

Agua del siglo XXI y los desafíos que enfrenta Uruguay

**Webinar organizado por la Asociación
de Limnología del Uruguay**

20 de marzo de 2025, hora 17:30

Danilo Ríos

Desafíos de la potabilización del agua en condiciones de alta salinidad

Se trata de identificar y evaluar las dificultades asociadas a la potabilización convencional del agua frente al aumento de la salinidad del agua bruta.

En este caso, potabilización convencional es aquella que incluye procesos diseñados para el tratamiento de agua dulce de origen superficial.

Agua con alta salinidad para los sistemas de potabilización

Estas plantas de potabilización no son efectivas para remover algunos contaminantes típicos del agua salada, como sodio y cloruros.

Los VMP (valores máximos permitidos) establecidos en la Norma Unit 833:2008/2010 son:

- Cloruros: VMP = 250 mg/l
- Sodio: VMP = 200 mg/l
- Conductividad: VMP = 2000 $\mu\text{s}/\text{cm}$
- Bromuros (--)

Importancia de la salinidad

Hasta la década de 1970 (en 1974 se descubrió la existencia de los trihalometanos, THM), la salinidad se evaluaba por sus efectos organolépticos.

En la actualidad, existen varios subproductos asociados a la salinidad que están limitados por las Guías de la OMS y por la norma uruguaya, por ejemplo: THM, bromatos (los ácidos monobromoacético y dibromoacético no están regulados en Uruguay).

THM y Bromatos

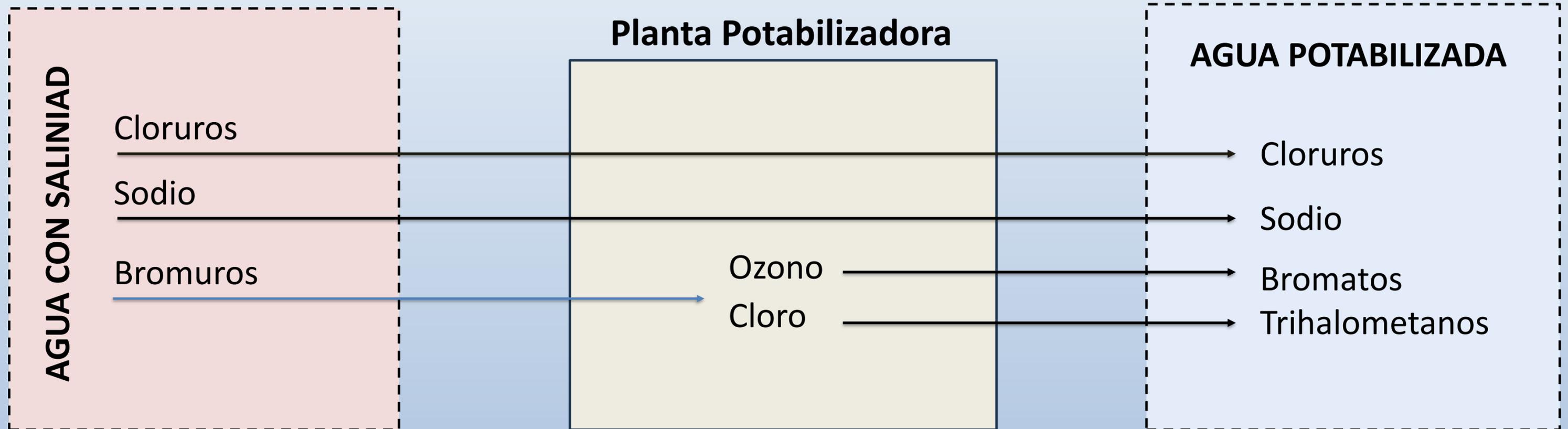
El *Centro Internacional de Investigación sobre el Cáncer* (IARC, por su sigla en inglés), clasificó a los THM cloroformo y bromodiclorometano, y a los bromatos dentro del grupo 2B (posibles cancerígenos para humanos).

THM y Bromatos están limitados por la norma Unit 833:2008/2010, en línea con las propuestas de las Guías para la Calidad del Agua Potable de la OMS.

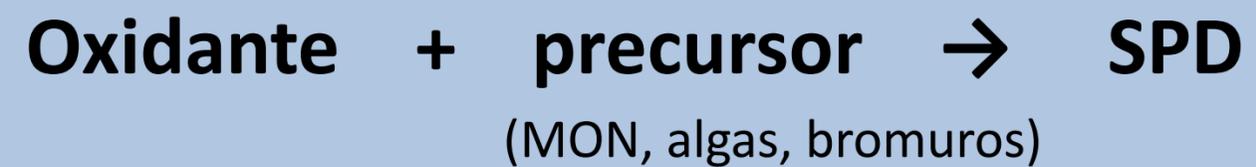
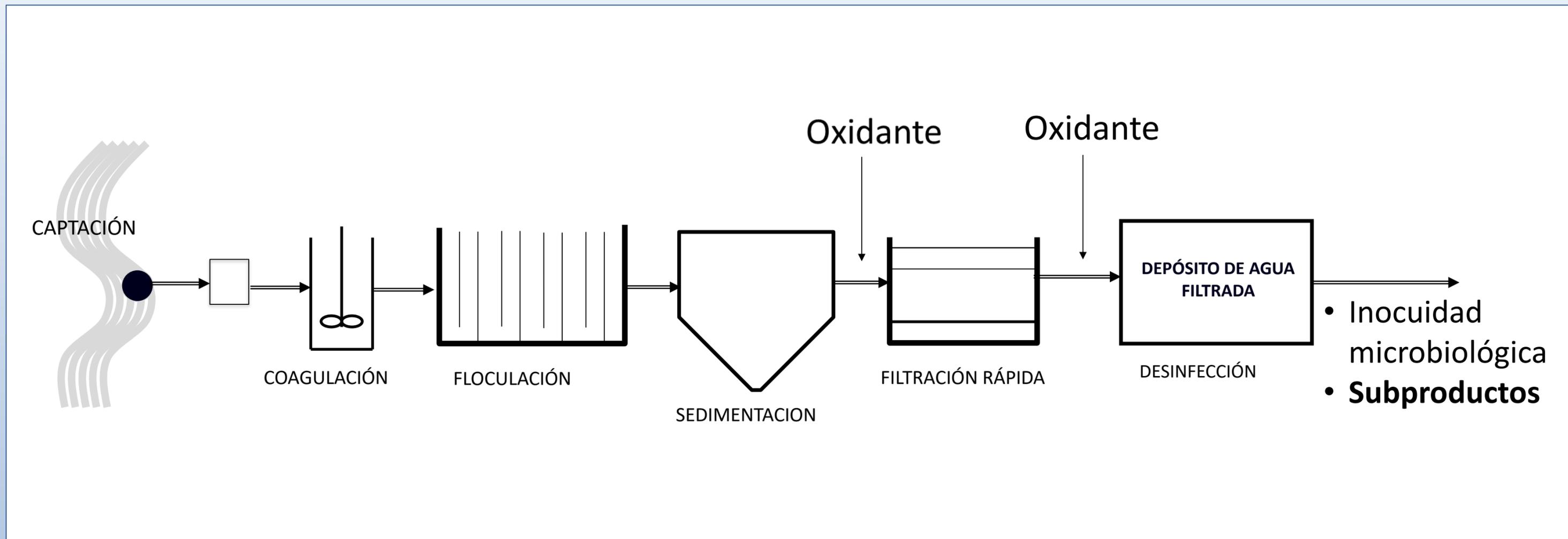
Los VMP establecidos en la Norma Unit 833:2008/2010 son:

- THM: VMP = 1 (Índice de trihalometanos)
- Bromatos: VMP = 10 $\mu\text{g/l}$

Que ocurre durante la potabilización?



Los cloruros y el sodio no pueden ser removidos. Los bromuros interactúan con el ozono, la materia orgánica y el cloro, y generan subproductos nocivos (bromatos, trihalometanos, entre otros). Los subproductos resultantes de la presencia de yodo aún no están regulados en Uruguay.

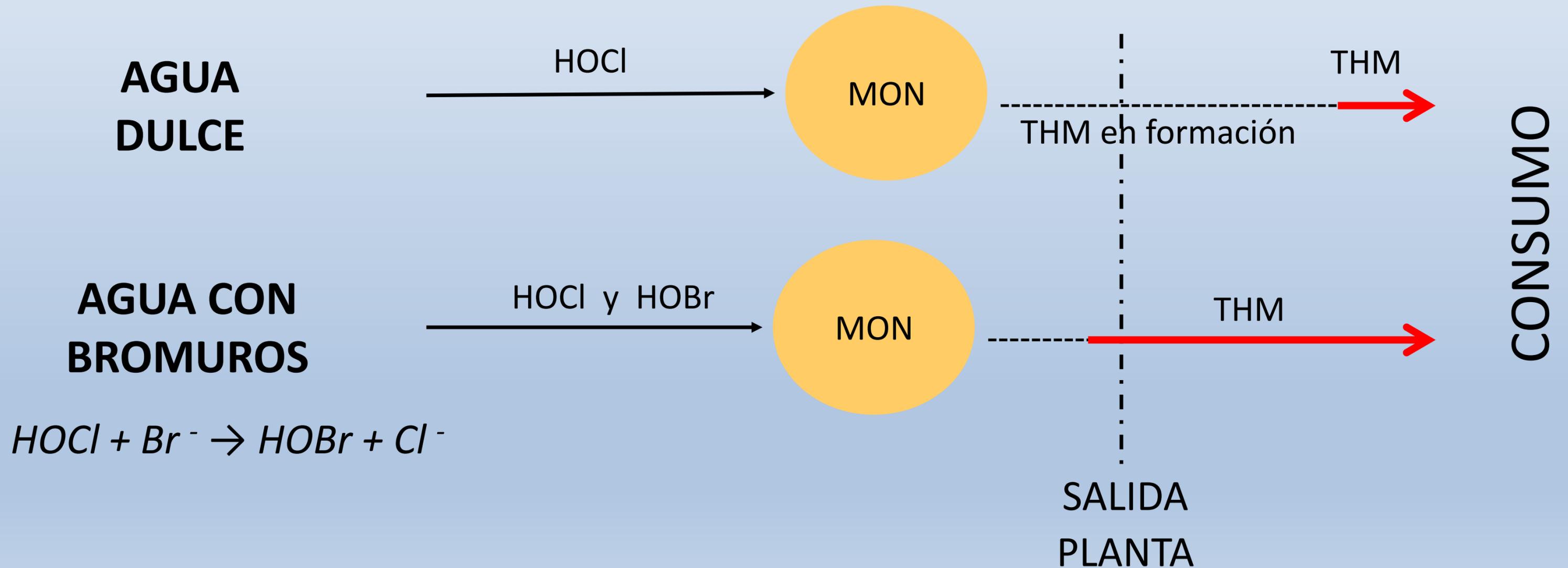


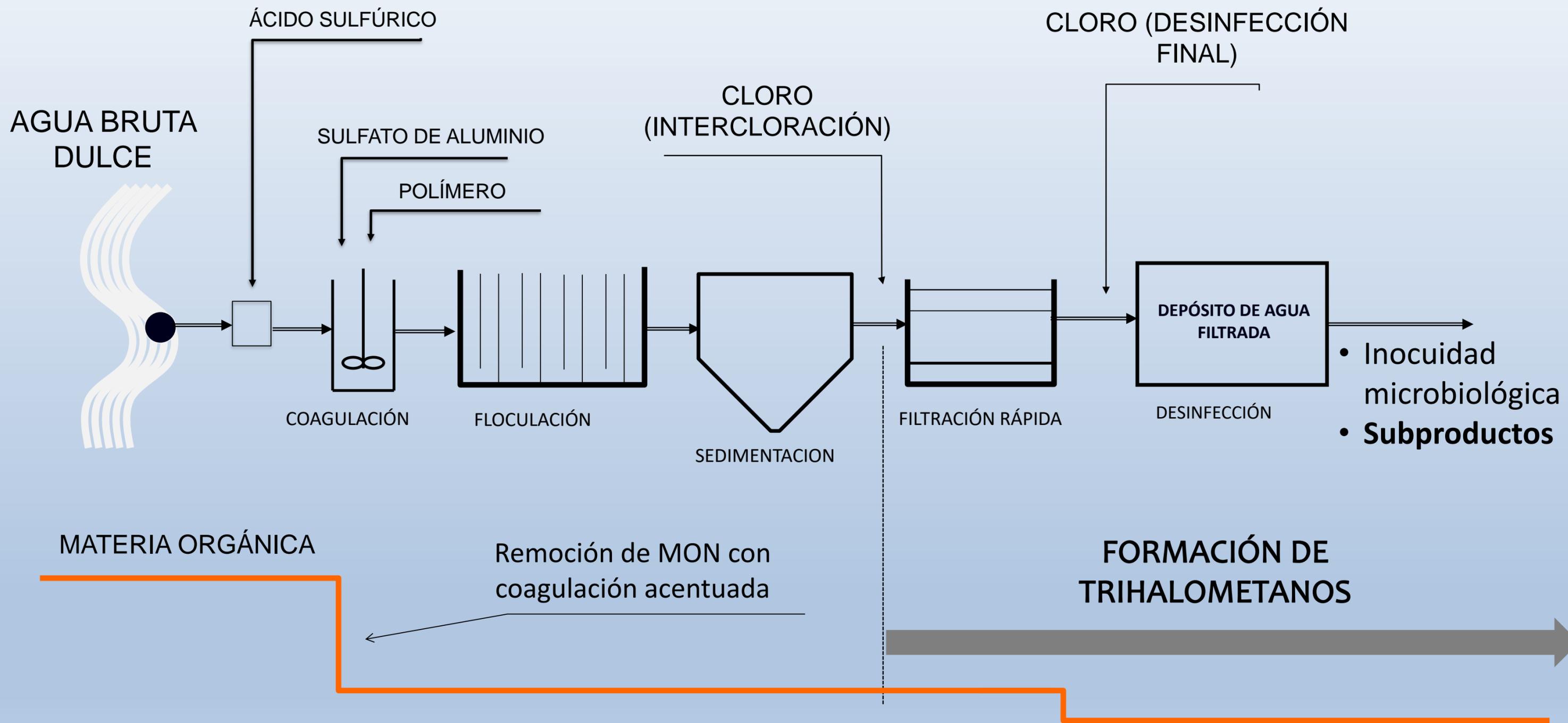
MON: Materia Orgánica Natural
 SPD: Subproductos de la desinfección

Se distinguen 2 casos:

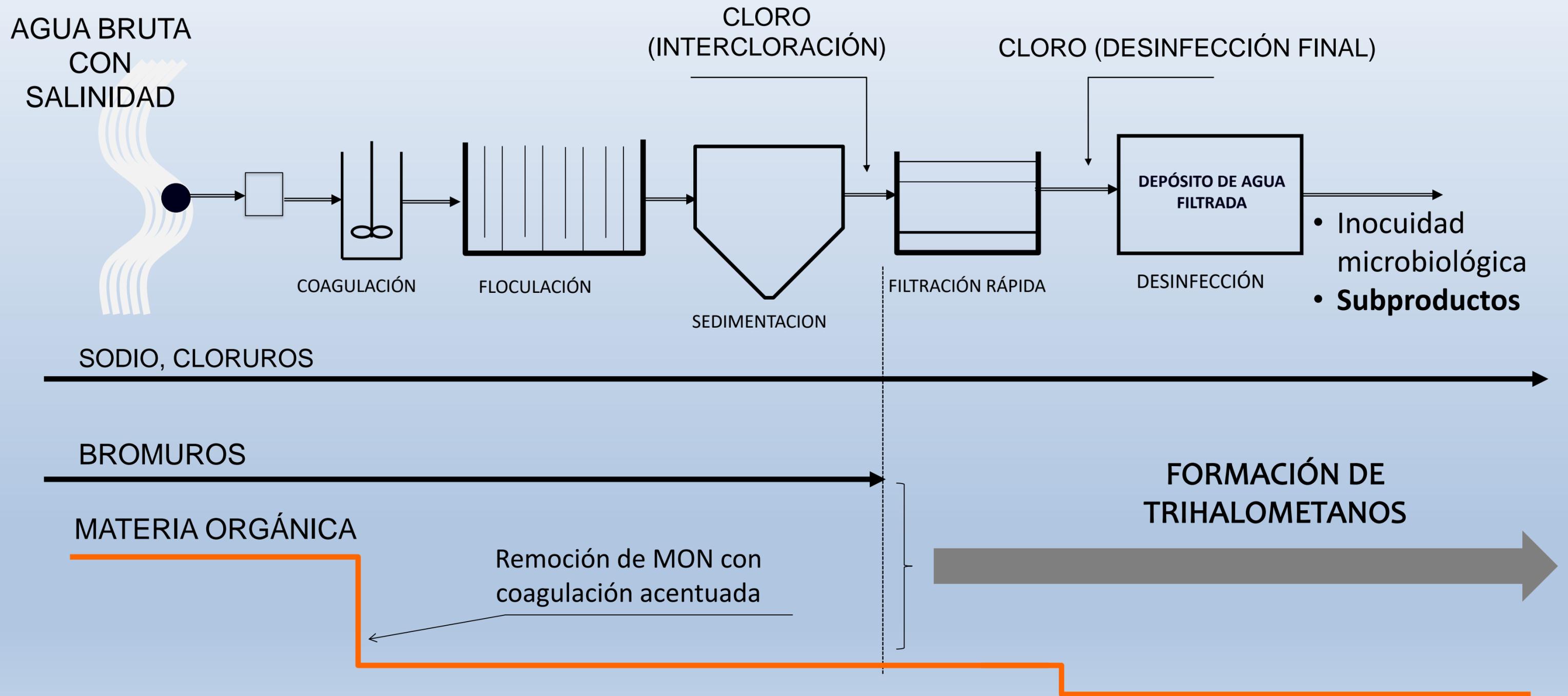
- Planta sin dosificación de ozono
- Planta con dosificación de ozono

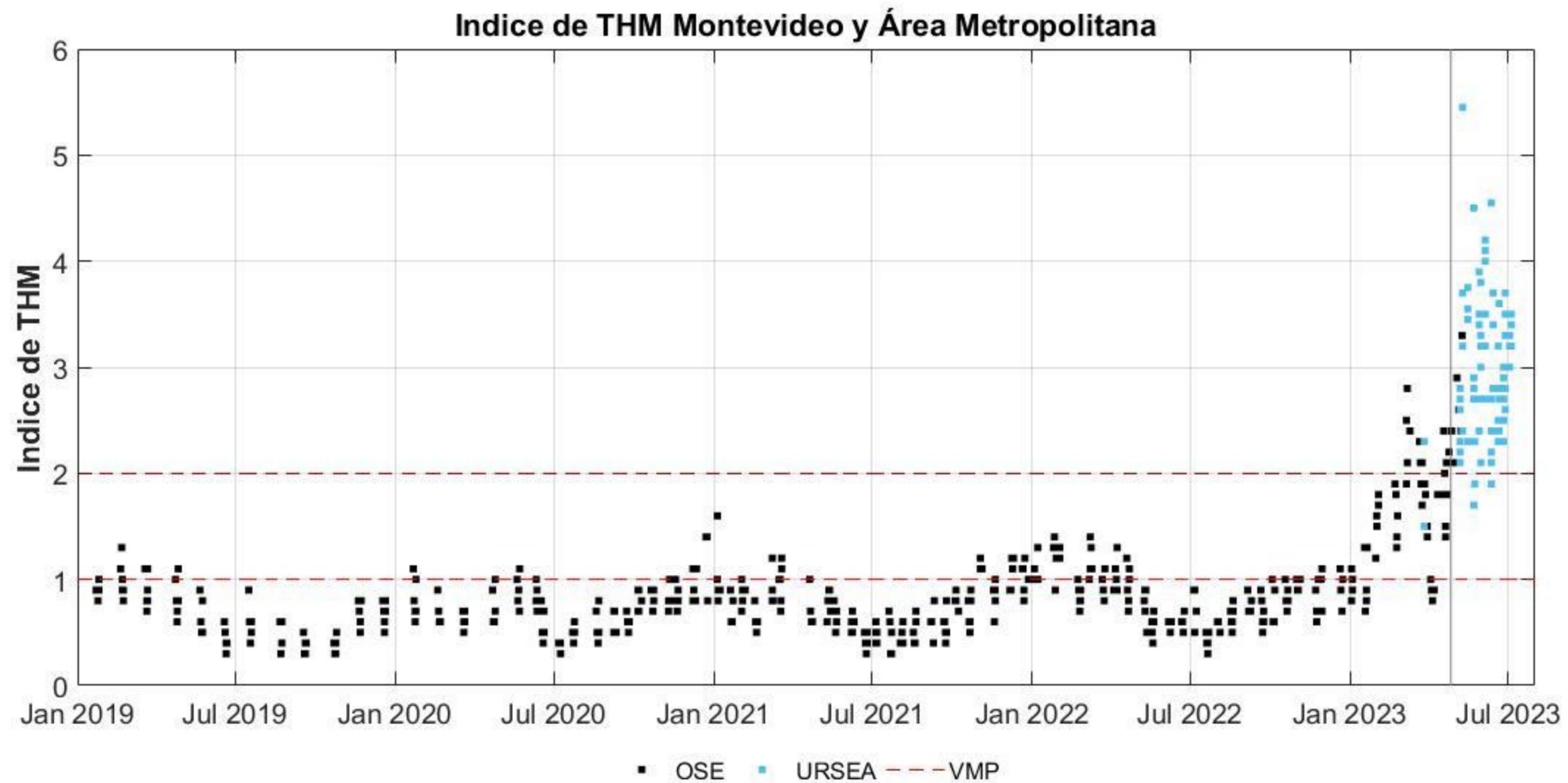
PLANTA POTABILIZADORA SIN DOSIFICACIÓN DE OZONO





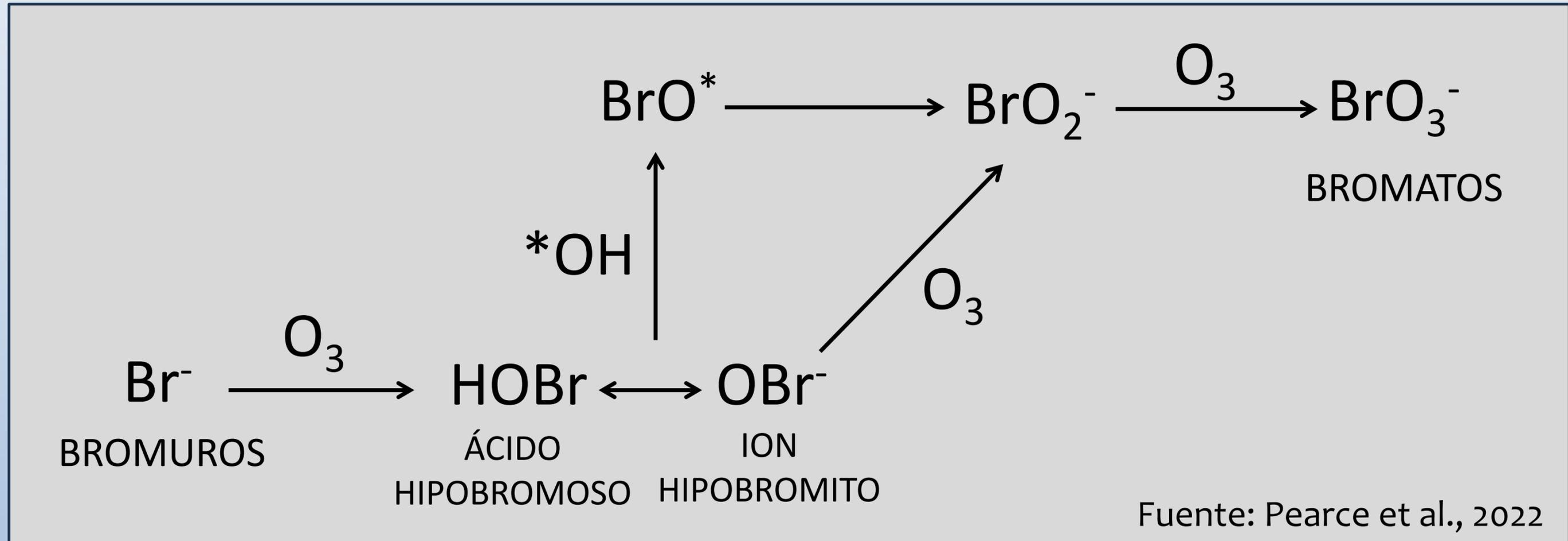
PLANTA POTABILIZADORA SIN DOSIFICACIÓN DE OZONO





Indice de THM en la red de distribución de Montevideo. $VMP = 1$

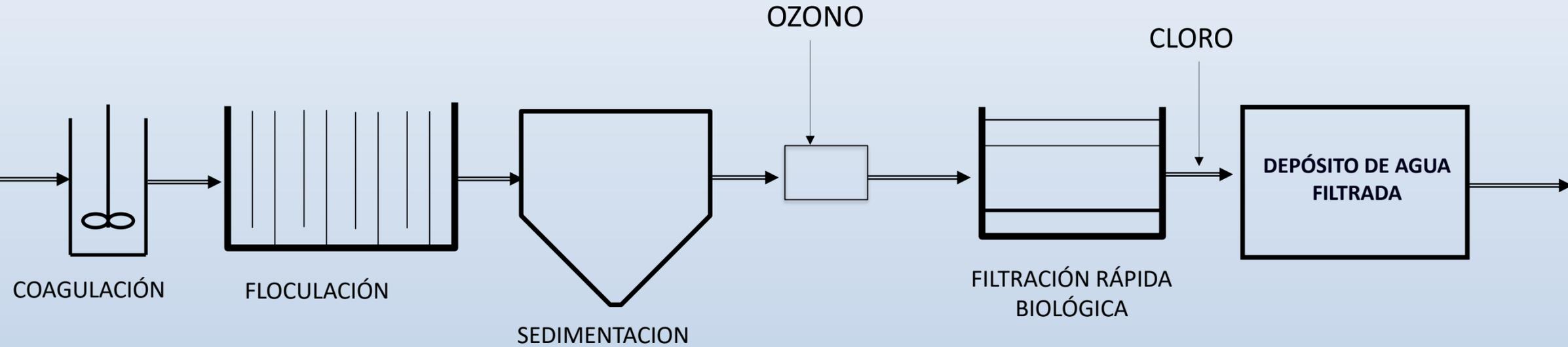
Cuando se incluye una etapa de ozonización:



Cuando la concentración de bromuros en el agua bruta es mayor que $50 \mu\text{g/l}$, se debe prestar atención a la formación de bromatos (Pearce et al., 2022)

PLANTA POTABILIZADORA CON DOSIFICACIÓN DE OZONO

AGUA BRUTA
CON
SALINIDAD



SODIO, CLORUROS

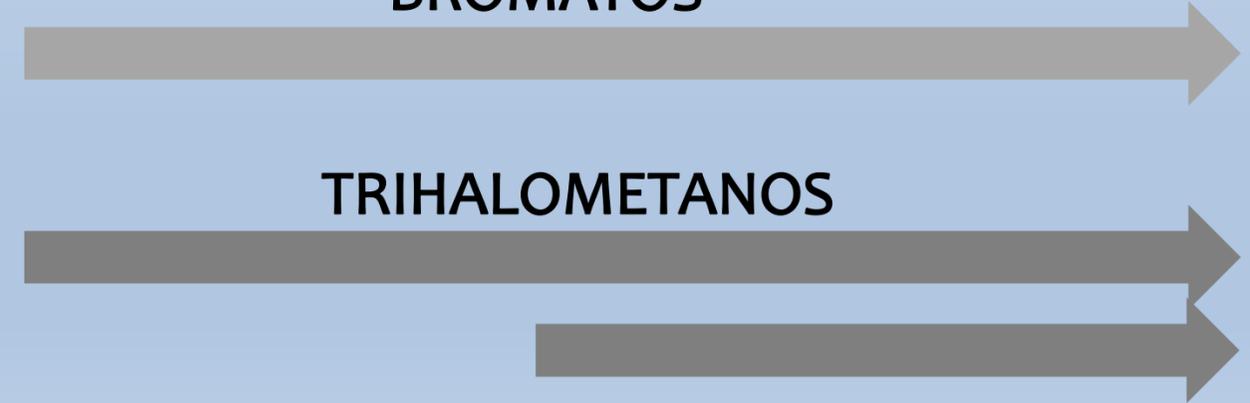
BROMUROS

MATERIA ORGÁNICA

Remoción de MON con
coagulación acentuada

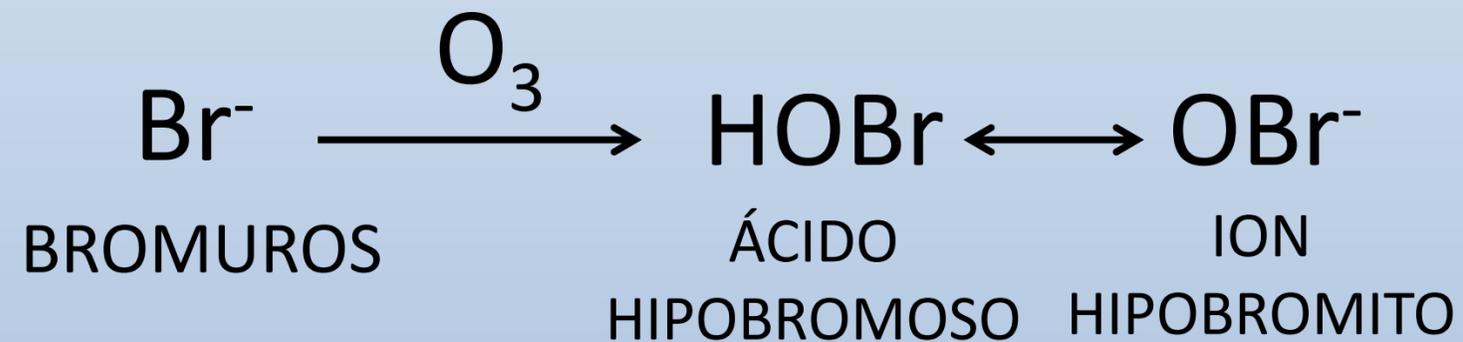
BROMATOS

TRIHALOMETANOS

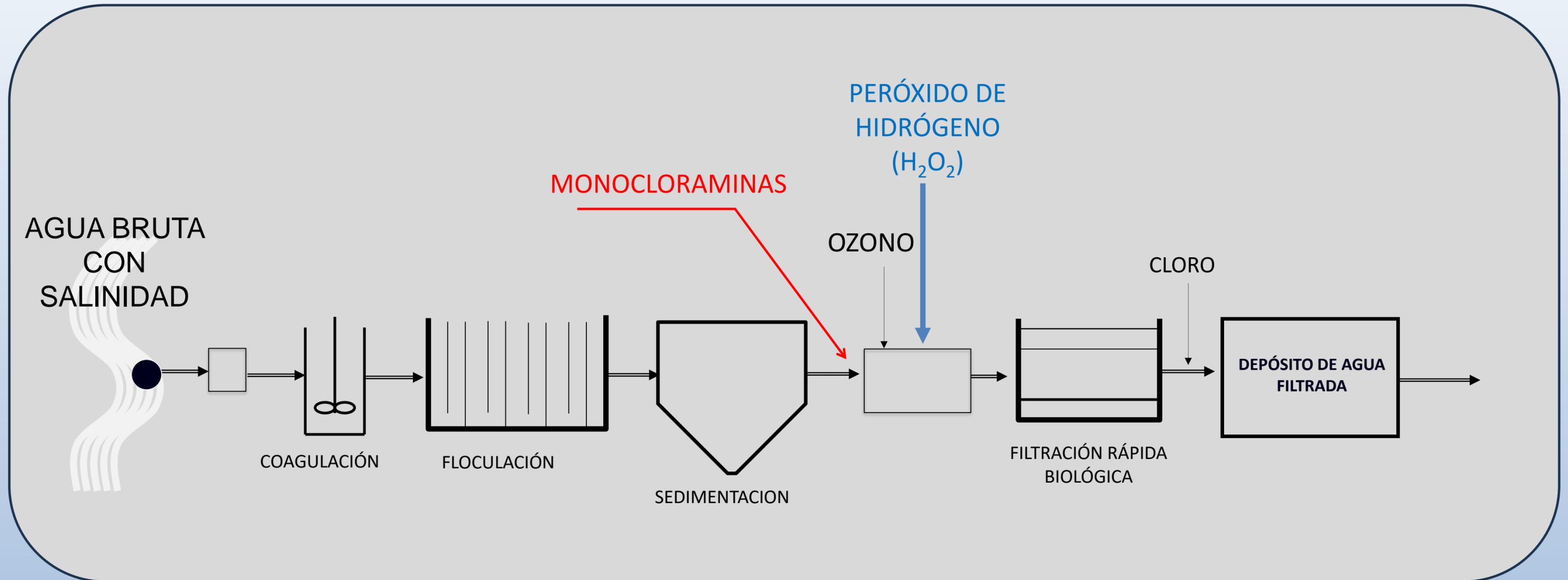


Estrategias para minimizar la formación de bromatos y THM

- Bajar el pH (por debajo de 6,5), lo cual reduce la proporción de ion hipobromito, responsable de la formación de bromatos. Esta acción está en línea con los requerimientos de coagulación acentuada y de desinfección.



Esta medida aumenta la proporción de ácido hipobromoso, por lo tanto, la remoción de MON es crucial para minimizar la formación de THM bromados y clorados.



MONOCLORAMINAS: ↓OH* ↓Bromatos ↓Oxidación de MON ↑THM

H₂O₂: ↑OH* ↑Oxidación MON ↓THM Revierte formación de HOBr y OBr- → ↓Bromatos ↑Br-

- **Dosificar monocloramidas**, que tienen la capacidad de limitar la vía indirecta de formación de bromatos, a través del abatimiento de los radicales hidroxilo. Esto podría ir en contra de la capacidad de oxidación de MON (Pearce et al., 2022)
- **Dosificar peróxido de hidrógeno**. El peróxido reacciona con el ozono y aumenta la formación de radicales hidroxilos, que tienen mayor poder de oxidación que el ozono. Esto favorece la oxidación de materia orgánica y por lo tanto minimiza la formación de THM.

A su vez, el peróxido puede revertir en parte las reacciones de formación de ácido hipobromoso e ion hipobromito, disminuyendo la formación de bromatos por vía directa y propiciando la aparición de bromuros a la salida del reactor (Yongkun Li et al., 2015). Esto impactaría en la formación de THM a partir de la desinfección final con cloro.

Conclusiones

- Si la planta no incluye dosificación de ozono no se forman bromatos, pero la remoción de MON por coagulación acentuada puede ser insuficiente para minimizar la formación de THM (ejemplo crisis 2023).
- Pese a que es responsable de la formación de bromatos, la ozonización es una etapa favorable para el proceso pues complementa la remoción de MON.

- Si la planta incluye una etapa de ozonización se debe analizar en detalle la formación de SPD, pues existe la posibilidad de que, aún cuando los cloruros estén por debajo de su VMP, los bromuros generen valores elevados de bromatos y/o THM.
- Puede ser necesaria la dosificación de productos químicos específicos para controlar la formación de SPD.
- La realización de ensayos de tratabilidad aportaría información para identificar el parámetro que limita la aptitud del agua para ser potabilizada (bromuros o cloruros).

¡GRACIAS!

Referencias

- IARC, WHO – International Agency for Research on Cancer (iarc.who.int. Acceso: 19/06/2023
- IARC, WHO. Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans – Preamble. Lyon, France, 2019.
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (UNIT). Norma Unit:2008, reimpresión corregida en julio de 2010.
- Organización Mundial de la Salud, OMS. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating first and second addenda. 2022. Disponible en: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>
- Robert Pearce, Samantha Hogard, Peter Buehlmann, Germano Salazar-Benites, Christopher Wilson, Charles Bott, Evaluation of preformed monochloramine for bromate control in ozonation for potable reuse, Water Research, Volume 211, 2022, 118049, ISSN 0043-1354, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118049>.
- URSEA. Resultados de los muestreos de calidad de agua distribuida en Montevideo y área metropolitana. Disponible en: <https://www.gub.uy/unidad-reguladora-servicios-energia-agua/>. Acceso: 16/06/23.
- Yongkun Li, Wenhua Shen, Shujie Fu, Hongwei Yang, Gang Yu, Yujue Wang, Inhibition of bromate formation during drinking water treatment by adapting ozonation to electro-peroxone process, Chemical Engineering Journal, Volume 264, 2015, Pages 322-328, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.11.120>.