

Ciclo de Conferencias del
Máster UNED-UCM y del Programa de Doctorado en
“Ingeniería de Sistemas y de Control”



Uso de vehículos autónomos marinos en la monitorización de la calidad de las aguas embalsadas

José A. López Orozco

jalo@dacya.ucm.es



Dpto. Arquitectura de
Computadores y Automática

31-05-2023

Esquema de la presentación

Introducción y descripción del problema
Vehículos autónomos de superficie (ASV)
Aplicación a la calidad del agua
Sistema de gestión de calidad

Presentación

Grupo UCM (desde 2005):

ISCAR (Ingeniería de Sistemas, Control, Automatización y Robótica)

14 profesores, 11 jóvenes investigadores

DACYA (Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática) &
DISIA (Departamento de Ingeniería del Software e Inteligencia Artificial)

Líneas principales de investigación:

- ▶ Modelado, identificación y control de sistemas
- ▶ Optimización de sistemas y aprendizaje máquina
- ▶ Visión por computador e integración multisensorial
- ▶ Vehículos autónomos y robótica móvil

Desarrollo de sistemas de generación de energía en el ámbito marino
Monitorización y gestión de la calidad de las aguas embalsadas

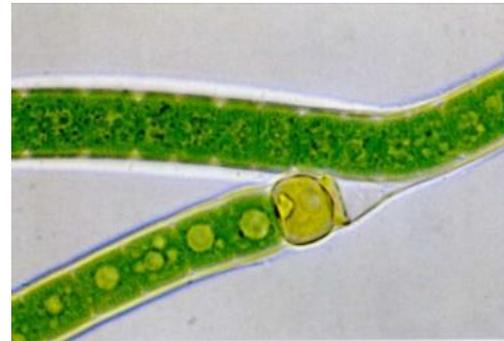


Cianobacterias

El problema. ¿Qué son las cianobacterias?

Baterías, organismos procariotas unicelulares fotosintéticos que carecen de núcleo definido u otras estructuras celulares especializadas

Contienen clorofila, realizan la fotosíntesis, fijando CO_2 y generando oxígeno.



Históricamente se las ha identificado como algas verde-azuladas

El problema. ¿Qué son las cianobacterias? (2)

Características:

- Capacidad de subir/bajar: vesículas de gas
- Rápido crecimiento: Formación de BLOOMS (afloramientos masivos)
- Acumulaciones en orillas: ESPUMAS (SCUMS)



El problema. ¿Qué son las cianobacterias? (3)

Problemas:

Impacto visual y económico
Presencia de toxinas, malos olores:

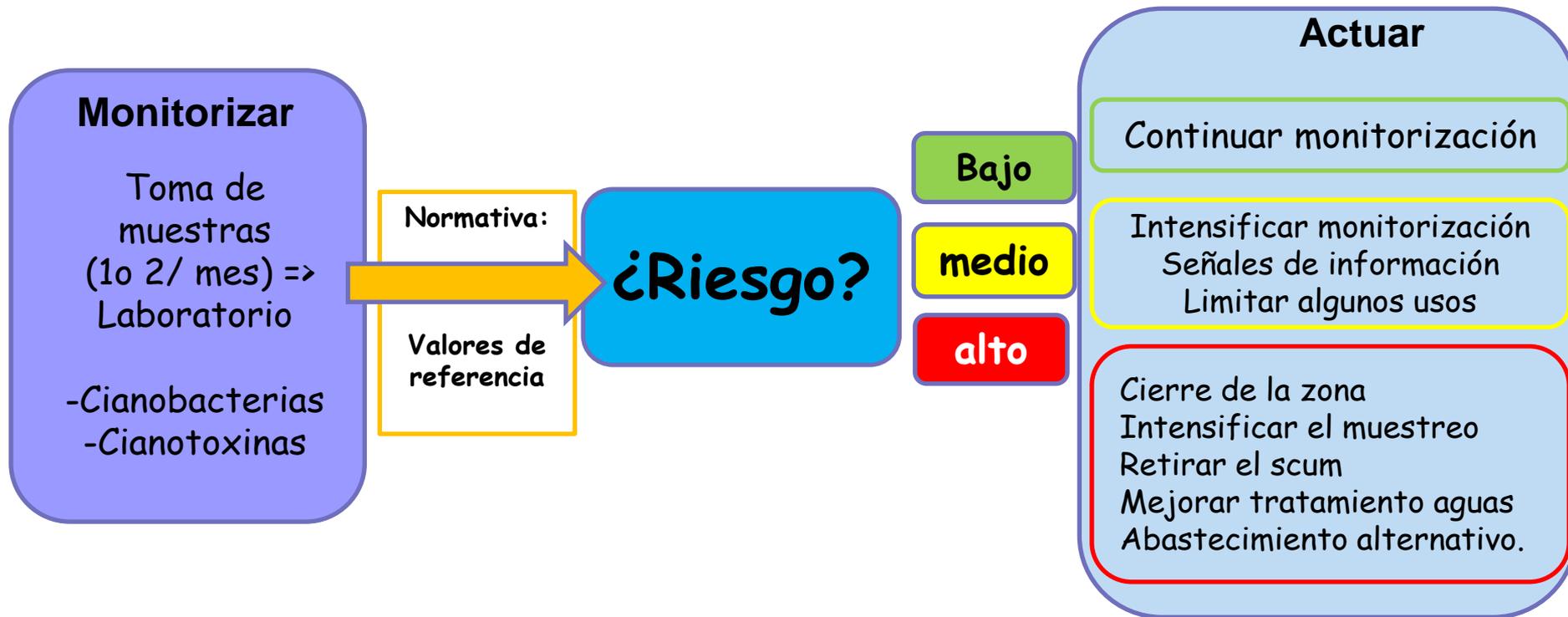
- Aguas de consumo
- Aguas recreativas
- Ambientes protegidos

Pueden producir toxinas (venenos) y enfermar a las personas y los animales:
Citotoxinas, Neurotoxinas,
Hepatotoxinas, Dermatotoxinas, ...

- Dolor de estómago.
- Síntomas neurológicos (dolor de cabeza, debilidad muscular, mareos, ...)
- Vómitos.
- Diarrea.
- Daño hepático.



Gestión actual: Análisis de riesgos



Legislación escasa. **Recomendaciones, valores obligatorios (microcistinas).**
Directiva Europea Water Quality (2021), 6° ODS 2030 (Agua limpia y Saneamiento).
Sobre todo en **aguas potable** (agua una vez tratada).
Aguas recreativas (agua en origen).

Muestreos

Periódicamente de forma manual:



Alternativa:



Sistema Automático de Información de Calidad de las Aguas (SAICA)



¿Qué sensores se utilizan?

Sensores que nos informen sobre el estado de la masa de agua

Saber qué está pasando



Alertar existencia de BCs



Temperatura
PH
Oxígeno disuelto
Conductímetro
Turbidímetro
Nitratos, fosfatos, ...
Ficocianina y clorofila
Imágenes (cámara fija / satélite), ...

Situados en puntos fijos, medidas puntuales y conocimiento local

Propuesta

Detectar / alertar / **predecir** BCs

Sensores fijos:

Puntos de interés: cámaras multispectrales, sensores físico-químicos, corrientímetros, estación meteorológica, ...

Sensores móviles:

Medir en los puntos de interés en cada instante
Conocimiento 4D del embalse

Turbidímetro
Ficocianina y clorofila
Temperatura
PH
Oxígeno
Conductímetro
Imágenes



ASV: Autonomous Surface Vehicles (1)

Vehículos Autónomos de Superficie para monitorización:

SL20

<https://www.oceanalpha.com/>

(L)105 cm *(W)55 cm (17Kg -10Kg)

<https://www.youtube.com/watch?v=znabMyLOSdc&t=6s>

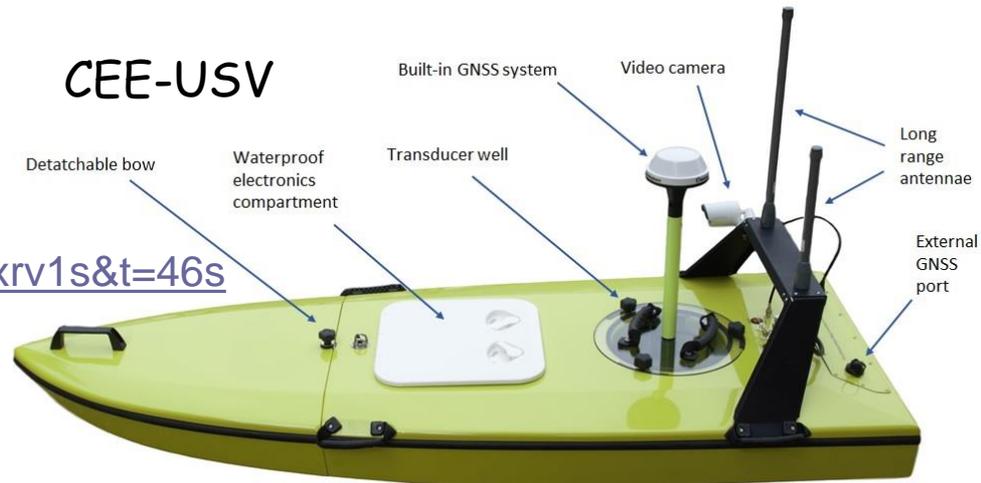


<https://ceehydrosystems.com/>

(L)195 cm *(W)72 cm (48Kg)

https://www.youtube.com/watch?v=i_f0IRxrv1s&t=46s

CEE-USV



ASV: Autonomous Surface Vehicles (2)

Catamaranes:

<https://www.teledyne.com/>

(L)127 cm *(W)94 cm *(H) 32 cm (22Kg)

<https://www.youtube.com/watch?v=X7SMjHlb8uA>

Z-Boat 1250



<https://ceehydrosystems.com/>

(L)130 cm *(W)88 cm (32Kg)

<https://www.youtube.com/watch?v=nwtlZf88Vxl>

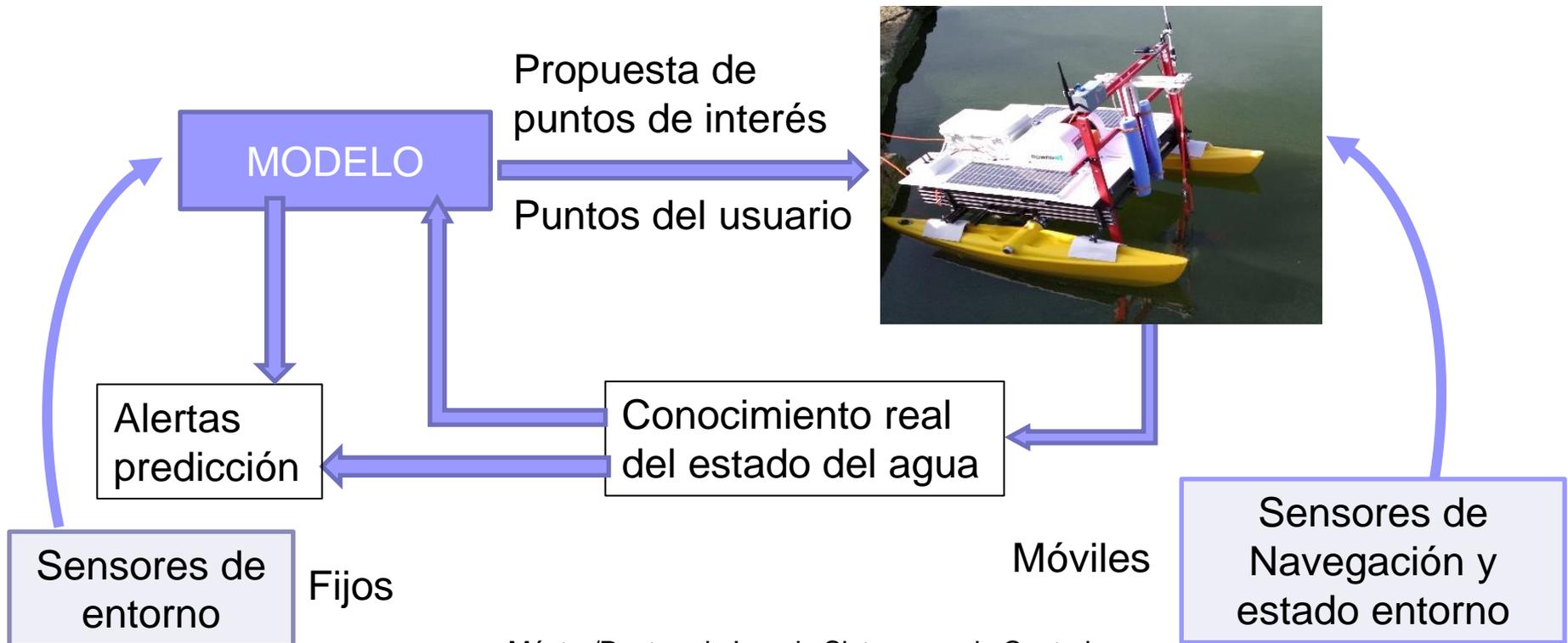
Trident ASV



Solución:

Aportar valor añadido: mejores algoritmos

Combinar sensores fijos y móviles (IoT)
Posición de medida guiada por modelos
Medidas tomadas mejoran los modelos



Sensores fijos:



CENTRO DE CONTROL
Modelo -> Planificación

Estado del entorno (mejorar el modelo):

Batimetría: Conocer el vaso de agua para el modelo hidrodinámico

DCP (corrientímetro Doppler): las corrientes que mueven las cianos

Estación metereológica: los vientos que desplazan las cianos y la luz/temperatura que favorece la floración

Aportes de agua, nutrientes, ...

Detección:

Cámaras: En puntos estratégicos información sobre la existencia de un BC.

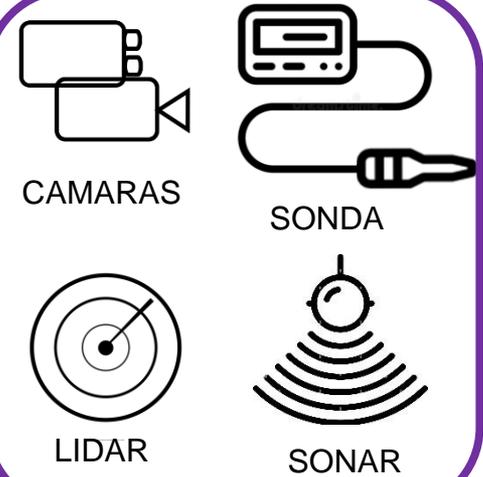
Sondas: Conocimiento clásico sobre el estado del embalse

Sensores móviles: ASV

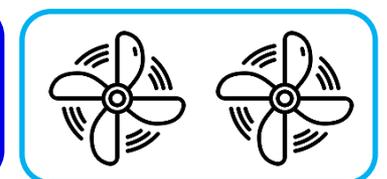
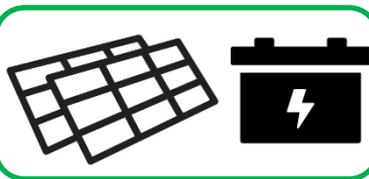
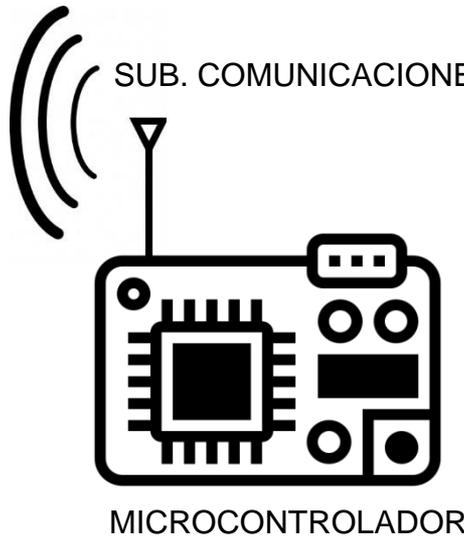
Subsistemas del ASV

VEHÍCULO AUTÓNOMO DE SUPERFICIE
Control y sensorización

SUB. SENSORIZACIÓN



SUB. COMUNICACIONES

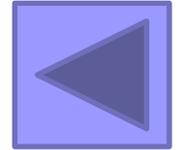


CENTRO DE CONTROL
Planificación de alto nivel



ASV

Sub. Posicionamiento



Posicionamiento, Navegación y control:

Propulsión:
T200 Thruster



Módulo GPS:
MINI Ublox M8N

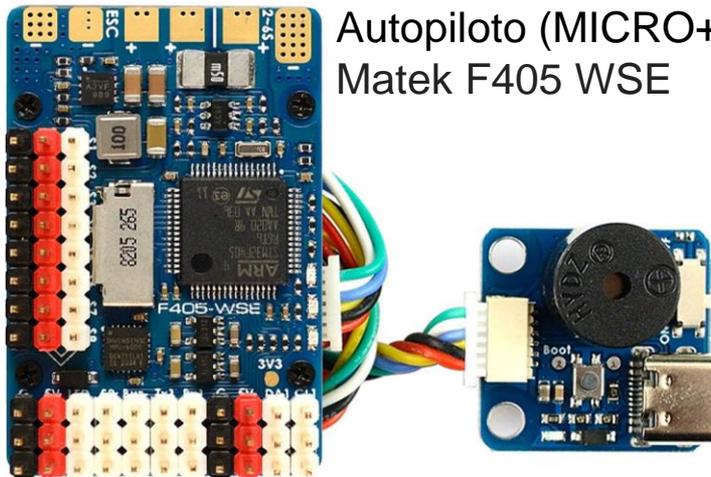


Paparazzi

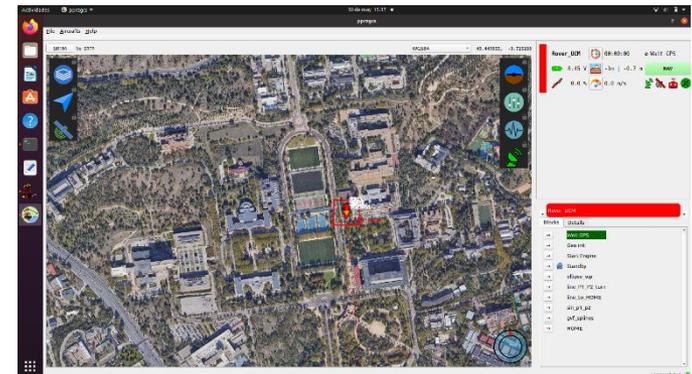


<https://wiki.paparazziuav.org/>

Autopiloto (MICRO+IMU):
Matek F405 WSE



*** Dupont 2.54 pins are shipped unsoldered



Sub. Comunicaciones



Control manual: radio

Futaba 14SG 2.4Ghz FASSTesT

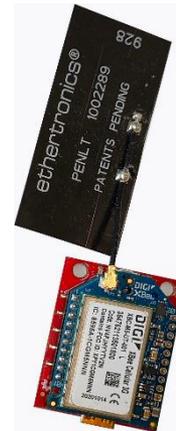
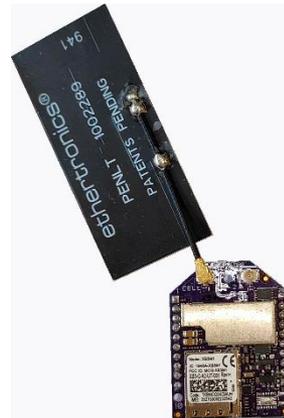


Comunicación CGS:

Radiofrecuencia:
Xbee S2C 2.4GHz



LTE:
DIGI XBee Cellular 3G
DIGI XBee Cellular LTE-M/NB-IOT



Wifi:
Ubiquiti Networks NSM2



Otros Lora, Sigfox ,...
Poco ancho de banda

Sub. Sensorización

Detección cianobacterias:

Cámaras: Observación de la existencia de un BC.

Sondas: Conocimiento sobre el estado de embalse

Información en 4D (posición, profundidad y tiempo).



Navegación:

Sonar, cámara, lidar: Detección de obstáculos.

GPS: Localización.

Estado: Nivel de batería, IMU, ...

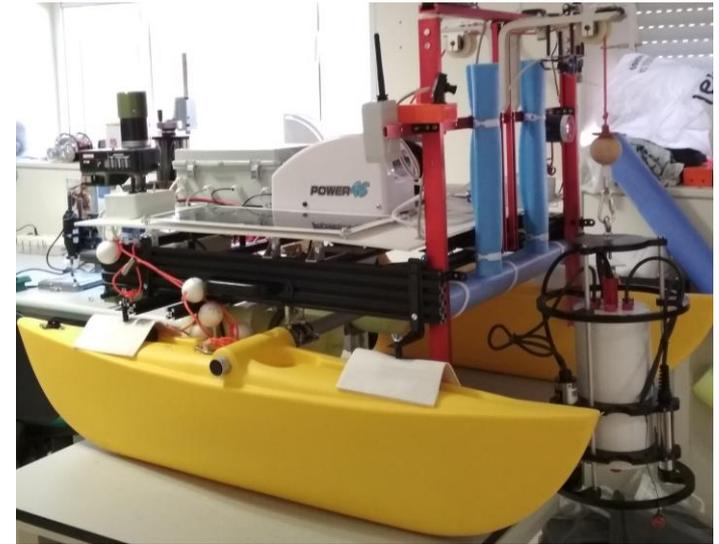
Sensor. Sonda multispectral (1)

Sonda móvil:

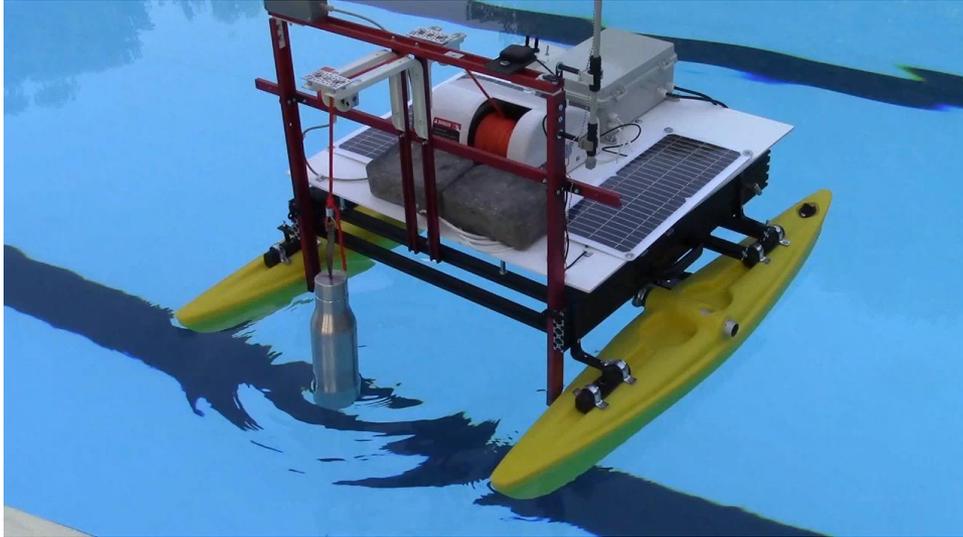
- Temperatura, profundidad y PH
- Oxígeno disuelto
- Ficocianina



Diámetro: 24 cm
Altura: 41 cm
Peso: 4 Kg



Sensor. Sonda multispectral (2)



Sensor. Cámara a bordo (1)

Características:

- Imágen a color
- Información de profundidad
- Detección de objetos.
- IMU, Barómetro y Magnetómetro integrados.



Permiten desarrollar la vision artificial para navegación y para detección de blooms

Sensor. Cámara a bordo (2)



Detección de obstáculos:

Algoritmos de detección de objetos de deep learning => 2D

Información de profundidad de la cámara stereo => 3D



Detección de Cianobacterias:

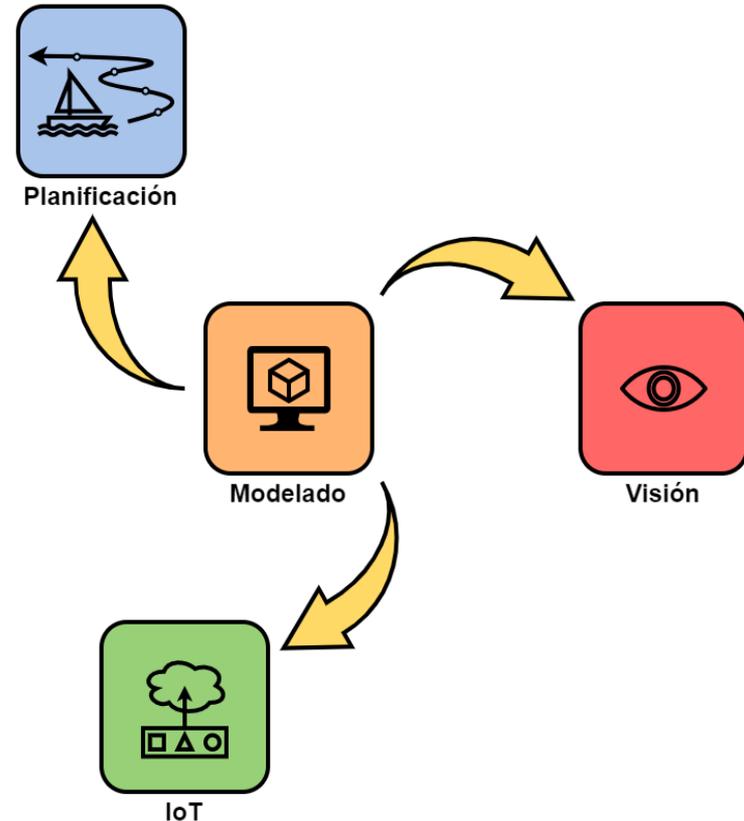
Algoritmos de deep learning de segmentación. Cada pixel es clasificado



- 1: Blooms
- 2: Water
- 3: Landscape
- 4: Sky

Modelo. ¿Por qué es útil?

- Conocimiento y comprensión
- Escenarios hipotéticos
- Capacidad de predicción
- Preparación de misiones
- Detección de fallos, ...



Modelo dinámico.

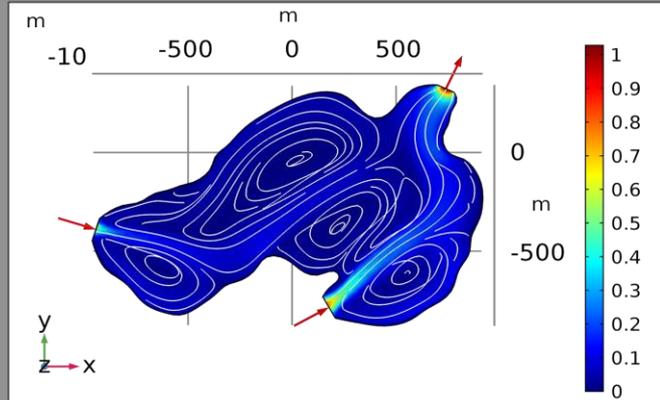
Corrientes y cianobacterias (1)

Fluid dynamics (Navier-Stokes)

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho_f} \nabla p + \mathbf{F} + \nu \nabla^2 \mathbf{u}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

COMSOL



Particle velocity

$$\left(1 + \frac{1}{2} \frac{\rho_f}{\rho_p}\right) \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_p}\right) \mathbf{g} + \frac{18\nu\rho_f}{d_p^2\rho_p} (\mathbf{u}_{ss} - \mathbf{u}_p) + \frac{3\rho_f}{2\rho_p} \frac{D\mathbf{u}_{ss}}{Dt}$$

Particle position

$$\frac{\partial \mathbf{x}_p}{\partial t} = \mathbf{u}_p$$

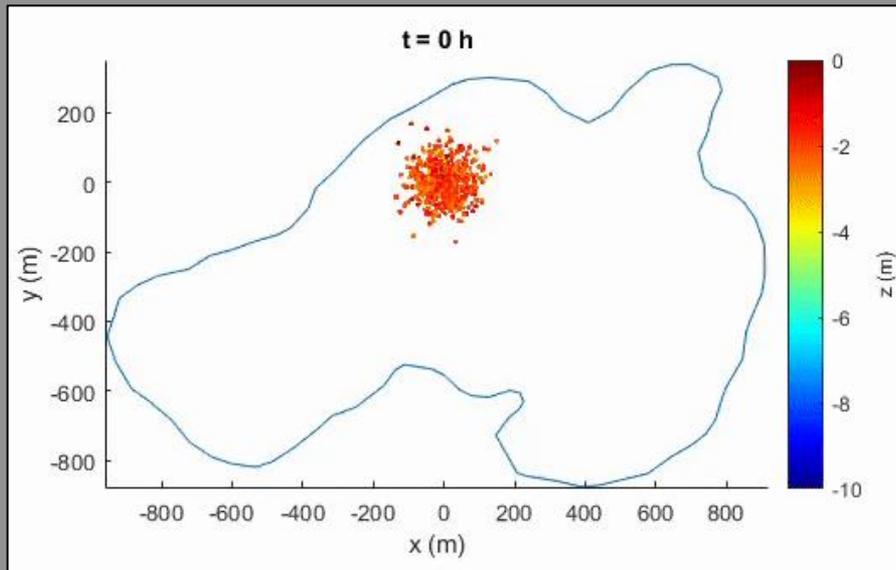
Next time-step

Modelo dinámico.

Corrientes y cianobacterias (2)

Modelos dinámicos:

Partículas



3D + tiempo

Migración vertical y transporte

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho_f} \nabla p + \mathbf{F} + \nu \nabla^2 \mathbf{u},$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0,$$

$$I = I_s \exp(K_i z),$$

$$\frac{d\rho_{\text{cell}}}{dt} = \beta I \exp(-I/I_0) + \gamma,$$

$$\frac{d\rho_{\text{cell}}}{dt} = -\alpha(\rho_{\text{cell}} - C_\rho) H(\rho_{\text{cell}} - C_\rho),$$

$$\rho_c = \rho_{\text{cell}} n_{\text{cell}} (1 - n_{\text{gas}}) + \rho_{\text{muc}} (1 - n_{\text{cell}}),$$

$$\mathbf{u}_p = \mathbf{u} + \frac{d_p^2}{18\nu} \left(\frac{\rho_c}{\rho_f} - 1 \right) \mathbf{g},$$

$$\frac{\partial \mathbf{x}_p}{\partial t} = \mathbf{u}_p,$$

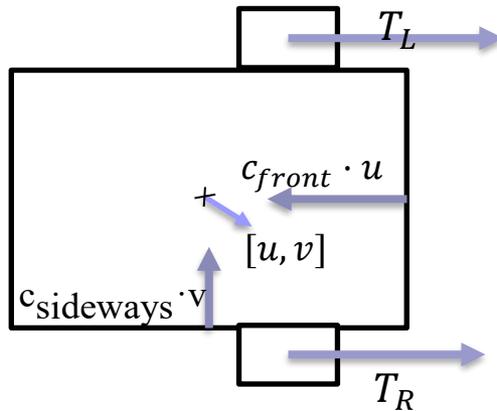
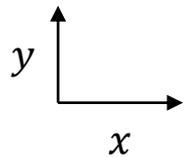
Modelo del vehículo (1)

- Estado del ASV $\forall t: s(t) = [x(t), y(t), \phi(t), u(t), v(t), r(t)]$
 - Posición
 - rumbo
 - velocidad
 - velocidad angular

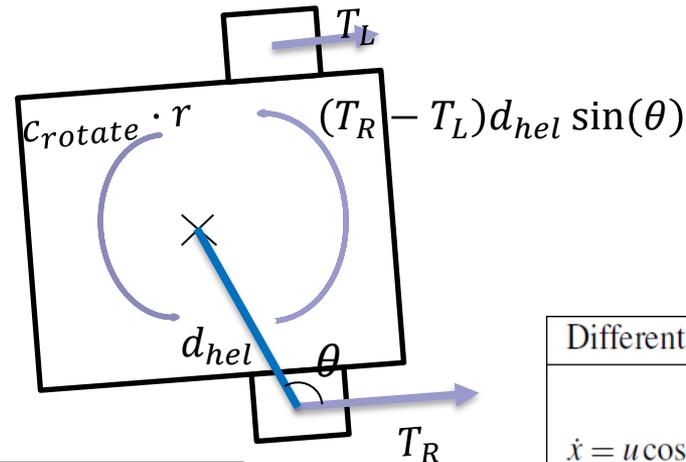
- Integración Runge-Kutta 4^o orden.
- Incluye fuerza de los propulsores ($T_{R,L}$) and fricción
 - No fuerzas externas (viento, corrientes).
- $T_{R,L}$ obtenido de la curva de potencia PWM-motor.

ASV parameters
$m = 40 \text{ Kg}$
$H = 0.98 \text{ m}$
$L = 0.73 \text{ m}$
$W = 0.70 \text{ m}$
$d_{hel} = 0.399 \text{ m}$
$c_{front} = 1.629$
$c_{sidways} = 29.71$
$c_{rotate} = 25.12$

Modelo del vehículo (2)



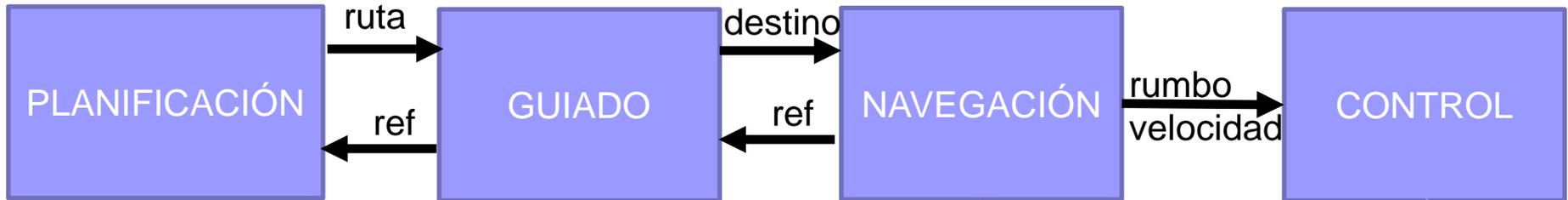
$s(t)[x(t), y(t), \phi(t), u(t), v(t), r(t)]$



Inputs, states and intermediate variables relationships
$T_i = \begin{cases} (1.3e^{-5} \cdot a_i^2 - 3.4e^{-2} \cdot a_i + 21.5) & \text{if } a_i \geq 1540 \\ 9.8 \cdot (9.2e^{-6} \cdot a_i^2 - 3.2e^{-2} \cdot a_i + 27.1) & \text{if } a_i \leq 1460 \\ 0 & \text{if } 1460 \leq a_i \leq 1540 \end{cases} \quad (\text{R1})$
$\left. \begin{aligned} X &= -c_{\text{front}} \cdot u + (T_L + T_R) \\ Y &= -c_{\text{sideways}} \cdot v \end{aligned} \right\} \quad (\text{R2})$
$N = -c_{\text{rotate}} \cdot r + (T_R - T_L) \cdot d_{\text{hel}} \cdot \sin(\theta) \quad (\text{R3})$

Differential Eq.
$\dot{x} = u \cos \phi - v \sin \phi$
$\dot{y} = u \sin \phi - v \cos \phi$
$\dot{\phi} = r$
$\dot{u} = \frac{X}{m} + r \cdot v$
$\dot{v} = \frac{Y}{m} - r \cdot u$
$\dot{r} = \frac{N}{\frac{m}{12} \cdot (L^2 + W^2)}$

Sistema PGNC



Obtención de la ruta óptima para muestrear

Planificación Offline



Puntos a los que dirigir el ASV

Obtención puntos online



Obtención de rumbo, velocidad, ...

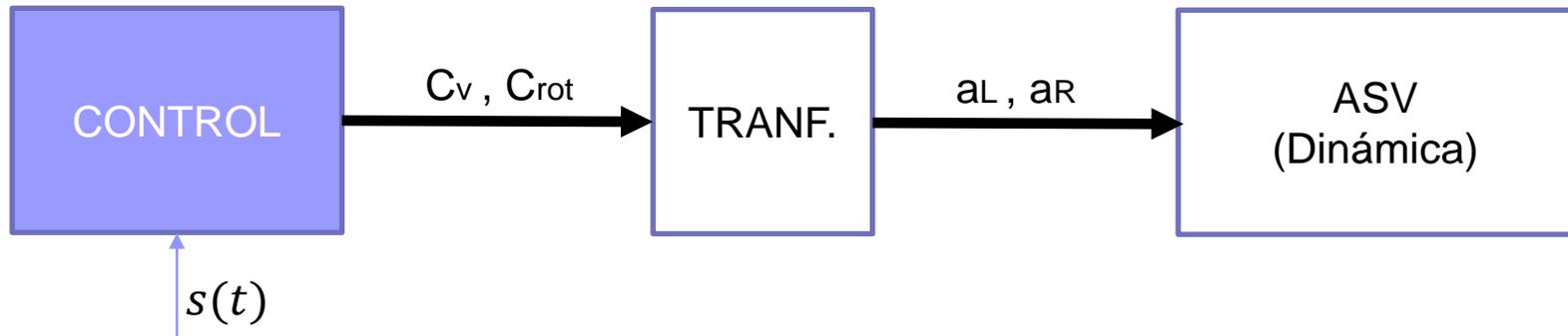
Esquiva de obstáculo (cambio rumbo)



Actuación sobre los propulsores

Control rumbo (corrientes, viento)
Control posición

PGNC. Controlador



Restricciones de aceleración y rotación del ASV

Rumbo/velocidad → Señales de control de alto (c_v, c_{rot})

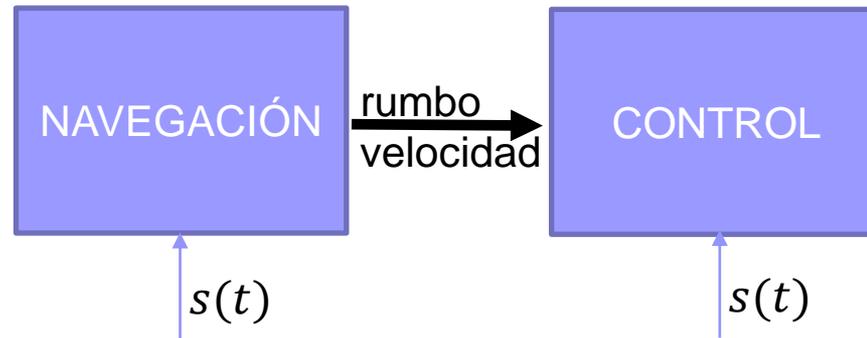
Según c_v reduce c_{rot} (evitar giros bruscos)

Control Proporcional Integral acotado con Anti-Windup

Señales de control (c_v, c_{rot}) → Señales al actuador (a_L, a_R)

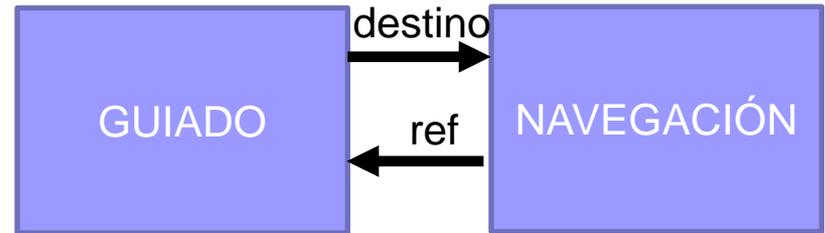
Curva Propulsores - PWM

PGNC. Navegación



- S(t) actual / punto destino → Rumbo/velocidad
- Decide cuando el destino se ha alcanzado → Reduce velocidad y solicita nuevo destino
- Detecta Obstáculo → Cambio de rumbo (circunnavegación)
Si variación rumbo alta, solicita nuevo destino

PGNC. Guiado



Ruta del Planificador → Obtiene los puntos objetivo

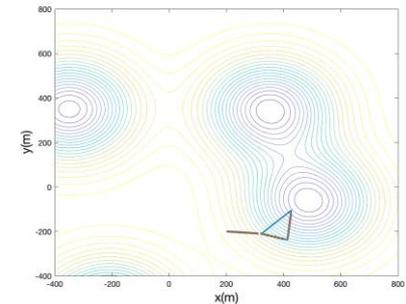
- Si punto no alcanzable (navegación) → Nuevo punto destino
- Si es exploración zona → Obtiene puntos según algoritmo:

Búsqueda de valor máximo:

Nelder-Mead Simplex Optimization Algorithm (1965)

Triangula en el espacio (3 medidas) para encontrar el mín/max

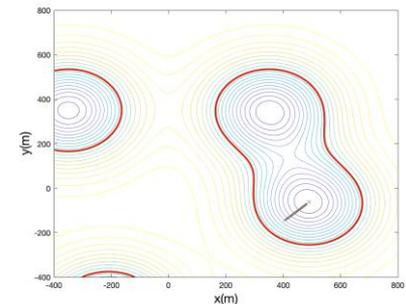
Fin: el área del triángulo es pequeña.



Búsqueda de contorno:

PATH following algorithm (Mezher and Philippe, 2000)

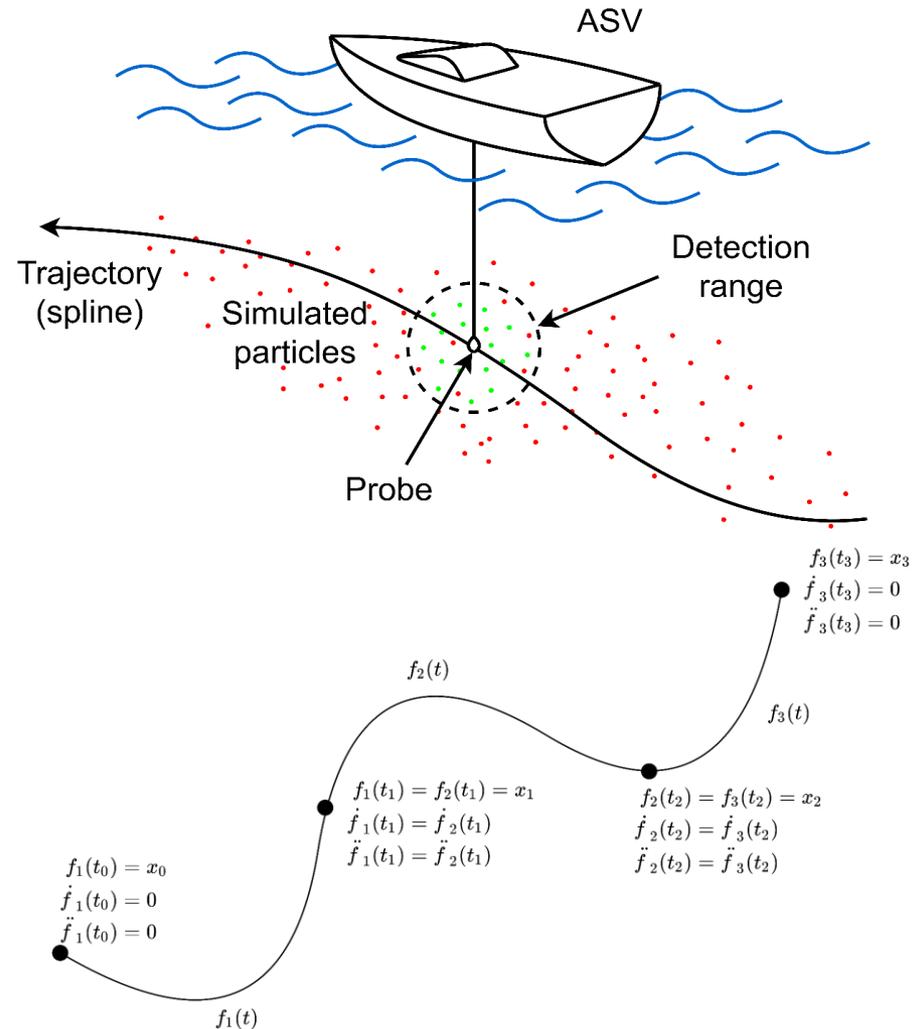
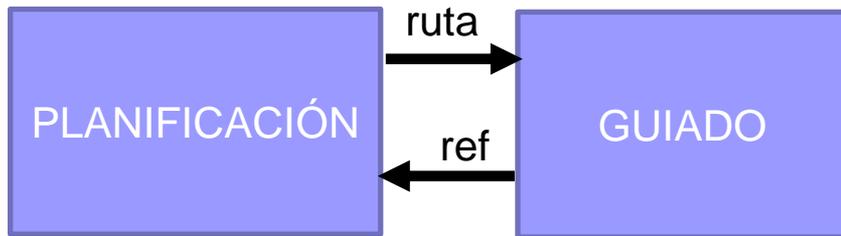
Se mueve entre nodos del triángulo (Pto interior - Pto exterior)



Exploración:

Genera puntos para trayectoria definida: segadora, espiral, ...

PGNC. Planificador (1)



Objetivo:

Planificar el camino del ASV

Visitar las zonas de máxima cantidad de cianobacterias (partículas)

Codificación de la trayectoria

Splines (grado 4 en los extremos y grado 3 en los interiores)

PGNC. Planificador (2)

Algoritmo de Optimización:
Algoritmo Genético multi-objetivo

OBJETIVOS:

Maximizar número de partículas encontradas

Minimizar duración de la misión

Minimizar longitud de trayectoria

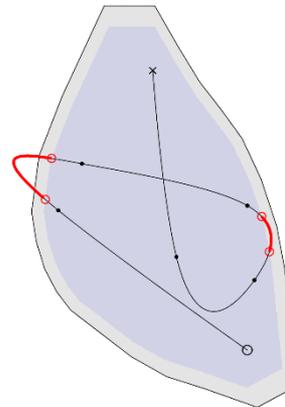
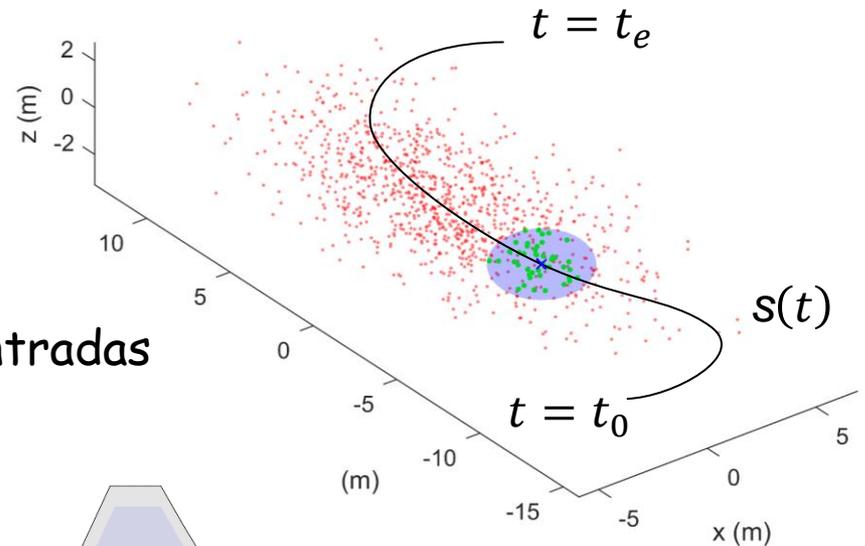
RESTRICCIONES:

Tiempo máximo de misión

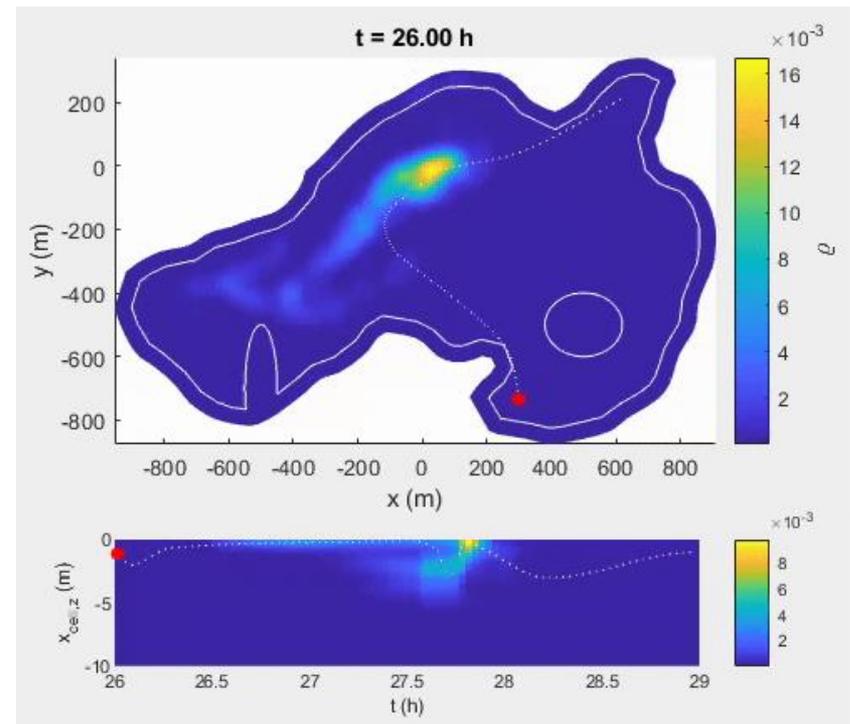
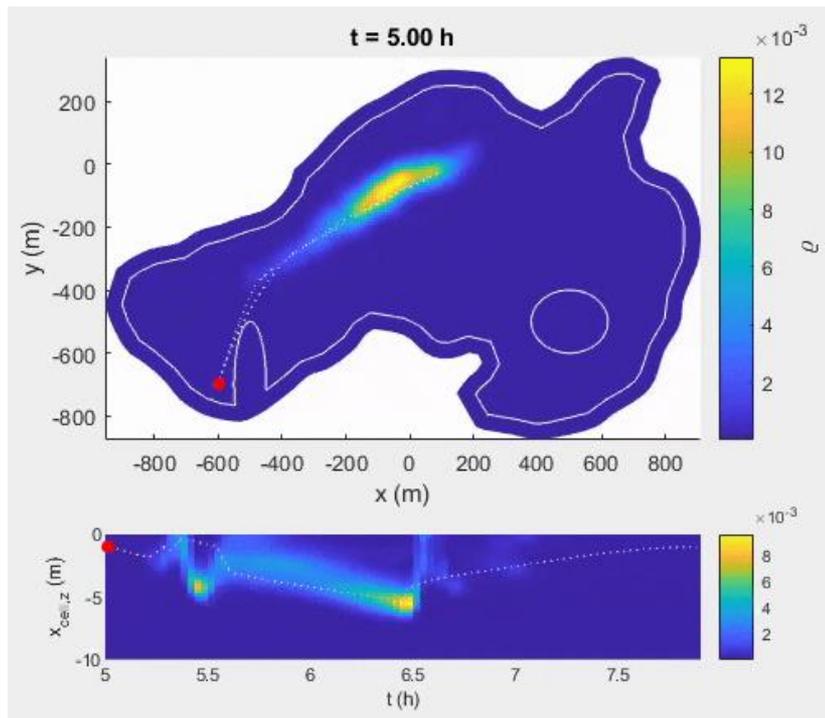
Velocidad máxima del ASV

Aceleración máxima del ASV

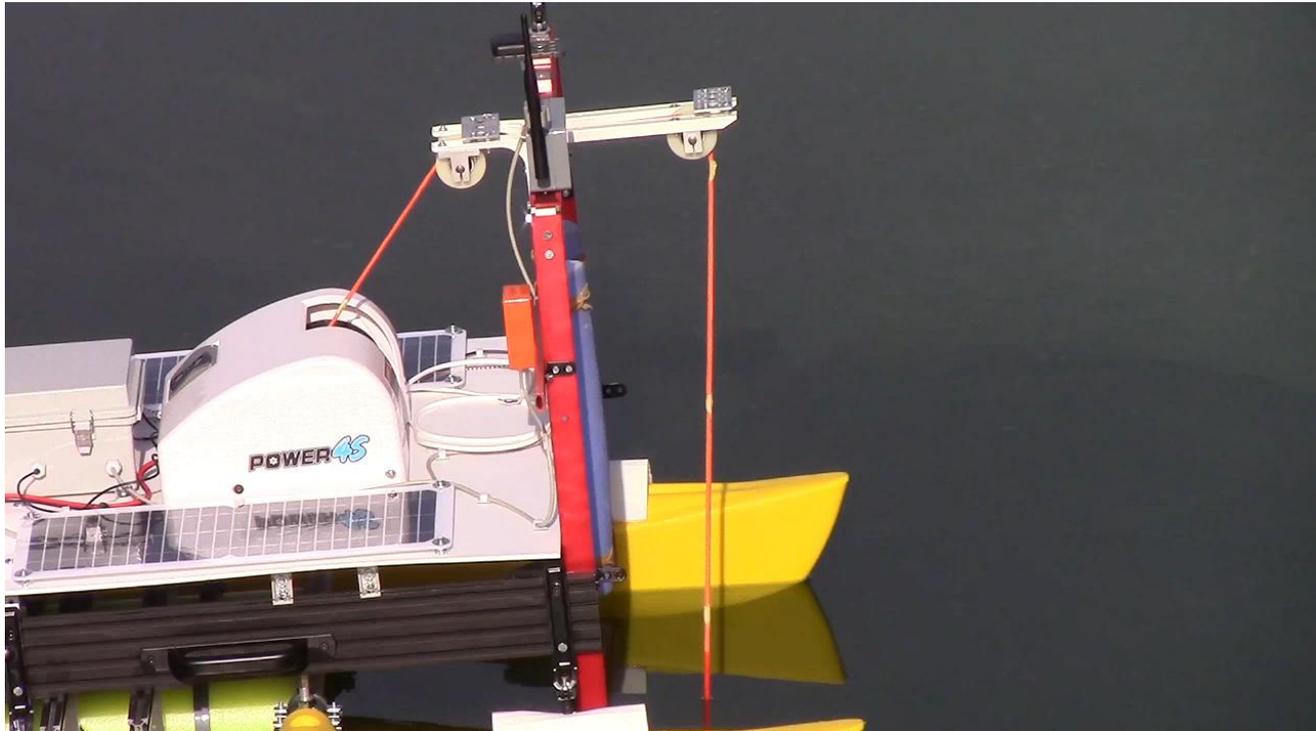
No salir del espacio permitido



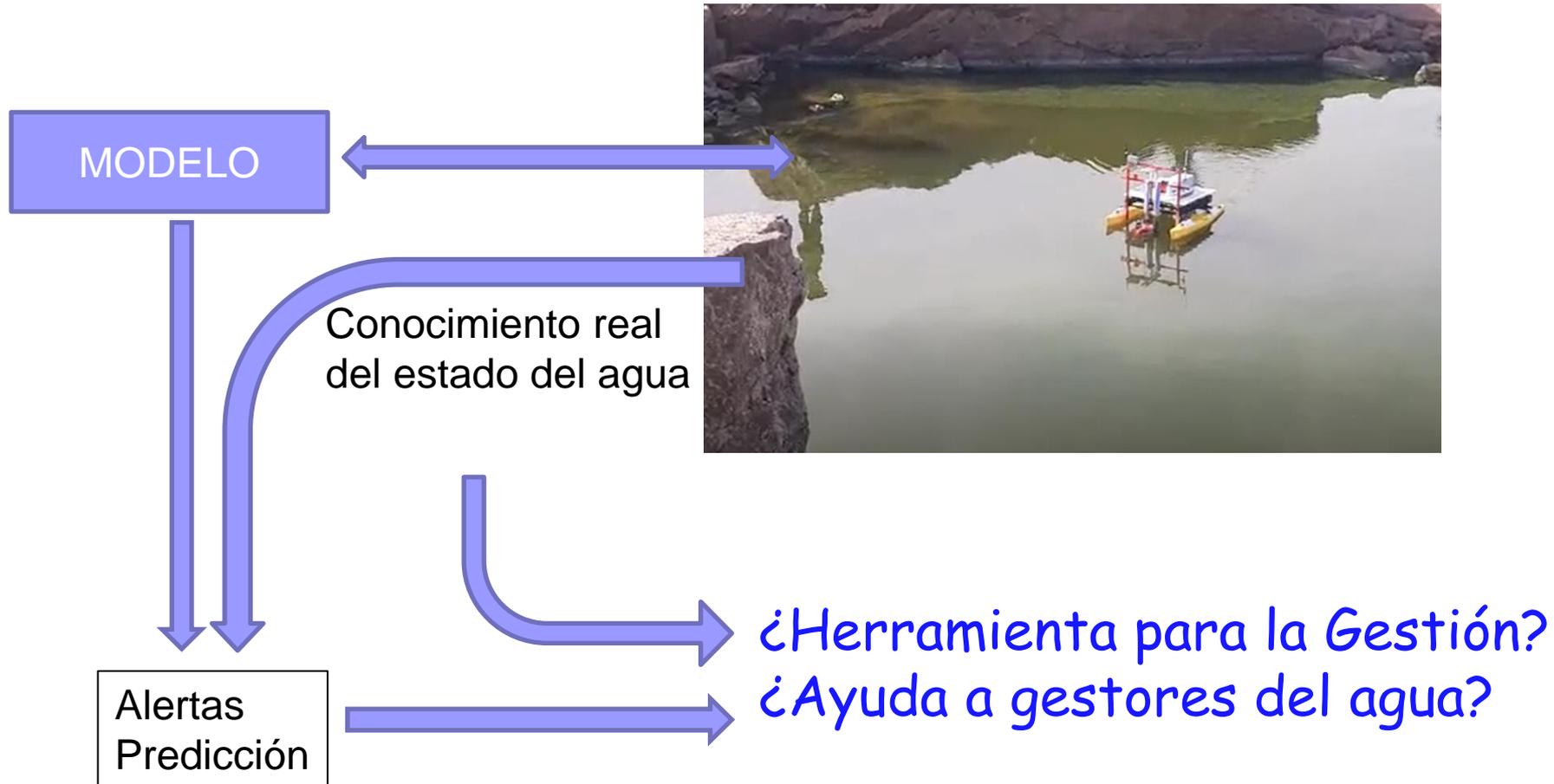
PGNC. Simulación



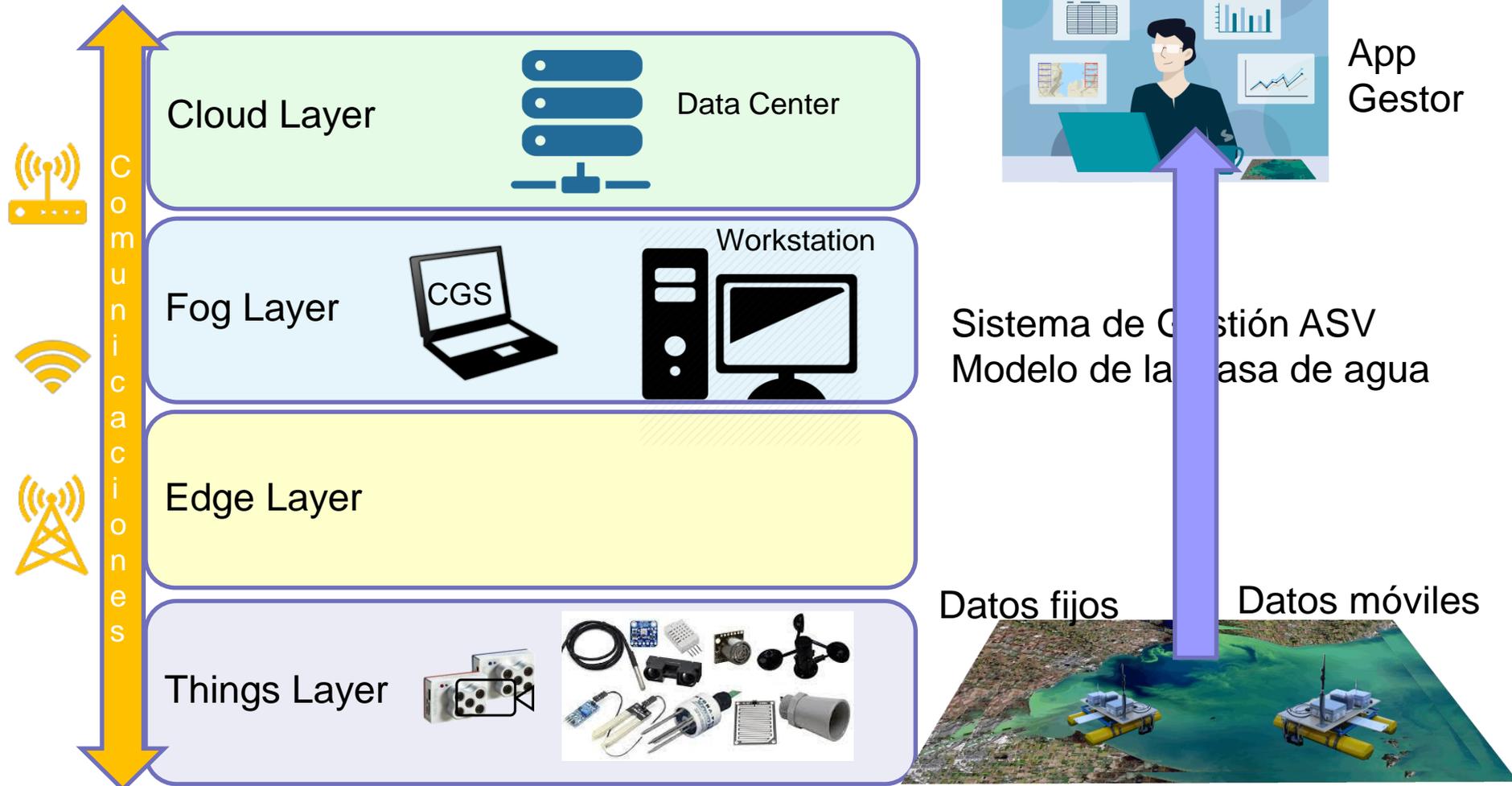
ASV. Ejemplo



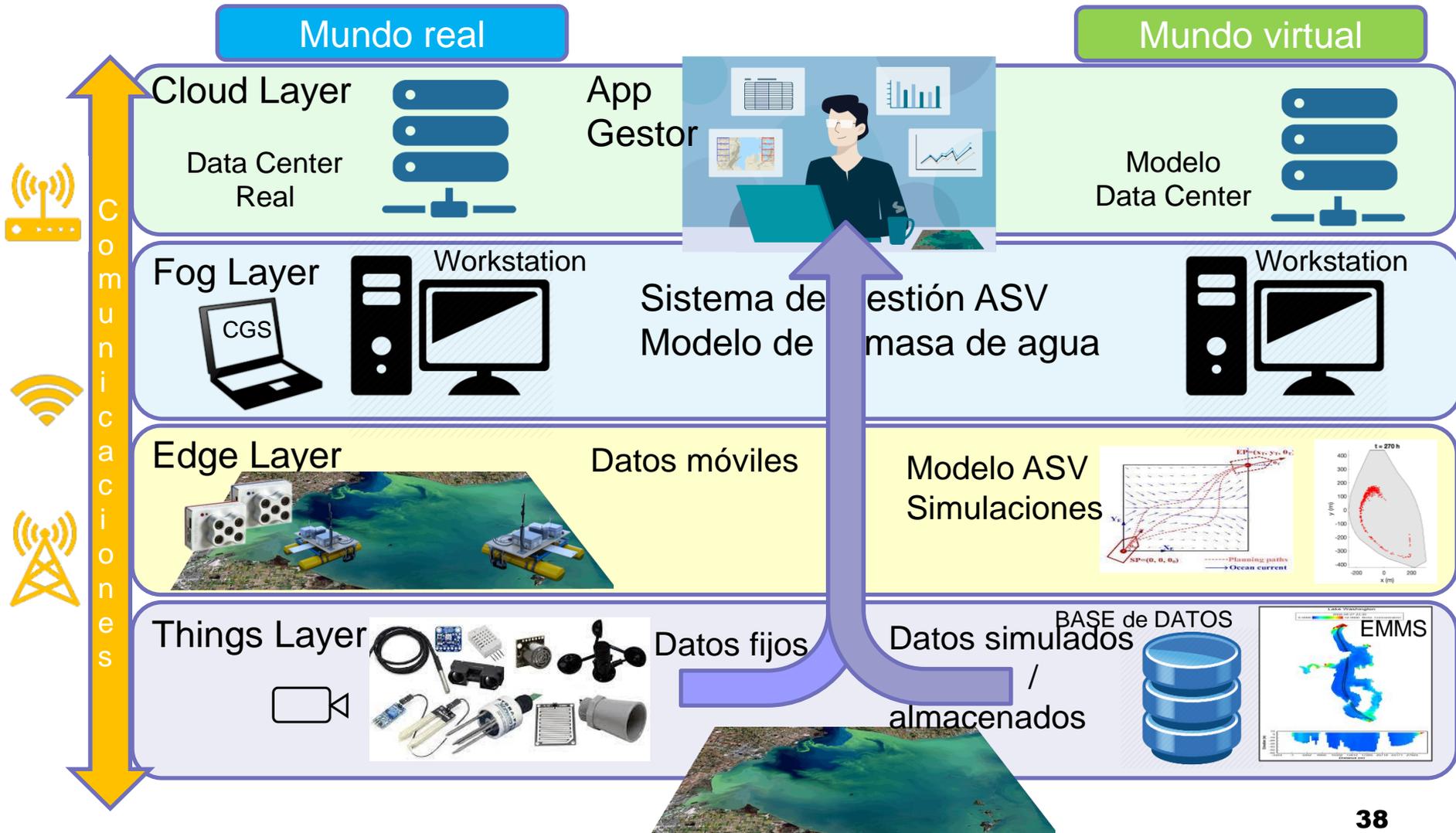
Predicción vs Gestión



Arquitectura EIoT para gestión



Arq. EIoT + Gemelos Digitales



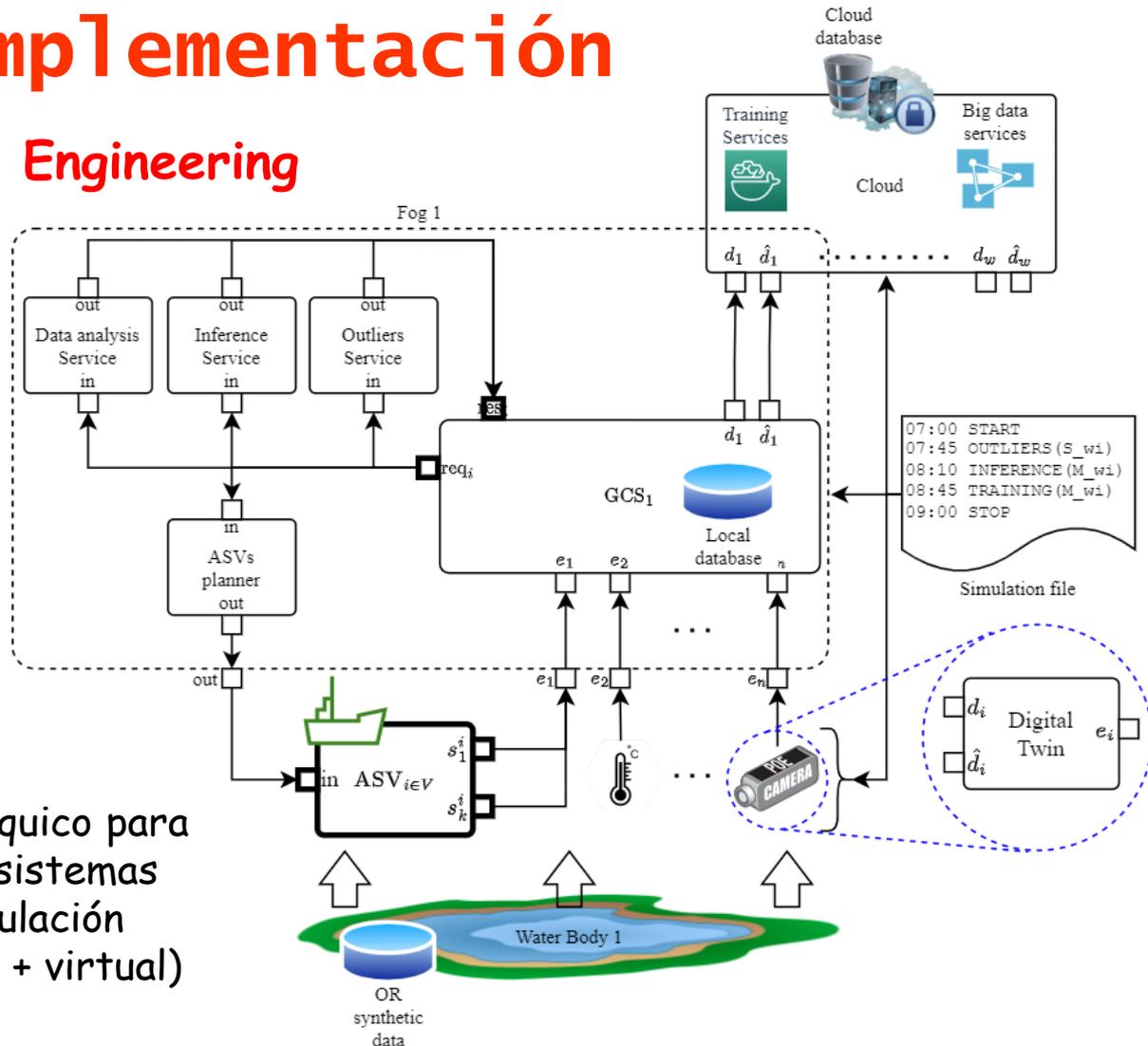
Sistema de Gestión Implementación

Model Based Systems Engineering

DEVS



- Múltiples modelos
- Formalismo modular y jerárquico para modelar, simular y analizar sistemas
- Separación de modelo y simulación
- Extensible y ampliable (real + virtual)
- Mantenable



Más ASV

Diferentes cuerpos de agua





¡Gracias!