

# Del Dato AL Plato

**IA y Producción Alimentaria en el Sur de Chile.**

Mauricio Herrera  
CISGER. Facultad de  
Ingeniería. Universidad de  
Desarrollo



# Contenido

---

## **01** Escala productiva regional y magnitud del desafío

Volatilidad Climática/Biológica, Trazabilidad internacional, Costos logísticos, Competitividad global

---

## **02** Estructura del dato

Sistemas vivos, estacionales y ambientalmente expuestos

---

## **03** La IA y Familias de Modelos

KPIs operacionales y funcionales objetivo. Compatibilidad entre tipo de señal y tipo de decisión

---

## **04** Ejemplos de Casos (técnico)

Aplicaciones por sector con estructura de problema, dato y salida

---

## **05** Agenda de implementación

Secuencia razonable para empresas regionales



# 01 · Escala Productiva Regional y Magnitud del Problema

Volatilidad Climática/Biológica, Trazabilidad internacional, Costos logísticos, Competitividad global

# El Sur de Chile opera como potencia alimentaria

El desafío no es “digitalizar” una industria pequeña: es gobernar sistemas biológicos de gran escala, alta variabilidad y fuerte exposición ambiental.

**57%** de las cosechas de centros de acuicultura del país se registraron en Los Lagos (2023)

**470 mil** de salmón Atlántico + coho cosechadas principalmente en Los Lagos (2024)

**403 mil** de chorito en 2024; 100% de la cosecha nacional se realizó en Los Lagos

**45,2%** de la leche cruda nacional provino de Los Lagos (1.072,9 millones de litros, 2025) se realizó en Los Lagos

**26,5%** de la masa ganadera bovina nacional está en Los Lagos (CAF 2021)

**82%** de las vacas lecheras del país se concentran en Los Lagos + Los Ríos

Alimentos • Tecnología • Sostenibilidad

Escala regional + variabilidad biológica + presión regulatoria

Pero en esta escala el sistema no opera siempre de forma estable.

Opera como un sistema biológico expuesto a clima, sanidad, estacionalidad y ambiente.

**0,93%** mortalidad mensual promedio en centros de mar de salmonicultura chilena en 2024

**1,17%** mortalidad mensual promedio en centros de mar de Los Lagos en 2024

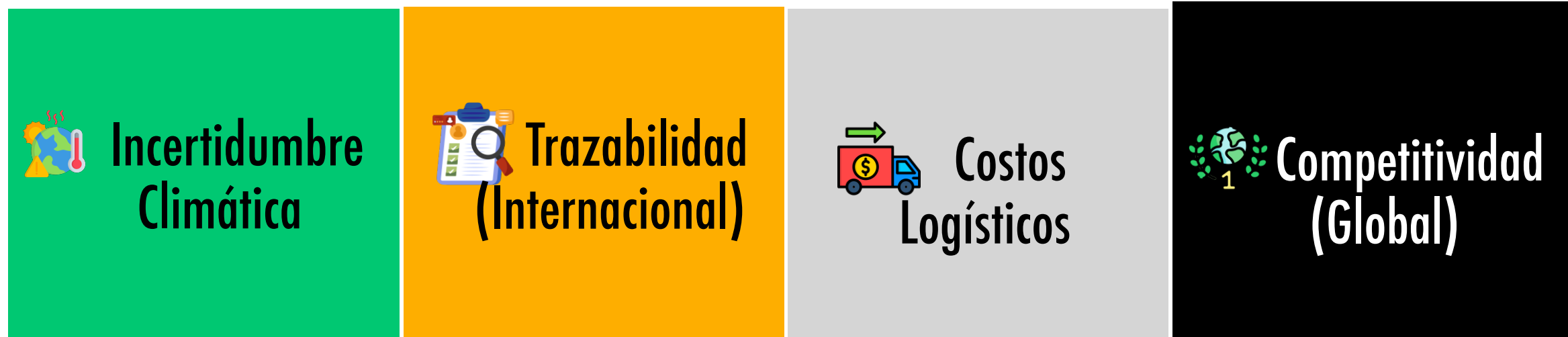
**550 mil t** biomasa cultivada máxima en septiembre de 2024; la biomasa promedio cayó 2% vs. 2023

**Estacionalidad** la lechería chilena se basa en pastoreo y presenta marcada estacionalidad cayó 2% vs. 2023

La IA entra a un sistema alimentario grande, biológico y variable, donde cada mejora de percepción, predicción u optimización tiene impacto operativo real y masivo

# Desafíos y Retos Actuales

La Región de los Lagos produce proteínas para mercados globales. Sus industrias enfrentan desafíos productivos, más exigencias, menos margen de error y necesidad creciente de decidir con mejor evidencia



## LOS LAGOS

*Un ecosistema de proteínas*



### Tensiones compartidas

- ✓ Variabilidad Biológica y Ambiental
- ✓ Calidad e Inocuidad
- ✓ Logística y Cadena de Frío
- ✓ Trazabilidad
- ✓ Sostenibilidad Medible



# 02 · Estructura del dato

---

Sistemas vivos, estacionales y ambientalmente expuestos

# Salmonicultura: arquitectura productiva y generación de datos

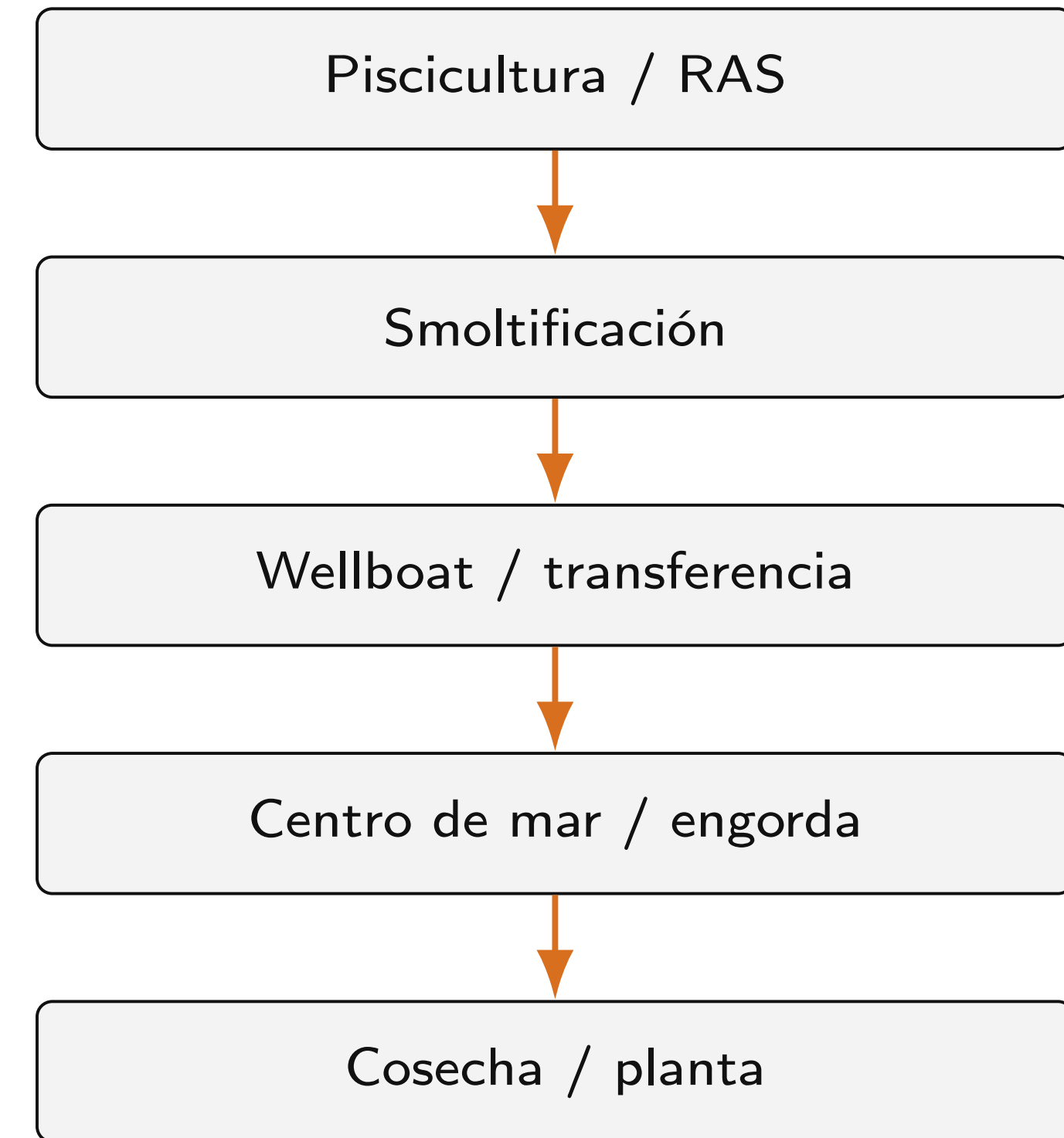
Dos fases biológicas, múltiples granularidades

## Agua Dulce

- Smolt de 100–150 g.
- Duración típica: 10–14 meses.
- RAS con recirculación superior al 95 %.
- Variables continuas: amonio, nitrito, CO<sub>2</sub>, pH, oxígeno, fotoperiodo y temperatura.

## Mar

- Engorda de 14–18 meses.
- Jaulas con 30.000–50.000 peces.
- Densidad legal típica: 17 kg/m<sup>3</sup> para Atlántico.
- Señales de operación: corrientes, salinidad, temperatura, O<sub>2</sub>, video subacuático.



Granularidad natural para modelamiento: estanque-hora, sensor-tiempo, jaula-día, documento-registro.

- **RAS:** *Recirculating Aquaculture System*, sistema de recirculación de acuicultura.
- **Smolt:** pez juvenil adaptado fisiológicamente al paso de agua dulce a mar.
- **Wellboat:** embarcación para transporte de peces vivos.
- **KPI:** *Key Performance Indicator*, indicador

# Variabilidad biológica y ambiental

La estructura del dato condiciona la metodología

## Salmonicultura

- Mortalidad mensual promedio en centros marinos durante 2024: 0,93 %.
- Mortalidad mensual promedio en Los Lagos: 1,17 %.
- Coho 2024: 11,8 % de la mortalidad primaria anual clasificada como ambiental.
- Biomasa máxima mensual superior a 550 mil toneladas.

## Lechería y Mitilicultura

- La lechería regional está marcada por estacionalidad y sistemas de pastoreo.
- La mitilicultura depende de dinámica larval, clorofila, temperatura, salinidad y ventanas operativas.

**Consecuencia metodológica. Los datos observados incluyen/combinan:**

- no linealidad,
- heterogeneidad entre unidades,
- efectos de calendario y clima,
- eventos raros de alto impacto,
- acoplamiento entre biología, ambiente y operación.

## Implicancias

Series no estacionarias, señales multimodales y colas pesadas favorecen modelos temporales, ensembles no lineales y enfoques híbridos.

# 03·La IA y Familias de Modelos

---

KPIs operacionales y funcionales objetivo. Compatibilidad entre tipo de señal y tipo de decisión

# ¿Qué es la IA?

El término **Inteligencia Artificial** fue acuñado en 1956 en la **conferencia de Dartmouth** (McCarthy, Minsky, Rochester, Shannon).

La IA es la habilidad de la máquinas de usar algoritmos para aprender a partir de los datos y de usar lo aprendido para tomar decisiones como lo haría un humano. Es decir, Pensar y Actuar como los humanos y/o Pensar y Actuar racionalmente

Russell, Stuart J. and Norvig, Peter.  
**Artificial Intelligence: A Modern Approach.** Pearson 2021

# De la Prueba de Turing a la Inteligencia Artificial Moderna

**La prueba de Turing**, propuesta por Alan Turing (1950), fue diseñada para proporcionar una definición operativa satisfactoria de inteligencia. Para pasarla se requiere que el computador posea las siguientes capacidades (IA Clásica (1950–2000) )

**(1) Procesamiento del Lenguaje Natural (NPL)**

**(2) Representación del Conocimiento**

**(3) Razonamiento Automatizado**

**(4) Aprendizaje Automático**

La llamada prueba de Turing Total incluye además:

**(5) Visión por Computadora**

**(6) Robótica**

# La Inteligencia Artificial Moderna

**Expansión Reciente (2000–2025). Nuevos campos y tendencias**

**(7) Sistemas Multi-agente (MAS) y coordinación distribuida**

**(8) Planificación y Scheduling de alto nivel**

**(9) Procesamiento de Señales (IoT, satélites, sensores)**

**(10) Optimización avanzada (metaheurísticas + ML + RL)**

**(11) Ética e IA Confiable (XAI, transparencia, seguridad)**

**(12) IA Generativa (LLMs, difusión multimodal)**

**(13) Ciencia de Datos para datos masivos y gemelos digitales**



# KPIs operacionales y funcionales objetivo

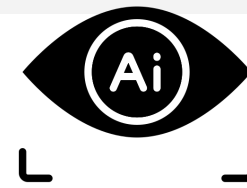
FCR, crecimiento, mortalidad e INFA

## KPIs

- FCR/FCA: indicador económico dominante.
- SGR: tasa de crecimiento específico.
- Mortalidad acumulada y supervivencia condicional.
- INFA: pellet no consumido y riesgo bentónico.

$$\text{SGR} = \frac{\ln(W_{t+h}) - \ln(W_t)}{h} \times 100$$

$$\text{FCR}_{t:h} = \frac{\sum_{\tau=t}^{t+h} \text{Feed}_{\tau}}{B_{t+h} - B_t + H_{t:h} - M_{t:h}}$$



## Función Objetivo Multi - atributo

$$\min_{\pi} \alpha \mathbb{E}[\text{FCR}] + \beta \mathbb{E}[\text{Mort}] + \gamma \mathbb{P}(\text{INFA fail})$$

sujeto a biomasa, oxígeno, regulación y logística.

## Notación

- $W_t$ : peso promedio al tiempo  $t$
- $h$ : intervalo de tiempo (días)
- $\text{Feed}_{\tau}$ : alimento suministrado en  $\tau$
- $B_t$ : biomasa viva al inicio del intervalo
- $B_{t+h}$ : biomasa viva al final del intervalo
- $H_{t:h}$ : biomasa cosechada entre  $t$  y  $t+h$
- $M_{t:h}$ : biomasa perdida por mortalidad entre  $t$  y  $t+h$
- **FCR / FCA**: *Feed Conversion Ratio* / factor de conversión alimenticia.
- **SGR**: *Specific Growth Rate*, tasa de crecimiento específico.

**La formulación práctica combina pronóstico, control, riesgo y cumplimiento normativo.**

# Taxonomía de problemas por sector

Señal dominante, problema y salida útil

Sector	Señal dominante	Problema	Salida útil
1 Salmones	jaula-día, sensor, video, red espacial	feeding, riesgo sanitario, biomasa, oxígeno	pronóstico, control, alerta
2 Choritos	larvas, oceanografía costera, clima	captación, ventana operativa, calidad	cosecha, riesgo, trazabilidad
3 Lácteos	series de planta, frío, laboratorio, ruta	calidad, energía, recibo, shelf-life	clasificación, mantenimiento
4 Carne bovina	visión, cadena de frío, inventario	clasificación, defectos, merma, inocuidad	scoring, detección, compliance

## Implicancia

No existe una única familia de modelos para todo el ecosistema. La arquitectura debe cubrir tabular temporal, visión, grafos, texto y simulación.

# Familias de modelos compatibles

Elección metodológica condicionada por la estructura del dato

---

Problema	Tipo de dato	Familias de modelos	Salida
Consumo / alimentación	lags, clima, biomasa, manejo	GBDT / XGBoost / LightGBM; TCN; LSTM; Transformer temporal; modelos cuantílicos	forecast + bandas
Ambiente / riesgo	sensores, oceanografía, clima, satélite	XGBoost; LSTM/Transformer; híbridos físico-estadísticos	riesgo, ventanas
Inspección / calidad	RGB, NIR, hiperespectral, video	CNN, ViT, YOLO, segmentación, tracking	clasificación, defecto
Integración / conocimiento	documentos, reglas, sensores, histórico multimodal	RAG, agentes LLM, gemelos digitales, RL	copilotos, decisión

---

## Nota técnica

En datos tabulares operacionales ruidosos, los ensembles no lineales siguen siendo muy competitivos. Deep learning se justifica cuando la señal es secuencial larga, multimodal o visual.

# Pronóstico probabilístico de KPIs salmonicultores

TFT / DeepAR + calibración de incertidumbre para alimentación, biomasa o FCR

## Objetivo

Construir pronósticos multi-horizonte para un KPI salmonicultor (*feed intake*, biomasa, FCR o mortalidad), entregando no solo una media esperada sino una **distribución predictiva** o intervalos calibrados.

## Variables de entrada

- $B_t$ : biomasa viva,
- $W_t$ : peso promedio individual,
- $T_t$ : temperatura,
- $O_{2,t}$ : oxígeno disuelto,
- $S_t$ : salinidad,
- $c_t$ : corrientes / hidrodinámica local,
- $u_t$ : alimento suministrado,
- $h_t$ : cosecha / ayuno / manejo,
- $m_t$ : mortalidad u otras covariables operacionales.

## Modelo probabilístico

$$Y_{t+1:t+H} \mid x_{1:t}, z \sim p_{\theta}(\cdot \mid x_{1:t}, z)$$

## Salidas

$$\hat{q}_{0.1}(t+h), \quad \hat{q}_{0.5}(t+h), \quad \hat{q}_{0.9}(t+h)$$

o, en forma distribucional,

$$\hat{\mu}_{t+h}, \quad \hat{\sigma}_{t+h}, \quad \hat{F}_{t+h}(y)$$

para cada horizonte  $h = 1, \dots, H$ .

## Calibración de incertidumbre

Sobre los cuantiles o residuales del modelo base, puede imponerse una corrección conformal:

$$C_{t+h}(x) = [\hat{y}_{t+h}(x) - \Delta_{1-\alpha}, \hat{y}_{t+h}(x) + \Delta_{1-\alpha}]$$

o bien conformal cuantílico:

$$C_{t+h}(x) = [\hat{q}_{\alpha/2}(x), \hat{q}_{1-\alpha/2}(x)].$$

## Uso Operacional

- ración y stock de alimento,
- riesgo de sub/sobrealimentación,
- planificación de cosecha,
- evaluación ex-ante de escenarios ambientales.

# **04·Ejemplos de Casos (técnico)**

---

Aplicaciones por sector con estructura de problema, dato y salida

# Caso I · Salmonicultura: feeding de precisión

Visión computacional, estado del cardumen y control

---

## Problema

La alimentación en pontón se regula por observación humana y cámaras submarinas. El pellet no consumido implica pérdida económica y riesgo bentónico.

## Datos

video subacuático · tracking del cardumen · historial de jaula-día · temperatura · O<sub>2</sub> · corrientes

## Modelos

CNN/ViT + tracking · TCN/LSTM/Transformer temporal · fusión multimodal · política de control con restricciones

## Salida

- cierre asistido o automático de válvulas,
- estimación de pellet no consumido,
- alimentación adaptativa por jaula,
- reducción de riesgo INFA.

## Impacto

El costo del alimento representa 40–60 % del costo total o operacional según el contexto reportado, por lo que pequeñas mejoras en FCR son financieramente relevantes.

# Caso II · Salmonicultura: grafos sanitarios y GNNs

## Matriz de conectividad

Caligus y SRS como problema de red

### Problema

La transmisión sanitaria no es independiente entre centros: corrientes, proximidad y barrios sanitarios inducen dependencia espacial explícita.

### Representación

$$G_t = (V, E_t), \quad V = \{A, B, C, D, E, \dots\}$$

donde cada nodo representa un **centro de cultivo** y cada arista una **conectividad efectiva** entre centros.

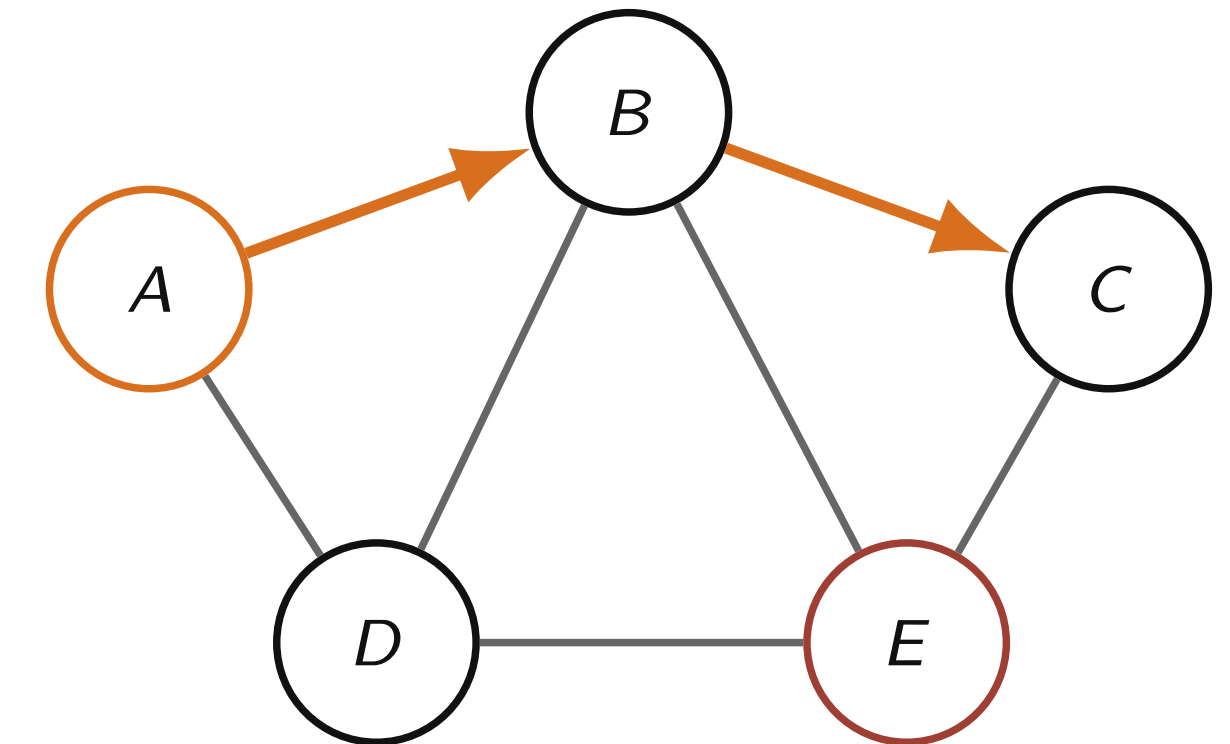
### Variables por nodo

$$x_i(t) = (L_i(t), M_i(t), B_i(t), T_i(t), O_{2,i}(t), U_i(t))$$

- $L_i(t)$ : carga de *Caligus*,
- $M_i(t)$ : mortalidad,
- $B_i(t)$ : biomasa,
- $T_i(t)$ : temperatura,
- $O_{2,i}(t)$ : oxígeno disuelto,
- $U_i(t)$ : tratamientos / intervención / manejo.

$$A_{ij}(t) = \kappa(\text{corrientes}_{ij}(t), d_{ij}, \text{barrio}_{ij}, \text{dirección}_{ij}(t))$$

Aquí,  $A_{ij}(t)$  mide la intensidad de influencia del centro  $j$  sobre el centro  $i$ .



### Capa GNN

$$h_i^{(\ell+1)}(t) = f_\theta \left( h_i^{(\ell)}(t), \sum A_{ij}(t) \psi(h_j^{(\ell)}(t)) \right)$$

donde:

- $f_\theta$ : actualización del estado latente del nodo,
- $\psi$ : transformación de mensajes desde nodos vecinos.

### Readout

$$\hat{y}_i(t+h) = g_\phi(h_i^{(L)}(t))$$

donde  $g_\phi$  proyecta el embedding final del nodo a una salida operacional: riesgo de brote, carga futura o ventana de tratamiento.

# Caso III · Salmonicultura: FAN, hipoxia y eventos extremos

Nowcasting, forecast extremo y decisión asimétrica

## Señales

clorofila-a satelital · SST · radiación · viento ·  
nutrientes · O<sub>2</sub> · boyas oceanográficas · historial local

## Modelado

- nowcasting multifuente,
- forecast extremo,
- calibración probabilística,
- política de respuesta operacional.

$$u^* = \arg \min_u \mathbb{E}(C_{FN}1_{FN} + C_{FP}1_{FP})$$

- $u^*$ : umbral óptimo de activación de alerta
- $C_{FN}$ : costo de falso negativo
- $C_{FP}$ : costo de falso positivo

## Dificultad

- baja frecuencia,
- alto impacto,
- shift climático,
- fuerte dependencia espacial,
- señales precursoras débiles.

## Salida

Alerta temprana probabilística + protocolo de respuesta condicionado al costo asimétrico del error.

# Caso IV · Mitilicultura

Oceanografía costera, captación de semilla y trazabilidad

---

## Estructura del Sector

Los Lagos concentra la totalidad de la cosecha nacional de chorito. El sector depende de captación de semilla, calidad ambiental, ventanas operativas y trazabilidad exportadora.

## Tareas plausibles

- modelos de captación y productividad,
- nowcasting de temperatura, salinidad y clorofila,
- scheduling logístico de cosecha y planta,
- clasificación visual de talla y daño.

## Dato público

La infraestructura de monitoreo ya existe: IFOP/SUBPESCA organizan el problema con larvas y variables ambientales. La brecha principal es analítica.

## Interés

Sector especialmente adecuado para combinar oceanografía costera, series temporales, visión y optimización logística.

# Caso V · Lechería

Estacionalidad, calidad y cadena de frío

## Estructura del problema

La cadena láctea combina producción biológica, control industrial, cadena de frío, logística y predicción de mercado. Desde el punto de vista analítico, esto induce una mezcla de datos tabulares, series temporales, señales de sensores, laboratorio, visión computacional y datos comerciales.

## Áreas de aplicación

- **Producción primaria:** pronóstico de productividad, salud reproductiva, detección temprana de desvíos y monitoreo continuo del rebaño.
- **Planta:** control de pasteurización, envasado, consumo energético, mantenimiento predictivo y control automatizado de calidad.

## Algunos KPIs para el sector

litros por vaca o por predio · tasa de preñez / fertilidad · calidad microbiológica y composicional · consumo energético por litro procesado · downtime de equipos · merma · exactitud del forecast de demanda · quiebre o sobrestock en cadena fría

## Familias de Modelos

- **Tabular / temporal:** XGBoost, LightGBM, TFT, DeepAR
- **Sensores / planta:** anomaly detection, state-space, mantenimiento predictivo
- **Visión:** CNN, ViT, detección de defectos y anomalías
- **Demanda:** forecasting probabilístico, quantile regression, conformal prediction

## Salidas operacionales

- volumen esperado y bandas de incertidumbre,
- alerta temprana de falla de equipos,
- clasificación automática de calidad,
- menor merma y mejor gestión de inventario,
- ajuste dinámico entre producción, frío y distribución.

# Caso VI · Carne bovina

Visión, clasificación y trazabilidad

---

## Problemas

- clasificación de canales y cortes,
- detección de defectos y control sanitario,
- cadena de frío,
- trazabilidad lote a lote.

## Modelos IA

visión computacional (CNN/ViT/YOLO) · anomaly detection · optimización logística · copilotos documentales

## Observación

Una buena arquitectura de inspección y trazabilidad puede tener más retorno que un modelo predictivo complejo mal integrado.

## Escala

Los Lagos concentra 26,5 % de la masa ganadera bovina nacional.

# 05·Agenda de implementación

---

Secuencia razonable para empresas regionales

# Arquitectura multimodal

Percepción, integración y acción

## Capa 1 · Percepción

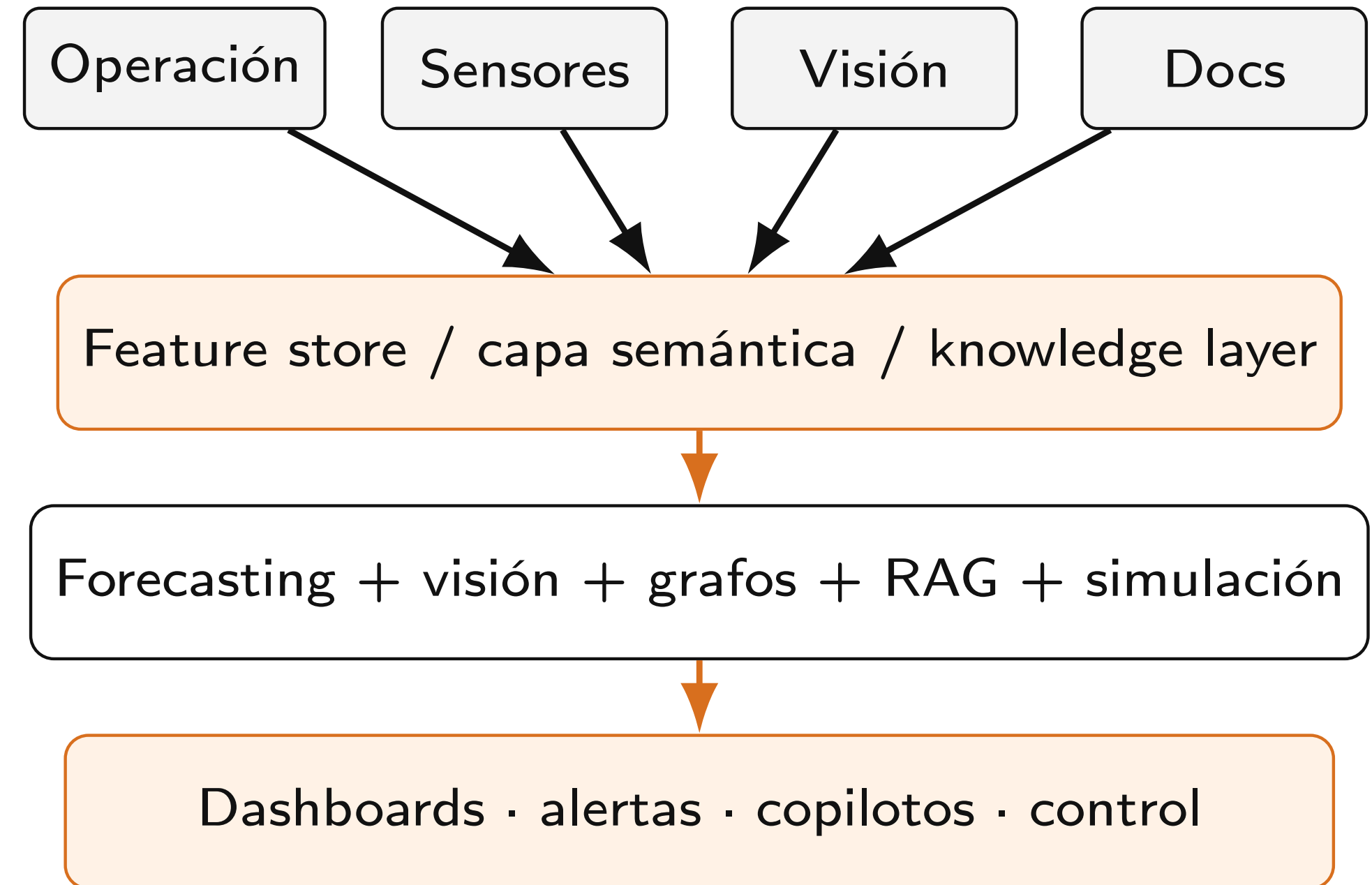
forecasting · clasificación · detección · scoring · anomaly detection

## Capa 2 · Integración

series temporales + visión + sensores + documentos + reglas operativas + conocimiento de dominio

## Capa 3 · Acción

alertas automáticas · control asistido · optimización · scheduling · simulación · copilotos operacionales



### Punto crítico

La ventaja no proviene de un único modelo brillante, sino de una arquitectura capaz de integrar modalidades, historial y conocimiento experto.

# Agentes, RAG y copilotos operacionales

Acceso al conocimiento distribuido de la operación

## Caso se uso inmediato

- consulta de SOPs, protocolos y normativa,
- explicación de desvíos de FCR o feeding,
- generación asistida de reportes ESG y compliance,
- navegación semántica de auditorías e incidentes.

## Condiciones para funcionar

grounding documental · control de fuentes ·  
versionamiento · guardrails · validación humana

## Nota técnica

Los agentes no reemplazan MLOps, trazabilidad de modelos ni validación cuantitativa. Su rol es reducir el costo de acceso al conocimiento distribuido.

## Riesgos

alucinaciones en contexto normativo crítico  
· documentación pobre · automatización  
excesiva de decisiones de alto impacto

- **SOP:** *Standard Operating Procedure*, procedimiento operativo estándar.
- **FCR / FCA:** *Feed Conversion Ratio /* factor de conversión alimenticia.
- **ESG:** Environmental, Social and Governance.

# Gemelos digitales y control bajo incertidumbre

De la predicción aislada a la simulación y decisión condicionada

## Definición operacional

$$\hat{x}_{t+1} = F(\hat{x}_t, u_t, z_t; \theta), \quad u_t = \pi(\hat{x}_t, \mathcal{C}_t)$$

## Notación

- $\hat{x}_t$ : estado estimado del sistema en el tiempo  $t$
- $\hat{x}_{t+1}$ : estado estimado un paso adelante
- $u_t$ : acción de control o decisión operacional
- $z_t$ : variables exógenas del entorno
- $F$ : dinámica de transición del sistema
- $\theta$ : parámetros del modelo
- $\pi$ : política de decisión
- $\mathcal{C}_t$ : conjunto de restricciones vigentes

## Ejemplos de interpretación

En salmonicultura:

- $\hat{x}_t$ : biomasa,  $O_2$ , temperatura, estado sanitario
- $u_t$ : ración, aireación, cosecha anticipada
- $z_t$ : corrientes, clima, salinidad, FAN

En lácteos o planta:

- $\hat{x}_t$ : inventario, temperatura, estado de equipos
- $u_t$ : setpoints, mantenimiento, secuencia de producción
- $z_t$ : demanda, energía, restricciones logísticas

# Agenda de implementación

Secuencia razonable para empresas regionales

---

1. Instrumentación: granularidad mínima útil.
2. Base de verdad: catálogos, eventos y trazabilidad documental.
3. Modelos iniciales: forecasting probabilístico, visión de calidad, anomalías.
4. Modelos de red y entorno: riesgo sanitario, clima, oxígeno, ventanas.
5. Capa cognitiva: RAG / agentes.
6. Gemelo / simulación: cuando el costo del error justifique mayor complejidad.

## **Criterio de priorización**

Frecuencia del problema · costo del error · disponibilidad del dato · capacidad de intervenir la operación  
· posibilidad de medir impacto

# Programa mínimo de investigación aplicada

Una agenda de 24 meses academia–industria

---

## Línea A

### Percepción y forecasting

- consumo/alimentación
- calidad/defectos
- nowcasting ambiental

## Línea B

### Sistemas complejos

- grafos sanitarios
- digital twins
- optimización bajo incertidumbre

## Línea C

### Capa cognitiva y gobernanza

- copilotos técnicos
- trazabilidad semántica
- auditoría y validación

## Salida esperada

publicaciones · pilotos con datos reales · datasets curados · base para fondos ANID/CORFO ·  
articulación regional

# Síntesis

---

1. La escala regional justifica ambición analítica.
2. La variabilidad biológica obliga a abandonar enfoques simplistas.
3. La frontera técnica combina forecasting, visión, grafos, agentes y gemelos digitales.
4. La arquitectura y la integración pesan más que un algoritmo aislado.

## Ecuación de Síntesis

$$\underbrace{\text{datos instrumentados}}_{\text{infraestructura}} + \underbrace{\text{modelos compatibles}}_{\text{metodología}} + \underbrace{\text{decisiones accionables}}_{\text{implementación}} = \text{producción alimentaria inteligente}$$

### Invitación

Si existen datos, pero las decisiones siguen siendo difíciles, entonces ya existe un problema legítimo de IA aplicada.

**Gracias iii**