



15 al 17 de octubre 2024

Cámara Mercantil de productos del país

## **PREDICCIÓN EN TIEMPO REAL DE LA CALIDAD BACTERIOLOGICA DE LAS PLAYAS DE MONTEVIDEO**

### **Nombre del autor 1**

Gabriela Camps (\*)

Intendencia de Montevideo, Departamento de Desarrollo Ambiental

Maestría en Ingeniería Ambiental, Maestría en Gerencia Pública, Ingeniera Hidráulica y Sanitaria.

Experiencia en sector público y privado entre otras actividades en proyectos, consultorías, dirección.



### **Cecilia Emanuelli**

Intendencia de Montevideo – Departamento de Desarrollo Ambiental- División Saneamiento. Servicio de Estudios y Proyectos de Saneamiento.

### **Jimena Risso**

Intendencia de Montevideo– Departamento de Desarrollo Ambiental – Gerencia de Gestión Ambiental - Evaluación de la Calidad y Control Ambiental

### **Sabrina Petraccia**

Intendencia de Montevideo– Desarrollo Sostenible e Inteligente - Tecnología para Ciudades Inteligentes - Internet de las cosas

### **Melina Rabinovich**

Intendencia de Montevideo– Desarrollo Sostenible e Inteligente - Tecnología para Ciudades Inteligentes - Internet de las cosas

### **Nahuel Marrero**

Intendencia de Montevideo – Departamento de Desarrollo Ambiental- División Saneamiento. Servicio de Estudios y Proyectos de Saneamiento.

### **Alejo Meoqui**

Intendencia de Montevideo – Departamento de Desarrollo Ambiental- División Saneamiento. Servicio de Estudios y Proyectos de Saneamiento.

### **Diego Marichal**

Intendencia de Montevideo – Departamento de Desarrollo Ambiental- División Saneamiento. Servicio de Estudios y Proyectos de Saneamiento.

### **TEMA: Predicción en tiempo real de la calidad bacteriológica de las playas de Montevideo.**

Dirección (\*): Montevideo – Departamento de Montevideo, Uruguay Tel.+598 99187959: – e-mail: [gabrielacamps@gmail.com](mailto:gabrielacamps@gmail.com)

### **RESUMEN**

Se presentan las experiencias de la aplicación del modelo en tiempo real de la calidad bacteriológica de las playas, de Montevideo. Se instaló en el Río de la Plata en la zona de salida del emisario subacuático de Punta Carretas, una boya meteorológica que mide y comunica en tiempo real, la intensidad y dirección de la velocidad de la corriente sub superficial, la intensidad y dirección del viento local, la temperatura y salinidad del agua. Esta información medida en tiempo real, alimenta un modelo hidrodinámico y de calidad bacteriológica, que permite pronosticar en tiempo real, con su probabilidad asociada y su correspondiente intervalo de confianza, la calidad bacteriológica de las playas. Su uso



15 al 17 de octubre 2024

Cámara Mercantil de productos del país

continuado en concordancia con el monitoreo de las playas permite la mejora continua de la calibración del modelo predictor, utilizando la herramienta matemática del filtro de Kalman.

1 línea en blanco

**Palabras Clave (en negritas): boya meteorológica, modelo hidrodinámico, modelo de calidad, Emisario Subacuático, Tiempo Real.**

## INTRODUCCIÓN

En 2004, como trabajo de tesis de la maestría en Ingeniería Ambiental de la UDELAR, se desarrolló un algoritmo para simular en Matlab, un modelo hidrodinámico y de calidad de predicción en tiempo real la calidad bacteriológica de las playas de Montevideo, utilizando el Filtro de Kalman.

En su momento se calibró y validó realizando las simulaciones en batch y con datos desfasados en el tiempo (serie de datos de corrientes de los estudios realizados para el diseño del emisario subacuático, comparando los resultados con los datos de calidad de playas desde la puesta en funcionamiento del emisario.

En esta oportunidad, se dispone de la boya que ya está brindando los datos en tiempo real y se dispone de los datos simultáneos de calidad de las playas. El algoritmo fue pasado a un modelo que corre en tiempo real realizado en Python y puede verificarse el diseño realizado en 2004.

Se presentan los principales resultados verificados, las lecciones aprendidas y los principales desafíos que nos quedan por delante.

## OBJETIVOS

Implementar el modelo en tiempo real de la predicción bacteriológica de las playas de Montevideo debido a las descargas de los emisarios sub acuáticos.

## ALCANCE

En esta instancia se presenta el estado de situación y avance del proyecto, con los primeros resultados y lecciones aprendidas, así como los próximos desafíos.

## MARCO CONCEPTUAL

La determinación de la calidad bacteriológica de las aguas para baño se realiza con análisis bacteriológicos que implican el cultivo de bacterias y que por lo tanto no pueden estar disponibles al momento del uso recreativo.

El modelo, una vez que sea implementado en su totalidad, permitirá advertir, según las condiciones meteorológicas que se medirán en tiempo real, de los riesgos en cada punto de interés.

La simulación del modelo propuesto se basa en descargas discretas de pulsos cuyo centro se sigue a lo largo del tiempo desde la zona de difusores hasta que su ubicación sale de la zona de interés (pulsos "vivos"), estimando para cada intervalo de tiempo la posición, velocidad de traslado, concentración de colifecales e intervalos de confianza correspondientes. El modelo se autocalibra en forma permanente a partir de mediciones de los parámetros estimados, aprendiendo de los eventos pasados.

El modelo tiene los siguientes componentes:

- predicción de velocidad de corrientes
- predicción de coeficiente de decaimiento bacteriano
- predicción de colimetría del efluente descargado



15 al 17 de octubre 2024

Cámara Mercantil de productos del país

- predicción del coeficiente de dilución inicial
- predicción de posición del centro de los pulsos “vivos” en la zona de estudio.
- predicción de la concentración de coliformes fecales en el centro de los pulsos “vivos”.
- Predicción de la concentración de coliformes fecales en un punto de interés.

**Predicción de posición de los pulsos “vivos”.-**

La predicción de la posición en cada intervalo de tiempo de cada pulso descargado que permanece en la zona de estudio (pulsos “vivos”) se realiza en forma discreta a partir de la velocidad de la corriente estimada en la posición anterior, considerando que entre posiciones la velocidad de la corriente es uniforme.

Las ecuaciones para la predicción de la posición son las siguientes:

$$x(t + dt) = x(t) + v_x(t)dt \qquad y(t + dt) = y(t) + v_y(t)dt \qquad (1)$$

$$v_x(t) = [aV_x(t) + b v_{ax}(t) + c R_t]_{x(t),y(t)} \qquad v_y(t) = [a V_y(t) + b v_{ay}(t) + c R_t]_{x(t),y(t)} \qquad (2)$$

El radio de confianza en cada paso se calcula en forma recursiva con la siguiente ecuación:

$$\sigma_x^2(t + dt) = \sigma_x^2(t) + t\sigma_{\sigma_x}^2(t) \qquad \sigma_y^2(t + dt) = \sigma_y^2(t) + t\sigma_{\sigma_y}^2(t) \qquad (3)$$

Dónde:

$\sigma_x^2(t)$  es la varianza de la coordenada x del pulso, en el instante t.

$\sigma_y^2(t)$  es la varianza de la coordenada y del pulso, en el instante t.

$\sigma_{\sigma_x}^2(t)$  es la varianza de la componente en x de la velocidad de la corriente.

$\sigma_{\sigma_y}^2(t)$  es la varianza de la componente en y de la velocidad de la corriente.

Estas varianzas se suponen constantes con respecto a la posición y se calculan a partir de los datos de medición de corrientes de la boya en el punto de referencia ( $x_0, y_0$ ) con las siguientes expresiones considerando de esta manera que los valores estarían del lado de la seguridad.

$$\sigma_{\sigma_x}^2(t) = \frac{1}{t-1} \sum_{j=1}^t [v_{x0}(j) - (a_{x0}V_x(j) + b_{x0}v_{ax0}(j) + c_{x0})]^2 \qquad \sigma_{\sigma_y}^2(t) = \frac{1}{t-1} \sum_{j=1}^t [v_{y0}(j) - (d_{y0}V_x(j) + e_{y0}v_{ax0}(j) + f_{y0})]^2 \qquad (4)$$

Los coeficientes a,b,c,d,e y f se corresponden con los hallados durante el período de calibración previa en la posición ( $x_0, y_0$ ).

**Predicción de la concentración de colifecales en el centro de los pulsos “vivos” .-**

Durante el seguimiento de los pulsos suceden los fenómenos de dispersión y decaimiento bacteriano.

En esta secuencia, se puede plantear la variación de la concentración de colifecales de cada pulso en cada posición, en forma recursiva de la siguiente manera:

$$C(t + dt) = S(t + dt)C(t)e^{-KB(t)dt} / S(t) \qquad (5)$$

Donde C identifica concentración de colifecales, S el factor de dispersión y KB el coeficiente de decaimiento bacteriano.



15 al 17 de octubre 2024

### Cámara Mercantil de productos del país

El factor  $S(t)$  debido a la dispersión se estima a partir de la simplificación de Brooks, considerando que el pulso está expuesto a un desplazamiento advectivo, preponderante frente a los términos de segundo orden de la ecuación fundamental:

$$S_{nt} = \left\{ \operatorname{erf} \left[ \frac{3/2}{(1+8\varepsilon_0 t / w^2)^{3/2} - 1} \right] \right\}^{-1/2} \quad (6)$$

dónde:  $\varepsilon_0, w$  son el coeficiente de dispersión y el largo del difusor respectivamente; y  $\varepsilon_0$  se estima con la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_0 = 0.01w^{4/3} \quad (7)$$

$t$  está en segundos,  $w$  en centímetros y  $\varepsilon_0$  en  $\text{cm}^2/\text{s}$

El valor de la concentración de coliformes fecales en el centro del pulso está afectado por una serie de propagación de ruidos correspondientes a los siguientes pasos:

- la predicción de la colimetría del efluente
- la predicción del coeficiente de dilución inicial
- la predicción del coeficiente de decaimiento bacteriano
- la predicción del coeficiente de dispersión

A los efectos de tener el intervalo de confianza correspondiente a la predicción de la concentración de coliformes fecales en el centro de los pulsos, se consideraron todos los casos más favorables, es decir los que determinan el mínimo valor posible  $C1(t)$  y todos los más desfavorables que determinan el mayor valor posible  $C2(t)$ .

## METODOLOGÍA

Se siguieron los siguientes pasos:

1. Adquisición, ajuste y mantenimiento de los sensores y sistema de comunicación de la boya meteorológica.
2. Desarrollo informático en Orión
3. Validación del desarrollo informático del modelo, corrido en batch, con relación al algoritmo realizado en el marco de la tesis.
4. Compatibilización de sistemas de coordenadas, sincronización de parámetros en tiempo real.
5. Diseño de los gráficos de salida y sistemas de alarma.
6. En esta etapa se procederá a analizar los impactos del emisario subacuático de Punta Carretas, por lo que se considerarán los datos de calidad obtenidos en condiciones de tiempo seco (se descartan los datos con menos de 48 horas de eventos previos lluviosos).

## RESULTADOS

### 1. Adquisición, ajuste y mantenimiento de sensores y sistema de comunicación de la boya meteorológica.

Se aprovechó la oportunidad de adquirir la boya a un precio muy reducido a Gas Sayago, ya que estaba dando de baja sus inversiones.



15 al 17 de octubre 2024

Cámara Mercantil de productos del país

Se tuvo un gran apoyo de los técnicos de la empresa que brindaron el traspaso de experiencia en cuanto al mantenimiento y soporte que ellos venían realizando.

La Intendencia de Montevideo a través de los Departamentos de Desarrollo Sostenible e Inteligente y de Desarrollo Ambiental, lideraron el proyecto concretando la adquisición y puesta en marcha de la Boya.

Con apoyo del SHOMA, convenio con la UDELAR y soporte técnico de Axis Technologies se realizaron las tareas de mantenimiento y puesta en marcha.





15 al 17 de octubre 2024

Cámara Mercantil de productos del país



## 2. Desarrollo Informático

Se contrató a una consultora el pasaje del algoritmo de la tesis, a un desarrollo en Orión que tomara la información de los datos transmitidos en tiempo real por la boya.

Se realizó una primera validación, confirmando que la salida del modelo coincidiera con la salida del algoritmo de la tesis.

Se tuvieron que realizar varios ajustes que se pudieron identificar gracias a las simulaciones realizadas, como el hecho que el sistema de coordenadas había cambiado y era necesario ajustarlo, los datos que comunica la boya pueden tener vacíos y por lo tanto no tienen una periodicidad determinada, cómo seleccionar los datos históricos y la información para que esta no sea infinita al ser un sistema en tiempo real.

Al momento todavía se está revisando y haciendo ajustes en su implementación.

En esta etapa la visualización todavía se está realizando en batch, con ayuda del Q-Gis.

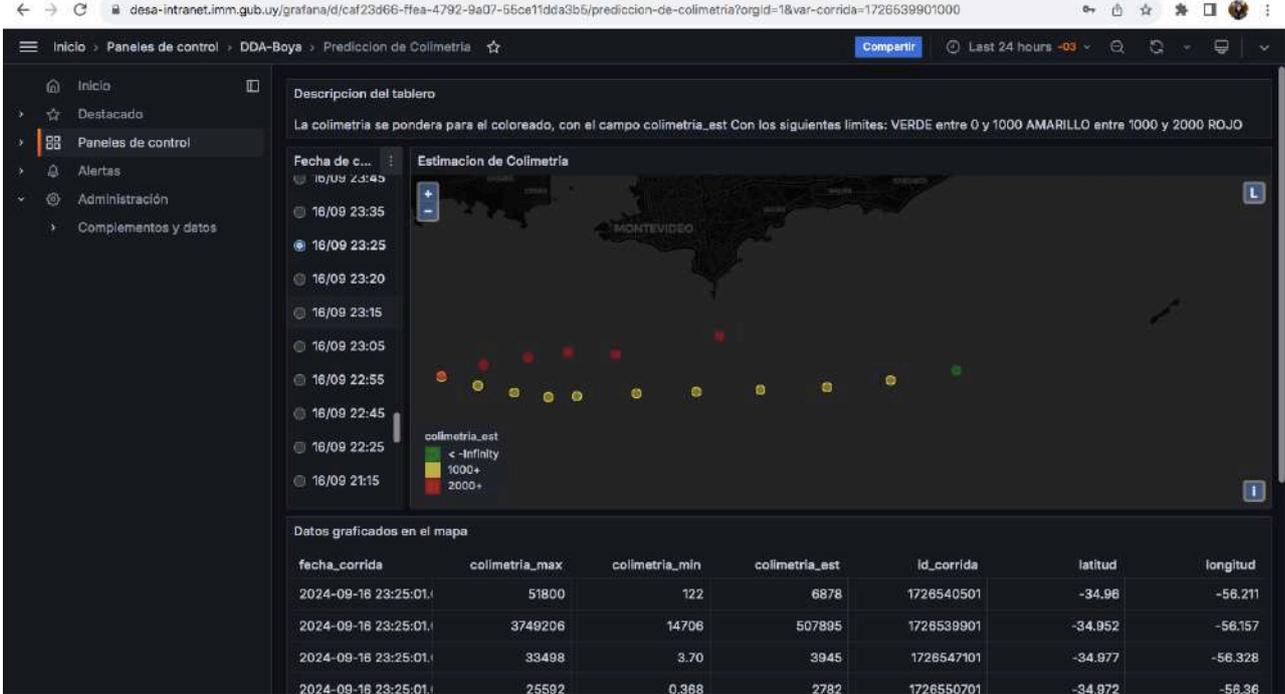
Luego de optimizado el modelo, se implementará para su visualización pública en la web de la IM y contará con sistemas de alarma de cuando exista probabilidad de contaminación de las playas para alertar del uso de las playas a la población y para optimizar los monitoreos y autocalibración del modelo.

En la siguiente figura se observa un ejemplo de visualización del modelo:



15 al 17 de octubre 2024

Cámara Mercantil de productos del país



3. Resultados preliminares del modelo.

Salidas del modelo:

Fecha: 08/07/2024 desde 5:40 a 11:10





15 al 17 de octubre 2024

Cámara Mercantil de productos del país

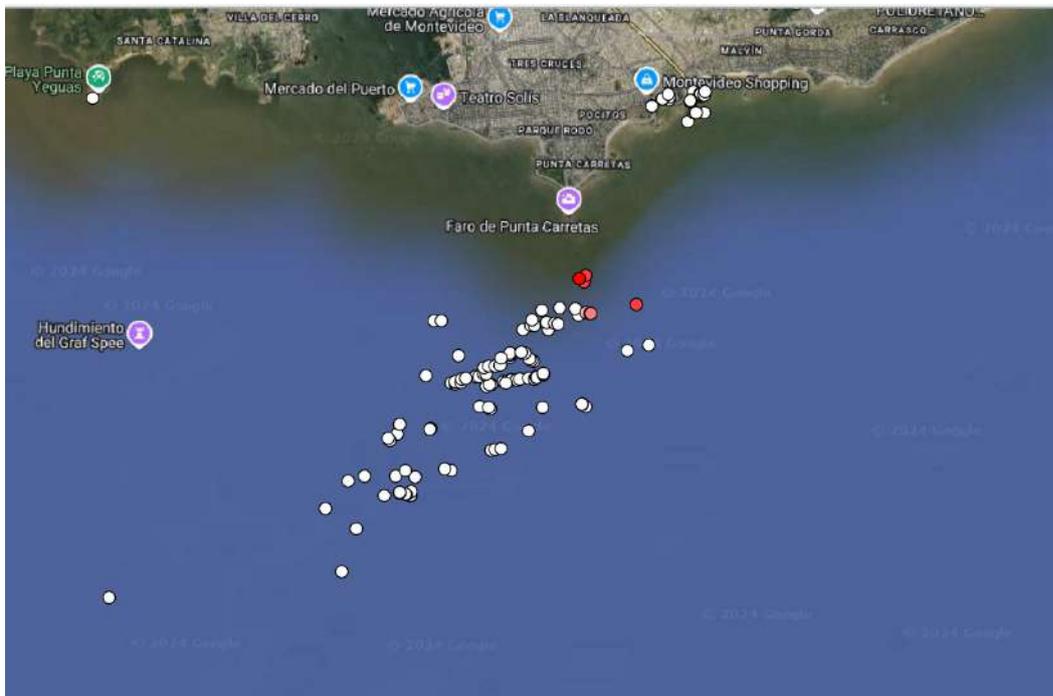
Monitoreo 8/07/24 de mañana

Tabla de datos del agua de playas

Fecha de muestreo ↓	Descripción abreviada del	Lugar de muestreo	Playa	Coliformes Termotolerante	Sal	Temperatura
2024-07-11 09:24:00	POC	Pocitos en Barreiro	Pocitos	4300	3.70	8
2024-07-11 09:15:00	POC-B	Pocitos en Av. Brasil	Pocitos	4500	3.60	
2024-07-08 11:20:00	CAR	Carrasco	Carrasco	820	4.70	9.70
2024-07-08 11:01:00	MAL	Malvin	Malvin	1500	4.50	9
2024-07-08 10:35:00	POC	Pocitos en Barreiro	Pocitos	1600	4.20	8.90
2024-07-08 10:28:00	POC-B	Pocitos en Av. Brasil	Pocitos	900	4.20	

Salida del modelo:

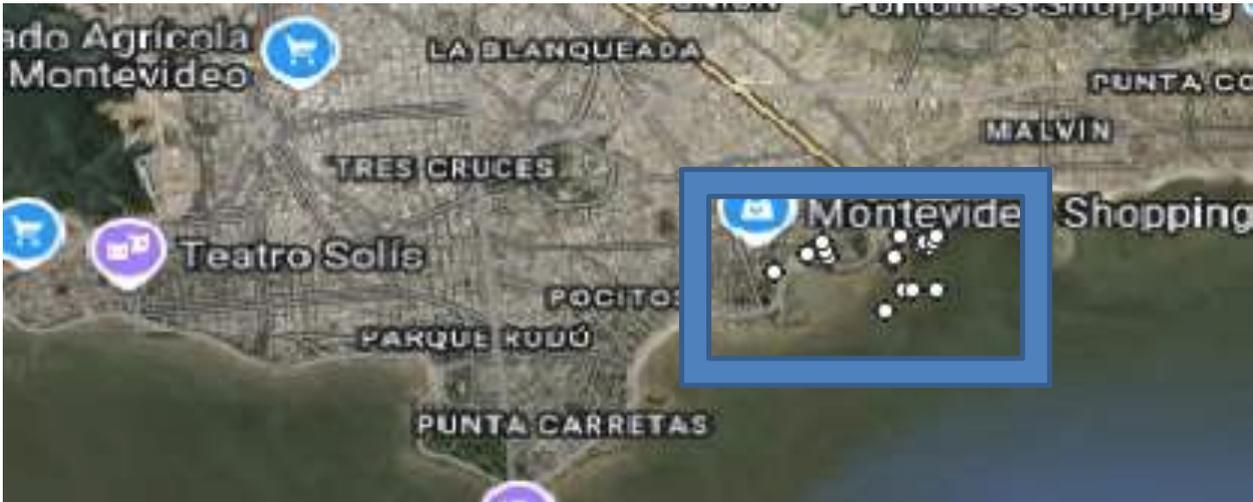
Fecha: 11/07/2024 desde 08:52 a 23:52





15 al 17 de octubre 2024

Cámara Mercantil de productos del país



Monitoreo 11/07/24 en la mañana

Tabla de datos del agua de playas

Fecha de muestreo	Descripción abreviada del	Lugar de muestreo	Playa	Coliformes Termotolerante	Sal	Temperatura
2024-07-11 10:41:00	Z	Zabala	Zabala	20	1.20	
2024-07-11 10:31:00	MIR	Miramar	Miramar	780	4.30	
2024-07-11 10:29:00	PB	Pajas Blancas	Pajas Blancas	5	1.20	7.30
2024-07-11 10:23:00	CAR	Carrasco	Carrasco	680	4.50	8.50
2024-07-11 10:00:00	ING	Ingleses	De Los Ingleses	640	3.80	
2024-07-11 09:51:00	MAL	Malvin	Malvin	1900	3.80	
2024-07-11 09:46:00	PE	Punta Espinillo	Punta Espinillo	13	0.900	
2024-07-11 09:40:00	BUC	Buceo	Buceo	2500	3.80	
2024-07-11 09:24:00	POC	Pocitos en Barreiro	Pocitos	4300	3.70	
2024-07-11 09:15:00	POC-B	Pocitos en Av. Brasil	Pocitos	4500	3.60	
2024-07-08 11:20:00	CAR	Carrasco	Carrasco	820	4.70	9.70
2024-07-08 11:01:00	MAL	Malvin	Malvin	1500	4.50	9
2024-07-08 10:35:00	POC	Pocitos en Barreiro	Pocitos	1600	4.20	8.90

CONCLUSIONES

Considerando solo la descarga del emisario de Punta Carretas, para días en tiempo seco, se observa que los resultados del modelo son compatibles con los resultados del monitoreo,

Se verificó la compatibilidad de los resultados en un día como el 11/7/24 en que se detectaron valores de colimetría altos en playa Pocitos y Buceo, sin otros motivos relevantes de contaminación cloacal, como en un día como el 8/07/24 en que también se realizaron muestreos y los valores fueron bajos.

Todavía es necesario prestar atención e interpretar los resultados que pueden ser consecuencia de otros vertimientos, como el arroyo Carrasco, o la cañada Pichuaga. Y la precisión de la ubicación y calidad de los pulsos debe ajustarse.

Por ahora los intervalos de confianza son muy amplios, se necesita mayor tiempo de funcionamiento para poder tener más información para la autocalibración.



## XII Congreso Nacional de AIDIS



15 al 17 de octubre 2024

### Cámara Mercantil de productos del país

Se continúa con los ajustes al desarrollo informático y se precisa mayor información para lograr la confiabilidad necesaria para brindar una herramienta pública.

Asimismo, se precisa superponer otros efectos como la descarga del emisario de Punta Lobos, la rotura del emisario y descargas puntuales en los aliviaderos o cursos de agua que pueden estar afectando aún en tiempo seco.

### **REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

Predicción en tiempo real de la calidad bacteriológica de un cuerpo receptor, Camps, 2004