf) sobre alternativas como JSON o

CBOR. Protobuf impone un esquema riguroso que garantiza robustez y compatibilidad de versiones, produciendo una carga útil binaria compacta —estimada en aproximadamente 25 bytes por lectura de sensor— que minimiza el tiempo en el aire y, por tanto, el consumo energético de la transmisión.

Para dar cumplimiento al requerimiento de autonomía operacional de largo plazo sin intervenciones de mantenimiento en un horizonte de 10 a 15 años (RNF-02), el diseño del Nodo Sensor implementa un estricto esquema de ciclo de trabajo (*Duty Cycle*) gestionado por hardware y software embebido. El cerebro del dispositivo, el microcontrolador de doble núcleo ESP32-S3, permanece el 99.5% de su ciclo operativo en modo de sueño profundo (*deep sleep*), apagando la CPU principal, los periféricos de radio y la memoria volátil. Durante este estado, se mantiene activo únicamente el coprocesador de ultra bajo consumo (ULP) y el reloj de tiempo real (RTC) interno, lo que reduce el consumo base a aproximadamente 25  $\mu$ A.

La orquestación de la energía es administrada por el circuito integrado especializado de administración de potencia (PMIC) TI BQ25570, el cual realiza un *energy harvesting* eficiente a partir de una celda solar de película delgada. Cada 15 minutos, el temporizador del RTC despierta secuencialmente el sistema: primero se energiza la etapa de sensores a través de transistores MOSFET de canal P para evitar corrientes de fuga; se estabilizan las lecturas analógicas e I2C durante un período activo de 2 segundos (con un consumo transitorio de 80 mA); los datos brutos de la firma multi-sensor (gases, partículas PM2.5 y radiación IR) son procesados y serializados de inmediato en formato binario compactado mediante Protocol

Buffers (Protobuf), reduciendo el *payload* a solo 25 bytes. Finalmente, se activa el transceptor de radio LoRa para transmitir la ráfaga de datos en un intervalo de ~150 ms utilizando una potencia de +14 dBm (consumo de 120 mA), volviendo instantáneamente al modo de letargo.

Este comportamiento pulsante elimina el estrés de carga constante sobre el sistema de almacenamiento. En lugar de celdas químicas de litio propensas a la degradación por envejecimiento calendario y fallos catastróficos por congelamiento térmico, la persistencia energética en el borde se confía a un banco de supercondensadores de doble capa eléctrica (EDLC), capaces de soportar más de 500,000 ciclos completos de carga/descarga y operar de manera nominal en el rango crítico de temperatura ambiental industrial de -40°C a 85°C requerido para exteriores.

El costo unitario proyectado para el nodo sensor en configuración de producción es de USD 79,48, mientras que la configuración de pruebas de laboratorio —basada en el módulo Heltec Wireless Stick Lite V3 y sensores de menor costo— se proyecta en USD 55,21.

#### 5.1.4 Red Mesh: Resiliencia en Topografía Compleja

La decisión de utilizar una topología de red en malla, en lugar de la topología estrella estándar de LoRaWAN, responde directamente a la geomorfología de quebradas del AMV. En una topología estrella, cada nodo final requiere línea de visión directa con un gateway centralizado; en las quebradas de Valparaíso, esto es estructuralmente imposible para una fracción significativa del territorio. La red mesh permite comunicación

multi-salto que extiende la cobertura superando obstrucciones, y su capacidad de auto-reparación garantiza que el fallo de un nodo individual no comprometa la conectividad de la red completa.

Para el despliegue en producción se especifica Wirepas Mesh, un protocolo de enrutamiento descentralizado de grado industrial diseñado específicamente para redes IoT densas, a gran escala y de bajo consumo, que supera las limitaciones de enfoques más simples como la inundación básica (flooding) en redes densas (Wong et al., 2024). Para el prototipo de pruebas de laboratorio se especifica Meshtastic, una alternativa de código abierto con comunidad activa que facilita la validación inicial de bajo costo, aunque no se considera óptima para producción debido a las limitaciones documentadas de su enfoque de managed flooding en redes de alta densidad.

### 5.1.5 Nodo Fog: Algoritmo Heurístico Híbrido de Detección

[Ver Figura 4: Diagrama C4 Nivel 3 — Aplicación Nodo Fog, adjunto como anexo.]

El nodo fog integra un Gestor de Comunicación Mesh que descifra los paquetes LoRa entrantes, un Procesador de Detección que ejecuta la lógica de fusión, un Broker MQTT que desacopla internamente los componentes, un Buffer Local en SQLite que almacena alertas y telemetría ante fallo de conectividad, y un Gestor de Conexión que administra el backhaul primario y secundario.

La decisión de ubicar la lógica de detección principal en el nodo fog —en lugar de enviarla a la nube— se basa en los tres beneficios determinantes del Fog Computing ya descritos: reducción

crítica de la latencia, ahorro de ancho de banda, y aumento de la resiliencia mediante operación autónoma. El hardware especificado para producción es un Ordenador Monoplaca (SBC) Radxa CM3J con almacenamiento eMMC soldado —seleccionado sobre tarjetas microSD por la gestión activa de desgaste (wear leveling) y corrección de errores (ECC) que ofrece su controlador integrado, crítico para una operación desatendida de largo plazo (SmartSemi, 2023)— y conectividad de backhaul híbrida: un enlace celular 4G/LTE como primario, respaldado por un enlace satelital de órbita baja (LEO) mediante el módulo Swarm M138, que provee diversidad de ruta completa e inmunidad a fallos de infraestructura terrestre como los documentados en el evento de 2024.

Tras un análisis comparativo de cuatro estrategias algorítmicas posibles —reglas heurísticas, fusión probabilística mediante Teoría de Dempster-Shafer, lógica difusa, y aprendizaje automático— se selecciona un algoritmo heurístico híbrido de dos etapas, fundamentado en un análisis de costo computacional: el enfoque heurístico requiere entre  $10^3$  y  $10^4$  operaciones de punto flotante con una huella de memoria inferior a 1 MB, mientras que un modelo de Machine Learning ligero para detección de incendios en imágenes, como una variante optimizada de YOLOX, requiere del orden de  $2,5 \times 10^9$  operaciones por inferencia —una diferencia de tres a cinco órdenes de magnitud que valida la elección heurística para garantizar baja latencia y bajo consumo en el hardware del nodo fog (Luan et al., 2024).

Etapas 1 — Análisis de Riesgo Contextual: el nodo fog calcula en tiempo real el Fire Weather Index (FWI) del Sistema Canadiense de Índice Meteorológico de Incendios, utilizando datos de sus

propios sensores ambientales combinados con observaciones meteorológicas externas. Esto transforma al FWI de una herramienta de evaluación regional en un indicador de riesgo hiperlocal, estableciendo el contexto de peligro para la zona inmediata y ajustando dinámicamente la sensibilidad del sistema de detección (Van Wagner, 1987; Castillo, 2019, estudio que adapta específicamente este índice a las condiciones de Viña del Mar).

La lógica de detección en el borde (Capa de Niebla) procesa los datos agregados de los Nodos Sensores mediante un algoritmo heurístico híbrido de dos etapas que se fundamenta en la adaptación local del Sistema Canadiense de Índice Meteorológico de Incendios (FWI). El Nodo Fog ejecuta en tiempo real las ecuaciones diferenciales simplificadas correspondientes a tres sub-índices críticos del FWI: el Código de Humedad del Combustible Fino (FFMC), el Código de Humedad de la Capa Orgánica (DMC) y el Índice de Propagación Inicial (ISI). El FFMC evalúa numéricamente el contenido de humedad de la hojarasca suelta y combustibles finos superficiales (capas de 1 a 2 cm de profundidad), parametrizado según las variaciones horarias de la temperatura y la humedad relativa capturadas en el microclima. El DMC extiende este análisis hacia las capas orgánicas de profundidad moderada (5 a 10 cm), e incorporando el historial acumulado de precipitaciones locales.

La integración clave del sistema radica en la combinación matemática del FFMC con la velocidad del viento regional para derivar el ISI, que representa la tasa potencial de propagación del frente de fuego en sus fases de ignición inicial. Este valor de riesgo contextual no se emplea únicamente como un indicador estático de visualización, sino

como un parámetro dinámico de control dentro del Nodo Fog. Mediante un modelo de control adaptativo, el valor calculado del ISI modifica los umbrales de activación de la segunda etapa (Confirmación de Ignición). En días donde el ISI supera el umbral crítico regional, el algoritmo incrementa automáticamente la sensibilidad de la regla de fusión multisensorial, disminuyendo los límites requeridos de partes por millón (ppm) de monóxido de carbono (CO) y de microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de material particulado (PM<sub>2.5</sub>) necesarios para validar una alerta. Esto optimiza el balance del sistema, minimizando los falsos negativos en condiciones meteorológicas extremas sin elevar la tasa de falsos positivos en períodos de bajo riesgo.

Etapas 2 — Confirmación de Ignición: el sistema implementa una regla de multi-firma —la implementación concreta del modelo de fusión a nivel de decisión descrito en el marco teórico— basada en la correlación simultánea de humo (PM<sub>2.5</sub>), gases (CO) y confirmación visual del sensor de llama infrarroja. Esta metodología de dos etapas ha sido validada en sistemas de WSN jerárquicos (Molina-Pico et al., 2016) y en estudios de campo que correlacionan picos de contaminantes atmosféricos con eventos de incendio reales (Lertsinsrutavee et al., 2023).

### Ejemplo de Operación del Algoritmo

Para ilustrar el funcionamiento conjunto de las dos etapas, considérese un escenario representativo de un día de verano en una ZIUF del AMV bajo condiciones de riesgo elevado. El nodo fog calcula, a partir de sus propios sensores y de datos meteorológicos externos, un valor de FWI hiperlocal de 28 sobre una escala que en Chile

central se considera de riesgo “Muy Alto” a partir de valores superiores a 21 (Castillo, 2019). Este valor de FWI ajusta dinámicamente el umbral de sensibilidad de la Etapa 2: en condiciones de riesgo bajo, el sistema exige una correlación más estricta entre las tres firmas para evitar falsas alarmas por fuentes benignas como una parrilla doméstica; en condiciones de riesgo “Muy Alto” como las del ejemplo, el umbral de activación se reduce, priorizando la sensibilidad sobre la especificidad, dado que el costo de una falsa alarma es comparativamente mucho menor que el costo de una detección tardía. Bajo este umbral ajustado, el nodo fog evalúa entonces la siguiente regla de fusión a nivel de decisión:

- SI [concentración de  $PM_{2.5} > 35 \mu g/m^3$  sostenida por más de 20 segundos] Y [concentración de  $CO > 9 ppm$ ] Y [sensor de llama IR registra señal positiva] ENTONCES generar alerta de confianza alta.
- Si únicamente se activa el sensor de partículas sin correlación de CO ni IR —un escenario consistente con polvo en suspensión o neblina costera, fenómenos frecuentes en el AMV— el sistema registra la lectura como anómala en sus logs de auditoría, pero no genera una alerta formal, evitando así el desgaste operacional de falsas alarmas hacia Bomberos y CONAF. Esta lógica de doble filtro —riesgo contextual ajustando sensibilidad, multi-firma confirmando ignición— es lo que permite al sistema cumplir simultáneamente los dos extremos del Requerimiento No Funcional RNF-05: maximizar la tasa de verdaderos positivos y minimizar los falsos positivos, sin que estos dos objetivos típicamente contrapuestos se anulen entre sí.

### 5.1.6 Plataforma Backend: Microservicios y Persistencia Polígloa

[Ver Figura 5: Diagrama C4 Nivel 3 — Backend, y Anexo: Modelo Entidad-Relación, adjuntos como anexos.]

La plataforma en la nube se implementa como una arquitectura de microservicios orientada a eventos, descomponiendo el backend en servicios pequeños y autónomos —Servicio de Ingesta, Servicio de Procesamiento, Servicio de Alertas, Servicio de Gestión de Dispositivos y API de Frontend— que permiten escalabilidad independiente, mayor resiliencia al aislar fallos, y desarrollo más ágil (Newman, 2015). Se especifica el lenguaje Go con el framework Gin por su modelo de concurrencia ligera, esencial para la ingesta de alta concurrencia característica de IoT, y por la eficiencia de recursos que reduce el TCO de infraestructura en la nube frente a alternativas interpretadas.

La persistencia de datos implementa un modelo polígloa con dos motores especializados:

- **Apache IoTDB** como base de datos de series temporales (TSDB), seleccionada por su rendimiento de ingesta y eficiencia de almacenamiento superiores a alternativas como InfluxDB, particularmente a medida que aumenta el número de dispositivos en la red (Liu et al., 2024). El modelo de datos jerárquico organiza las rutas como `root.{grupo_almacenamiento}.{tipo_dispositivo}.{id_dispositivo}.{medición}`, utilizando el identificador del dispositivo en PostgreSQL como puente entre los metadatos relacionales y las series temporales.

- **PostgreSQL con la extensión PostGIS** como base de datos relacional y geoespacial, elegida por su robustez, conformidad ACID y soporte nativo para el tipo de dato GEOGRAPHY que habilita cálculos geodésicos precisos sobre la ubicación de cada nodo sensor. El modelo entidad-relación especifica entidades para FogNodes y SensorNodes con clave primaria sustituta y clave natural única (hardware\_id), permitiendo el reemplazo de hardware sin pérdida de continuidad histórica; y un subsistema de gestión de incidentes compuesto por Alerts, AlertHistory —que funciona como log inmutable de auditoría— y AlertAssociatedSensors, que vincula cada alerta con el clúster de sensores que la generó.

Para garantizar una interoperabilidad nativa y multidifusión con las plataformas de los organismos públicos del Sistema Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SINAPRED), tales como la Corporación Nacional Forestal (CONAF) y el Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED), el Backend del sistema transforma los eventos validados de incendios en un esquema de datos estructurado bajo el estándar internacional OASIS Common Alerting Protocol (CAP) Versión 1.2. Al momento en que el Servicio de Alertas del Backend recibe un evento confirmado desde la capa de niebla, encapsula la telemetría histórica y operacional en un documento XML normalizado, mapeando las variables relacionales de la base de datos PostgreSQL a elementos jerárquicos del protocolo.

La traducción lógica se realiza correlacionando el nivel de riesgo heurístico procesado y los metadatos del dispositivo con los tres vectores normativos de CAP: Urgency (definido estricta-

mente como *Immediate* debido a la naturaleza de detección temprana en minutos), Severity (mapeado dinámicamente como *Extreme* o *Severe* según los indicadores combinados de llama IR y saturación de gases), y Certainty (establecido como *Observed* cuando existe concurrencia de firmas energéticas y químicas). Paralelamente, el elemento <area> del esquema CAP se nutre directamente del subsistema geográfico PostGIS. El objeto espacial almacenado en la tabla relacional bajo el tipo de dato nativo GEOGRAPHY(Point, 4326) se procesa mediante funciones geométricas para generar un polígono circular de afectación estimado (<poligon> o <circle>). Este documento XML estandarizado se expone inmediatamente a través de un *endpoint* REST de alta disponibilidad y se distribuye de manera proactiva mediante Webhooks asíncronos orientados a eventos, permitiendo que los sistemas centrales de emergencia o la infraestructura de mensajería SAE (Sistema de Alerta de Emergencia para celulares) consuman e interpreten la alerta de forma automatizada sin requerir capas intermedias de traducción de software.

### 5.1.7 Estrategia de Despliegue Físico

La densidad de despliegue se deriva del rango de detección efectiva de los sensores físicos. El observable más relevante para detección temprana a distancia es el humo, con distancias de detección típicas entre 10 y 100 metros según estudios de optimización de WSN para monitoreo de incendios (Gómez-González et al., 2025). Favoreciendo una estrategia de colocación en rejilla hexagonal para maximizar cobertura, se definen tres escenarios de densidad: alta densidad para ZIUF críticas (4 a 5 nodos por hectárea), densidad media para zonas de amortiguamiento (2 a 3 no-

dos por hectárea), y baja densidad para vigilancia forestal amplia (1 nodo por hectárea).

## 5.2 Plan de Verificación

Dado que el alcance de esta memoria se limita al diseño arquitectónico, la validación empírica completa del sistema en condiciones reales constituye el paso inmediato siguiente a este trabajo, no un resultado ya alcanzado. Se ha definido, sin embargo, un plan de verificación riguroso y trazable que conecta cada Requerimiento No Funcional crítico con un método de prueba específico y un criterio de éxito medible, diseñado para ejecutarse sobre un prototipo de bajo costo.

### 5.2.1 Prototipo de Verificación Propuesto

El plan especifica la construcción de un prototipo a escala reducida compuesto por dos Nodos Sensores y un Nodo Fog, utilizando la selección de hardware de desarrollo detallada en la sección 5.1.3 (Heltec Wireless Stick Lite V3, Bosch BME688, Raspberry Pi 4B, protocolo Meshtastic), con un costo total de hardware estimado inferior a 200 dólares americanos. Este prototipo de bajo costo es deliberadamente accesible para que la validación pueda ejecutarse como continuación inmediata de este trabajo, sin requerir financiamiento significativo.

### 5.2.2 Pruebas Específicas y Criterios de Éxito

**Validación de Precisión de Detección (RNF-05):** se simulan dos escenarios en entorno controlado —un escenario de incendio simulado con fuente de calor y generador de humo que activa simultáneamente los tres sensores, y un escenario de

falsa alarma simulada con únicamente la fuente de calor. El criterio de éxito exige que el sistema genere una alerta formal solo en el primer escenario, demostrando la eficacia del algoritmo de fusión multi-firma frente a estímulos parciales.

**Validación de Resiliencia Operacional (RNF-04):** se desconecta físicamente el backhaul del nodo fog durante cinco minutos mientras los nodos sensores continúan transmitiendo. El criterio de éxito exige que, al reconectar, el backend reciba la totalidad de los datos acumulados, y que la base de datos SQLite local del nodo fog confirme el almacenamiento temporal y posterior envío de los registros.

**Validación de Baja Latencia de Alerta (RNF-01):** se instrumentan timestamps de alta precisión en el firmware del nodo sensor (momento de envío del paquete anómalo) y en la aplicación del nodo fog (momento de confirmación de alerta). El criterio de éxito exige una diferencia consistentemente inferior a 30 segundos, validando la eficiencia de la cadena de comunicación LoRa Mesh y el procesamiento en tiempo real en el borde.

**Validación de Seguridad Integral (RNF-11):** se captura el tráfico de red saliente del nodo fog mediante Wireshark durante la transmisión de datos. El criterio de éxito exige confirmar el uso de TLSv1.3 y la ilegibilidad del payload capturado, validando el uso correcto de MQTT sobre TLS.

**Validación de Interoperabilidad (RNF-09):** se genera un archivo XML de alerta siguiendo la estructura CAP y se valida contra un validador en línea reconocido (Google Public Alerts); en paralelo, se implementa el endpoint de feed RSS y se verifica su correcta suscripción y visualización mediante un lector estándar. El criterio de éxito

exige validación sintáctica CAP 1.2 exitosa y correcta recepción vía RSS.

### 5.2.3 Limitaciones Reconocidas del Plan de Verificación

Es importante declarar con honestidad las limitaciones inherentes a este plan: las pruebas propuestas se ejecutan en un entorno de laboratorio que no replica completamente las condiciones ambientales reales de una ZIUF —viento, humedad variable, interferencias de radio en terreno—; el prototipo de dos nodos no permite validar el comportamiento de la red mesh a la escala de cientos de nodos que un despliegue real requeriría; y las pruebas de corta duración no validan la degradación de componentes ni la fiabilidad del sistema a lo largo de meses de operación continua. La validación de la autonomía energética proyectada de 10 a 15 años, en particular, solo puede confirmarse mediante análisis del presupuesto energético teórico complementado con mediciones empíricas de consumo de corriente en las fases de sueño profundo y operación activa, comparadas contra las hojas de datos de los componentes seleccionados.

### 5.2.4 Zona Piloto Recomendada

Para la verificación en entorno real que debe seguir a la validación de laboratorio, se ha identificado como zona piloto un sector específico dentro del Jardín Botánico Nacional de Viña del Mar, en el área adyacente al Canal Chacao y el sector El Olivar. [Ver Figura 6: Mapa de Zona Piloto Recomendada, adjunto como anexo.] Esta zona cumple los criterios derivados del análisis del problema: representatividad crítica de ZIUF, topografía compleja, historial do-

cumentado de vulnerabilidad, y proximidad directa al área más afectada por la catástrofe de febrero de 2024 (Alegría Tardón, 2020; Martínez et al., 2024).

La selección específica de la zona piloto que comprende el sector de Canal Chacao, El Olivar y la periferia del Jardín Botánico Nacional en la comuna de Viña del Mar no solo responde a criterios de alta vulnerabilidad socioeconómica e historial de catástrofes, sino que se justifica técnicamente como el escenario óptimo para someter la arquitectura de red a pruebas de estrés electromagnético y de enrutamiento físico. Desde la perspectiva de la ingeniería de radiofrecuencia (RF), esta área presenta una geomorfología extremadamente irregular, caracterizada por laderas con pendientes que superan el 35% y quebradas profundas y sinuosas. Esta topografía genera severas obstrucciones físicas que eliminan la línea de visión directa (NLoS, *No Line of Sight*) entre múltiples puntos, creando 'zonas de sombra' donde las tecnologías de comunicación tradicionales en estrella (como LoRaWAN estándar) fallarían críticamente al no alcanzar un *gateway* central.

Adicionalmente, la alta densidad de biomasa combustible forestal e introducida —principalmente plantaciones de *Eucalyptus globulus* y masas densas de *Acacia melanoxylon*— actúa como un medio altamente atenuador para las ondas de radio en las bandas sub-GHz utilizadas por los módulos LoRa, debido al fenómeno de dispersión y absorción por follaje húmedo. Por lo tanto, desplegar el prototipo de Prueba de Concepto (PoC) en esta ubicación permite evaluar de forma empírica la resiliencia y robustez del protocolo de Red de Malla (Wirepas Mesh / Meshtastic). El

entorno forzará a los Nodos Sensores a descubrir dinámicamente rutas alternativas a través de saltos múltiples (*multi-hop*) utilizando nodos intermedios para esquivar los accidentes geográficos, validando de manera rigurosa el mecanismo de auto-reparación (*self-healing*) exigido en el requerimiento RNF-04 ante la simulación de pérdida total o parcial de infraestructura en situaciones de desastre.

## 5.3 Viabilidad Económica y Análisis Costo-Beneficio

### 5.3.1 Costos de Inversión (CAPEX)

El costo unitario de cada nodo se compone de elementos individuales cuya selección fue justificada en la sección 5.1.3. El desglose completo para el Nodo Sensor en configuración de producción es:

- Microcontrolador ESP32-S3-WROOM-1-N8R8: USD 4,65
- Gestión de energía (PMIC Texas Instruments BQ25570): USD 5,18
- Supercondensador EDLC para almacenamiento energético
- Sensor de gas Bosch BME688: USD 6,65
- Sensor de partículas Bosch BMVo80: USD 45,00 (el componente individual de mayor costo del nodo)
- Sensor de llama infrarroja KEMET QFCE: USD 18,00
- Licenciamiento del protocolo de red mesh Wirepas

Subtotal Nodo Sensor: USD 79,48

Para el Nodo Fog, el desglose es:

- Ordenador monoplaca Radxa CM3J con placa portadora: USD 105,00
- Backhaul celular primario Quectel EG25-G (4G/LTE): USD 60,00
- Kit de backhaul satelital secundario Swarm M138: USD 198,00 (componente de mayor costo individual de toda la arquitectura, justificado por la resiliencia que aporta ante el escenario documentado de colapso de infraestructura celular)

Subtotal Nodo Fog: USD 363,00

Es relevante notar que el costo del nodo fog es proporcionalmente mucho mayor al del nodo sensor —más de cuatro veces—, lo que refuerza la importancia de la relación de redundancia 10:1 adoptada en el diseño: el sistema concentra la capacidad de procesamiento y comunicación de mayor costo en un número reducido de nodos fog, mientras multiplica los nodos sensores de bajo costo para maximizar la densidad de cobertura.

Aplicando estos costos unitarios y la relación de redundancia conservadora de 10 nodos sensores por nodo fog —que prioriza máxima fiabilidad y baja latencia sobre minimización de costos— a las densidades de despliegue especificadas en la sección 5.1.7, para un área de referencia de 100 hectáreas (1 km<sup>2</sup>) el costo de hardware proyectado es:

- Densidad baja (1,0 nodos/ha): 90 sensores, 10 fogs — USD 10.783
- Densidad media (2,0 nodos/ha): 180 sensores, 20 fogs — USD 21.566
- Densidad alta / ZIUF crítica (4,5 nodos/ha): 405 sensores, 45 fogs — USD 48.524

### 5.3.2 Costos Operacionales (OPEX)

Para el escenario de densidad media (200 nodos totales), el costo operacional anual proyectado es de USD 1.234, compuesto por tres partidas:

- Conectividad de datos (planes IoT/M2M nacionales para los nodos fog): USD 720
- Infraestructura cloud (precios de referencia de AWS): USD 264
- Mantenimiento y reposición (provisión basada en una tasa de falla de componentes del 2% anual): USD 250

### 5.3.3 Marco de Análisis Costo-Beneficio

El argumento económico central de este sistema no reside en una comparación directa y simplificada entre el costo del hardware y el costo total de un desastre específico, sino en la cadena causal que conecta la reducción de la latencia de detección con la reducción del daño esperado.

El sistema propuesto reduce la latencia de detección de 2 a 3 horas —el tiempo característico de la detección satelital— a un objetivo de menos de 2 minutos, con una meta de diseño de 30 segundos. En las condiciones meteorológicas documentadas durante el evento de febrero de 2024, caracterizadas por el factor crítico “30-30-30” de temperatura, humedad y viento, cada minuto adicional de propagación libre del fuego en una ZIUF representa hectáreas adicionales quemadas y, consecuentemente, mayor exposición de viviendas y vidas humanas a la línea de fuego.

Como referencia de magnitud, el Plan de Reconstrucción del Gobierno de Chile para las comunas afectadas por la catástrofe de 2024 se estimó en 1.100 millones de dólares (Gobierno de Chile,

2024). El costo de inversión en el sistema propuesto para cubrir 100 hectáreas de ZIUF crítica —el escenario de mayor densidad— representa una fracción marginal de esa cifra. Es importante señalar, con honestidad metodológica, que esta comparación no implica que el sistema habría evitado el desastre de 2024 en su totalidad: el cálculo riguroso del beneficio esperado requeriría modelar la relación entre minutos de detección temprana y reducción del área quemada bajo condiciones meteorológicas específicas, análisis que excede el alcance de esta memoria pero que constituye una línea de trabajo futuro clara. Lo que sí puede afirmarse con solidez es que, incluso bajo supuestos conservadores sobre el porcentaje de daño evitable, la relación entre la inversión requerida y la magnitud de los costos documentados de los desastres en la región hace que el sistema sea una estrategia de mitigación de riesgo con una relación costo-beneficio favorable.

El beneficio cualitativo más importante —y el que ningún análisis cuantitativo puede capturar completamente— es la protección de vidas humanas. Las 135 personas fallecidas en el evento de 2024 constituyen el argumento más directo y el que originó esta investigación.

### 5.4 Líneas de Trabajo Futuro

El diseño presentado en esta memoria constituye una primera capa de detección hiperlocal, no un sistema cerrado. Su arquitectura modular fue concebida deliberadamente para admitir las siguientes extensiones, identificadas como las de mayor potencial de impacto:

Evolución hacia Edge AI. El algoritmo heurístico actual prioriza la viabilidad computacional inmediata sobre la precisión máxima alcanzable. Una línea de trabajo natural es la migración progresiva hacia modelos de Tiny Machine Learning (TinyML) ejecutados directamente en el ESP32-S3 del nodo sensor, y modelos más complejos como Máquinas de Vectores de Soporte (SVM) o redes LSTM en el nodo fog, que han demostrado en la literatura una capacidad de generalización superior a los enfoques basados en reglas fijas (Warden & Situnayake, 2019; Zhang & Pan, 2024). Esta migración debe ser posterior, no previa, a la validación del enfoque heurístico, dado que requiere volúmenes de datos de entrenamiento que solo una operación piloto puede generar.

Detección de nodos defectuosos y modelos de confianza. La naturaleza distribuida y no supervisada de una red de cientos de sensores en terreno exige mecanismos que distingan entre un fallo de hardware y una lectura anómala genuina. Se identifica como línea de trabajo la implementación de modelos de confianza (trust models) que evalúen dinámicamente la fiabilidad histórica de cada nodo antes de incorporar sus lecturas al algoritmo de fusión (Khan et al., 2025), así como modelos de detección de intrusiones basados en arquitecturas Transformer para identificar comportamiento anómalo que pueda indicar un ciberataque, no solo un fallo físico (Haque & Soliman, 2025).

Mapas de riesgo en tiempo real mediante interpolación geoestadística. Una vez que el sistema

esté operativo con múltiples nodos fog calculando cada uno su FWI hiperlocal, la aplicación de técnicas de interpolación como el Kriging permitiría generar una superficie continua de riesgo para toda el área protegida, estimando el nivel de peligro incluso en las zonas no instrumentadas directamente entre sensores. Esta técnica ha sido validada específicamente para variables climáticas de incendio, con mejoras de precisión cuando se combina con variables auxiliares como la elevación del terreno (Jain & Flannigan, 2017).

Sistema híbrido de confirmación visual. La arquitectura basada en sensores físicos destaca por su inmunidad a las condiciones de visibilidad, pero su potencial máximo se alcanza al integrarse con sistemas de vigilancia visual como un mecanismo de confirmación dual. Una alerta generada por multi-firma, con su coordenada geográfica precisa, podría comandar automáticamente el despeje de un vehículo aéreo no tripulado equipado con detección visual en tiempo real, proveyendo evidencia inmediata que permita a los equipos de emergencia evaluar la magnitud real del evento antes de desplazarse al terreno (Bakirci & Bayraktar, 2024).

Estas cuatro líneas no son requisitos del diseño actual sino su horizonte de evolución natural, y se documentan aquí para que cualquier equipo que continúe este trabajo —ya sea en una próxima memoria, un proyecto de implementación, o una colaboración institucional con CONAF o SENAPRED— tenga clara la hoja de ruta completa, no solo el primer paso.

## 6. Conclusiones

Esta memoria de título responde a una urgencia real, vivida directamente por su autor durante la catástrofe de febrero de 2024, con una propuesta de ingeniería concreta y técnicamente fundamentada. Sus principales conclusiones son:

- Arquitectura adaptada al contexto, no genérica. El diseño no constituye una aplicación estándar de tecnologías IoT preexistentes. Cada decisión arquitectónica —la topología mesh sobre la topología estrella, el procesamiento en niebla sobre el procesamiento centralizado en nube, el supercondensador sobre la batería de litio, el backhaul satelital como respaldo del backhaul celular— está justificada específicamente por las condiciones geomorfológicas, climáticas y de infraestructura de las ZIUF del AMV, y respaldada por el comportamiento documentado de esa infraestructura durante el desastre real que motivó este trabajo.
- Diseño orientado a la resiliencia en el peor escenario. El sistema está diseñado para seguir funcionando precisamente cuando el resto de la infraestructura colapsa. La red mesh continúa operando cuando caen antenas celulares —como ocurrió con 213 antenas durante el evento de 2024—; el nodo fog continúa generando alertas locales cuando se pierde la conexión a internet; la alimentación solar con supercondensadores continúa operando cuando el tendido eléctrico falla. Esta resiliencia por diseño, no como característica añadida posteriormente, es lo que distingue a un sistema de monitoreo convencional de un sistema de misión crítica genuino.
- Viabilidad económica defendible. El costo de hardware para cubrir 100 hectáreas de ZIUF crítica es inferior a 50.000 dólares americanos, con

un costo operacional anual inferior a 1.300 dólares para un despliegue de 200 nodos. Frente a la magnitud de los costos documentados de reconstrucción tras desastres similares en la región, la inversión en capacidad de detección temprana se sostiene como una estrategia de mitigación de riesgo razonable, sin necesidad de recurrir a comparaciones desproporcionadas entre escalas distintas.

- Base técnica accionable para la siguiente fase. El conjunto de artefactos generados —requerimientos formales trazables, diagramas C4 en cuatro niveles de abstracción, modelo entidad-relación completo, selección tecnológica justificada mediante análisis de

trade-offs, y un plan de verificación con criterios de éxito medibles y un prototipo de bajo costo ya especificado— constituye una hoja de ruta directamente accionable. El paso inmediato siguiente, claramente delimitado por este trabajo, es la construcción del prototipo de verificación y la ejecución del plan de pruebas en la zona piloto identificada.

Las comunidades de las ZIUF del Gran Valparaíso no necesitan más estudios sobre su vulnerabilidad: esa vulnerabilidad está documentada con tragedia. Lo que necesitan es que el diseño técnico aquí propuesto se convierta, en una próxima etapa, en una herramienta construida, probada y desplegada.

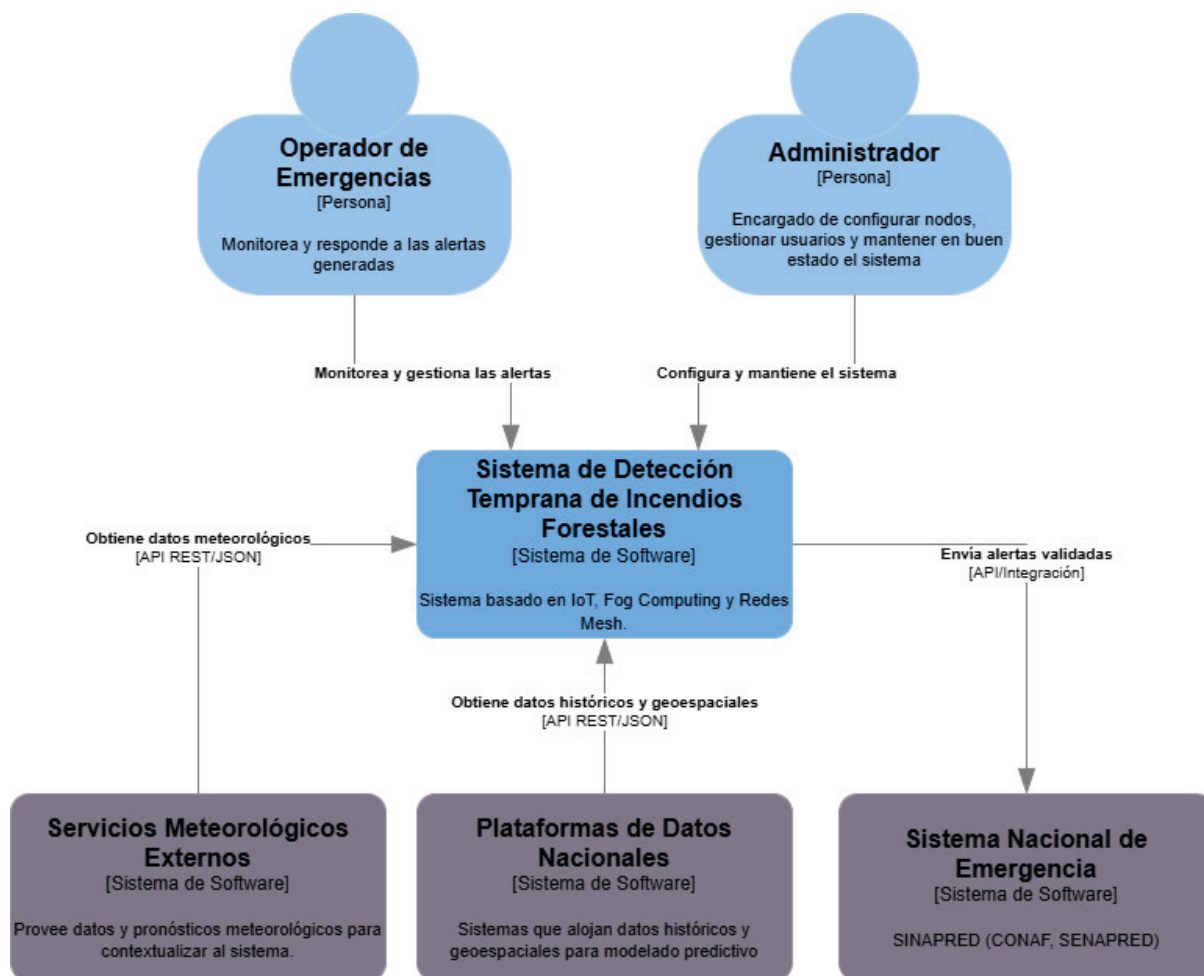
## 7. Referencias bibliográficas principales

- Al Enany, M. O., Harb, H. M., & Attiya, G. (2021). A comparative analysis of MQTT and IoT application protocols. International Conference on Electronic Engineering, IEEE.
- Alegría Tardón, R. E. (2020). Estudio y evaluación del riesgo de incendios forestales en la interfaz urbano-forestal de las comunas que componen el Área Metropolitana de Valparaíso: periodo 2000-2017 [Tesis de Pregrado, Universidad de Chile].
- Alkhafajee, A. R., Al-Muqarm, A. M. A., Alwan, A. H., & Mohammed, Z. R. (2021). Security and performance analysis of MQTT protocol with TLS in IoT networks. IICETA, IEEE.
- Bonomi, F., Milito, R., Zhu, J., & Addepalli, S. (2012). Fog computing and its role in the internet of things. MCC Workshop on Mobile Cloud Computing, ACM.
- Brown, S. (s.f.). C4 Model. <https://c4model.com/>
- Buyya, R., & Dastjerdi, A. V. (Eds.). (2016). Internet of Things: Principles and Paradigms. Morgan Kaufmann.
- Castillo, R. (2019). Cálculo de índice de riesgo de incendios utilizando variables meteorológicas [Tesis de Pregrado, UTFSM].  
<https://doi.org/10.71700/dspace-memorias/1394>
- Certini, G., Moya, D., Lucas-Borja, M. E., & Mastrolonardo, G. (2021). The impact of fire on soil-dwelling biota: A review. Forest Ecology and Management, 488, 119008.
- Chan, C. C., Alvi, S. A., Zhou, X., Durrani, S., Wilson, N., & Yebra, M. (2024). A survey on IoT ground sensing systems for early wildfire detection. IEEE Access.

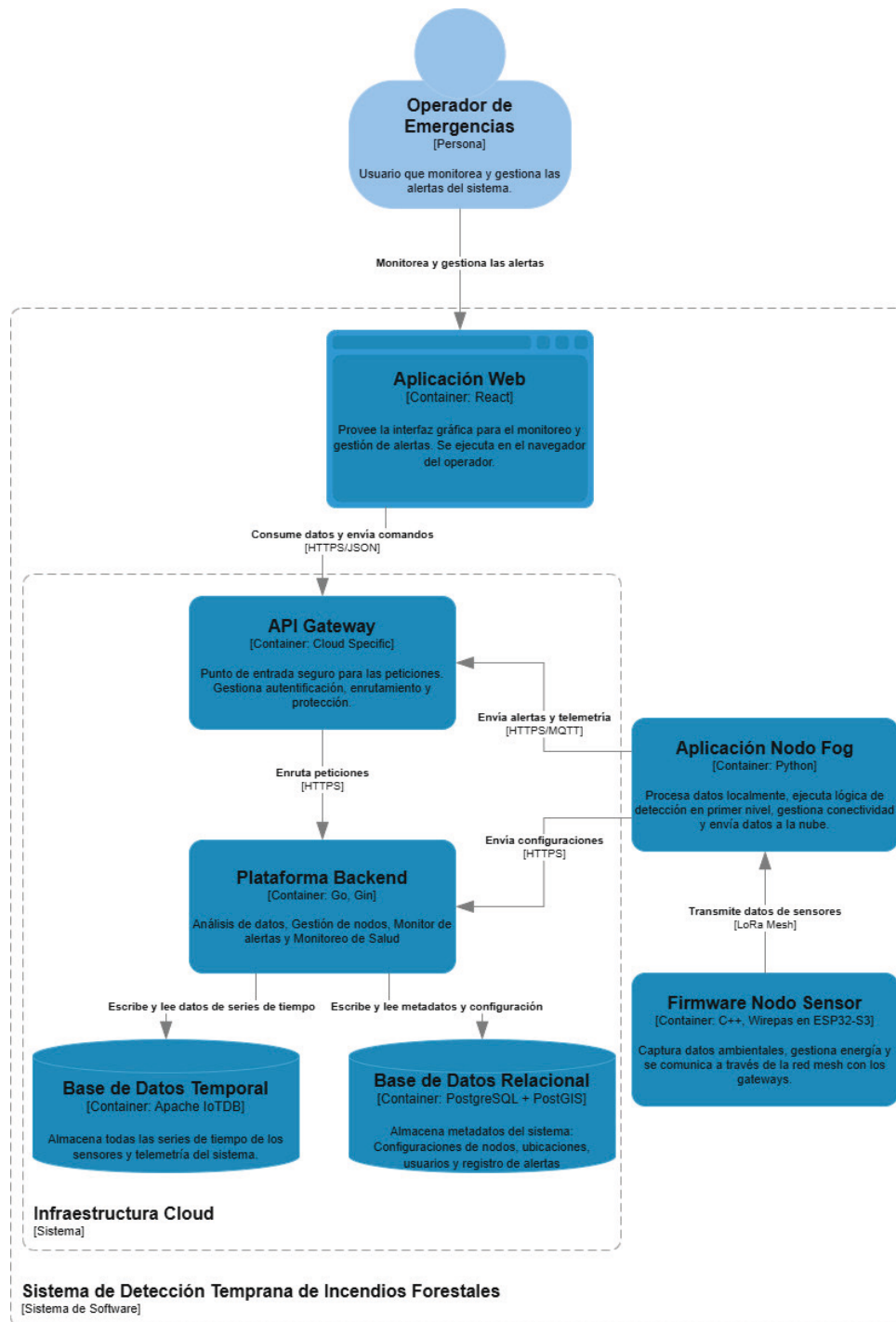
- Chávez, R., Pérez, M., Fuentes, S., Castro, G., Álvarez, L., & Castillo, M. (2024). Mega-Incendio Valparaíso febrero 2024. PUCV & Universidad de Chile.
- Cordero, R. R., Feron, S., Damiani, A., Carrasco, J., Karas, C., Wang, C., Kraamwinkel, C. T., & Beaulieu, A. (2024). Extreme fire weather in Chile driven by climate change and ENSO. *Scientific Reports*, 14(1).
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia [CR2]. (2015). La megasequía 2010-2015: una lección para el futuro.
- EATON. (2024). Technical Data ELX1087: TVA supercapacitors Automotive Grade cylindrical cells.
- Espressif Systems. (2025). ESP32-S3 Series datasheet.
- Gil, M., & Cruz Florencia. (2024). Gestión del riesgo de incendios forestales en Chile: aprendizajes y temas emergentes. *Temas de la Agenda Pública*, 19(170).
- Gobierno de Chile. (2024). Plan de reconstrucción: incendios Viña del Mar, Quilpué, Villa Alemana, región de Valparaíso. Ministerio de Desarrollo Social y Familia.
- Gómez-González, J. L., Marcoulaki, E., Cantizano, A., Konstantinidou, M., Caro, R., & Castro, M. (2025). Simulated fire observables as indicators for optimizing wireless sensor networks in wildfire risk monitoring. *Ecological Indicators*, 175, 113509.
- González, M., et al. (2020). Incendios forestales en Chile: causas, impactos y resiliencia. CR2.
- González Saggia, V. (2023). Plan de innovación en detección temprana de incendios forestales en la Isla Yacyretá [Tesis de Magíster, Universitat de Barcelona].
- Gottuk, D. T., Peatross, M. J., Roby, R. J., & Beyler, C. L. (2002). Advanced fire detection using multi-signature alarm algorithms. *Fire Safety Journal*, 37(4), 381-394.
- Gräßler, I., Wiechel, D., Roesmann, D., & Thiele, H. (2021). V-model based development of cyber-physical systems. *Procedia CIRP*, 100, 253-258.
- Greer, C., Burns, M., Wollman, D., & Griffor, E. (2019). Cyber-physical systems and internet of things. NIST SP 1900-202.
- Jonsson, F. (2016). Component-based software design of embedded real-time systems. DiVA portal.
- Kadir, E. A., Alomainy, A., Daud, H., Maharani, W., Muhammad, N., & Syafitri, N. (2023). Multi Sensor Network System for Early Detection and Prediction of Forest Fires in Southeast Asia. ITNAC, IEEE.
- Larabee, D. (2009). Best Practice - An Introduction to Domain-Driven Design. MSDN Magazine.
- Lertsinsruttavee, A., Kanabkaew, T., & Raksakietisak, S. (2023). Detection of forest fires and pollutant plume dispersion using IoT air quality sensors. *Environmental Pollution*, 338, 122701.
- Liang, Y., Rui, X., Wang, Y., Zhang, J., Zhang, Y., Zhang, X., & Song, W. (2025). An early forest fire detection algorithm based on multi-sensor data fusion. SSRN.
- Liu, R., Yuan, J., & Huang, X. (2024). Benchmarking Time Series databases with IoTDB-Benchmark for IoT scenarios. arXiv.
- Luan, T., Zhou, S., Zhang, G., Song, Z., Wu, J., & Pan, W. (2024). Enhanced Lightweight YOLOX for Small Object Wildfire Detection in UAV Imagery. *Sensors*, 24(9), 2710.
- Martínez, C., et al., & CIGIDEN. (2024). Incendios 02 y 03 de febrero de 2024, Viña del Mar: Informe de daños - fase de emergencia.
- Molina-Pico, A., Cuesta-Frau, D., Araujo, A., Alejandre, J., & Rozas, A. (2016). Forest

- Monitoring and Wildland Early Fire Detection by a Hierarchical WSN. *Journal of Sensors*, 2016.
- Naumann, M., Schimpe, M., Keil, P., Hesse, H. C., & Jossen, A. (2018). Analysis and modeling of calendar aging of a commercial  $\text{LiFePO}_4$ /graphite cell. *Journal of Energy Storage*, 17, 153-169.
- Newman, S. (2015). *Building Microservices*. O'Reilly Media.
- Organización Panamericana de la Salud [OPS] & Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2025). Análisis de la situación de salud pública de los incendios forestales en Sudamérica.
- Özel, B., Alam, M. S., & Khan, M. U. (2024). Review of Modern Forest Fire Detection Techniques. *Information*, 15(9), 538.
- Pang, Y., Wu, Y., & Yuan, Y. (2023). FuF-Det: An Early Forest Fire Detection Method under Fog. *Remote Sensing*, 15(23), 5435.
- Parvin, J. R. (2019). *An Overview of Wireless Mesh Networks*. IntechOpen eBooks.
- Poblete, S. (2024). *Uso de teledetección satelital para la detección de focos de incendios forestales [Tesis de Pregrado, UTFSM]*.
- Saldamli, G., Deshpande, S., Jawalekar, K., Ghopal, P., Tawalbeh, L., & Ertaul, L. (2019). Wildfire detection using wireless mesh network. *IEEE FMEC*.
- Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). Edge computing: vision and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(5), 637-646.
- SmartSemi. (2023). *Embedded MultiMediaCards (eMMCs) vs. Secure Digital (SD) Cards*.
- Subsecretaría de Telecomunicaciones [SUBTEL]. (2024). *Subtel informa: antenas fuera de servicio en la región de Valparaíso por incendios forestales*.
- Tjukanov, T. (2018). *Why should you care about PostGIS?* Medium.
- Van Wagner, C. E., & Service, C. F. (1987). *Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System*.
- Wong, A. W., Goh, S. L., Hasan, M. K., & Fattah, S. (2024). *Multi-Hop and Mesh for LoRa Networks: Recent Advancements, Issues, and Recommended Applications*. *ACM Computing Surveys*, 56(6).
- Yi, S., Li, C., Li, Q., & ACM. (2015). *A survey of Fog Computing: Concepts, applications and issues*. *Workshop on Mobile Big Data*, ACM.

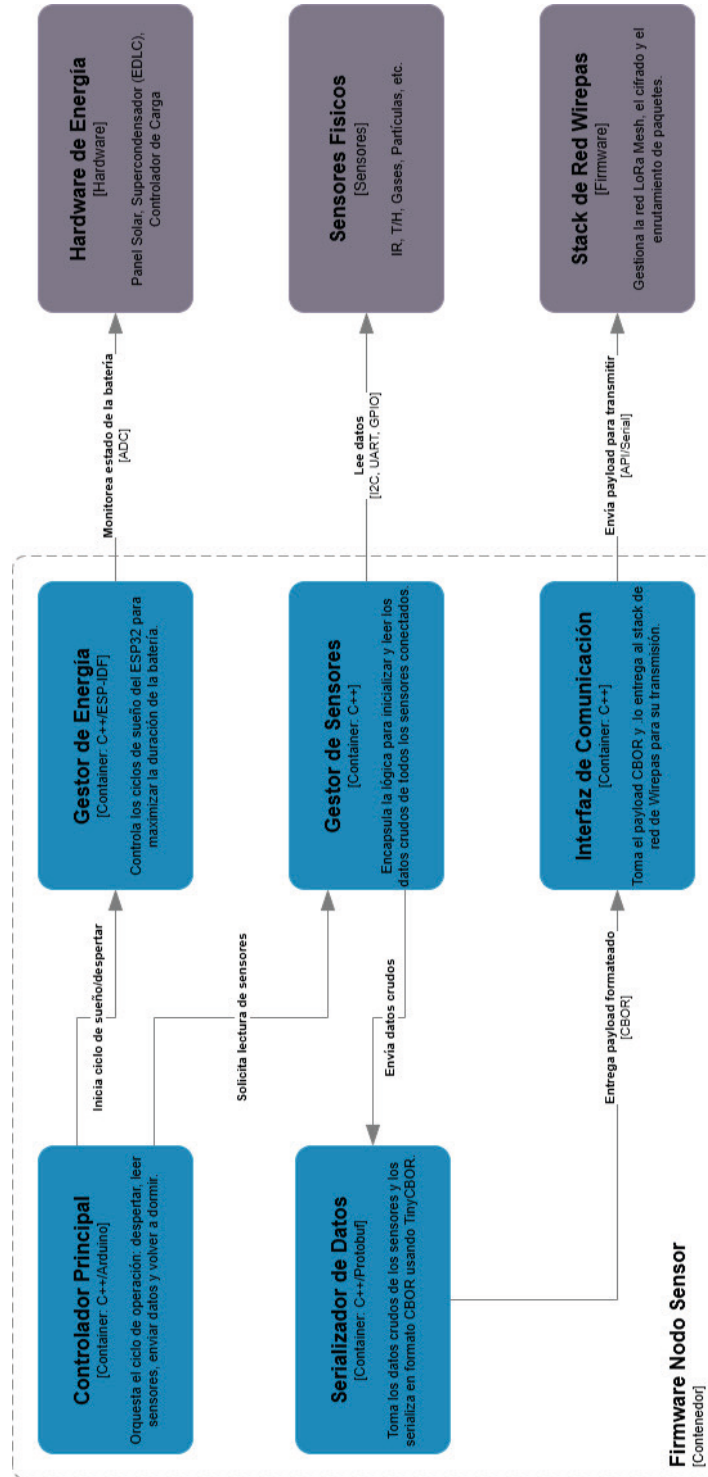
## Anexo A — Diagrama C4 Nivel 1: Diagrama de Contexto



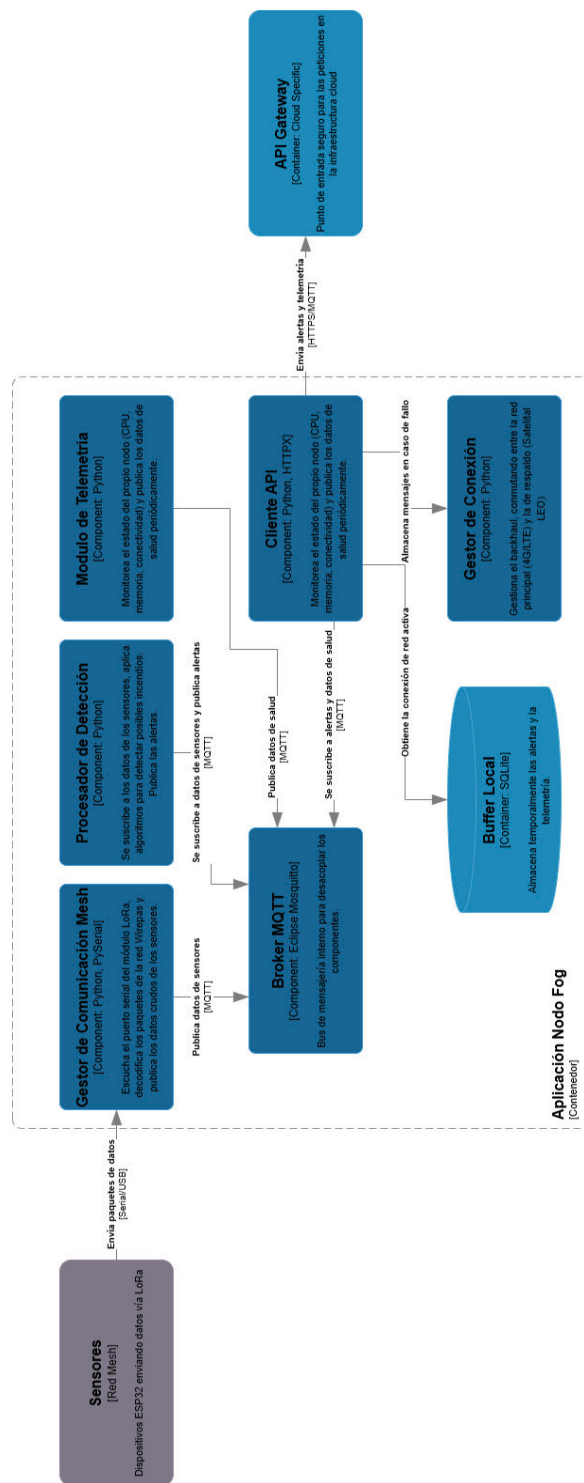
## Anexo B — Diagrama C4 Nivel 2: Diagrama de Contenedores



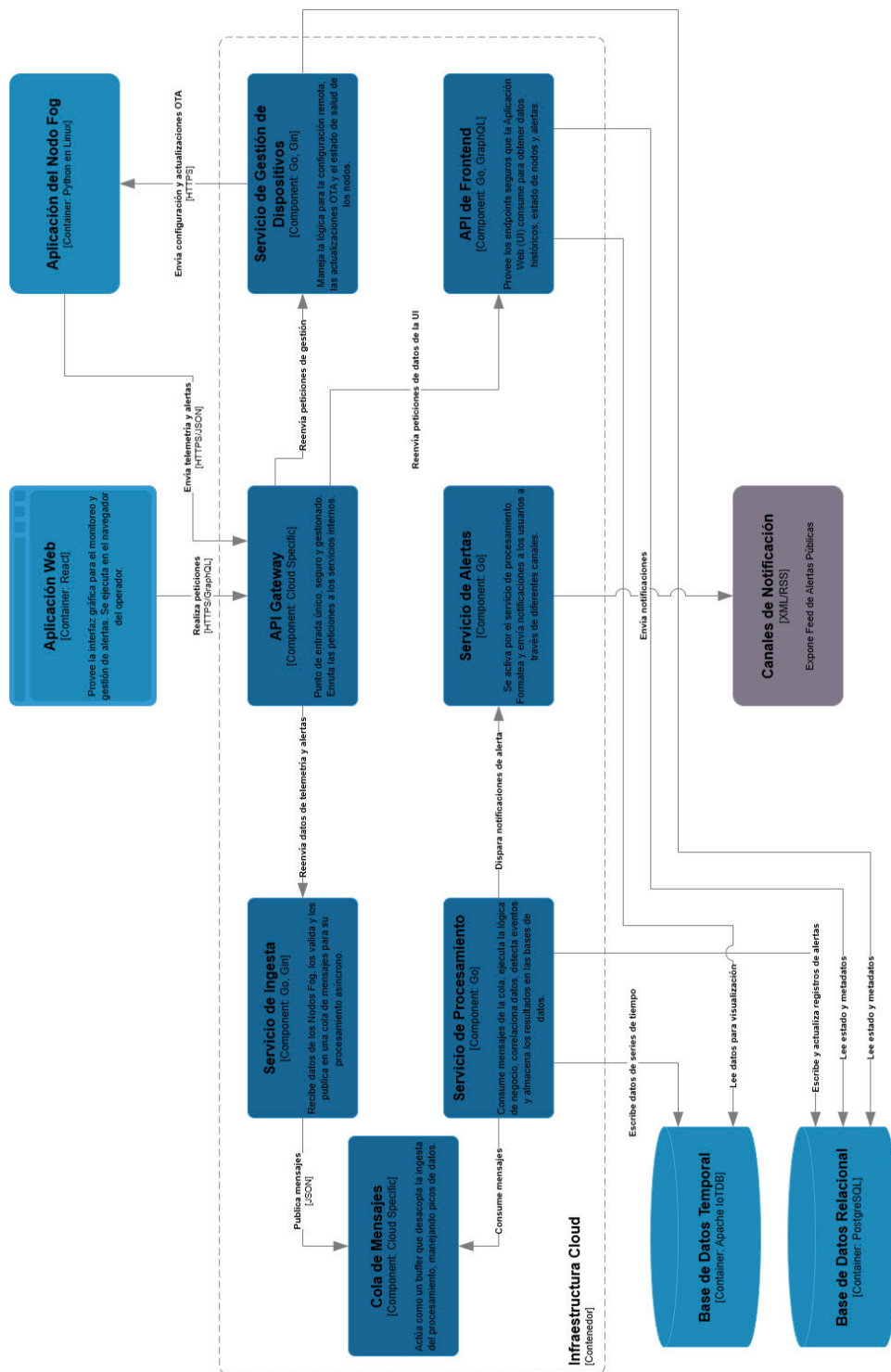
Anexo C — Diagrama C4 Nivel 3: Firmware Nodo Sensor



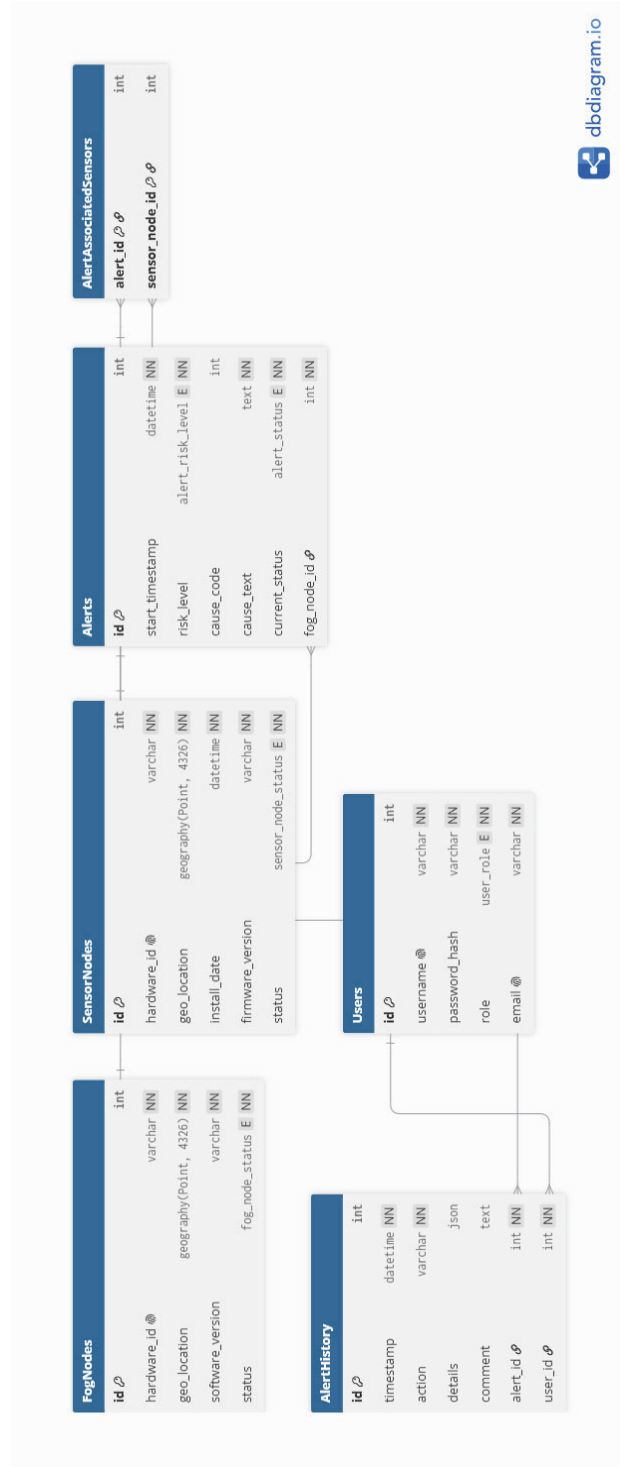
Anexo D — Diagrama C4 Nivel 3: Aplicación Nodo Fog



Anexo E — Diagrama C4 Nivel 3: Infraestructura Cloud



## Anexo F — Modelo Entidad-Relación



Anexo G — Mapa de Zona Piloto Recomendada (Jardín Botánico Nacional, Viña del Mar)





# Propuesta de intervención para el funicular Larraín en Valparaíso

**Tesista: Sara Pinilla Yaupe**

Profesor guía: Uriel Padilla Carreño

Facultad de Ingeniería. Escuela de Construcción

Universidad de Valparaíso



**CRUV**  
CONSEJO DE RECTORES  
DE VALPARAÍSO



**Universidad  
de Valparaíso**  
CHILE



# 1. Resumen

El sistema de funiculares de Valparaíso constituye una infraestructura histórica de transporte que ha sido fundamental para la conectividad entre el plan y los cerros de la ciudad. Sin embargo, el progresivo deterioro de estas estructuras y la falta de acciones sostenidas de conservación han provocado la paralización de varios de estos sistemas, afectando tanto la movilidad urbana como la preservación del patrimonio industrial de la ciudad. En este contexto, el presente trabajo desarrolló una propuesta de intervención para el Funicular Larraín, ubicado en la ciudad de Valparaíso y declarado Monumento Histórico mediante el Decreto N°866 de 1998.

La investigación se estructuró en tres etapas complementarias. En primer lugar, se realizó un diagnóstico técnico-constructivo del estado de deterioro de las estaciones y del plano de rodadura, mediante inspección visual sistemática y la aplicación de ensayos no destructivos en los elementos estructurales de madera, con el fin de determinar su densidad y contenido de humedad. Este análisis permitió identificar pérdidas de materialidad, presencia de patologías biológicas, deformaciones y desprendimientos en diversos elementos estructurales, definiendo así las zonas prioritarias de intervención.

En una segunda etapa se desarrollaron soluciones constructivas de restauración orientadas a la recuperación funcional y estructural del sistema, diseñadas bajo los principios de mínima intervención, compatibilidad material y reversibilidad. Las estrategias propuestas consideraron la recuperación y refuerzo de elementos originales, la sustitución controlada de piezas irrecuperables, el tra-

tamiento de protección biológica y la consolidación estructural de muros, techumbres y sistemas de apoyo.

Finalmente, la investigación incorporó una evaluación de la propuesta mediante la cubicación de partidas, el análisis de precios unitarios y la estimación del presupuesto total de intervención. Los resultados permitieron determinar la viabilidad técnica y económica de la recuperación del funicu-

lar, demostrando su potencial para reintegrarse al sistema de movilidad urbana de Valparaíso.

En conjunto, el trabajo propuso una metodología de diagnóstico y diseño de intervenciones aplicable a infraestructuras patrimoniales de características similares, contribuyendo tanto a la preservación del patrimonio industrial como a la recuperación de sistemas históricos de transporte que forman parte de la identidad urbana de la ciudad.

## 2. Marco teórico

### Antecedentes de los funiculares en Valparaíso

El origen del funicular se remonta al transporte de cargas mineras, donde las pendientes inclinadas dificultaban su acceso. Su desarrollo estuvo ligado al surgimiento del ferrocarril. A nivel mundial, antes de finalizar el siglo XIX, existían alrededor de una veintena de funiculares, tres de los cuales ya estaban ubicados en los cerros de Valparaíso (Morgado, 1993).

Valparaíso se consideró la ciudad con mayor cantidad de funiculares en funcionamiento a nivel mundial, constituyendo una parte representativa del patrimonio industrial de la ciudad tras su proceso temprano de industrialización (Álvarez et al., 2020). En 1883 se construyó el primer funicular en el Cerro Concepción, iniciando la proliferación de estos sistemas de transporte, los cuales alcanzaron cerca de 30 funiculares en 1932, integrándose a la morfología de la ciudad y otorgándole un importante valor histórico, social y turístico (Morgado, 1993; Decreto N°866, 1998).

Su importancia patrimonial se relaciona con el hecho de ser estructuras industriales creadas a finales del siglo XIX y principios del XX, las cuales han cumplido un rol fundamental en la movilidad urbana, conectando los diferentes barrios entre el plan y los cerros (INGÉROP, 2016). Debido a su valor patrimonial, en 1998 el Consejo de Monumentos Nacionales declaró 14 funiculares como Monumentos Históricos, promoviendo su conservación y preservación.

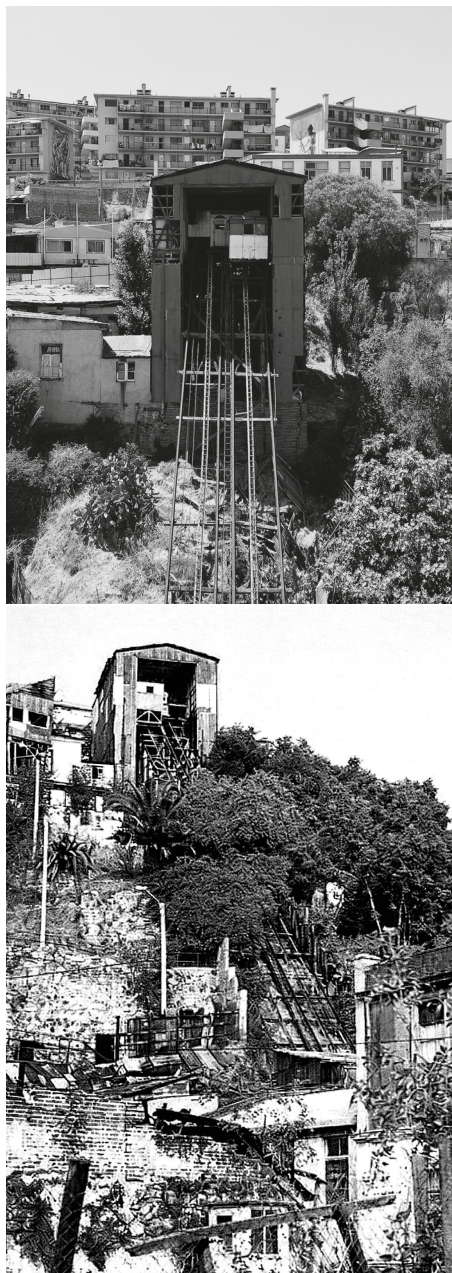
## Funicular Larraín

El funicular Larraín, ubicado en el cerro del mismo nombre, conecta su estación inferior en el pasaje coronel Reyna y con su estación superior en la calle San José. Fue inaugurado el 31 de octubre de 1909, construido por Ricardo Onfray y su propietario original fue la Compañía de Ascensores de Valparaíso S.A. Debido a su valor histórico y cultural, fue declarado Monumento Histórico mediante el Decreto N°866 de 1998.

Construido con tecnología de procedencia alemana, posee un recorrido de 68 metros, una pendiente de 35° y una altura de 43 metros. El sistema permitía el transporte de hasta 7 pasajeros por carro, con un tiempo de desplazamiento aproximado de 35 segundos (Puelles & Ulloa, 2003). Inicialmente funcionó con maquinaria a vapor y posteriormente fue modernizado con sistemas motrices eléctricos.

El funicular se mantuvo operativo de manera ininterrumpida hasta mayo de 2010. Según el Diario La Tercera (2010), su cierre se debió principalmente a los altos costos de mantención y los bajos ingresos generados. En 2012 pasó a ser propiedad del Gobierno Regional de Valparaíso (GORE), siendo entregado en comodato a la Ilustre Municipalidad de Valparaíso para su administración.

Actualmente, el funicular presenta un avanzado estado de deterioro, cuya comparación con su condición original se observa en la Figura 1.



*Figura 1. Funicular Larraín 1909 y 2025.*

*Fuente: Archivo Histórico Patrimonial, Ilustre Municipalidad de Valparaíso, 2016; Elaboración Propia, 2025.*

## Principios de intervención patrimonial

En el ámbito de la conservación del patrimonio construido, la intervención patrimonial se entiende como el conjunto de acciones orientadas a preservar, proteger y recuperar los valores arquitectónicos, históricos y constructivos de un bien, garantizando su permanencia y funcionalidad en el tiempo. Según la *Guía para la elaboración de las normas de intervención de Zonas Típicas o Pintorescas* (Consejo de Monumentos Nacionales, 2020a), toda intervención debe regirse por principios como la conservación, el respeto por los valores y atributos patrimoniales, la compatibilidad material, la mínima intervención, la reversibilidad y la legibilidad de la intervención.

Estos principios son coherentes con los postulados de la Carta de Venecia (1964), que establece que las intervenciones en el patrimonio deben preservar su autenticidad y garantizar su transmisión a las generaciones futuras. En el caso del funicular Larraín, estos criterios orientan las soluciones constructivas propuestas, con el propósito de conservar su integridad estructural y estética, respetando su condición de Monumento Histórico y su valor como testimonio del desarrollo urbano y tecnológico de Valparaíso.

Asimismo, de acuerdo con los lineamientos del Consejo de Monumentos Nacionales (2025), la propuesta de intervención constructiva y patrimonial desarrollada en este estudio se basa en el diagnóstico del estado actual del funicular Larraín y tiene como objetivo orientar futuras acciones de conservación y puesta en valor.

## Propiedades físicas de la madera

Las propiedades físicas de la madera representan parámetros fundamentales para comprender su comportamiento en condiciones de servicio y aplicaciones estructurales. Entre ellas, el contenido de humedad y la densidad resultan especialmente relevantes, ya que condicionan la resistencia mecánica, la estabilidad dimensional y la durabilidad del material (Cuevas, 2003). Debido a su carácter higroscópico, la madera presenta variaciones en su contenido de agua según las condiciones ambientales, influyendo en sus propiedades y favoreciendo procesos de deterioro (NCh 176/1:2019).

### Humedad

La humedad en la madera se conoce como la proporción de agua presente en relación con su peso seco expresado como porcentaje (Cuevas, 2003). De acuerdo con la NCh 1198:2024, contenidos de humedad superiores al 30% pueden favorecer el desarrollo de ataques biológicos y comprometer la durabilidad del material. Este valor se relaciona con el punto de saturación de la fibra (PSF), situado en torno al 30%, a partir del cual aumenta el riesgo de deterioro por hongos (CORMA, 2003).

La NCh 176/1:2019 establece como método de referencia para determinar la humedad el secado en estufa. Sin embargo, debido a su carácter destructivo y los tiempos prolongados de análisis, los medidores eléctricos han adquirido relevancia como técnica de evaluación en terreno, permitiendo resultados inmediatos sin extracción de material (CORMA, 2003).

## Densidad

La densidad de la madera corresponde a la relación entre su masa y el volumen que ocupa, siendo una de las propiedades físicas más relevantes para la caracterización del material (Cuevas, 2003). Este parámetro permite comparar distintas especies y evaluar el comportamiento mecánico y estructural de la madera, encontrándose influenciado por su contenido de humedad (NCh 176/2, 1986).

La NCh 176/1:2019 establece diferentes denominaciones de densidad según el estado de humedad en que se determine la masa y el volumen de la pieza. Por ello, su evaluación debe considerar condiciones de humedad equivalentes para una adecuada caracterización del material (CORMA, 2003).

## Patologías Constructivas

Las causas que originan daños y patologías en la construcción han sido ampliamente estudiadas en la literatura técnica. Varela (2010) las agrupa en factores indirectos, asociados a deficiencias en la etapa de proyecto, ejecución, materiales o mantenimiento, y en factores directos. Por su parte, Broto (2006) señala que estos últimos se manifiestan mediante lesiones físicas, mecánicas o químicas, destacando la importancia de reconocer tanto la causa como la manifestación de la lesión para obtener un diagnóstico preciso del estado de los inmuebles. Esta clasificación se presenta en la Tabla 1.

### a. Humedad

La humedad constituye una de las principales patologías en la construcción, manifestándose de manera no deseada en distintos materiales y elementos. Según Alvarado (2001), puede presentarse como humedad de absorción, capilaridad, filtración y condensación.

### b. Hongos

Los hongos se desarrollan en el interior y exterior de las construcciones, afectando los materiales y generando su deterioro. En la madera, Ortega (2005) distingue hongos cromógenos, que afectan principalmente su superficie, y hongos de pudrición, que requieren altos niveles de humedad y provocan una degradación destructiva, pudiendo presentarse como pudrición parda o blanca.

### c. Termitas

Las termitas constituyen uno de los principales agentes biológicos de deterioro de la madera, ya que se alimentan de celulosa y generan pérdidas en sus propiedades. Ortega (2005) identifica en Chile termitas subterráneas, de muebles, de madera seca y de madera húmeda, diferenciadas según su hábitat y forma de ataque.

### d. Fisuras y grietas

Corresponden a rupturas en el material que pueden debilitar o inutilizar los elementos constructivos. Su aparición se asocia a movimientos del terreno, erosión, envejecimiento natural o variaciones de temperatura (Alvarado, 2001).

### e. Deformaciones

Corresponden a cambios en la forma de los elementos constructivos producto de esfuerzos me-

Tabla 1. Tipos de daños y patologías

| Causas     | Lesiones         | Tipos de daños/patologías                                                        |
|------------|------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Indirectas | De proyecto      | Errores en elección de material, técnicas o del sistema constructivo             |
|            | De ejecución     | Deficiencias en el proceso constructivo<br>Errores en colocación                 |
|            | De material      | Defectos de fabricación<br>Cambios de materiales                                 |
|            | De mantenimiento | Falta de mantenimiento preventivo y correctivo.                                  |
| Directas   | Físicas          | Humedad<br>Erosión<br>Suciedad                                                   |
|            | Mecánicas        | Deformaciones<br>Grietas<br>Fisuras<br>Desprendimiento<br>Erosiones mecánicas    |
|            | Químicas         | Eflorescencias<br>Corrosión<br>Organismos (hongos, mohos, termitas)<br>Erosiones |

*Fuente: Elaboración propia basada en Broto (2006) y Varela (2010).*

cánicos o cargas externas, afectando su comportamiento y estabilidad. Entre las principales se encuentran el desnivel y el desplome, asociados a deformaciones del elemento y fallas en la cimentación (Broto, 2006).

#### f. Desprendimiento

Corresponde a la separación de revestimientos o acabados de los elementos constructivos, pudiendo originarse por deficiencias en la ejecución, calidad de los materiales, acciones mecánicas, humedad o agentes externos (Broto, 2006).

#### g. Corrosión

Corresponde a la pérdida progresiva de material metálico debido a procesos electroquímicos, pudiendo comprometer la resistencia y estabilidad del elemento afectado (Broto, 2006).

## Ensayos no destructivos aplicados en madera

Los ensayos no destructivos constituyen herramientas clave para evaluar las propiedades y el estado de conservación de la madera sin comprometer significativamente su integridad. Su aplicación permite obtener antecedentes técnicos para la toma de decisiones respecto a la conservación de elementos estructurales (Conde et al., 2007). Entre los ensayos utilizados destacan el extractor de tornillos y el xilohigrómetro, instrumentos que permiten estimar la densidad y el contenido de humedad de la madera.

## Extractor de tornillos

El extractor de tornillos corresponde a un método pseudo no destructivo que determina la fuerza máxima requerida para arrancar un tornillo insertado en la madera (Basterra et al., 2009). Este valor presenta una correlación con propiedades físicas del material, como la densidad y el módulo de elasticidad. Debido a que entrega información localizada, se recomienda realizar mediciones en zonas representativas del elemento estructural, permitiendo obtener antecedentes útiles para la evaluación de la madera (Fakopp Enterprise, 2010).

## Xilohigrómetro

El xilohigrómetro es un instrumento utilizado para determinar el contenido de humedad de la madera mediante la medición de sus propiedades eléctricas o dieléctricas, permitiendo obtener resultados rápidos sin necesidad de extraer probetas (Basterra et al., 2009). Existen equipos resistivos y capacitivos, diferenciados por su método de medición y nivel de precisión. Según la NCh 176/1:2019, su uso se admite en maderas con contenidos de humedad entre 7% y 28%, debiendo estar calibrado para la especie evaluada y mantener un margen de error adecuado.

## 3. Metodología

La investigación adoptó un enfoque mixto, integrando elementos cualitativos y cuantitativos. La dimensión cualitativa se basó en la recopilación y análisis de información histórica y documental, además de inspecciones visuales en terreno, mientras que la dimensión cuantitativa se sustentó en la obtención de datos técnicos mediante mediciones y ensayos no destructivos aplicados en elementos de madera.

La metodología se estructuró en tres etapas principales: diagnóstico del estado actual del funicular Larraín, desarrollo de soluciones constructivas compatibles con su valor patrimonial y valorización preliminar de las intervenciones propuestas.

### Diagnóstico del estado actual

El diagnóstico correspondió a la etapa inicial del estudio y tuvo como objetivo caracterizar las condiciones actuales del funicular Larraín. Para ello, se emplearon dos herramientas principales: la inspección visual de las estaciones y del plano de rodadura, y la aplicación de ensayos no destructivos en elementos de madera de pino oregón seleccionados.

### Inspección visual

La inspección visual se constituyó como la herramienta principal para la evaluación inicial del funicular Larraín, al permitir detectar de manera directa los

|                                                                                                                                                   |                                    |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------|
| <br><b>Universidad<br/>de Valparaíso</b><br><small>CHILE</small> | <b>FICHA DE INSPECCIÓN TÉCNICA</b> | <b>N°</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------|

**1. Antecedentes generales**

|                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Descripción general</b><br>Ubicación: _____<br>Sector: _____<br>Sistema constructivo: _____<br><br><b>Elementos constructivos</b><br>Estructura: _____<br>Revestimiento: _____<br>Puertas y ventanas: _____<br>Otro: _____ | <b>Registro fotográfico</b><br><div style="border: 1px solid black; height: 150px; width: 100%;"></div> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**2. Evaluación por daño**

| Tipos de daños     | Estructura | Revestimiento | Puertas y ventanas | Otro |
|--------------------|------------|---------------|--------------------|------|
| Humedad            |            |               |                    |      |
| Hongos             |            |               |                    |      |
| Termitas           |            |               |                    |      |
| Fisuras/grietas    |            |               |                    |      |
| Desnivel           |            |               |                    |      |
| Desplome           |            |               |                    |      |
| Desprendimiento    |            |               |                    |      |
| Corrosión          |            |               |                    |      |
| Otro (especifique) |            |               |                    |      |

\*Leve, moderado, severo: se considera su evaluación según criterios establecidos en informe y su evaluación se determinará mediante puntaje.

**3. Alcance del daño**

|                     | Estructura | Revestimiento | Puertas y ventanas | Otro |
|---------------------|------------|---------------|--------------------|------|
| Focalizado          |            |               |                    |      |
| Parcial (<50%)      |            |               |                    |      |
| Generalizado (>50%) |            |               |                    |      |

\*Elaborada con base en el Anexo 6: "Criterios para el estado de conservación" de la Guía Técnica de Normas de Intervención del Consejo de Monumentos Nacionales (CMN), 2020.

**4. Clasificación del daño**

|         | Estructura | Revestimiento | Puertas y ventanas | Otro |
|---------|------------|---------------|--------------------|------|
| Bueno   |            |               |                    |      |
| Regular |            |               |                    |      |
| Malo    |            |               |                    |      |

\*Bueno: El inmueble no presenta daños, o existen algunos de manera focalizada. Requiere acciones de **mantención**.  
 \*Regular: El inmueble presenta daños de manera parcial. Requiere de acciones de **restauración**.  
 \*Malo: El inmueble presenta daños de manera generalizada. Requiere acciones de **reconstrucción**.

**5. Conclusión y observaciones**

**SPY**
**Fecha:**

*Figura 2. Ficha de inspección técnica*  
*Fuente: Elaboración propia, 2025.*

daños presentes en los diferentes componentes de la estructura. Su aplicación se enfocó en recorrer sistemáticamente las estaciones y el plano de rodadura mediante registro fotográfico y captura aerofotogramétrica, registrando evidencias de deterioro.

Para complementar esta evaluación, se emplearon instrumentos de medición que permitieron cuantificar deformaciones, fisuras y grietas observadas. Con el fin de garantizar un levantamiento ordenado y sistemático, se elaboraron fichas de inspección técnica que permitieron consignar de manera estandarizada cada observación realizada en terreno, asignando tipos de daño, evaluación del daño y alcance del daño, siguiendo criterios de evaluación recomendados por el Consejo de Monumentos Nacionales (CMN).

## Criterios para la evaluación visual

Con el fin de sistematizar la información obtenida durante la inspección visual y facilitar la interpretación de los resultados, se definieron criterios de evaluación específicos para cada tipo de daño identificado en el funicular Larraín.

Los criterios se desarrollaron considerando distintos tipos de daño presentes en sistemas constructivos patrimoniales, organizados según su materialidad predominante. En elementos de madera se incluyeron patologías como humedad, hongos y ataque por termitas; en albañilería y hormigón se consideraron fisuras y grietas; mientras que en la materialidad general se registraron daños asociados a desnivel, desplome, desprendimiento y corrosión.

Para cada tipo de daño se establecieron criterios que permitieron evaluar de manera objetiva su magnitud y efectos potenciales, contribuyendo a obtener un diagnóstico más preciso y a jerarquizar las zonas que requerían intervención prioritaria.

## Aplicación de ficha de inspección

Con el fin de otorgar mayor rigurosidad y objetividad al diagnóstico, se incorporó en las fichas de inspección técnica un sistema de clasificación estandarizado, inspirado en metodologías utilizadas en la evaluación de inmuebles patrimoniales y estudios de percepción, basado en la escala tipo Likert.

El sistema consideró dos variables principales: la evaluación del daño y el alcance del daño, permitiendo cuantificar visualmente el deterioro de los elementos inspeccionados. A partir de estos criterios, los elementos fueron clasificados según su estado de conservación como bueno, regular o malo, definiendo además la intervención recomendada correspondiente a mantención, restauración o reconstrucción.

**Tabla 2. Grado de intensidad del ataque por corrosión**

| Grado    | Descripción                                                                                                                             |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Leve     | El elemento no presenta signos visibles de corrosión ni manchas de óxidos.                                                              |
| Moderado | El elemento presenta corrosión u óxido visible en la superficie, con rugosidad o picaduras iniciales, pero mantiene su forma y sección. |
| Severo   | El elemento presenta corrosión generalizada, desprendimiento de escamas de óxido y pérdida evidente de sección o forma estructural.     |

*Fuente: Elaboración propia basada en ISO (2007).*

## Ensayos no destructivos

Para complementar la inspección visual, se aplicaron ensayos no destructivos en elementos de madera seleccionados del funicular, permitiendo obtener información cuantitativa sobre su densidad y contenido de humedad, constituyendo una base objetiva para el diagnóstico.

Los elementos seleccionados correspondieron a pilares, vigas y diagonales localizados en el funicular, debido a su relevancia estructural en la estabilidad, rigidez y comportamiento mecánico general de la estructura.

La densidad de la madera se determinó mediante un extractor de tornillos aplicado directamente sobre los elementos seleccionados, mientras que el contenido de humedad se evaluó mediante un xilohigrómetro. Adicionalmente, las mediciones de humedad fueron contrastadas mediante el método de secado en estufa, según lo establecido en la NCh 176/1:2019, con el propósito de mejorar la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos.

## Soluciones constructivas de la intervención

En esta etapa se desarrollaron las acciones necesarias para determinar y definir las alternativas técnicas más adecuadas para la intervención del funicular Larraín. El propósito fue proponer soluciones que garantizaran la compatibilidad constructiva y patrimonial del bien, asegurando su conservación y funcionalidad futura.



*Figura 3. Extractor de tornillos y Xilohigrómetro.  
Fuente: Elaboración propia, 2025.*

En primer lugar, se realizó un análisis de soluciones constructivas aplicables a los elementos críticos de las estaciones y del plano de rodadura. Este análisis se fundamentó en los resultados del diagnóstico, referencias técnicas contenidas en licitaciones previas y la Guía de normas de intervención del Consejo de Monumentos Nacionales (CMN), con el fin de seleccionar soluciones compatibles con el estado actual del bien y los principios de mínima intervención, reversibilidad y compatibilidad material.

El siguiente paso correspondió al desarrollo de las soluciones constructivas, en el cual se precisaron las técnicas de intervención más adecuadas para cada caso, considerando la naturaleza de los materiales, los requerimientos de durabilidad y las recomendaciones de fabricantes.

Finalmente, se contempló la elaboración de detalles constructivos, los cuales representaron gráficamente las soluciones seleccionadas para los elementos críticos. Estos detalles constituyeron un complemento fundamental para la propuesta, ya que permitieron visualizar la forma en que se ejecutarían las intervenciones, precisando uniones, refuerzos, empalmes y encuentros.

## Valorización de la propuesta de intervención

Esta etapa final tuvo como propósito estimar los costos asociados a la ejecución de las soluciones constructivas definidas para el funicular Larraín, estableciendo un presupuesto preliminar referencial que permitiera dimensionar económicamente la intervención propuesta.

El proceso comenzó con la elaboración de cubicaciones, considerando las partidas definidas, las dimensiones de los elementos a intervenir y los planos existentes, con el fin de obtener cantidades de obra coherentes con el diagnóstico técnico. Posteriormente, se realizó un análisis de precio unitario, asignando valores referenciales a cada partida a partir de manuales técnicos, rendimientos y costos de mercado.

Con las cubicaciones y los precios unitarios definidos, se procedió al cálculo del costo total de la propuesta de intervención, considerando los costos directos e indirectos, permitiendo obtener una visión global de la magnitud económica requerida para la puesta en valor del funicular Larraín.

Finalmente, se contempló la revisión de la propuesta de intervención, con el fin de verificar la coherencia técnica, constructiva y económica del presupuesto obtenido, asegurando su concordancia con los objetivos del estudio y los criterios de compatibilidad patrimonial adoptados.

## Resultados del diagnóstico del funicular Larraín

### Fichas de inspección

El diagnóstico del funicular Larraín se elaboró a partir de 26 fichas de inspección técnica correspondientes a la estación superior, plano de rodadura y estación inferior. Este levantamiento permitió obtener un panorama integral del estado actual de los elementos constructivos, identificando los principales daños y clasificando su condición según niveles de conservación.

Tabla 3. Resumen resultados de fichas de inspección técnica

| Ubicación         | N° de Ficha | Sector            | Sistema constructivo                      | Clasificación del daño |
|-------------------|-------------|-------------------|-------------------------------------------|------------------------|
| Estación superior | 1           | Sala de máquinas  | Muro de sobrecimiento                     | Regular                |
|                   | 2           |                   | Muro norte                                | Malo                   |
|                   | 3           |                   | Muro sur                                  | Malo                   |
|                   | 4           |                   | Muro poniente                             | Malo                   |
|                   | 5           |                   | Muro oriente                              | Malo                   |
|                   | 6           |                   | Bodega interior                           | Regular                |
|                   | 7           |                   | Escalera                                  | Malo                   |
|                   | 8           |                   | Pavimento interior                        | Malo                   |
|                   | 9           | Hall de acceso    | Puente de acceso                          | Malo                   |
|                   | 10          |                   | Cielo                                     | Malo                   |
|                   | 11          |                   | Revestimiento interior                    | Regular                |
|                   | 12          |                   | Pavimento interior y entramado de piso    | Regular                |
|                   | 13          |                   | Puertas y ventanas                        | Regular                |
|                   | 14          | Cubierta          | Techumbre                                 | Malo                   |
| Estación inferior | 15          | Pasillo de acceso | Fachada principal                         | Malo                   |
|                   | 16          |                   | Escalera de acceso                        | Malo                   |
|                   | 17          |                   | Tabiquería y revestimiento interior       | Malo                   |
|                   | 18          | Hall de acceso    | Pavimento interior                        | Malo                   |
|                   | 19          |                   | Tabiquería y revestimiento interior       | Regular                |
|                   | 20          |                   | Revestimiento y tabiquería de zona de car | Malo                   |
|                   | 21          |                   | Puertas y ventanas                        | Malo                   |
| Plano de rodadura | 22          | Cubierta          | Cielo                                     | Malo                   |
|                   | 23          |                   | Techumbre                                 | Regular                |
|                   | 24          | Zona Baja         | Plano de rodadura                         | Malo                   |
|                   | 25          | Zona Alta         | Plano de rodadura                         | Malo                   |
|                   | 26          |                   | Estructura interior y uniones             | Malo                   |

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En términos generales, los resultados evidenciaron un predominio de elementos en mal estado. Del total de fichas levantadas, 19 fueron clasificadas como malas, correspondientes al 73 % del total, mientras que el 27 % restante alcanzó una condición regular, sin registrarse elementos en estado bueno. Esta distribución confirmó un deterioro avanzado y generalizado de la estructura, asociado principalmente a la falta de mantención prolongada y a la exposición constante a factores ambientales.

Los daños más recurrentes correspondieron a humedad, desprendimientos y corrosión, a los que se sumaron, en sectores específicos, desnivel, desplo-

me, termitas y hongos, evidenciando la necesidad de desarrollar acciones de intervención orientadas a recuperar la estabilidad estructural y resguardar su valor patrimonial.

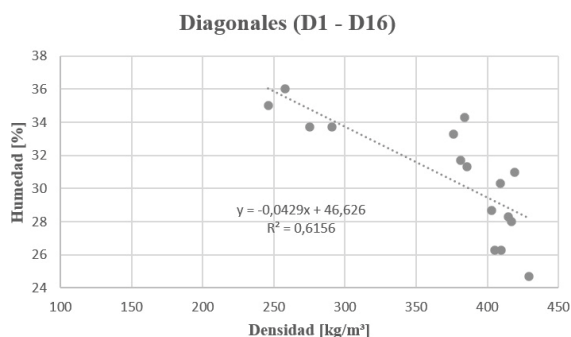
## Ensayos no destructivos

Los ensayos realizados mediante extractor de tornillos y xilohigrómetro permitieron complementar la inspección visual mediante parámetros cuantitativos relacionados con la densidad y el contenido de humedad de los elementos estructurales de madera.

Los resultados del extractor de tornillos evidenciaron una pérdida progresiva de densidad en los sectores más expuestos, donde el 60 % de los pilares y el 50 % de las diagonales no cumplieron con el criterio de aceptación establecido. Destacó la viga V1 como el elemento más crítico del conjunto, alcanzando una densidad promedio de  $152 \text{ kg/m}^3$ , equivalente a una reducción del 72 % respecto al valor de referencia.

Por su parte, las mediciones mediante xilohigrómetro registraron contenidos de humedad entre 22,7 % y 36,0 %, identificando mayores niveles en los elementos con mayor exposición ambiental y cercanos al punto de saturación de la fibra, condición que favoreció los procesos de biodeterioro de la madera.

La comparación entre ambos métodos confirmó la relación inversamente proporcional entre la densidad y la humedad, evidenciando que los elementos con mayor contenido de agua presentaron una disminución de su capacidad resistente y un mayor grado de deterioro.

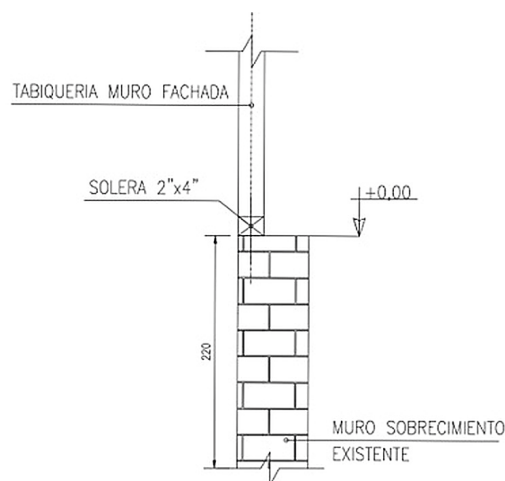


**Figura 4.** Correlación entre densidad y humedad en diagonales. *Fuente:* Elaboración propia, 2025.

## Resultados de la propuesta de soluciones constructivas

A partir del diagnóstico realizado en el funicular Larraín, se definieron 22 partidas de intervención, correspondientes a soluciones de restauración y reconstrucción aplicadas en la estación superior, estación inferior y plano de rodadura. Las propuestas desarrolladas abarcaron sistemas de albañilería, estructuras de madera y acero, pavimentos, cubiertas, carpinterías, elementos de circulación y componentes asociados al sistema de desplazamiento del funicular, respondiendo al nivel de deterioro identificado en cada elemento.

Como resultado del desarrollo de las soluciones, se establecieron las especificaciones técnicas y detalles constructivos de cada partida. Como ejemplo, la reposición de los muros de fachada consideró una nueva estructura de madera de pino oregón con solera y entramado de 2" x 4", revestimiento estructural mediante placas OSB de 15 mm, incorporación de aislación térmica de lana de vidrio de 50 mm, revestimiento interior con machihembrado de pino oregón y terminación en esmalte al agua, además de un revestimiento exterior de planchas de zincaluminum con protección anticorrosiva.



**Figura 5.** Detalle coronamiento muro sobrecimiento con tabiquería muro fachada.

**Fuente:** Elaboración propia, 2025.

## Resultados de la valoración para la propuesta de intervención

La valoración económica de la propuesta de intervención del funicular Larraín determinó un costo total estimado de \$1.317.947.325 CLP, correspondiente a las obras necesarias para recu-

perar las estaciones superior e inferior, además del plano de rodadura.

Los resultados indicaron que el plano de rodadura correspondió al sector de mayor incidencia económica, concentrando aproximadamente el 60 % del costo de la intervención, debido principalmente a la reposición de la infraestructura portante, compuesta por estructura de acero, durmientes de madera, fijaciones y rieles. En segundo lugar, la estación superior representó cerca del 30 % del presupuesto, asociada principalmente a la reposición de muros, estructuras de techumbre, revestimientos y otros elementos de terminación. Finalmente, la estación inferior concentró el menor porcentaje del costo total, con intervenciones orientadas principalmente a la recuperación de tabiques, cubiertas y terminaciones interiores.

Estos resultados reflejaron que la mayor inversión se concentró en los elementos estructurales y en aquellos sistemas que presentaron un mayor grado de deterioro, permitiendo dimensionar la magnitud económica necesaria para la recuperación y puesta en valor del funicular Larraín.

## 4. Conclusiones

Los resultados de la investigación permitieron constatar que el funicular Larraín presentó un estado avanzado de deterioro que comprometió su estabilidad estructural y su valor patrimonial. El diagnóstico realizado evidenció que el 73 % de los elementos evaluados se encontraba en condición mala y el 27 % en condición regular, sin registrarse componentes en buen estado. Los ensayos no destructivos complementaron esta evaluación, confirmando la disminución de densidad y el aumento del contenido de humedad en los elementos de madera, condiciones asociadas a la exposición prolongada a la humedad, la acción de agentes biológicos y la falta de mantenimiento.

A partir de estos antecedentes, se desarrolló una propuesta de intervención basada en criterios de compatibilidad material, mínima intervención y conservación del carácter patrimonial del inmueble. Las soluciones planteadas consideraron acciones de restauración y reconstrucción en las estaciones y el plano de rodadura, mediante la recuperación de elementos conservables, la reposición de componentes con deterioro irreversible y la incorporación de materiales y tratamientos compatibles que permitieron recuperar las condiciones de seguridad y funcionalidad del sistema.

La valorización económica permitió estimar un costo total de \$1.317.947.325 CLP, incluyendo costos directos, gastos generales, utilidades e IVA. Los resultados indicaron que el plano de rodadura concentró la mayor inversión debido a la complejidad de las intervenciones requeridas en su infraestructura portante, mientras que las estaciones presentaron menores costos al permitir la conservación

parcial de algunos elementos originales. De esta manera, la propuesta constituyó una base técnica y económica referencial para futuras etapas de diseño y restauración del funicular.

Finalmente, la investigación permitió actualizar el diagnóstico arquitectónico y estructural del funicular Larraín, entregando información que pudo servir como base para futuras intervenciones. No obstante, se recomendó complementar los antecedentes obtenidos mediante estudios geotécnicos, estructurales y electromecánicos, además de implementar planes de mantenimiento preventivo orientados al control de humedad y protección frente a agentes de biodeterioro. Asimismo,

la metodología desarrollada pudo ser aplicada en otros funiculares patrimoniales de Valparaíso, contribuyendo a su conservación y puesta en valor.

En este sentido, la recuperación del funicular Larraín no solo representó una oportunidad para conservar un bien de alto valor histórico y técnico, sino también para restituir un sistema de transporte que históricamente contribuyó a la conectividad entre el plan y los cerros de Valparaíso. Su eventual reactivación permitiría recuperar parte de la identidad urbana de la ciudad, integrando la preservación del patrimonio industrial con las necesidades actuales de movilidad y uso del espacio urbano.

## 5. Referencias

- Alvarado, J., & Andrade, V. (2001). *Proyecto de restauración Escuela Granja Pedro Aguirre Cerda F-511, Pocuro, Calle Larga*. Valparaíso, Chile: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Álvarez, L., Barría, C., & Tirado, C. (2020). *Los "ascensor" de primera generación como patrimonio industrial de Valparaíso, Concepción, Cordillera y Espíritu Santo. La revolución del cable acerado (1850-1920)*.
- Basterra, A., Acuña, L., Casado, M., Ramón, G., & López, G. (2009). *Diagnóstico y análisis de estructuras de madera mediante técnicas no destructivas: Aplicación a la Plaza Mayor de Chinchón (Madrid)*. 61(516), pp. 21-36.
- Broto, C. (2006). *Enciclopedia Broto de patologías de la construcción*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili.
- Conde García, M., Fernández-Golfín Seco, J. I., & Hermoso Prieto, E. (2007). *Improving the prediction of strength and rigidity of structural timber by combining ultrasound techniques with visual grading parameters*. *Materiales de Construcción*, 57(288), pp. 49-59.
- Consejo de Monumentos Nacionales. (1998). *Decreto N°866. Declara Monumento Histórico 14 ascensores de Valparaíso*.
- Consejo de Monumentos Nacionales. (2020a). *Guía para la elaboración de las normas de intervención de zonas típicas: Complemento al reglamento sobre zonas típicas o pintorescas de la Ley 17.288 sobre Monumentos Nacionales*. Santiago, Chile.
- Consejo de Monumentos Nacionales. (2025). *Autorización para intervención en Monumentos Históricos*.

- Corporación Chilena de la Madera (CORMA). (2004). *Manual para la construcción de viviendas en madera*. Santiago, Chile.
- Cuevas, E. (2003). *Propiedades físicas y mecánicas de la madera. Material de apoyo en propiedades físicas y mecánicas*. Talca, Chile: Universidad de Talca.
- INGÉROP Ghisolfo. (2016). *Etapas IV: Memoria descriptiva de arquitectura – Ascensor Larraín*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Arquitectura.
- Instituto Nacional de Normalización. (1986). *NCh176/2 Of. 1986. Madera – Parte 2: Determinación de la densidad*. Santiago, Chile: INN.
- Instituto Nacional de Normalización. (2019). *NCh176/1 Of. 2019: Madera – Parte 1: Determinación del contenido de humedad*. Santiago, Chile: INN.
- Instituto Nacional de Normalización. (2024). *NCh1198 Of. 2024. Madera – Construcciones en madera – Cálculo*. Santiago, Chile: INN.
- International Council on Monuments and Sites (ICOMOS). (1964). *Carta internacional sobre la conservación y la restauración de monumentos y sitios (Carta de Venecia)*. Venecia, Italia.
- Morgado, P. (1993). *El impacto de la modernización técnica. Los ascensores de Valparaíso*. Arquitectura del Sur, 10(20), pp. 2–7.
- Ortega, E. (2005). *Diagnóstico de estado, restauración y conservación ante ataques de termitas del edificio patrimonial Lord Cochrane*. Valparaíso, Chile: Universidad de Valparaíso.
- Pérez, E. (29 de mayo de 2010). *Cierran ascensores Cordillera y Larraín en Valparaíso*. La Tercera.
- Puelles, C., & Ulloa, P. (2003). *Evaluación de la Red de Ascensores de Valparaíso*. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso.
- Varela, F. (2010). *Diagnóstico y evaluación de edificio patrimonial Reina Victoria, Valparaíso*. Valparaíso, Chile: Universidad de Valparaíso.





# Mesozoica: Representación Visual de la fauna extinta chilena del Triásico al Cretácico

**Tesista: Ruy Francisco Muñoz Mateluna**

Profesor guía: Dr. Alberto Madrid Letelier

Licenciatura en Artes

Universidad de Playa Ancha





# 1. Resumen

En el contexto actual, marcado por una creciente crisis ambiental, el cambio climático y la escasez hídrica que afecta de manera significativa a Chile, se vuelve imprescindible reflexionar sobre la relación que la sociedad establece con su entorno natural. En este escenario, la comprensión del pasado geológico y biológico del territorio adquiere una relevancia particular, en tanto permite dimensionar los procesos de transformación que han modelado la vida en la Tierra a lo largo de millones de años. Sin embargo, no siempre ha existido una conciencia clara respecto de esta riqueza: a comienzos de la década de 1990, la posibilidad de la existencia de dinosaurios en Chile resultaba prácticamente impensable para gran parte de la población. Hoy, en cambio, se reconoce la existencia de un valioso patrimonio paleontológico, caracterizado por una notable diversidad de especies que habitaron el territorio durante distintas etapas del planeta.

A pesar de estos avances, persiste una limitada valoración social de dicho patrimonio, lo que se traduce en el descuido de espacios naturales de gran importancia científica. Estos territorios, además de resguardar vestigios del pasado, constituyen ecosistemas vivos que actualmente enfrentan amenazas como la contaminación, la degradación ambiental y la disminución de recursos hídricos. La falta de conciencia respecto de la historia natural y de la biodiversidad contribuye a profundizar esta problemática, dificultando la conservación tanto del legado fósil como de las especies que hoy habitan el país.

En este marco, la propuesta Mesozoica: Representación de la fauna chilena extinta del Triásico al Cretácico surge como una iniciativa que busca articular arte, ciencia y educación, con el fin de acercar al público a la riqueza del registro fósil nacional. A través de la ilustración científica, el proyecto no solo pretende difundir conocimientos en los ámbitos paleontológico, geológico y biológico, sino también poner en valor el rol del arte como herramienta de divulgación y construcción de patrimonio cultural. De este modo, se propone ampliar la mirada tradicional centrada exclusivamente en los dinosaurios, incorporando una diversidad de especies que permiten comprender de manera más integral la biodiversidad del pasado.

La serie, compuesta por diez ilustraciones organizadas cronológicamente desde el Triásico hasta el Cretácico, plantea un recorrido visual que da cuenta de los procesos de cambio, adaptación y evolución de la vida en el territorio chileno. Esta disposición, que sugiere una marcha continua, no solo representa el transcurso del tiempo geológico, sino que también invita a reflexionar sobre las transformaciones actuales del planeta. En un contexto donde el cambio climático acelera la pérdida de biodiversidad y la crisis hídrica redefine los equilibrios ecológicos, observar el pasado

se convierte en una herramienta para comprender el presente y proyectar el futuro.

Asimismo, el proyecto se inscribe en un marco contemporáneo que articula avances científicos recientes, tecnologías actuales y dinámicas colaborativas entre arte y ciencia. La reconstrucción de especies extintas se basa en investigaciones paleontológicas actualizadas, lo que permite generar representaciones más precisas y fundamentadas. Al mismo tiempo, el uso de herramientas digitales y la interacción con especialistas evidencian nuevas formas de producción de conocimiento, propias del siglo XXI.

En este sentido, el presente ensayo propone analizar la serie no solo como una producción artística, sino como un dispositivo de mediación entre el conocimiento científico y la sociedad. A través de ella, se busca evidenciar cómo la ilustración científica puede contribuir a la comprensión del patrimonio natural, al mismo tiempo que fomenta una reflexión crítica sobre las problemáticas ambientales contemporáneas. Así, el estudio del pasado mesozoico no se presenta como un ejercicio meramente retrospectivo, sino como una vía para tomar conciencia sobre la urgencia de proteger los ecosistemas actuales y enfrentar los desafíos que impone la crisis climática y la escasez de recursos naturales.

## 2. Marco Teórico

### Referentes

#### Claudio Gay

La obra de Claudio Gay constituye un pilar fundamental en el desarrollo de esta tesis, ya que no solo representa un registro natural excepcional del entorno nacional, sino que también ofrece un modelo ejemplar de cómo abordar la ilustración científica. Su trabajo se caracteriza por una precisión visual rigurosa y un método de investigación exhaustivo, lo que lo convierte en una referencia indispensable para proyectos que buscan integrar el arte y la ciencia.

Desde una perspectiva visual, las ilustraciones de Gay destacan por su alto nivel de detalle en la representación de especies, paisajes y estructuras geológicas, evidenciando una observación meticulosa y un enfoque sistemático en la documentación. Además, la composición de sus láminas equilibra la fidelidad científica con una disposición visual clara y didáctica, optimizando la transmisión del conocimiento y facilitando su comprensión. Este enfoque resulta especialmente relevante para el presente proyecto, ya que busca combinar el rigor científico con una estética accesible y educativa.

Desde un enfoque metodológico, la investigación escrita desarrollada por Gay se erige como un referente en la organización y articulación del conocimiento científico aplicado a la ilustración. Su capacidad para integrar de manera rigurosa el análisis descriptivo con su correspondiente representación gráfica proporciona un marco metodológico sólido para el desarrollo de ilustraciones

paleontológicas precisas y fundamentadas. Tomar como referencia estos principios permitirá fortalecer la precisión en las representaciones visuales de este proyecto, asegurando que cada imagen no solo cumpla con criterios estéticos, sino que también funcione como un recurso de divulgación sustentado en evidencia científica y respaldado por un proceso de documentación coherente y verificable.

Además, la obra de Gay tiene un impacto significativo en el ámbito paleontológico, como lo demuestra su contribución al registro de fósiles en Chile. Un ejemplo destacado es la descripción realizada por Gervais del *Plesiosaurus chilensis*, incluida en la obra de Gay, que representa el primer registro científico de un reptil fósil en América. Este hallazgo, realizado en la isla Quiriquina (cuyo nombre nativo significa "isla de los lagartos"), situó la presencia de plesiosaurios en Chile durante el Cretácico, hace aproximadamente 65 millones de años. Este descubrimiento impulsó investigaciones posteriores que llevaron al hallazgo de otras especies de reptiles marinos en la zona, como el *Aristonectes quiriquinensis* y el *Mauisaurus* sp., así como fósiles de mosasáuridos, aves y tortugas.

Sumado a esto, Gay recolectó una gran cantidad de fósiles durante sus expediciones, muchos de los cuales fueron enviados a Francia y descritos posteriormente por Hupé en el tomo VIII de la Historia Física y Política de Chile. Entre estos se encuentran los fósiles descubiertos en 1837 en un manto calcáreo cerca de las cumbres del departamento de Elqui, donde identificó la presencia de Plagióstomos, Ammonites, Terebrátulas, entre otros. Este material fue fundamental para la publicación de Los fósiles terciarios y cuaternarios

de Chile por Philippi en 1887, una obra clave para la paleontología nacional que se basó en gran parte en los fósiles descritos previamente por Hupé en la obra de Gay.

### Mauricio Álvarez

Es fundamental destacar el rol de los ilustradores científicos en la difusión del conocimiento paleontológico, ejemplificado en la trayectoria de Mauricio Álvarez. Su trabajo ha sido clave en la confluencia entre arte y ciencia, contribuyendo a la valorización del patrimonio paleontológico chileno tanto a nivel nacional como internacional. Álvarez ha participado activamente en la reconstrucción visual de especies emblemáticas descubiertas en Chile, como *Stegouros elengassen*, *Chilesaurus diegosuarezi* y *Gonkoken nanoi*, cuyas singularidades morfológicas y geográficas han generado gran interés en la comunidad científica global.

Sus ilustraciones, publicadas en revistas de alto impacto como *Nature* y *National Geographic*, no solo han enriquecido la divulgación científica, sino que también han posicionado a Chile como un referente en paleontología. Esta labor ha tenido efectos multiplicadores en áreas como la educación, el turismo especializado y la proyección internacional de la investigación local. Por su rigor técnico, estilo distintivo y capacidad para comunicar hallazgos complejos, Álvarez se consolida como un referente indispensable en el estudio de la ilustración científica aplicada a la paleontología, justificando su inclusión como eje analítico en esta investigación.

### Max Sir

En el desarrollo de este proyecto de tesis, la figura de Max Sir emerge como un referente fun-

damental, tanto por su excelencia técnica como por su impacto en las decisiones formales y materiales adoptadas. Su obra, especialmente las ilustraciones a lápiz de fauna contemporánea presentadas en la exposición La Forma del Tiempo, realizada en colaboración con el destacado artista Claudio Bravo, constituye un punto de partida esencial para la construcción de la identidad gráfica y conceptual de esta investigación. En dicha muestra, Sir logra una representación visual notable de mamíferos y aves modernas, utilizando materiales tradicionales en formatos de gran escala. La calidad compositiva y expresiva de estas ilustraciones no solo responde directamente a los objetivos formales y conceptuales de este proyecto, sino que también establece un estándar técnico y estético que ha sido determinante en su desarrollo.

Además de su influencia visual, la obra de Sir ha tenido un impacto significativo en las decisiones materiales adoptadas en este proyecto. Específicamente, su recomendación de utilizar papel para grabado de 300 gramos en las ilustraciones de La Forma del Tiempo fue incorporada en el proyecto Mesozoica: Representación de la fauna extinta chilena del Triásico al Cretácico. Esta elección material, junto con la adopción de un formato visual depurado caracterizado por fondos completamente blancos y el uso de técnicas tradicionales como el grafito y el carboncillo, ha permitido alcanzar un equilibrio entre precisión técnica y expresividad artística. La manera en que Sir emplea estos recursos, con economía visual y un alto grado de detalle, ha influido profundamente en el replanteamiento de la materialidad de esta tesis, guiando tanto las estrategias de representación como los criterios estéticos que la sustentan.

En conjunto, las referencias a la obra de Max Sir no solo han contribuido a definir la identidad gráfica del proyecto, sino que también han proporcionado un marco conceptual y técnico sólido para fundamentar las decisiones formales adoptadas. Su enfoque en la utilización de materiales tradicionales, combinado con una visión contemporánea de la representación visual, ha permitido establecer un diálogo entre el pasado y el presente, enriqueciendo así el desarrollo de esta investigación y consolidando su relevancia tanto en el ámbito académico como en el artístico.

## Relación con la tradición naturalista con códigos

Para comprender la relación entre las obras que conforman este proyecto de tesis y la tradición naturalista dentro de la ilustración científica, resulta necesario revisar los conceptos fundamentales que la sustentan. La tradición naturalista en este ámbito fue impulsada por figuras pioneras, entre las que destaca la naturalista alemana y referente en la entomología, Maria Sibylla Merian (1647-1717). Su labor marcó un punto de inflexión en la disciplina, ya que fue de las primeras en observar directamente a los insectos en su entorno natural con el fin de estudiar sus procesos de metamorfosis. De este modo, integró de manera innovadora el rigor científico con la sensibilidad artística, generando ilustraciones que no solo documentaban la morfología de los insectos, sino que también representaban sus interacciones ecológicas, particularmente con las plantas de las que se alimentaban. Su énfasis en la representación del ciclo vital completo de las especies, junto con su capacidad para conjugar precisión y estética, estableció un precedente decisivo en el de-

sarrollo de la ilustración botánica y entomología moderna.

Maria Sibylla Merian no se limitó a trabajar con especímenes disecados, sino que desarrolló una metodología innovadora basada en la recolección, crianza y observación directa de insectos vivos en su entorno natural. Gracias a este enfoque, sus ilustraciones lograron establecer una conexión entre los insectos y el medio que habitaban, evidenciando las relaciones ecológicas entre las especies y sus fuentes de alimento. De este modo, Merian integró el rigor científico con una sensibilidad estética excepcional, contribuyendo a elevar de manera significativa los estándares de la ilustración científica de su tiempo.

Asimismo, su producción visual y sus minuciosas observaciones tuvieron un impacto decisivo en el ámbito científico, al contribuir a refutar la teoría de la generación espontánea, que sostenía que los insectos surgían de la materia en descomposición. Sus métodos de investigación sentaron un precedente fundamental para los futuros estudios entomológicos. Cabe destacar, además, la relevancia de su expedición a Surinam, emprendida en un contexto histórico en el que las mujeres contaban con escasas oportunidades en el ámbito académico y científico. Este viaje no solo evidencia su valentía y compromiso con la ciencia, sino que también reforzó su propósito de representar con fidelidad la flora y la fauna. Con ello, Merian estableció un nuevo paradigma en la ilustración científica, consolidando su legado como una de las figuras más influyentes en la historia de la disciplina.

Este marco teórico permite contextualizar la relevancia de la tradición naturalista en la ilustración

científica y su influencia en las obras que conforman este proyecto de tesis. La integración de la observación directa, el rigor científico y la sensibilidad estética, tal como lo ejemplifica Merian, constituye un referente esencial para comprender la evolución y los principios fundamentales de esta disciplina.

El naturalismo en la ilustración científica encuentra sus raíces en el legado de figuras como Maria Sibylla Merian, quien estableció un precedente fundamental al combinar la observación meticulosa de la naturaleza con una representación rigurosamente precisa. Este enfoque se caracteriza por su compromiso con la exactitud científica, pero también integra la sensibilidad y los recursos artísticos del ilustrador, generando un resultado que equilibra la fidelidad documental con el valor estético. En este sentido, los “códigos” de esta tradición no se refieren a un sistema técnico de programación, sino a un conjunto de principios visuales orientados a garantizar la veracidad en la representación del mundo natural y la eficacia en la transmisión del conocimiento científico.

La ilustración naturalista surge como una herramienta esencial en las expediciones científicas destinadas a documentar nuevos descubrimientos. A través de la conformación de un corpus de imágenes, esta tradición se consolidó como un referente fundamental para las generaciones posteriores. Si bien en ocasiones se vincula con prácticas artísticas, su propósito esencial ha sido servir a la investigación y la divulgación científica, aportando representaciones visuales de conceptos, hallazgos y registros detallados de especies. Este recurso resultó decisivo en investigaciones de gran alcance, como las realizadas por Charles

Darwin, donde las ilustraciones complementaron y enriquecieron el análisis científico.

En este marco, los dibujos científicos cumplen una función dual: ilustrar estructuras, detalles morfológicos y procesos biológicos, y facilitar la comprensión de la información científica. Tradicionalmente, los artistas recolectaban especímenes para trabajar en el taller, práctica que en la era contemporánea se ha visto enriquecida con la incorporación de la fotografía como herramienta de registro. Sin embargo, la fotografía no ha sustituido la capacidad del ojo y la mano del ilustrador para destacar detalles específicos y relevantes desde un enfoque científico. En la actualidad, la ilustración naturalista ha integrado recursos tecnológicos como el dibujo digital y el uso de software especializado, ampliando sus posibilidades expresivas y comunicativas y contribuyendo a acercar el conocimiento científico a un público más amplio y diverso.

El presente proyecto de tesis se sustenta en los códigos propios de la tradición naturalista, con el propósito de alcanzar los más altos estándares en

términos de resultados artísticos. A través de estos principios, las ilustraciones que conforman la serie adquieren el carácter de representaciones visuales rigurosas y pertinentes para un trabajo desarrollado desde una perspectiva científica. Un ejemplo de ello es la necesidad de documentarse de manera directa sobre la anatomía de los animales representados, lo que requirió visitas a instituciones como el Museo Nacional de Historia Natural y el Museo de Historia Natural de Valparaíso.

En particular, la exposición temporal Dinosaurios del Sur del Mundo, vigente durante todo el año 2025 en el Museo Nacional de Historia Natural, resultó fundamental para el desarrollo de la serie. Esta muestra, la más completa de fauna mesozoica sudamericana, incluye 18 réplicas anatómicas de dinosaurios a escala real y una amplia colección de fósiles auténticos, que abarcan desde dientes de tiburones y conchas de cefalópodos extintos hasta huesos de dinosaurios con una antigüedad aproximada de 150 millones de años. La exposición permitió observar de manera directa la escala de los animales

### 3. Metodología

El trabajo de campo constituye una fase metodológica esencial en esta investigación, ya que permite la obtención de información directa sobre el objeto de estudio, facilitando la contrastación de teorías, la comprensión de dinámicas específicas y la diversificación de fuentes de información. Además, contribuye al desarrollo de una perspectiva crítica, al situar al investigador en contacto con la realidad analizada. En el contexto contemporáneo, marcado por la digitalización, esta práctica ha incorporado herramientas virtuales y metodologías adaptadas a entornos no presenciales, sin perder validez ni confiabilidad en los datos recopilados.

Esta aproximación metodológica revela la dimensión humana y material de los fenómenos estudiados, evidenciando cómo las teorías se manifiestan en contextos concretos. Asimismo, implica un proceso de cuestionamiento y adaptación de supuestos teóricos previos, lo que enriquece el análisis y profundiza la comprensión del tema. Entre las técnicas empleadas en el trabajo de campo destacan la observación participante, las entrevistas, el registro documental y la elaboración de bocetos, todas ellas fundamentales para garantizar la rigurosidad y riqueza de los datos obtenidos.

Circunstancias como la pandemia o situaciones de violencia han impulsado la reconfiguración de las estrategias de trabajo de campo, promoviendo el uso de herramientas digitales que permiten mantener la continuidad investigativa. En este marco, se han incorporado aplicaciones para la toma de notas, grabación de audios y videos, así como modalidades de observación virtual y expe-

rimentación remota. Estas innovaciones no solo complementan, sino que en algunos casos reemplazan los métodos tradicionales, asegurando la validez de los resultados sin comprometer la calidad de la investigación.

En el desarrollo de este proyecto, el trabajo de campo se centró en visitas a instituciones museísticas, con especial énfasis en el Museo Nacional de Historia Natural, el cual alberga una extensa colección de registros biológicos, paleontológicos y mineralógicos. Este enfoque permitió profundizar en el concepto de “gabinete de historia natural”, un espacio fundamental en la evolución de la ilustración científica.

Los gabinetes de historia natural surgieron como repositorios de especímenes (animales, plantas, fósiles y minerales) que servían de base para el estudio y la representación rigurosa de la biodiversidad. Estas colecciones permitían a los ilustradores realizar observaciones detalladas, registrando con precisión características morfológicas, patrones cromáticos y rasgos anatómicos que, en muchos casos, resultaban difíciles de capturar mediante la fotografía de la época. Las ilustraciones derivadas de estos estudios no solo documentaban hallazgos científicos, sino que también se difundían mediante catálogos y publicaciones, contribuyendo al avance del conocimiento y a la divulgación cultural.

Además en el desarrollo metodológico de este estudio, se consideró el papel de la ilustración como un recurso central para el registro y la clasificación de especies identificadas en el contexto de expediciones científicas, reconociéndose como un elemento clave en las etapas iniciales de la biología. En este sentido, se revisaron catálo-

gos y publicaciones vinculadas a colecciones de gabinete, en los cuales las representaciones gráficas cumplen una función esencial al facilitar la circulación del conocimiento científico tanto en ámbitos especializados como en públicos no expertos.

Asimismo, se incorporó el análisis de la ilustración científica como herramienta de alta precisión, especialmente en comparación con los medios fotográficos disponibles en periodos anteriores. Estas representaciones permitieron describir con mayor rigurosidad las características morfológicas de los especímenes, reduciendo ambigüedades en su identificación. De este modo, se consideró la colaboración entre naturalistas, artistas y científicos como un eje metodológico relevante, en tanto posibilita una comprensión integral del mundo natural mediante la convergencia entre observación científica y representación visual.

Por otra parte, el trabajo de campo se desarrolló principalmente a través de la observación directa de registros fósiles, particularmente restos óseos y minerales, los cuales resultaron fundamentales para la construcción de un entendimiento anatómico de las especies abordadas. En este proceso, los museos fueron concebidos como espacios metodológicos clave, dado que reproducen la lógica del gabinete y permiten el acceso cercano a las colecciones. La disposición de los materiales y la interacción directa con estos constituyeron factores determinantes para alcanzar los objetivos propuestos en la elaboración de la serie artística.

Finalmente, se analizó la puesta en escena museográfica como parte del enfoque metodológico, atendiendo a las diferencias en las formas de

exhibición de los materiales. Las réplicas de fósiles se presentan de manera abierta y accesible, facilitando una observación detallada y próxima por parte del espectador. En contraste, los restos originales se mantienen protegidos en vitrinas, en algunos casos recubiertos con yeso para resguardar su conservación. En el caso de especímenes de menor tamaño, estos se disponen en estructuras suspendidas dentro de espacios acristalados. Estas variaciones en los criterios de exhibición responden a las características físicas y dimensiones de los materiales, lo que fue considerado en el análisis metodológico del estudio.

Finalmente, dentro del enfoque metodológico adoptado, se consideró como un componente clave el acceso a información especializada disponible en espacios museográficos, entendidos como extensiones contemporáneas del gabinete. En particular, se valoró la posibilidad de interac-

ción directa con expertos en instituciones como el Museo Nacional de Historia Natural (MNHN) y el Museo de Historia Natural de Valparaíso (MHNV).

En dichos contextos, la colaboración con profesionales de áreas como la biología, la geología y la paleontología permitió orientar el proceso investigativo, así como resolver interrogantes específicas vinculadas a cada disciplina. Este acompañamiento especializado fue integrado como parte del procedimiento metodológico, dado que enriqueció la calidad y precisión de los registros obtenidos.

Asimismo, se reconoció este apoyo como un recurso fundamental en la elaboración de bitácoras de trabajo y en el desarrollo de procesos asociados a la ilustración científica, contribuyendo de manera significativa a la rigurosidad y coherencia del proyecto.

## 4. Desarrollo

### Materialidad

En el desarrollo del presente proyecto de tesis, se transitó por diversas etapas de exploración tanto conceptual como material, lo que implicó la evaluación de múltiples alternativas en relación con las técnicas, soportes y lenguajes visuales a emplear. En una fase inicial, se consideraron distintas posibilidades vinculadas a las materialidades, las texturas y las gamas cromáticas, incluyendo la opción de trabajar en formato digital. Sin embargo, dichas alternativas fueron progresivamente descartadas, ya sea por limitaciones técnicas (como la ausencia de herramientas digitales adecuadas para alcanzar un nivel profesional), o por dificultades logísticas y económicas, particularmente en lo relativo a la impresión de las obras.

En este proceso de toma de decisiones, también influyó la observación de referentes artísticos, como el trabajo de Mauricio Álvarez, cuyo manejo del color, junto con la percepción general del público que tiende a asociar la práctica artística con la pintura, motivó una primera intención de desarrollar la serie en color. No obstante, esta inclinación fue posteriormente cuestionada, al identificarse como una estrategia orientada principalmente a captar la atención del espectador más que a responder a una necesidad conceptual propia de la obra. En consecuencia, se optó por descartar esta alternativa, privilegiando una aproximación más coherente con una búsqueda expresiva personal y auténtica.

Esta redefinición se consolidó a partir del análisis de la obra de Max Sir, particularmente en su colaboración con Claudio Bravo, la cual reafirmó la pertinencia de

trabajar desde la ilustración tradicional en blanco y negro. Este referente no solo validó la elección técnica, sino que también permitió resignificar la propia práctica artística, orientándola hacia un lenguaje más sobrio, preciso y alineado con los objetivos del proyecto. A partir de esta decisión, se inició una exploración específica de los materiales más adecuados para alcanzar los resultados visuales propuestos.

En este sentido, la selección de materiales constituyó una etapa fundamental del desarrollo. Tras considerar diversas herramientas (como tinta china, tiralíneas o plumas metálicas), se optó por el uso de lápices y barras de grafito, debido a su versatilidad y capacidad para generar una amplia gama de valores tonales. Estos permiten un control preciso del trazo y facilitan la representación de detalles complejos, tales como texturas orgánicas en pieles, plumas o estructuras anatómicas. Asimismo, el grafito posibilita la construcción de profundidad y volumen, aspectos esenciales para el carácter descriptivo y cercano a lo científico que define la serie. En contraste, otras técnicas más rígidas, como la tinta, presentan limitaciones en términos de flexibilidad tonal, lo que dificulta alcanzar el nivel de realismo requerido.

De manera complementaria, se emplearon lápices de grafito en distintas durezas, desde HB hasta 12B, junto con lápices de carboncillo en graduaciones 4B y 6B, destinados a intensificar sombras y enriquecer las texturas. Además, se incorporó el uso de fijador en spray como recurso técnico indispensable para la conservación de las obras, asegurando la estabilidad del material y su protección frente al paso del tiempo y la manipulación.

La elección del soporte también respondió a un proceso de análisis y experimentación. En una

primera instancia, se evaluaron papeles como el hilado N°9 y el Bristol; no obstante, sus características superficiales no resultaron óptimas para el tipo de trabajo requerido. En particular, la textura excesivamente lisa del papel Bristol dificulta la adherencia del grafito, lo que limita la construcción de sombras profundas y compromete la calidad del detalle. Frente a ello, se optó por papel para grabado de 300 gramos, el cual ofrece una superficie más adecuada para la fijación del material y el desarrollo de un rango tonal amplio. Esta decisión se vio reforzada por la recomendación directa del artista Max Sir, así como por la consideración del papel de acuarela de igual gramaje como alternativa viable dentro del campo de la ilustración.

Finalmente, en lo que respecta a la presentación de las obras, se definió un formato de enmarcación que responde tanto a criterios estéticos como prácticos. Las piezas serán montadas en marcos de madera con protección de fibra de vidrio, en dimensiones estandarizadas de 50 x 60 cm, con una excepción de mayor formato para una de las obras principales. Esta decisión implicó ajustar una idea inicial de formatos más grandes, la cual fue descartada debido a dificultades asociadas a su producción y montaje.

En conjunto, estas elecciones materiales y formales responden a la intención de construir una propuesta visual coherente, caracterizada por una estética sobria y tradicional. El uso de la madera aporta calidez y naturalidad al conjunto, mientras que la fibra de vidrio no solo cumple una función protectora, sino que también refuerza la percepción de valor de cada obra. De este modo, se busca generar una experiencia visual que invite a la contemplación atenta, en diálogo con los espacios expositivos y con el carácter científico-artístico que sustenta la serie.

## Técnicas

En el desarrollo del presente proyecto, se llevó a cabo un proceso articulado en distintas etapas de reflexión y exploración creativa, mediante las cuales se fueron definiendo tanto los lineamientos conceptuales como las decisiones técnicas de la propuesta. En una fase inicial, adquirió especial relevancia la idea de trabajar ilustraciones inspiradas en los principios del grabado tradicional, caracterizadas por el predominio del trazo lineal en la construcción de las formas y en la generación de sombras. Esta aproximación implicaba, además, la elaboración de fondos completamente intervenidos, reduciendo al mínimo la presencia de espacios en blanco, con el propósito de construir composiciones densas, altamente detalladas y formalmente estructuradas.

No obstante, con el avance del proceso, esta propuesta fue perdiendo pertinencia, especialmente al ser contrastada con referentes propios de la ilustración científica. A partir de un análisis más detenido, se evidenció que dichas producciones no suelen apoyarse en fondos recargados ni en una lógica exclusivamente lineal, sino que privilegian la claridad visual y la precisión anatómica. Estos aspectos comenzaron a perfilarse como fundamentales para responder de manera adecuada a los objetivos expresivos y comunicativos del proyecto, lo que motivó un cambio en la propuesta inicial.

En consecuencia, se optó por adoptar un enfoque técnico más flexible, capaz de favorecer la representación detallada de estructuras complejas (como escamas, plumas o pelajes), sin comprometer la legibilidad de las imágenes. Esta decisión implicó también una reconfiguración

compositiva, centrando la atención en la figura animal y reduciendo significativamente la presencia de fondos elaborados. Tal determinación se sustentó en la observación de estudios previos, donde se constató que los fondos excesivamente complejos tendían a competir con el motivo principal, debilitando su protagonismo. Asimismo, en el caso de composiciones monocromáticas, se identificó el riesgo de confusión entre la silueta del animal y el entorno, lo que afectaba la claridad general de la imagen.

El énfasis en la figura central no solo responde a criterios propios de la ilustración científica (al facilitar la observación precisa de los rasgos morfológicos), sino que también se vincula con una búsqueda personal orientada a lograr una organización visual más clara y depurada. Este aspecto adquiere especial relevancia al tratarse de la representación de especies extintas, cuya reconstrucción depende exclusivamente de evidencias indirectas, como el registro fósil, debido a la inexistencia de referentes visuales directos.

En este sentido, la serie se plantea como un medio para acercar al espectador a formas de vida desaparecidas hace millones de años, proponiendo una experiencia visual que articula conocimiento científico e imaginación. La ilustración se concibe, así, como un recurso capaz de hacer visible aquello que ya no puede observarse, funcionando como un puente entre el pasado profundo y la percepción contemporánea. De este modo, la propuesta busca contribuir a la reconstrucción simbólica de estas especies, otorgándoles presencia en el ámbito visual.

Tras la exploración de diversas alternativas, tanto en el plano conceptual como en el técnico, se de-

terminó que los materiales más adecuados para la ejecución de la serie eran los lápices de grafito en sus distintas graduaciones, complementados eventualmente con carboncillo según las necesidades de cada obra. Esta elección responde a una intención consciente de trabajar con medios tradicionales, en contraste con la predominancia actual de herramientas digitales en el campo de la ilustración.

Finalmente, además de visibilizar especies extintas del territorio chileno, la propuesta busca poner en valor las posibilidades expresivas del grafito y técnicas afines. A través de esta serie, se pretende evidenciar que materiales comúnmente considerados básicos pueden dar lugar a obras complejas, rigurosas y significativas, cuestionando así ciertas nociones instaladas que tienden a privilegiar el uso del color o los medios digitales por sobre las prácticas monocromáticas tradicionales.

## Detalles

En el desarrollo de la presente propuesta, el proceso de realización de las obras se configura como un aspecto central, particularmente en lo que respecta a la reconstrucción visual de especies extinguidas hace aproximadamente 66 millones de años. La precisión en la elaboración de estos modelos resulta fundamental para garantizar el carácter riguroso y verosímil de las ilustraciones, en coherencia con los principios de la ilustración científica.

La construcción de dichas representaciones se sustenta en múltiples factores, entre los cuales destaca el acompañamiento de especialistas en

áreas vinculadas a las ciencias de la Tierra y la paleontología. En este contexto, la colaboración con expertos permitió orientar el proceso desde una perspectiva informada, aportando conocimientos anatómicos, acceso a material de estudio, registros visuales de fósiles y correcciones continuas a lo largo del desarrollo de las obras. Este intercambio constante contribuyó a resolver dudas específicas y a fortalecer la base científica de cada ilustración.

Cada representación se inicia con una revisión detallada de la información disponible sobre la especie en cuestión, considerando aspectos como su clasificación taxonómica, hábitos de vida y entorno. Esta etapa preliminar resulta clave para construir una visión integral del organismo, lo que a su vez permite aplicar criterios de la anatomía comparada y formular hipótesis fundamentadas sobre su morfología. En este sentido, la comparación entre estructuras de especies actuales y extintas se convierte en una herramienta esencial para inferir características plausibles, apoyando la reconstrucción visual desde una base científica sólida.

La articulación de estas estrategias metodológicas posibilita la elaboración de imágenes que no solo buscan un alto nivel de fidelidad, sino que también se sustentan en evidencia verificable. De este modo, la ilustración se posiciona como un medio que integra conocimiento científico y representación visual, permitiendo aproximarse de manera fundada a organismos cuya existencia solo es conocida a través del registro fósil.

En relación con la composición de la serie, esta fue definida tras un proceso de exploración que incluyó diversas alternativas, como la incorporación de fondos narrativos o la representación

fragmentaria de los sujetos, centrada en detalles específicos. Sin embargo, se optó finalmente por la representación de las especies en su totalidad, decisión que responde tanto a influencias referenciales como a objetivos comunicativos. Esta elección permite ofrecer una comprensión más completa de cada organismo, facilitando su lectura visual, especialmente en un contexto donde el conocimiento sobre la fauna mesozoica nacional es limitado.

Asimismo, se determinó prescindir de fondos en las ilustraciones, decisión que responde a cri-

terios tanto estéticos como funcionales. Por un lado, esta elección contribuye a mantener una coherencia formal dentro de la serie; por otro, permite concentrar la atención del espectador exclusivamente en la morfología del animal. La ausencia de elementos secundarios evita distracciones y favorece una lectura clara de la imagen, estableciendo una jerarquía visual que prioriza los aspectos esenciales de cada ejemplar. En este sentido, la composición se organiza a partir de recursos como el contraste, la escala y la disposición espacial, con el objetivo de guiar la mirada y reforzar la claridad expositiva de cada ilustración.

## 5. Conclusiones

A modo de cierre, la presente investigación permite afirmar que *Mesozoica: Representación de la fauna chilena extinta del Triásico al Cretácico* no solo cumple con su propósito de difundir el conocimiento sobre especies fósiles de relevancia nacional, sino que también se posiciona como una propuesta que articula arte, ciencia y conciencia ambiental. En este sentido, la divulgación de la biodiversidad del pasado adquiere una dimensión contemporánea, al invitar a reflexionar sobre la fragilidad de los ecosistemas actuales frente a problemáticas como el cambio climático y la creciente escasez hídrica que afecta al territorio chileno.

A lo largo del desarrollo del proyecto, se logró materializar una serie de ilustraciones rigurosas que representan diversas especies extintas, evidenciando la riqueza del patrimonio paleontológico nacional. Sin embargo, más allá del logro técnico y artístico, este trabajo pone de manifiesto la relevancia del arte como herramienta de mediación entre el conocimiento científico y la sociedad. Tal como lo demuestran referentes históricos y contemporáneos, la labor del ilustrador científico resulta fundamental para traducir información compleja en imágenes accesibles, capaces de generar interés, comprensión y valoración en públicos diversos.

En este contexto, la reconstrucción visual de organismos que habitaron el territorio hace millones de años permite establecer un vínculo simbólico entre pasado y presente, evidenciando que la vida en la Tierra ha estado sujeta a constantes transformaciones. Esta perspectiva adquiere especial pertinencia

en la actualidad, marcada por una crisis ambiental global, donde fenómenos como el aumento de las temperaturas, la pérdida de biodiversidad y la escasez de recursos hídricos plantean desafíos urgentes. Así, la representación de especies extintas no solo remite a un pasado remoto, sino que también funciona como una advertencia implícita sobre las consecuencias de los desequilibrios ecológicos.

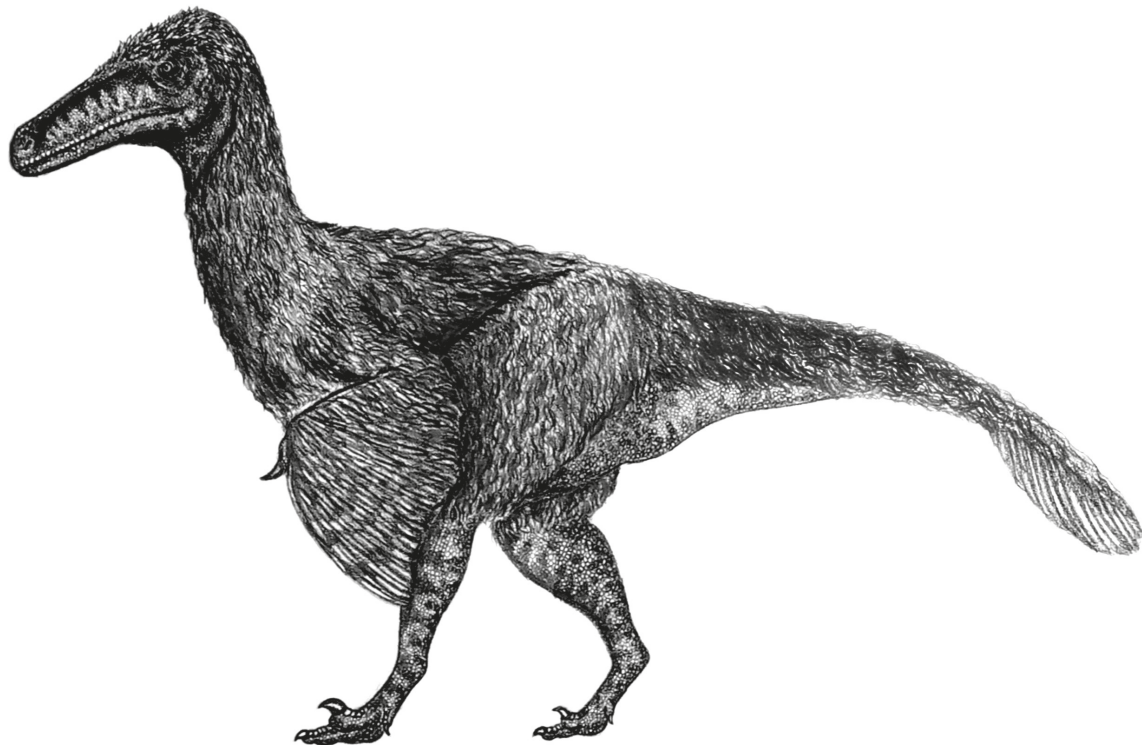
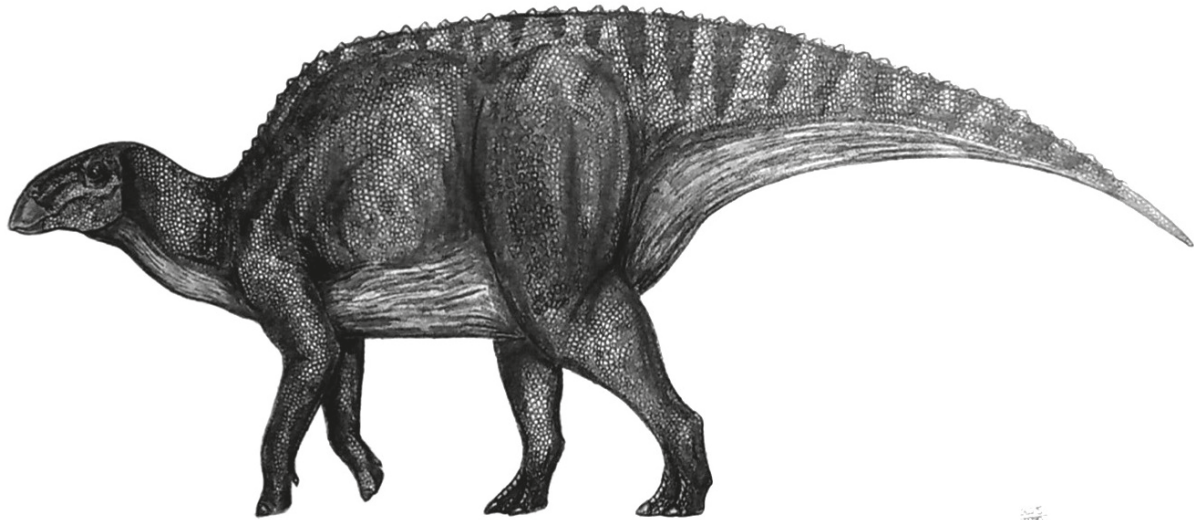
Desde una dimensión formativa, el proceso de desarrollo de esta tesis permitió consolidar una práctica artística consciente y fundamentada, en la cual la ilustración científica se comprende como un ejercicio investigativo en sí mismo. La integración entre teoría y práctica favoreció una comprensión más profunda del rol del artista como generador de conocimiento visual, capaz de contribuir activamente a la educación y a la sensibilización en torno a problemáticas ambientales. En este sentido, el arte se posiciona no solo como un medio expresivo, sino también como una herramienta crítica que puede incidir en la manera en que la sociedad percibe y valora su entorno natural.

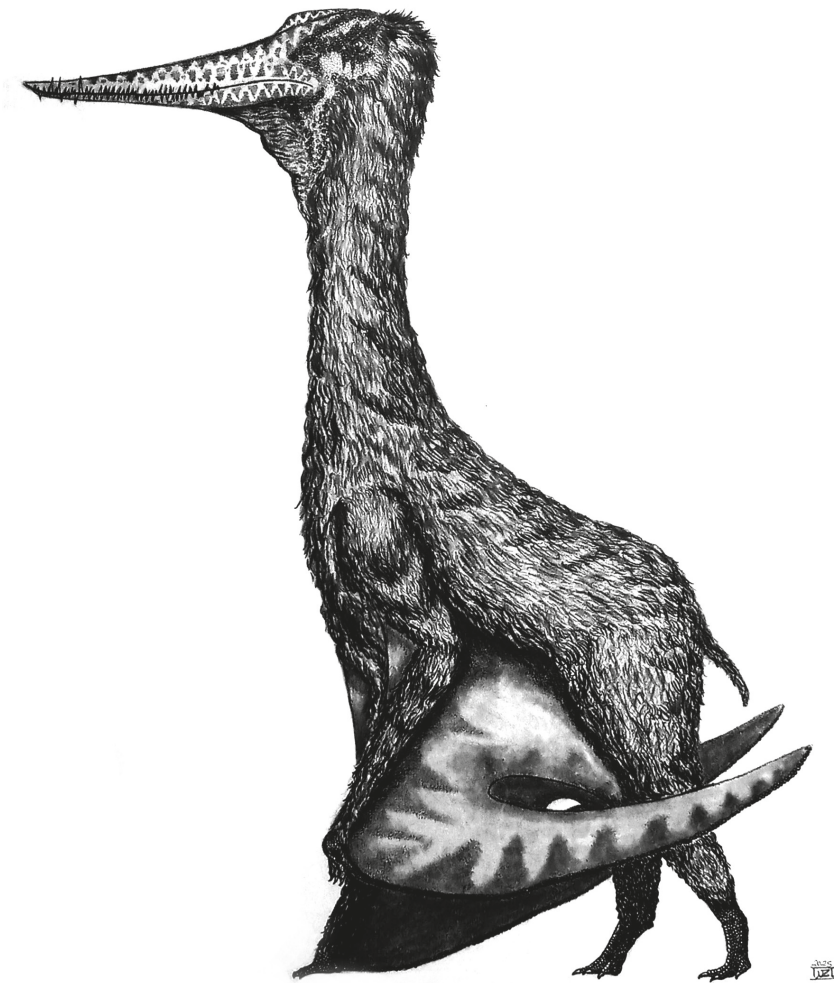
Asimismo, la difusión de la serie, especialmente a través de plataformas digitales, permitió ampliar su alcance e involucrar tanto a especialistas como a público general, evidenciando el potencial de la ilustración científica como recurso pedagógico. Este aspecto resulta particularmente relevante en

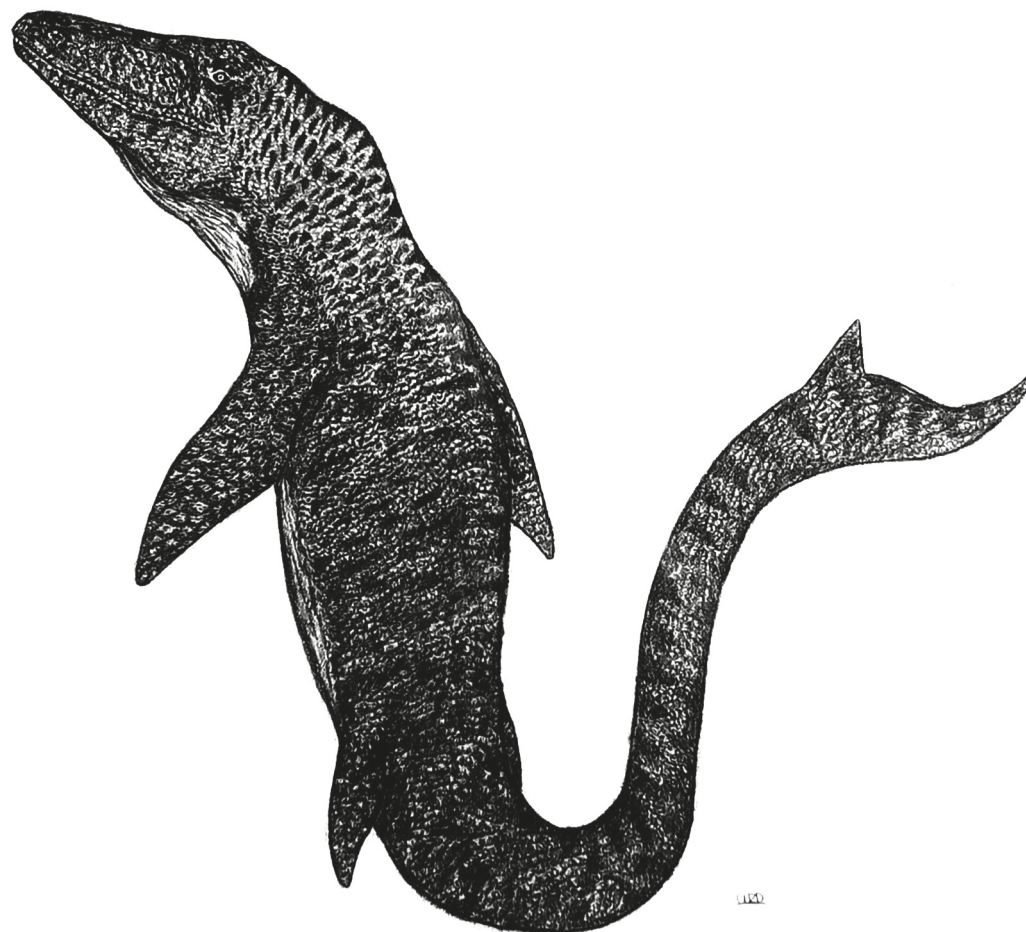
un contexto donde la educación ambiental se vuelve indispensable para enfrentar desafíos como la crisis hídrica, que en Chile se manifiesta de manera sostenida a través de sequías prolongadas y la sobreexplotación de recursos naturales.

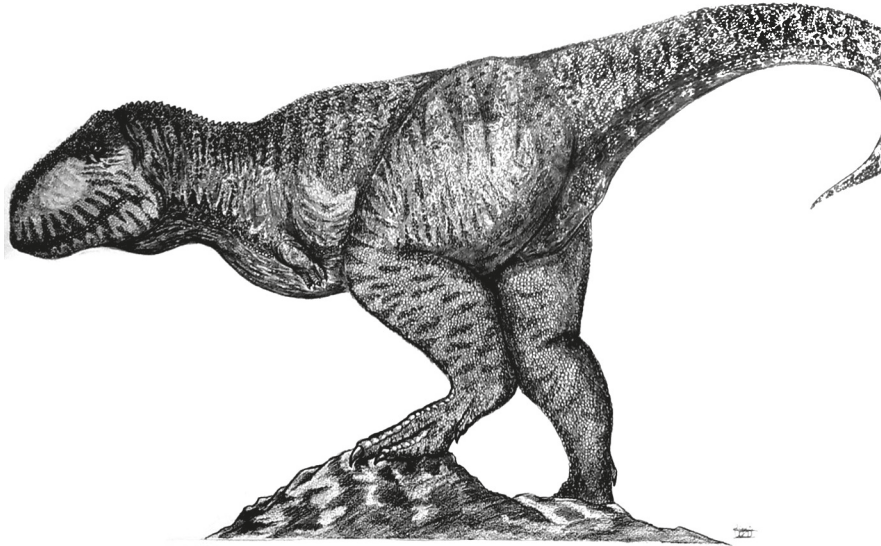
Por otra parte, el desarrollo del proyecto implicó enfrentar diversas dificultades, tanto técnicas como logísticas, así como los desafíos propios de la investigación interdisciplinaria. No obstante, estas complejidades contribuyeron a enriquecer el proceso, reforzando la importancia de la colaboración con especialistas y del trabajo sostenido en el tiempo. En consecuencia, la experiencia no solo permitió alcanzar los objetivos propuestos, sino que también abrió nuevas proyecciones en el ámbito de la ilustración científica.

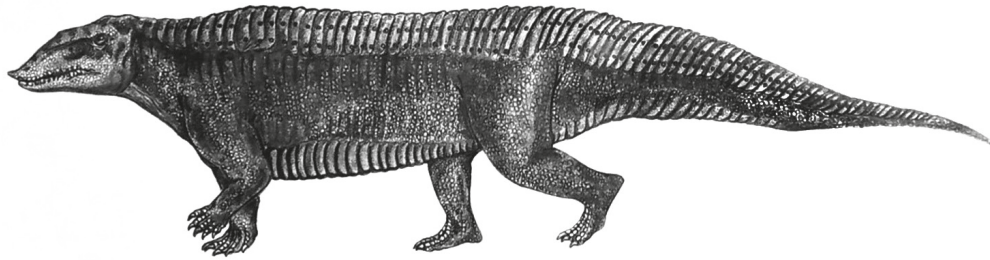
En definitiva, esta investigación reafirma el valor del arte como un medio de conocimiento que trasciende lo estético, contribuyendo de manera significativa a la comprensión del pasado, a la valoración del patrimonio natural y a la reflexión crítica sobre el presente. En un escenario marcado por el deterioro ambiental y la escasez de recursos, iniciativas como esta adquieren una relevancia particular, al fomentar una mayor conciencia sobre la necesidad de preservar los ecosistemas actuales y evitar que la pérdida de biodiversidad continúe replicando, en el presente, procesos de desaparición que alguna vez definieron la historia de la vida en la Tierra.







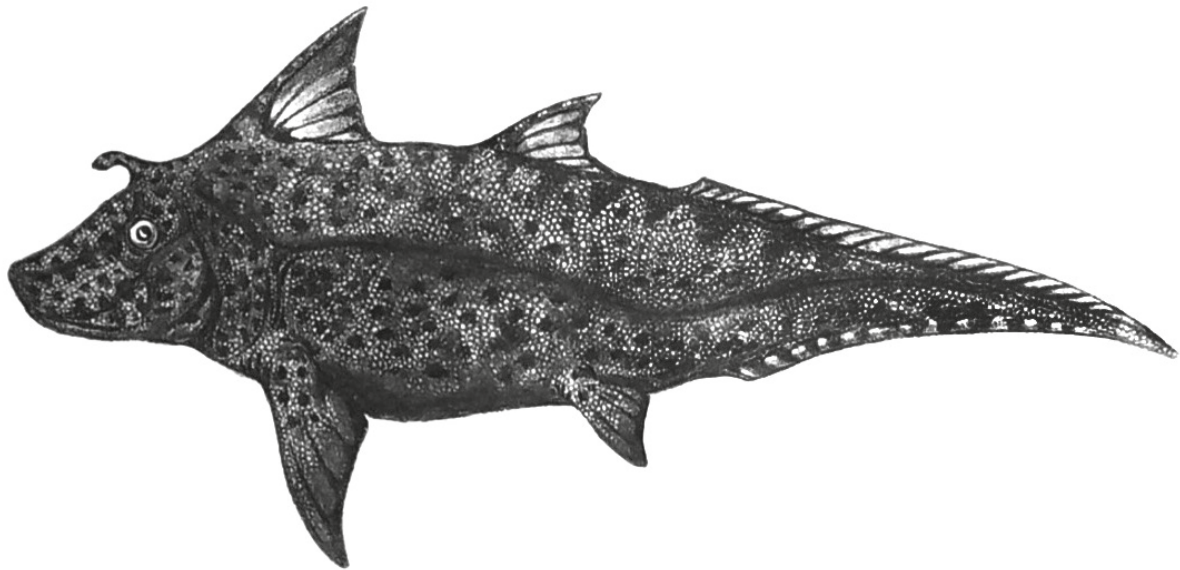




100



101





UNIVERSIDAD TÉCNICA  
FEDERICO SANTA MARÍA



## EL GOBIERNO REGIONAL DE VALPARAÍSO

se encuentra elaborando la Estrategia Regional de Desarrollo, la que, en la etapa de diagnóstico levantó insumos a partir de instancias participativas realizadas en los diferentes territorios, además de entrevistas a informantes claves.

Los insumos levantados corresponden a información sobre atributos regionales y principales problemáticas de la región de Valparaíso.

El Consejo de Rectores de Valparaíso seleccionó algunas de las principales problemáticas para orientar las tesis de pregrado de este presente concurso, las que son:

- Medio Ambiente, cambio Climático y Escasez Hídrica.
- Habitabilidad, vivienda y asentamientos irregulares.
- Movilidad, Transporte y Conectividad.
- Desarrollo Económico socialmente justo y ambientalmente sostenible.

Estas orientaciones entregadas a los tesis de las universidades del CRUV representan parte de los esfuerzos que la academia aporta a entender y apoyar la solución de estos problemas regionales.