

# Jornadas de Automática

## Optimización dinámica y control sobre los flujos de inyección de desinfectante de un proceso de lavado de productos agrícolas en tanques en canal

Moreno-Razo, Ari<sup>a</sup>, Vilas, Carlos<sup>a</sup>, García, Míriam R.<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>Grupo de Biosistemas e Ingeniería de Bioprocesos, IIM-CSIC, C/Eduardo Cabello, 6, 36208, Vigo, España.

**To cite this article:** Moreno-Razo, Ari, Vilas, Carlos, García, Míriam R. 2025. Dynamic optimization and control over disinfectant injection flows of a fresh produce washing process in flume tanks. *Jornadas de Automática*, 46. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2025.46.12101>

### Resumen

La eficiencia del lavado es esencial para garantizar la calidad y seguridad alimentaria de productos de cosecha, especialmente en aquellos que se consumen frescos (productos de cuarta gama). A nivel industrial, esta práctica se lleva a cabo en tanques en forma de canal, donde los productos cosechados son introducidos y transportados mediante un flujo de agua corriente al que se añade un desinfectante. Las variaciones espacio-temporales en el flujo de entrada de producto representan un desafío para una implementación eficiente del proceso. Este estudio se centra en la optimización dinámica del flujo de inyección para minimizar las dosis de desinfectante, garantizando que la concentración de bacterias en el agua de lavado se mantenga dentro de los rangos considerados seguros, incluso ante fluctuaciones en la cantidad de producto entrante.

*Palabras clave:* Control de procesos, Optimización dinámica, Seguridad alimentaria, Ingeniería de sistemas de procesos, Procesamiento de alimentos post-cosecha, Sistemas de reacción y transporte, Sistemas de parámetros distribuidos

### Dynamic optimization and control over disinfectant injection flows of a fresh produce washing process in flume tanks

#### Abstract

Washing efficiency is essential to ensure the quality and safety of harvested fresh produces. At the industrial scale, this process is commonly carried out in channel-type washing tanks, where the produce is introduced and transported by a continuous water flow to which a disinfectant is added. Spatio-temporal variations in the incoming product flow pose a challenge to the effective implementation of the process. This study addresses the dynamic optimization of the injection flow to minimize the disinfectant dosage, ensuring that the concentration of bacteria in the washing water remains within the ranges considered safe, even when dealing with fluctuations in the amount of incoming product.

*Keywords:* Process control, Dynamic optimization, Food safety, Process systems engineering, Post-harvesting and food processing, Reaction and transport systems, Distributed parameter systems

## 1. Introducción

El consumo de productos frescos ha aumentado notablemente en las últimas décadas, impulsado por recomendaciones de organismos de salud pública que promueven su incorporación en dietas saludables (Thomas et al., 2024). Sin embargo, este incremento ha venido acompañado de un aumento en los brotes de infecciones de origen microbiano, particularmente en Europa y Norteamérica (Aiyedun et al., 2021). Como res-

puesta, organismos reguladores como la FDA y la EFSA han establecido normativas más estrictas para reducir los riesgos microbiológicos en el procesamiento industrial de vegetales frescos (U.S. Food and Drug Administration, 1998; EFSA Panel on Biological Hazards (BIOHAZ) et al., 2023).

Dentro de la cadena de procesamiento de productos frescos, el proceso de lavado representa una etapa crítica para reducir la carga bacteriana y asegurar la inocuidad del alimento.

\*Autor para correspondencia: miriamr@iim.csic.es  
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

Aunque técnicas como el enjuague con agua limpia no son suficientes para alcanzar los niveles exigidos de seguridad, el uso de desinfectantes, particularmente los basados en cloro, permite mejorar significativamente la efectividad del proceso (Thomas et al., 2024). Sin embargo, el uso excesivo de cloro presenta importantes limitaciones: en presencia de materia orgánica da lugar a subproductos peligrosos.

Ante estas limitaciones, han surgido tecnologías que permiten regular de forma más precisa la concentración de desinfectante en los tanques de lavado (Tudela et al., 2019). No obstante, la mayoría de estos enfoques no se basan en estrategias que reaccionan a la medida de un sensor y ajustan los controles hasta alcanzar valores de seguridad en sus observables. Estas tecnologías no utilizan optimización sobre su control ni las ventajas predictivas de la resolución numérica de modelos que describan el sistema.

Por otro lado, se han propuesto diversos modelos matemáticos para representar las dinámicas del proceso, incluyendo la evolución del desinfectante, los microorganismos y la materia orgánica, cuya presencia interfiere con la eficacia del tratamiento. Entre los trabajos más relevantes se encuentran los modelos cinéticos desarrollados por Munther et al. (2015), extendidos posteriormente por Mokhtari et al. (2018), y Abnavi et al. (2021), quienes exploraron la competencia entre el cloro libre y los exudados en el agua de lavado. Más recientemente, la EFSA (Gil et al., 2025) ha realizado un estudio que, además de realizar una revisión bibliográfica exhaustiva sobre las operaciones de manipulación en productos de cosecha, utilizó el modelado para interpretar una colección extensa de datos experimentales de la industria, en casos de especial interés, y con énfasis en desinfectantes basados en cloro. Sin embargo, la mayoría de estos trabajos asumen condiciones de mezcla completa, lo que limita su aplicabilidad a sistemas reales tipo canal, caracterizados distribuciones espaciales significativas de contaminantes y desinfectante. El estudio de Tan et al. (2022) es una excepción destacada, al modelar la distribución espacial de clorina libre y materia orgánica, aunque no considera la inactivación microbiana ni la influencia de la materia orgánica. Para cubrir estas limitaciones, Moreno-Razo et al. (2023) propuso un enfoque multifísico que incluye las principales especies y su transporte en régimen turbulento, mientras que en Moreno-Razo et al. (2024) se introdujo un modelo unidimensional acoplado que permite evaluar configuraciones óptimas de inyección. No obstante, ninguno de estos enfoques había sido planteado desde una perspectiva de optimización dinámica adaptada a condiciones variables, lo cual resulta fundamental para avanzar hacia sistemas de control inteligente o gemelos digitales en contextos industriales reales.

En este trabajo, siguiendo la filosofía de trabajos anteriores (Cougnon et al., 2006; Moreno-Razo et al., 2023, 2024; Gil et al., 2025), se presenta un modelo que considera las interacciones entre el producto, el agua y el desinfectante dentro de un sistema de lavado tipo canal. Se aborda la optimización del flujo de inyección de desinfectante mediante control óptimo, considerando las fluctuaciones temporales en la cantidad de producto entrante en el sistema, con el objetivo de garantizar la reducción microbiana deseada mientras se minimiza la concentración de desinfectante presente en el tanque de lavado. La metodología es aplicable a diseños industriales reales y tiene como propósito aumentar la eficiencia, sostenibilidad y

seguridad del proceso de lavado de productos agrícolas.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Descripción del sistema

El producto de cosecha (al que desde ahora nos referiremos directamente como producto) contiene bacterias y materia orgánica que deben ser eliminados antes de su distribución. Para ello, el producto se introduce en tanques de tipo canal - ver Tudela et al. (2019) - que contienen agua y un desinfectante para inactivar bacterias. La Figura 1 muestra una representación esquemática del sistema.

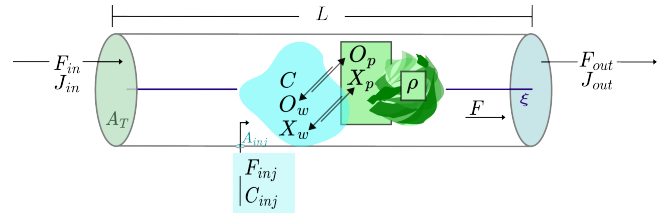


Figura 1: Esquema del proceso de lavado en un tanque tipo canal, con longitud  $L$  y área transversal  $A_T$ . El sistema cuenta con dos entradas: (1) un flujo principal compuesto por los flujos de agua de lavado ( $F_{in}$ ) y masa de producto ( $J_{in}$ ), y (2) un inyector de desinfectante con área  $A_{inj}$ .

El agua de lavado entra al tanque con un flujo  $F_{in}$ , mientras que el flujo másico de producto entrante se denota como  $J_{in}$ . La materia orgánica y las bacterias se transfieren entre el producto y el agua de lavado. El desinfectante, en este caso cloro libre ( $C$ ), entra con un flujo  $F_{inj}$  a través de puertos de inyección. En este trabajo, se considera un solo un inyector (situado a un tercio de la longitud total del tanque), aunque la metodología aquí tratada es válida para diseños con múltiples inyectores. Una vez introducido el desinfectante, éste interactúa con la materia orgánica disuelta, así como con las bacterias en el agua de lavado y en el producto. Finalmente, el agua de lavado y el producto salen del sistema con flujos  $F_{out}$  y  $J_{out}$ , respectivamente. Los flujos volumétricos se calculan como el producto entre el área transversal y la velocidad del fluido en ese punto, es decir,  $F_{in} = u_{in} A_T$ ,  $F_{inj} = u_{inj} A_{inj}$ , y  $F = u A_T$ , siendo el  $F = F(\xi)$  y  $u = u(x)$  el flujo y la velocidad del flujo en cualquier punto del dominio respectivamente. Como se muestra en la figura, existe una transferencia entre las especies contenidas en el producto y las presentes en el agua de lavado. En el inyector, el desinfectante es introducido a una concentración  $C_{inj}$  y un flujo  $F_{inj}$ . Finalmente, el agua de lavado sale del sistema con un flujo  $F_{out} = F_{in} + F_{inj}$ .

### 2.2. Modelo matemático del proceso

Las especies relevantes en el sistema son las concentraciones de: (i) cloro libre en el agua de lavado ( $C$ ), (ii) materia orgánica medida como demanda química de oxígeno en el agua de lavado ( $O_w$ ), (iii) materia orgánica en el producto ( $O_p$ ), (iv) bacterias en el agua de lavado ( $X_w$ ), y (v) bacterias en el producto ( $X_p$ ). Adicionalmente, se considera la masa de producto por unidad de volumen ( $\rho$ ). Para la derivación del modelos se tienen en cuenta las siguientes simplificaciones:

- La sección transversal del tanque es mucho menor que la longitud del mismo por lo que el sistema 3D se describe mediante un dominio espacial 1D (longitud del tanque), cuya variable espacial se denota como  $\xi$ .

- La dirección del flujo de entrada del inyector es la misma que la dirección del flujo principal del tanque.
- La transferencia de desinfectante desde el agua de lavado al producto se considera despreciable.
- No hay volúmenes muertos en el tanque y no se consideran flujos turbulentos.
- El primer contacto entre el producto y el agua de lavado se produce al entrar en el tanque.

Para derivar el modelo del proceso, hemos seguido un procedimiento análogo al mostrado en (Cougnon et al., 2006), que parte de un balance de masa en un elemento de volumen. De esta forma, la concentración de la especie  $i$  ( $\mathcal{C}_i$ ) está gobernada por la siguiente ecuación de transporte:

$$\frac{\partial \mathcal{C}_i}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 \mathcal{C}_i}{\partial \xi^2} - \frac{\partial(u \mathcal{C}_i)}{\partial \xi} + r_i + \frac{F_{inj} \delta(\xi - \xi_{inj})}{A_T} \mathcal{C}_{i,inj}, \quad (1)$$

donde,  $D_i$  es el coeficiente de difusividad de la especie  $i$ ,  $u$  se corresponde con el campo de velocidades del flujo en el dominio espacial, y  $r_i$  describe las interacciones de la especie  $i$  con el resto de especies. Finalmente, el último término al lado derecho de la ecuación corresponde a la contribución de los flujos entrantes de la especie  $i$  a través de los inyectores. Para un inyector localizado en  $\xi_{inj}$ ,  $\mathcal{C}_{i,inj}$  es la concentración de la especie  $i$  en el inyector y  $\delta(\xi - \xi_{inj})$  la función delta de Dirac centrada en  $\xi_{inj}$ . Se considera que la única especie en los inyectores es el desinfectante ( $C$ ). Con cierto abuso de notación, se utilizará la nomenclatura propuesta al principio de la sección 2.2 para cada una de las especies. En este sentido, definiendo el conjunto  $\mathcal{C} = \{\mathcal{C}_i\}_{i=1}^6 = \{C, O_w, O_p, X_w, X_p, \rho\}$ , la Ecuación (1) se puede desagregar en:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_C \frac{\partial^2 C}{\partial \xi^2} - \frac{\partial}{\partial \xi}(u C) + \frac{F_{inj}}{A_T} C_{inj} \delta(\xi - \xi_{inj}) - \lambda C - \beta O_w C, \quad (2)$$

$$\frac{\partial O_w}{\partial t} = D_w \frac{\partial^2 O_w}{\partial \xi^2} - \frac{\partial}{\partial \xi}(u O_w) + K_{Opw} O_p \rho - K_{Owp} O_w - \gamma \beta O_w C, \quad (3)$$

$$\frac{\partial O_p}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial \xi}(u O_p) + K_{Owp} \frac{O_w}{\rho} - K_{Opw} O_p, \quad (4)$$

$$\frac{\partial X_w}{\partial t} = D_X \frac{\partial^2 X_w}{\partial \xi^2} - \frac{\partial}{\partial \xi}(u X_w) + K_{Xpw} X_p \rho - K_{Xwp} X_w - \alpha \frac{K}{K + O_w} \text{HOCl } X_w, \quad (5)$$

$$\frac{\partial X_p}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial \xi}(u X_p) + K_{Xwp} \frac{X_w}{\rho} - K_{Xpw} X_p - \eta \alpha \frac{K}{K + O_w} \text{HOCl } X_p, \quad (6)$$

$$\text{HOCl} = \frac{C}{1 + 10^{\text{pH}} 10^{-\text{p}K_a}}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial \xi}(u \rho). \quad (8)$$

En las Ecuaciones (2)-(8) se han considerado las siguientes interacciones (correspondientes a  $r_i$ ):

*Interacciones en la ecuación de desinfectante:*

- Degradación natural del desinfectante en el agua, modelada como una reacción de primer orden ( $\lambda C$ ), donde  $\lambda$  es la tasa de degradación (Abnavi et al., 2021).
- Inactivación del desinfectante por la materia orgánica disuelta en el agua: ( $\beta O_w C$ ), con  $\beta$  como coeficiente de inactivación (Abnavi et al., 2021).

*Interacciones en las ecuaciones de materia orgánica (agua y producto):*

- Transferencia de materia orgánica desde el producto al agua ( $K_{Opw} O_p \rho$ ), siendo  $K_{Opw}$  la tasa de salida desde el producto.
- Transferencia de materia orgánica en el agua hacia el producto ( $K_{Owp} O_w$ ) a una tasa  $K_{Owp}$ .
- Inactivación de la materia orgánica en el agua por el desinfectante: ( $\gamma \beta O_w C$ ), donde  $\gamma$  es el factor de rendimiento de esta reacción.

*Interacciones en las ecuaciones de bacterias (agua y producto):*

- Transferencia de bacterias desde el producto al agua ( $K_{Xpw} X_p \rho$ ), a una tasa  $K_{Xpw}$ , y transferencia de bacterias en el agua hacia el producto ( $K_{Xwp} X_w$ ), a una tasa  $K_{Xwp}$ .
- Inactivación de bacterias por acción del desinfectante. Una vez diluido en agua, el cloro libre toma diferentes formas, entre ellas el ácido hipocloroso (HOCl) considerado el de mayor actividad antimicrobiana Gil et al. (2025). Por lo tanto, en este trabajo solo consideramos HOCl, cuya concentración en agua se puede calcular a partir de la concentración de cloro libre como (Randtke, 2009):  $\text{HOCl} = \frac{C}{1 + 10^{-\text{p}K_a} 10^{\text{pH}}}$ , con  $\text{p}K_a = \frac{3000}{T} + 0,0253 T - 10,06$ , donde  $T$  es la temperatura del agua expresada en Kelvin. Se considera la inactivación de bacterias (a) en el agua de lavado por la acción del desinfectante (HOCl), modelada con una cinética tipo Monod:  $\alpha \frac{K}{K + O_w} \text{HOCl } X_w$  (Abnavi et al., 2021), donde  $\alpha$  denota la tasa de inactivación de las bacterias y  $K$  es la constante asociada al efecto protector de la materia orgánica sobre la acción del desinfectante, y (b) en el producto por HOCl, también modelada con cinética tipo Monod:  $-\eta \alpha \frac{K}{K + O_w} \text{HOCl } X_p$ , con  $\eta$  como factor de eficiencia relativa en el producto.

### 2.2.1. Condiciones iniciales y de frontera

Al inicio del proceso, se asume que solo hay agua limpia en el tanque, tal que  $\mathcal{C}_i(t_0, \xi) = 0$ . Adicionalmente, la asunción de interacción nula aguas arriba del proceso de lavado entre especies y contacto con el agua de lavado implica que la concentración de especies disueltas a la entrada es cero. También, se considera que el producto entrante posee una concentración constante de bacterias y materia orgánica. Dadas estas consideraciones, se establecen condiciones de tipo Dirichlet en la entrada del sistema ( $\xi = 0$ ) de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} C|_{\xi=0} &= 0, & O_w|_{\xi=0} &= 0, & X_w|_{\xi=0} &= 0, \\ \rho|_{\xi=0} &= \rho_{in}(t), & O_p|_{\xi=0} &= O_{p,in}, & X_p|_{\xi=0} &= X_{p,in}. \end{aligned} \quad (9)$$

Finalmente, en la salida del sistema ( $\xi = L$ ), se asume que no hay recirculación y que se tiene un flujo completamente desarrollado, por lo tanto, las condiciones de frontera tomadas

para la salida son de Neumann homogéneas:

$$\left. \frac{\partial C}{\partial \xi} \right|_{\xi=L} = 0, \quad \left. \frac{\partial O_w}{\partial \xi} \right|_{\xi=L} = 0, \quad \left. \frac{\partial X_w}{\partial \xi} \right|_{\xi=L} = 0. \quad (10)$$

### 2.3. Optimización del sistema de lavado

Típicamente, en las plantas industriales de lavado, los operarios añaden al tanque una cantidad de desinfectante cada cierto tiempo. Sin embargo, este procedimiento resulta, en general, en un uso excesivo de desinfectante con el consiguiente coste económico. Además, cuando el desinfectante es un producto basado en cloro (como en el caso de estudio que se considera en este trabajo), puede reaccionar con la materia orgánica y dar lugar a subproductos dañinos para la salud. En esta sección proponemos optimizar el flujo de desinfectante a añadir de forma que se asegure una reducción determinada en la concentración de bacterias a la salida del tanque y que minimice la concentración máxima de desinfectante en el tanque, para evitar en la medida de lo posible, la formación de subproductos. Además, hay que tener en cuenta que la densidad de producto introducido en el tanque ( $\rho_{in}$ ) varía a lo largo del tiempo de operación (véase, por ejemplo, los escenarios presentados en Gil et al. (2025)). Estas variaciones pueden conocerse con antelación para un cierto intervalo de tiempo ( $\Delta t$ ) teniendo en cuenta la cantidad de producto tratado en etapas previas al lavado. Para mejorar el desempeño, en lugar de considerar un flujo constante de desinfectante en el inyector, se permitirá la variación del flujo con el tiempo. Esto resulta en un problema de control óptimo que se puede formular de la siguiente forma: *Encontrar la evolución temporal del flujo de inyección de desinfectante ( $F_{inj}(t)$ ) que minimiza la concentración máxima de desinfectante en el tanque y que asegura que la concentración de bacterias a la salida del tanque está por debajo de un valor determinado.* Para resolver este problema, discretizamos la ventana temporal ( $\Delta t$ ) en  $N$  intervalos y aproximamos el flujo de inyección por polinomios de orden cero en cada uno de dichos intervalos, i.e.  $F_{inj}(t) = [F_{inj,1}, F_{inj,2}, \dots, F_{inj,N}]$ . Matemáticamente, este problema se puede formular de la siguiente forma:

$$\min_{F_{inj}(t) \in R^N} [\mathcal{J}^* = C_{max}(\Delta t)], \quad (11)$$

Sujeto a:

- Concentración de bacterias en el agua de lavado a la salida del tanque no sobrepasa el límite permitido ( $X_{obj}$ ), es decir,  $X_w(t, L) \leq X_{obj}$
- Modelo del proceso -Ecuaciones (2) a (8), (9) y (10)-.

En la expresión (11),  $C_{max}$  denota la concentración máxima de desinfectante alcanzada en el sistema a lo largo del intervalo  $\Delta t$ , y se calcula como el valor máximo del perfil espacial de concentración durante dicho intervalo. Cabe mencionar que, aunque la cantidad de producto se conoce para una ventana  $\Delta t$ , se desconoce para el resto del proceso. En consecuencia, la solución óptima obtenida resolviendo el problema (11) debe actualizarse en un proceso iterativo según llega nueva información del proceso (García, 2008):

1. La información del flujo de producto entrante en el periodo  $\Delta t$  se suministra al problema de optimización.

2. Se resuelve el problema de optimización y se obtiene el perfil  $F_{inj}(t) \in R^N$  en la ventana  $\Delta t$ .
3. Se aplica el primer valor a la variable manipulada (flujo  $F_{inj}$ ) al proceso.
4. Se repiten los pasos 1-3 con la nueva información del flujo de producto entrante.

### 2.4. Métodos numéricos empleados

Para la integración numérica del sistema de EDPs dado por las Ecuaciones (2) a ((8)), se utilizó un esquema de diferencias finitas generado mediante la toolbox MATMOL (Vande Wouwer et al., 2014). Se emplearon diferencias finitas centradas para aproximar las derivadas espaciales de segundo orden, y un esquema *upwind*, coherente con la dirección del flujo de convección, para las derivadas de primer orden. La función *ode15s* de Matlab para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias resultantes. El esquema de diferencias finitas implementado considera una malla no uniforme, con un refinamiento más fino en la vecindad del inyector. Esta distribución permitió una mejor resolución sin aumentar innecesariamente el coste computacional. En total se utilizaron  $N_{fd} = 50$  puntos de discretización, de los cuales 25 se concentraron en el intervalo  $[\xi_{inj} - 0,1, \xi_{inj} + 0,1]$  m. La elección de la malla se realizó comparando los resultados obtenidos con diferentes configuraciones hasta alcanzar un compromiso adecuado entre precisión y eficiencia.

Para resolver el problema de control óptimo (11) se utilizó un algoritmo basado en gradientes (función *fmincon* de MATLAB). La solución obtenida, se utilizó como solución inicial para el siguiente paso del proceso iterativo.

En un ordenador con un procesador AMD Ryzen 9 7950X, 4.5 GHz, 30 GB de RAM, el tiempo medio de cómputo requerido para resolver el problema de optimización en cada iteración es de aproximadamente 27,3 segundos. Dado que el intervalo de actualización del control se realiza cada minuto, este tiempo de cómputo resulta, en general, adecuado para su implementación en línea. No obstante, se ha observado que en ciertos casos el tiempo de resolución puede exceder los 60 segundos, lo que comprometería la aplicación puntual de la nueva acción de control. En esos casos, se propone mantener la última solución válida aplicada hasta que se disponga de una nueva, garantizando así la continuidad operativa del sistema sin interrupciones bruscas ni pérdida de efectividad en la desinfección.

## 3. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la implementación en un tanque de lavado de producto del proceso de optimización descrito en la Sección 2.3. La Tabla 1, muestra los valores de los parámetros para el modelo que describe el sistema de lavado (Ecuaciones (2)-(8)). Se consideró un límite permitido para la concentración de bacterias a la salida del tanque de  $X_{obj} \leq 10^4$  CFU/L y una duración total del proceso de lavado de una hora. El intervalo de tiempo para el que se conoce el flujo de producto entrante es  $\Delta t = 10$  min.

| Parámetro   | Valor                  | Unidades      |
|-------------|------------------------|---------------|
| $L$         | 2,04                   | m             |
| $\xi_{inj}$ | 0,68                   | m             |
| $A_T$       | $1 \times 10^{-1}$     | $m^2$         |
| $A_{inj}$   | $6,12 \times 10^{-4}$  | $m^2$         |
| $u_{in}$    | $1,70 \times 10^{-2}$  | m/s           |
| $O_{p,in}$  | $1 \times 10^3$        | mg-COD/L      |
| $X_{p,in}$  | $1 \times 10^5$        | CFU/L         |
| $\lambda$   | $2,83 \times 10^{-5}$  | 1/s           |
| $\beta$     | $1,30 \times 10^{-5}$  | L/(mg-COD·s)  |
| $\gamma$    | 8,16                   | mg-COD/mg-C   |
| $\alpha$    | $1,27 \times 10^{-1}$  | L/(mg-HOCl·s) |
| $\eta$      | 0,01                   | -             |
| $K$         | $5,54 \times 10^4$     | mg-COD/L      |
| $K_{Opw}$   | 0,01                   | 1/s           |
| $K_{Xpw}$   | 0,05                   | 1/s           |
| $K_{Owp}$   | $1 \times 10^{-3}$     | 1/s           |
| $K_{Xwp}$   | $1 \times 10^{-3}$     | 1/s           |
| $T$         | 277,15                 | K             |
| pH          | 7,00                   | -             |
| $D_c$       | $1,38 \times 10^{-9}$  | $m^2/s$       |
| $D_o$       | $2,27 \times 10^{-9}$  | $m^2/s$       |
| $D_x$       | $4,00 \times 10^{-10}$ | $m^2/s$       |

Tabla 1: Parámetros considerados en el modelo del proceso de lavado.

Además, cada 1 min llega nueva información de la planta sobre la cantidad de producto que llegará en el siguiente  $\Delta t$ . En el problema de control óptimo, el flujo de inyección de desinfectante se discretiza en  $N = 10$  intervalos. En cada uno de esos intervalos (de 1 min) el flujo de inyección es constante. El proceso iterativo descrito en la Sección 2.3 se implementó bajo estas condiciones y los resultados se muestran en las Figuras 2 y 3.

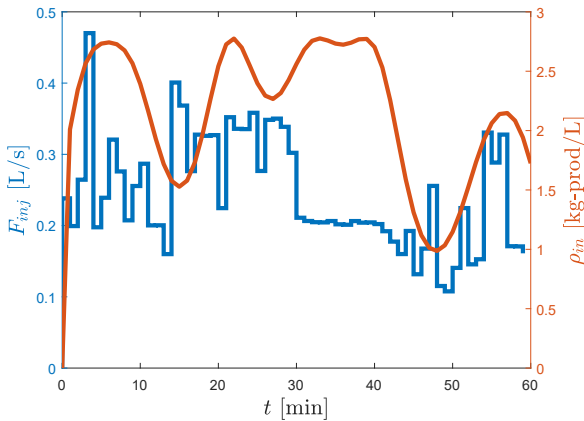


Figura 2: Flujo de inyección de desinfectante (línea azul), calculado mediante el procedimiento propuesto e implementado en la planta, y densidad de producto entrante al sistema (línea naranja) a lo largo del proceso de lavado.

La Figura 2 muestra el flujo de producto entrante a lo largo del proceso (línea naranja) y el flujo de entrada de desinfectante (línea azul) calculado por el procedimiento descrito anteriormente para compensar las variaciones en el producto. Como respuesta a tasas de producto entrante más pronunciadas, se produce un incremento pronunciado en el flujo de in-

yección de desinfectante. Así también, cuando la tasa de cambio del producto entrante es pequeña, se obtienen cambios pequeños en el control (ver intervalo 30 – 40 min). Cabe señalar que el perfil óptimo de control presenta ciertos saltos abruptos entre intervalos consecutivos. Sin embargo, al tratarse de flujos de inyección, dichos saltos no impiden su implementación práctica. En todo caso, si estos saltos pudiesen comprometer la capacidad de respuesta del equipo, podría añadirse un término de penalización a la variación de los controles en la función objetivo (Expresión 11) para suavizar las transiciones entre valores consecutivos del flujo de inyección.

Por otra parte, la Figura 3 ilustra los resultados de la aplicación de este procedimiento en el proceso. En el panel superior (Figuras 3(a)-(c)) se muestra la evolución espacio-temporal en la concentración de desinfectante y de bacterias en el agua y en el producto. Como era de esperar, el desinfectante tiene un pico en su concentración justo donde se localiza el inyector ( $\xi = L/3$ ), antes del mismo su concentración es cero y después evoluciona según las ecuaciones del modelo. Además, la concentración de bacterias se incrementa rápidamente al principio del tanque ( $\xi = 0$ ) debido a la rápida transferencia del producto. La evolución de  $X_w$  antes del inyector responde a los cambios en la cantidad de producto entrante. Después del inyector,  $X_w$  disminuye paulatinamente hasta alcanzar el valor deseado al final del tanque. La concentración de bacterias en el producto disminuye a lo largo del reactor. En el panel inferior, se muestra el máximo de la concentración de desinfectante en el agua de lavado a lo largo del proceso (Figura 3(d)) así como la concentración de bacterias en el agua y en el producto a la salida del tanque (Figuras 3(e)-(f)). Como se puede observar, el procedimiento aplicado permite asegurar niveles adecuados (por debajo de la restricción fijada, representada en la Figura 3(e) por una línea discontinua magenta) de bacterias a la salida del tanque.

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado e implementado una estrategia de control para un proceso de lavado de productos de cosecha, con el objetivo de mantener la concentración de bacterias a la salida del sistema dentro de los límites establecidos de seguridad alimentaria. El sistema se ha modelado mediante una aproximación unidimensional del dominio espacial, considerando las especies relevantes y sus interacciones.

El control se diseñó con un enfoque de optimización dinámica, tratando al flujo de inyección de desinfectante como variable de control. Esta estrategia permitió minimizar la concentración global de desinfectante en el tanque, mejorando la eficiencia operativa al reducir el consumo de insumos y disminuyendo, además, la formación de subproductos nocivos por interacción con materia orgánica. Las simulaciones muestran que la estrategia cumple consistentemente con las condiciones de seguridad, incluso ante flujos de entrada de producto variables.

#### Agradecimientos

Agradecemos la financiación recibida de los proyectos PID2022-136817OB-I00 y PID2021-123654OB-C32, financiadas por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, y la ayuda IN607B 2023/04 de la Xunta de Galicia.

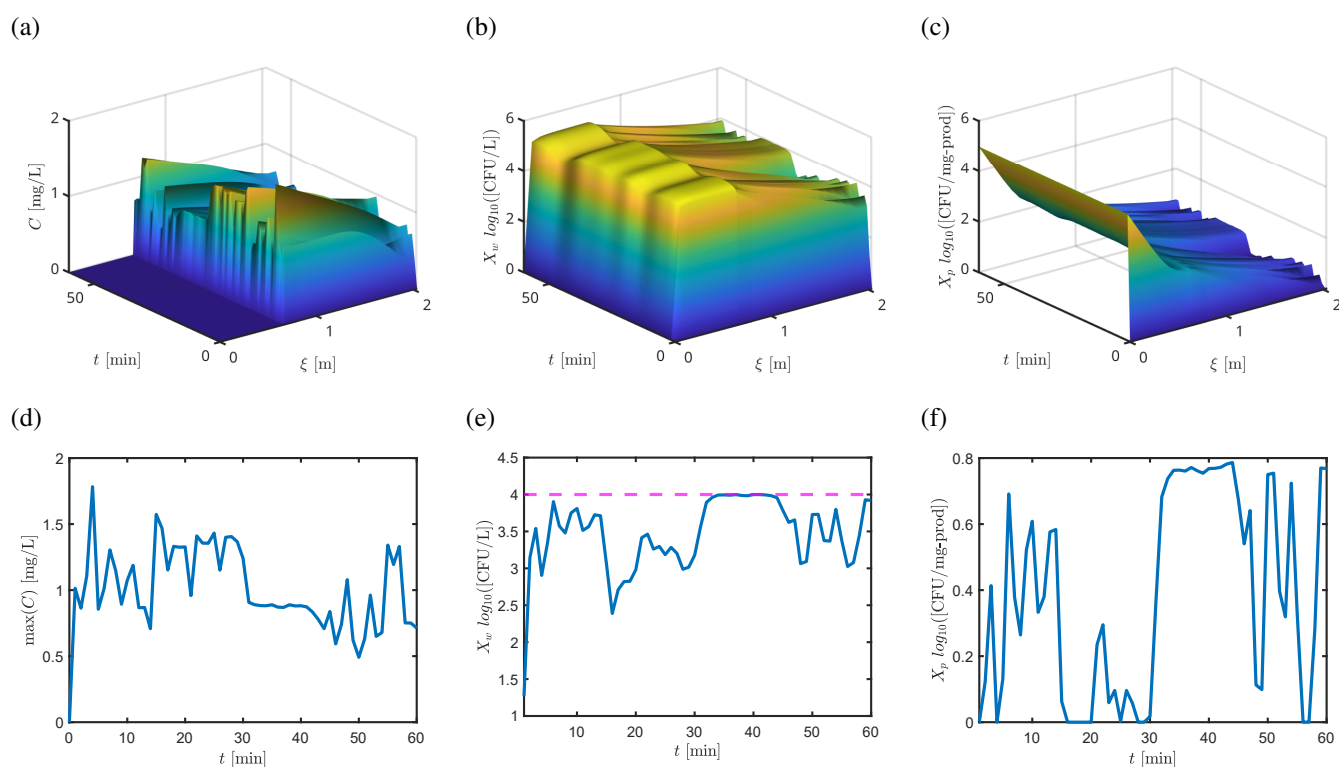


Figura 3: Resultados del proceso de lavado bajo el control del flujo de desinfectante. Panel superior: (a) evolución espacio-temporal de la concentración de desinfectante en el agua ( $C$ ), (b) concentración de bacterias en el agua de lavado ( $X_w$ ) y (c) en el producto ( $X_p$ ). Panel inferior: (d) concentración máxima de desinfectante en el agua a lo largo del proceso ( $C_{\max}$ ), (e) concentración de bacterias en el agua a la salida del tanque ( $X_{w,\text{out}}$ ), donde la línea discontinua representa el límite máximo permitido, y (f) concentración de bacterias en el producto a la salida ( $X_{p,\text{out}}$ ).

## Referencias

- Abnavi, M. D., Kothapalli, C. R., Munther, D., Srinivasan, P., Oct 2021. Chlorine inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 in fresh produce wash process: effectiveness and modeling. *International Journal of Food Microbiology* 356, 109364. DOI: [10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109364](https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109364)
- Aiyedun, S. O., Onarinde, B. A., Swainson, M., Dixon, R. A., 2021. Foodborne outbreaks of microbial infection from fresh produce in Europe and North America: a systematic review of data from this millennium. *International Journal of Food Science & Technology* 56 (5), 2215–2223. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.14884>
- Cougnon, P., Dochain, D., Guay, M., Perrier, M., 2006. Real-time optimization of a tubular reactor with distributed feed. *AIChE Journal* 52 (6), 2120–2128. DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.10799>
- EFSA Panel on Biological Hazards (BIOHAZ), Koutsoumanis, K., Ordóñez, A. A., Bolton, D., Bover-Cid, S., Chemaly, M., De Cesare, A., Herman, L., Hilbert, F., Lindqvist, R., Nauta, M., Nonno, R., Peixe, L., Ru, G., Simons, M., Skandamis, P., Suffredini, E., Banach, J., Ottoson, J., Zhou, B., da Silva Felício, M. T., Jacxsens, L., Martins, J. L., Messens, W., Allende, A., 2023. Microbiological hazards associated with the use of water in the post-harvest handling and processing operations of fresh and frozen fruits, vegetables and herbs (ffvhs). part 1 (outbreak data analysis, literature review and stakeholder questionnaire). *EFSA Journal* 21 (11), e08332. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.8332>
- García, M. R., 2008. Identification and real time optimisation in the food processing and biotechnology industries. Ph.D. thesis, Universidade de Vigo.
- Gil, M. I., García, M. R., Abadías, M., Sánchez, G., Sampers, I., van Asselt, E., Tudela, J. A., Moreno-Razo, A. S., Vilas, C., Martínez-López, N., Vanmarcke, H., Hernandez, N., Andujar, S., Serrano, V., Sabater, D., Truchado, P., van de Kamer, D., van der Berg, J. P., Safitri, R., Boxman, I., Tuyschaever, T., Vandenbussche, C., Díaz-Reolid, A., Anguera, M., Plaza, P., 2025. Microbiological hazards associated with the use of water in the post-harvest handling and processing operations of fresh and frozen fruits, vegetables and herbs (ffvhs). Tech. Rep. EN-8924, EFSA supporting publication. DOI: [10.2903/sp.efsa.2025.EN-8924](https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2025.EN-8924)
- Mokhtari, A., Oryang, D., Chen, Y., Pouillot, R., Van Doren, J., Aug. 2018. A Mathematical Model for Pathogen Cross-Contamination Dynamics during the Postharvest Processing of Leafy Greens. *Risk Analysis: An Official Publication of the Society for Risk Analysis* 38 (8), 1718–1737. DOI: [10.1111/risa.12960](https://doi.org/10.1111/risa.12960)
- Moreno-Razo, A., García, M. R., Vilas, C., Apr. 2024. Optimización de las dosificaciones de desinfectante en los inyectores de un tanque de lavado en forma de canal. In: *Proceedings of the III CEA Symposium of the Groups: Control Engineering – Modelling, Simulation and Optimization*. Vigo, Spain, 10–12 April.
- Moreno-Razo, A. S., Martínez-López, M., García, M. R., 2023. Modelado y simulación de la inactivación de patógenos con higienizantes en un tanque de lavado de alimentos operado en continuo y con flujo turbulento. In: *XLIV Jornadas de Automática*. pp. 429–434. DOI: [10.17979/spudc.9788497498609.429](https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498609.429)
- Munther, D., Luo, Y., Wu, J., Magpantay, F. M. G., Srinivasan, P., Oct. 2015. A mathematical model for pathogen cross-contamination dynamics during produce wash. *Food Microbiology* 51, 101–107. DOI: [10.1016/j.fm.2015.05.010](https://doi.org/10.1016/j.fm.2015.05.010)
- Randtke, S., 2009. *Chemistry of Aqueous Chlorine*. John Wiley & Sons, Ltd, Ch. 2, pp. 68–173. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470561331.ch2>
- Tan, J., Yi, J., Yang, X., Lee, H., Nitin, N., Karwe, M., 2022. Distribution of chlorine sanitizer in a flume tank: Numerical predictions and experimental validation. *LWT* 155, 112888.
- Thomas, G. A., Paradel Gil, T., Müller, C. T., Rogers, H. J., Berger, C. N., 2024. From field to plate: How do bacterial enteric pathogens interact with ready-to-eat fruit and vegetables, causing disease outbreaks? *Food Microbiology* 117, 104389. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fm.2023.104389>
- Tudela, J. A., López-Gálvez, F., Allende, A., Gil, M. I., Dec 2019. Chlorination management in commercial fresh produce processing lines. *Food Control* 106, 106760. DOI: [10.1016/j.foodcont.2019.106760](https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106760)
- U.S. Food and Drug Administration, 1998. *Guidance for Industry: Guide to Minimize Microbial Food Safety Hazards for Fresh Fruits and Vegetables*.
- Vande Wouwer, A., Saez, P., Vilas, C., 07 2014. Simulation of ODE/PDE models with MATLAB, OCTAVE and SCILAB. *Scientific and engineering applications*. DOI: [10.1007/978-3-319-06790-2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-06790-2)