



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,  
Canales y Puertos.  
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



# ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS APROPIADAS PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AGUA EN PAÍSES EMPOBRECIDOS

Trabajo realizado por:  
*Unai Bellido Pérez*

Dirigido:  
*Pedro Lastra*  
*Amaya Lobo*

Titulación:  
**Máster Universitario en  
Ingeniería de Caminos, Canales y  
Puertos**

Santander, septiembre de 2021



OFICINA DE COOPERACIÓN  
AL DESARROLLO

TRABAJO FIN DE MASTER

NACIONES UNIDAS  
**impacto  
académico**

Por el  
compromiso  
social de las  
universidades



## **Resumen**

### **Español**

El agua es una necesidad básica y cumple una función primordial en la salud de la población, y su escasez en numerosos lugares del mundo ponen de manifiesto una situación crítica que debe ser solventada. Este proyecto es un primer trabajo dirigido por la Oficina de Cooperación al Desarrollo de la Universidad de Cantabria, cuyo objetivo es promover el desarrollo humano sostenible y erradicar la pobreza. El estudio consiste en aportar una base teórica en relación con distintas técnicas que mejoran la calidad del agua y realizar ensayos experimentales que respalden dicha base. Las alternativas deben englobarse dentro del concepto de tecnología apropiada, que implica adaptación a las condiciones locales, coste asumible, independencia en cuanto a su uso y mantenimiento, escala pequeña y utilización asumible por la población local desde un punto de vista medioambiental, cultural y técnico. La información recopilada se ordena en el estudio de manera sistemática con criterios comunes. Teniendo en cuenta que existen numerosos indicadores para determinar la calidad del agua, se ha acotado el número de parámetros estudiados a dos: turbidez y la contaminación biológica. Finalmente, las conclusiones consisten en una valoración cuantitativa y comparación de las distintas alternativas teniendo en cuenta los resultados experimentales, los recursos empleados, la accesibilidad, la sencillez en el montaje y explotación, la flexibilidad frente al agua a tratar y si hay algún requisito climático.

### **Inglés**

Water is a basic need and plays an essential role in the health of the population, and its scarcity in many parts of the world highlights a critical situation that must be solved. This project is a first project directed by the Office for Development Cooperation of the University of Cantabria, whose objective is to promote sustainable human development and eradicate poverty. The study consists of providing a theoretical basis in relation to different techniques that improve water quality and conducting experimental tests to support this basis. The alternatives must be included within the concept of appropriate technology, which implies adaptation to local conditions, affordable cost, independence in terms of use and maintenance, small scale and affordable use by the local population from an environmental, cultural and technical point of view. The information collected is ordered in the study in a systematic way with common criteria. Taking into account that there are numerous indicators to determine water quality, the number of parameters studied has been limited to two: turbidity and biological contamination. Finally, the conclusions consist of a quantitative assessment and comparison of the different alternatives taking into account the experimental results, the resources used, accessibility, simplicity in assembly and operation, flexibility in relation to the water to be treated and if there is any climate requirement.



### **Agradecimientos**

*El agradecimiento de este trabajo va dirigido primero a mi familia por hacer posible que llegara hasta aquí, también a José Ramón Mira por tener siempre una solución a mis problemas de laboratorio, a mis tutores Amaya Lobo y Pedro Lastra que gracias a sus conocimientos pude hacer un trabajo potable, a Mamen Restegui por su habilidad para la alfarería y a todos los que me han apoyado.*

*Unai Bellido Pérez*

## Contenido

1. Antecedentes .....	9
2. Introducción .....	9
2.1. Motivación del proyecto .....	9
2.2. Situación mundial.....	9
2.3. Necesidad de calidad del agua para consumo humano.....	10
3. Objetivos .....	11
4. Tecnologías existentes .....	11
4.1. El concepto de la tecnología apropiada .....	11
4.2. Métodos y aplicaciones.....	12
4.2.1. Microfiltración, ultrafiltración y ósmosis inversa.....	14
4.2.1.1. Microfiltración.....	14
4.2.1.2. Ultrafiltración .....	14
4.2.1.3. Nanofiltración.....	14
4.2.1.4. Ósmosis inversa.....	14
4.2.2. Filtro de tela .....	15
4.2.3. Filtro de arena .....	17
4.2.3.1. Filtro de arena rápido.....	18
4.2.3.2. Filtro lento de arena.....	21
4.2.4. Filtro de rama de pino .....	22
4.2.5. Filtro cerámico.....	23
4.2.6. Cloración.....	24
4.2.7. Tratamientos térmicos .....	27
4.2.7.1. Hervor.....	27
4.2.7.2. Pasteurización .....	27
4.2.8. Desinfección solar (SODIS) .....	28
4.2.9. Otros.....	31
4.2.9.1. Yodo.....	31
4.2.9.2. Condensación .....	31
4.2.9.3. Destilación .....	33
4.2.9.4. Sistemas naturales .....	34
5. Metodología general.....	34
5.1. Agua natural sintética .....	34
5.2. Interpretación de resultados.....	36
6. Ensayos experimentales.....	38
6.1. Microfiltración, ultrafiltración y ósmosis inversa.....	38



6.1.1.	Materiales y procedimiento .....	38
6.1.2.	Resultados .....	39
6.2.	Filtro de tela .....	40
6.2.1.	Materiales y procedimiento .....	40
6.2.2.	Resultados .....	43
6.3.	Filtros de arena.....	46
6.3.1.	Filtro de arena rápido.....	46
6.3.1.1.	Materiales y procedimiento .....	46
6.3.1.2.	Resultados .....	48
6.3.2.	Filtro lento de arena.....	49
6.3.2.1.	Materiales y procedimiento .....	49
6.3.2.2.	Resultados .....	50
6.4.	Filtro de rama de pino .....	50
6.4.1.	Materiales y procedimiento .....	50
6.4.2.	Resultados .....	53
6.5.	Filtros cerámicos .....	54
6.5.1.	Materiales y procedimiento .....	54
6.5.2.	Resultados .....	55
6.6.	Cloración.....	57
6.6.1.	Materiales y procedimiento .....	57
6.6.2.	Resultados .....	59
6.7.	Tratamientos térmicos .....	61
6.7.1.	Materiales y procedimiento .....	61
6.7.2.	Resultados .....	62
6.8.	Desinfección solar (SODIS) .....	64
6.8.1.	Materiales y procedimiento .....	64
6.8.2.	Resultados .....	65
7.	Conclusiones.....	68
8.	Referencias.....	72



**Tabla de ilustraciones**

Ilustración 1. Capacidad de retención de los diferentes procesos de membrana. Elaboración propia a partir de Lenntech (s.f.). ..... 15

Ilustración 2. Tipos de poro (Lu, 1996)..... 15

Ilustración 3. Tipos de tejido (Lu, 1996). ..... 16

Ilustración 4. Fuerzas inerciales y centrífugas sobre una partícula (Huisman, 1974). ..... 18

Ilustración 5. Diagrama psicrométrico (S&P, 2019). ..... 32

Ilustración 6. Warka Water («Warka Water. La torre de bambú que produce hasta 100 litros de agua al día»,2021). ..... 33

Ilustración 7. Condensación en el bambú Water («Warka Water. La torre de bambú que produce hasta 100 litros de agua al día»,2021). ..... 33

Ilustración 8. Roca de arcilla de la que se extrae la turbidez del agua. .... 35

Ilustración 9. Fusión del medio de cultivo. .... 36

Ilustración 10. Equipo de filtración. .... 36

Ilustración 11. Recuento estimado: 310 (3M, 2010). ..... 37

Ilustración 12. Cultivo de no coliforme (3M, 2010). .... 37

Ilustración 13. Recuento de colonias: 10<sup>6</sup> (3M, 2010)..... 37

Ilustración 14. Recuento de colonias: 10<sup>7</sup> (3M, 2010)..... 38

Ilustración 15. Recuento de colonias: 10<sup>8</sup> (3M, 2010)..... 38

Ilustración 16. Microfiltración. .... 39

Ilustración 17. Estado de los filtros saturados. .... 40

Ilustración 18. De izquierda a derecha: tela de algodón con elastano, vaquera y de algodón puro. .... 41

Ilustración 19. Filtro de tela de mantel ..... 41

Ilustración 20. Filtro de tela vaquera. .... 42

Ilustración 21. Filtro de tela de camiseta ..... 42

Ilustración 22. Montaje del filtro rápido de arena. .... 47

Ilustración 23. Montaje del filtro lento de arena ..... 49

Ilustración 24. Rama de pino..... 51

Ilustración 25. Corteza de la rama de pino. .... 51

Ilustración 26. Diferencia de sección entre un pino seco y fresco..... 51

Ilustración 27. Montaje del filtro de pino. .... 52

Ilustración 28. Irregularidades en la rama de pino. .... 52

Ilustración 31. Muestras de cultivo (filtro de pino)..... 54

Ilustración 34. Resultados de cultivos. 1/1.000 (filtro cerámico). .... 55

Ilustración 35. Resultados de cultivos. 1/10.000 (filtro cerámico). .... 56

Ilustración 36. Resultados de cultivos. 1/100.000 (filtro cerámico). .... 56

Ilustración 39. Efecto del reactivo del cloro sobre el agua. .... 58

Ilustración 40 Resultados de los cultivos (cloración) ..... 60

Ilustración 41. Hervor..... 61

Ilustración 42. Pasteurización. .... 62

Ilustración 43. Muestra de cultivo (hervor durante 1 min)..... 62

Ilustración 44. Muestra de cultivo (hervor durante 10 min)..... 63

Ilustración 45. Muestra de cultivo (65°C durante 30 min). .... 63

Ilustración 46. Muestra de cultivo (65°C durante 45 y 60 min)..... 63

Ilustración 47. Método SODIS con botellas PET..... 65

Ilustración 48. Resultados del primer experimento SODIS (27-05-2021). ..... 66

Ilustración 49. Resultados del segundo experimento SODIS (07-06-2021). ..... 66



## Tabla de gráficas

Gráfica 1. Pérdida de carga y turbidez a lo largo del tiempo (Suárez et al., 2014).....	19
Gráfica 2. Pérdida de carga en función de la profundidad del lecho (Suárez et al., 2014).....	19
Gráfica 3. Correlación del pH con HOCl y OCl- (Manual de Cloración, 1984). ....	25
Gráfica 4. Curva de demanda de cloro. Fuente: Elaboración propia a partir de Manual de Cloración (1984). ....	26
Gráfica 5. Tiempo de saturación para distintas turbideces (microfiltración). ....	40
Gráfica 6. Tiempo en filtrar 1 L (tela de mantel). ....	43
Gráfica 7. Rendimiento de eliminación de turbidez en filtros de tela de mantel. ....	43
Gráfica 8. Tiempo en filtrar 1 L (tela vaquera). ....	44
Gráfica 9. Rendimiento de eliminación de turbidez en filtros de tela vaquera. ....	44
Gráfica 10. Tiempo en filtrar 1 L (tela de camiseta). ....	45
Gráfica 11. Rendimiento de eliminación en filtros de tela de camiseta. ....	45
Gráfica 12. Rendimiento de eliminación de turbidez en filtros de arena rápidos. ....	48
Gráfica 13. Variación de pérdida de carga frente al tiempo (filtro de arena rápido). ....	48
Gráfica 14. Rendimiento de la eliminación de la turbidez. ....	50
Gráfica 15. Rendimientos de eliminación de turbidez (filtro cerámico). ....	57
Gráfica 16. Cloro aplicado frente a cloro libre. ....	59

## Tabla de tablas

Tabla 1. Estándares de calidad de agua, según la OMS (Lenntech, s.f.). ....	11
Tabla 2. Comparativo de características básicas entre las alternativas.....	13
Tabla 3. Características de un filtro rápido. Fuente: Elaboración propia a partir de Suárez et al. (2014). ....	20
Tabla 4. Longitudes de onda de las bandas espectrales (Casanova, 2012). ....	29
Tabla 5. Eliminación de la turbidez (microfiltración). ....	39
Tabla 6. Conductividad hidráulica de la rama de pino. ....	53
Tabla 7. Eliminación de coliformes (filtro de pino). ....	54
Tabla 8. Resultados cuantitativos de eliminación de coliformes en filtros cerámico. ....	56
Tabla 9. Resultados cuantitativos de eliminación de coliformes (cloración). ....	60
Tabla 10. Límites de cloración. ....	60
Tabla 11. Cloro necesario para lejía de 40g Cl/L. ....	60
Tabla 12. Cloro necesario para lejía de 20g Cl/L. ....	61
Tabla 13. Cloro necesario para lejía de 10g Cl/L. ....	61
Tabla 14. Eliminación de coliformes (hervor). ....	64
Tabla 15. Eliminación de coliformes (pasteurización). ....	64
Tabla 16. Eliminación de coliformes (27-05-2021). ....	66
Tabla 17. Eliminación de coliformes (07-06-2021). ....	67
Tabla 18. Valoración numérica de las alternativas. ....	70





## **1. Antecedentes**

Este estudio está dirigido por la Oficina de Cooperación de Desarrollo, una institución dentro de la Universidad de Cantabria cuyo objetivo es promover el desarrollo humano sostenible, eliminar las desigualdades sociales, erradicar la pobreza y reducir la injusticia social en el mundo. La fundación de la Oficina de Cooperación es reciente y este TFM es un primer trabajo dirigido por dicha institución. El trabajo no es un estudio de laboratorio en el sentido tradicional, sino que consiste en aportar una base teórica, organizar la información de manera sistemática con criterios comunes y realizar unos primeros ensayos que puedan servir como cimiento para los trabajos venideros que se hagan en este departamento.

## **2. Introducción**

### **2.1. Motivación del proyecto**

Uno de los motivos que me ha motivado a realizar este trabajo es el interés en investigar distintas herramientas y tecnologías que puedan mejorar las condiciones económicas de la gente y que, al no reportar beneficios económicos, su aplicación no es muy habitual. Por otro lado, me pareció interesante el reto de realizar trabajos manuales para elaborar herramientas sencillas que pudieran ser útiles eliminando contaminantes. Otra de las razones fue el poder realizar un proyecto fuera de lo convencional, entendiéndolo que difícilmente iba a tener la oportunidad de hacer algo parecido en un futuro u otras circunstancias.

### **2.2. Situación mundial**

El agua es una necesidad humana básica y desempeña un papel sanitario primordial para la salud de la población. También puede tener un valor social y cultural. El acceso a él y el saneamiento constituyen un derecho básico universal. El agua tiene un valor incalculable que a menudo pasa desapercibido y éste mejora indudablemente la calidad de vida de la gente, implicando un menor gasto sanitario y un aumento de productividad. Ha quedado constatado el balance positivo que implica una inversión en la mejora del acceso a agua potable. Las mujeres, sobre todo las más jóvenes, suelen ser las responsables de conseguir el agua por lo que este tipo de inversiones les afecta directamente (UNESCO, 2021).

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), 844 millones de personas carecen de suministro básico de agua potable y, en todo el mundo, más de 2000 millones de personas consumen agua con contaminación fecal. Se estima que de aquí a 2025, la mitad de la población mundial vivirá en zonas con escasez de agua. Se calcula que abastecerse con agua contaminada provoca más de 502000 muertes al año por diarrea, además de otras enfermedades que provoca, como la disentería, la fiebre tifoidea o la poliomielitis (OMS, 2019).

Entre los 10 países con menos agua potable se encuentra Mozambique, que el 52,7% de la población carece de agua en el hogar, situación que se empeoró por dos tifones en 2019, que causó brote de cólera y aumentaron las enfermedades transmitidas por el agua. En Níger las sequías son habituales y el 54,2% de población no dispone de agua limpia para beber. En Chad más de la mitad de los habitantes no tienen acceso a agua potable y el 6% consume agua contaminada de los ríos y arroyos. Somalia se encuentra en una situación similar, acentuada por guerras, sequías e inundaciones. En Eritrea 8 de cada 10 personas no disponen de agua limpia, situación intensificada por sequías y deforestaciones. En Papúa Nueva Guinea, Angola,



República Democrática del Congo, Etiopía y Uganda más de la mitad de la población no se abastece de agua potable (Fundación iO, 2020).

Todo lo anterior pone de manifiesto una situación crítica que debe ser solucionada.

### **2.3. Necesidad de calidad del agua para consumo humano**

Las bacterias son el grupo que más enfermedades y epidemias causan. El agua sin tratar es el mayor causante de enfermedades. La transmisión se genera vía fecal-oral. El género *Salmonella* provoca numerosas enfermedades, siendo los tipos más perjudiciales la *Salmonella typhi* (fiebres tifoideas), *Salmonella paratyphi* y *Salmonella schottmuelleri* (fiebres paratifoideas). La *Shigella* rara vez afecta a animales y es poco resistente al medio. Es responsable de la disenteria bacteriana. La *Escherichia Coli (E. Coli)* provoca enfermedades como la diarrea o gastroenteritis. Otro tipo de bacteria llamado *Vibrio cholerae* es responsable del cólera. La *Campylobacter*, al igual que la *Salmonella*, es causante de diarreas. Otro patógeno conocido como *Legionella* es responsable de la enfermedad del legionario (Moro, 2011).

Dentro de los protozoos hay distintos tipos. El *Cryptosporidium* puede sobrevivir mucho tiempo hasta que es ingerido y es portado por una gran cantidad de animales. Es responsable de síntomas como diarrea, fiebre, dolores abdominales, náuseas y vómitos. La *Giardia lamblia*, al igual que el anterior, es capaz de sobrevivir durante mucho tiempo hasta ser ingerido y se encuentra en intestinos de diversos animales. Este tipo de parásitos provoca giardiasis, una enfermedad que genera diarrea, cólicos y malestar general (Moro, 2011).

En cuanto a los virus, se ha demostrado que el adenovirus, enterovirus, rotavirus, astrovirus y otros son capaces de persistir en ambientes acuáticos, a pesar de que no se puedan reproducir. Son agentes patógenos transmisores de enfermedades respiratorias y diarrea, entre otras (Moro, 2011).

Los parámetros de calidad es una cuestión de gran complejidad debido a la basta cantidad de indicadores que existen, tanto físicos, químicos como biológicos.

También resulta relevante mencionar los distintos parámetros e indicadores relativos a la salud que no sean bacterias, protozoos o virus. Para ello, las directrices de la OMS, establecidas en 1993 en Génova, son un punto de referencia internacional en cuanto a estándares de seguridad y salud se refiere (Tabla 1).



Elemento	Directriz de la OMS basada en salud	Elemento	Directriz de la OMS basada en salud
Aluminio	0,2 mg/l	Hierro	0,001 mg/l
Amonio	No hay directriz	Plomo	0,07 mg/l
Antimonio	0,005 mg/l	Manganeso	0,02 mg/l
Arsénico	0,01 mg/l	Mercurio	50 mg/l nitrógeno total
Asbestos	No hay directriz	Molibdeno	No se menciona
Bario	0,3 mg/l	Níquel	No hay directriz
Berilio	No hay directriz	Nitratos y nitritos	0,01 mg/l
Boro	0,3 mg/l	Turbidez	No hay directriz
Cadmio	0,003 mg/l	pH	200 mg/l
Cloro	250 mg/l	Selenio	500 mg/l
Cromo	0,05 mg/l	Plata	No hay directriz
Color	No se selecciona	Sodio	200 mg/l
Cobre	2 mg/l	Sulfato	500 mg/l
Cianuro	0,07 mg/l	Estaño	No hay directriz
Oxígeno disuelto	No hay directriz	SDT	No hay directriz
Fluor	No hay directriz	Uranio	1,4 mg/l
Dureza	0,01 mg/l	Zinc	3 mg/l
Sulfuro de hidrógeno	0,5 mg/l		

*Tabla 1. Estándares de calidad de agua, según la OMS (Lenntech, s.f.).*

A partir de estos valores, los organismos o instituciones crean índices de calidad. Estos índices pueden ser útiles para dar una idea general de la calidad del agua, aunque pueden ser problemáticos debido a la pérdida de información concreta que suponen.

### 3. Objetivos

El objetivo de este estudio es realizar una recopilación sistemática de las tecnologías relativas al tratamiento del agua para consumo humano, organizar la información disponible de manera sistemática para facilitar la selección de alternativas de acuerdo con condicionantes locales, y aportar unos primeros resultados experimentales para completar la falta de información sobre las diferentes eficiencias de las tecnologías consideradas. Una vez delimitado el número de tecnologías a estudiar, se explicará una base teórica en el que se comentarán los fundamentos físicos por los cuales se rige cada tecnología y se analizarán experimentalmente para clasificarlas según unos criterios comunes. Principalmente, se estudiará la turbidez removida y las bacterias eliminadas para tener una visión orientativa. También influirá en la clasificación las áreas de aplicación.

## 4. Tecnologías existentes

### 4.1. El concepto de la tecnología apropiada

La tecnología apropiada para el desarrollo humano es aquella que se adapta a las condiciones locales, tiene un coste asumible, no genera dependencia externa en cuanto a su uso y mantenimiento, su escala es pequeña y su utilización puede ser asumida por la población local desde un punto de vista medioambiental, cultural y técnico. Puede incrementar la calidad de vida de sectores pobres, tanto en salud como en ahorro de tiempo. Este concepto surgió como solución a las limitaciones de la tecnología tradicional y de los problemas que suponía la transferencia de tecnología moderna de un país desarrollado a uno pobre. Uno de los problemas es la dependencia del país pobre al tener que importar constantemente tecnología de países desarrollados. Además, la introducción de según qué tecnología puede suponer daños



medioambientales, problemas por falta de conocimiento en el uso o incremento de diferencias sociales. La tecnología introducida, en función de quién las controle o de los recursos o ingresos que genere darán lugar a cambios en relaciones sociales, relaciones de género (las mujeres no suelen ejercer control), la división de trabajo o el acceso a recursos naturales (Pérez y Zabala, s.f.).

La tecnología apropiada se rige por los siguientes tres principios (Pérez y Zabala, s.f.):

- Es esencial considerar el conocimiento de la población local.
- Se debe enfocar su introducción desde una perspectiva participativa, comprendiendo si realmente será útil, quién será el beneficiario y el impacto socioeconómico que generaría.
- La sostenibilidad medioambiental es fundamental, procurando reducir los recursos y residuos generados.

El uso de tecnología apropiada dio paso al de Tecnologías para el Desarrollo Humano (TDH), que es un concepto más global respecto a la tecnología apropiada, cuyo fin es mejorar la calidad de vida de la gente (García et al., 2006).

#### **4.2. Métodos y aplicaciones**

Para seleccionar las tecnologías que se emplearon, se ha procurado que los métodos sean lo más sencillos posibles y que su replicación en países empobrecidos sea viable. En definitiva, el objetivo era que encajarán lo máximo posible en el concepto de tecnología apropiada. Por otro lado, se han empleado tecnologías de referencia (que en este caso no son apropiadas para el contexto de los países empobrecidos) para poder comparar el rendimiento respecto a las que sí son apropiadas. Se estudiarán las siguientes tecnologías apropiadas, tanto su rendimiento en la mejora de calidad de agua como las áreas de aplicación, que se comentan en cada uno de los apartados:

- Microfiltración, ultrafiltración y ósmosis inversa
- Filtro de tela
- Filtro de arena rápido
- Filtro de arena lento
- Filtro de rama de pino
- Filtro cerámico
- Cloración
- Hervor
- Pasteurización
- Desinfección solar (SODIS)

Se añade también un apartado (Otros), donde se incluyen tecnologías que se estudiaron desde un punto de vista teórico, pero no se llegaron a evaluar a nivel de laboratorio.

Previo a exponer la base teórica de cada tecnología, se muestra en la Tabla 2 un comparativo de las características básicas de cada alternativa.

	Escala	Recursos			Agua residual			Complejidad en el entendimiento para		Requisito climático	
		Locales	Precio estimado (\$)	Vida útil	Agua de entrada	Remueve	No remueve	Montaje	Explotación/Mantenimiento		
Filtro cerámico	Doméstico (30-40 L/día)	Sí	63-400	Practicamente ilimitada	Concentración baja de turbidez	Bacterias, parásitos, protozoos, turbidez, SS, virus	Contaminantes químicos, algunos patógenos	Alta	Baja	No	
Hervir	-	Sí	En función de la fuente de energía y el precio del combustible	-	Sin turbidez	Bacterias, parásitos, protozoos, virus	Turbidez, productos químicos	Baja	Baja	No	
Pasteurización	Doméstico	Sí	En función de la fuente de energía y el precio del combustible	-	Sin turbidez	Bacterias, parásitos, protozoos, virus	Turbidez, productos químicos	Complejidad en función del tipo de montaje	Baja	Unicamente si la fuente de energía es solar	
Filtro lento de arena	Doméstico (20-30 L/día según la calidad del agua y mantenimiento)	Sí	~ 250	Carrera de filtro entre 2 y 3 meses. Vida útil entre 3 y 5 años	Turbidez menor a 20 UNT y baja concentración de algas	Turbidez, bacterias, coliformes, SS	Ciertos compuestos químicos, como el fluor	Media	Alta	No, pero bajas Tº pueden causar congelación	
Filtro rápido de arena	Comunitaria (~ 150 L/h según la calidad del agua y mantenimiento)	Sí	~ 250	Carrera de filtro entre 12 y 72 h	Alta tolerancia frente a fluctuaciones de turbidez	Turbidez	Turbidez, bacterias, coliformes, SS	Media	Alta	No	
Desinfección solar SODIS (botella de agua)	Doméstico	Sí	Insignificante	Hasta que la botella muestre signos de envejecimiento	Hay que filtrar los SS previamente	Gérmenes infecciosos, como virus, bacterias y parásitos	Turbidez	Baja	Baja	Luz solar	
Filtro casero con rama de pino	Individual (4L/día)	Sí (algún complemento puede requerir importación)	Insignificante	Cuando el filtro se colmate	Agua con muy baja turbidez	Bacterias, parásitos, partículas mayores a 200 nanómetros	Virus	Media	Baja	No	
Cloración	-	Puede requerir importación	~ 1,5 \$/botella de 1 L	-	Sin turbidez	Bacterias, parásitos, protozoos, virus	Parásitos como la Giardia, cryptosporidium y huevos de gusanos	-	Media	No	
Filtro de tela	Individual	Sí	Insignificante	-	-	Turbidez y sólidos en suspensión	Bacterias, parásitos, protozoos, virus	Baja	Baja	No	
Otros	Yodo	Individual	-	Costo muy elevado. Unicamente recomendable si se dispone localmente	-	Sin turbidez	Bacterias	Baja eficacia frente a virus, protozoos y quistes	Baja	Media	No
	Condensación	En función de la tecnología	En función de la tecnología	En función de la tecnología	En función de la tecnología	Humedad	-	-	Alta	Alta	Sí
	Destilación	Individual	Sí	En función de la tecnología. Con materiales locales el costo puede ser insignificante	-	Puede ser agua de mar, agua turbia, agua con coliformes...	-	-	Alta	Alta	Sí
	Sistemas naturales	Comunitaria	Sí	Costo bajo, aunque requiere gran cantidad de terreno	-	-	Turbidez, patógenos, nutrientes	Ciertos patógenos	Alta	Alta	Sí

Tabla 2. Comparativo de características básicas entre las alternativas



#### **4.2.1. Microfiltración, ultrafiltración y ósmosis inversa**

A grandes rasgos, la microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa (Ilustración 1) consiste en la separación de partículas de distintos tamaños respecto al medio donde se encontraban. La separación de las partículas se realiza por efecto tamiz bajo la acción de un gradiente hidráulico (Hernández et al., 1990).

##### **4.2.1.1. Microfiltración**

En la microfiltración se usan membranas con tamaño de poro entre 0,1  $\mu\text{m}$  y 10  $\mu\text{m}$  y se filtran partículas con un rango de tamaños igual al tamaño de poro de la membrana. La diferencia de presión en el proceso se sitúa en torno a 0,1 a 2 bares (Hernández et al., 1990).

##### **4.2.1.2. Ultrafiltración**

En cuanto a ultrafiltración, el proceso es idéntico al de la microfiltración, siendo la única variación el tamaño de la partícula se separan partículas de un tamaño menor a 0,3  $\mu\text{m}$  de diámetro, concretamente de peso molecular entre 2.000 y 200.000 Daltons. El tamaño de poro de la ultrafiltración opone baja resistencia al paso del disolvente y el soluto es prácticamente retenido en su totalidad. En este caso se requiere una diferencia de presión mayor, de 2 a 10 bares (Hernández et al., 1990).

##### **4.2.1.3. Nanofiltración**

El tamaño de poro de las membranas de nanofiltración varía entre 0,001  $\mu\text{m}$  y 0,005  $\mu\text{m}$ . Este tipo de filtración remueve virus, bacterias, parásitos y, en general, la mayor parte de la materia orgánica disuelta. También filtra gran parte de los sólidos totales disueltos. La diferencia de presión típica que se debe aplicar se encuentra entre 4,8 y 13,7 bares (Mourato, 1998).

##### **4.2.1.4. Ósmosis inversa**

La ósmosis inversa se emplea cuando las partículas en el disolvente son de tan pequeño tamaño que la presión osmótica (desplazamiento del disolvente de un medio a otro a través de una membrana cuando existen diferencia de concentraciones) es muy elevada. El tamaño de poro en este caso estaría comprendido entre  $1,5 \cdot 10^{-3}$  y  $5 \cdot 10^{-4}$   $\mu\text{m}$ . En este caso, la diferencia de presión a aplicar debe superar la presión osmótica, por lo que se debe aplicar una presión entre 20 y 100 bares (Hernández, 1990).

Tal y como se ha mencionado anteriormente, el experimento referente a este apartado es de carácter académico, informativo y comparativo con los resultados de otros experimentos. En ningún caso pretende emular una situación real en la que se emplee únicamente tecnología apropiada.

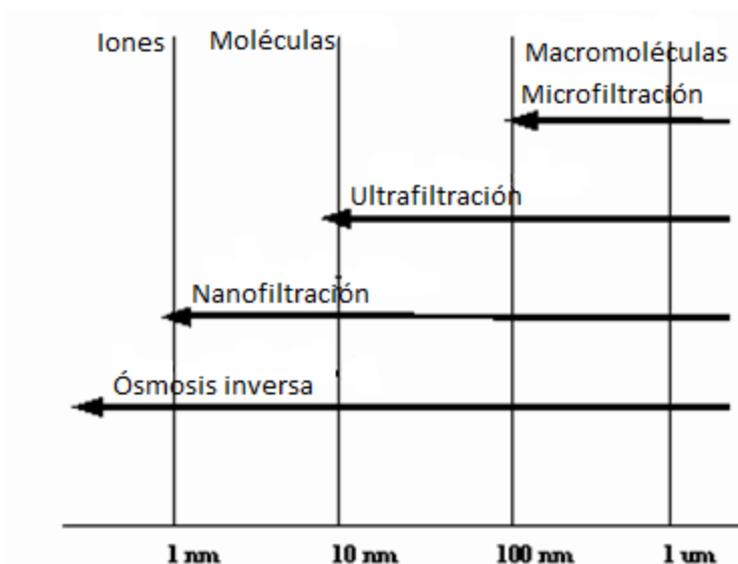


Ilustración 1. Capacidad de retención de los diferentes procesos de membrana. Elaboración propia a partir de Lennotech (s.f.).

#### 4.2.2. Filtro de tela

En el anterior apartado, se ha analizado la filtración teniendo en cuenta el tamaño de poro. Ese principio es aplicable al filtro de tela, aunque en este caso habría que añadir más variables, como el tipo de tejido. Para un mismo material, la geometría de los patrones de cosido va a determinar el flujo hidrodinámico a través de la tela, por lo que conviene estudiar el fenómeno más a fondo. La forma de los hilos influye en el efecto del flujo y el ensuciamiento debido a la contaminación que se produzca en la tela (Lu, 1996).

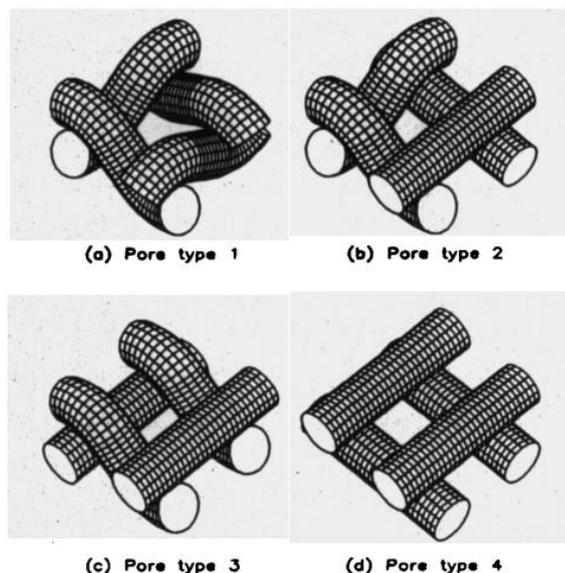


Ilustración 2. Tipos de poro (Lu, 1996).

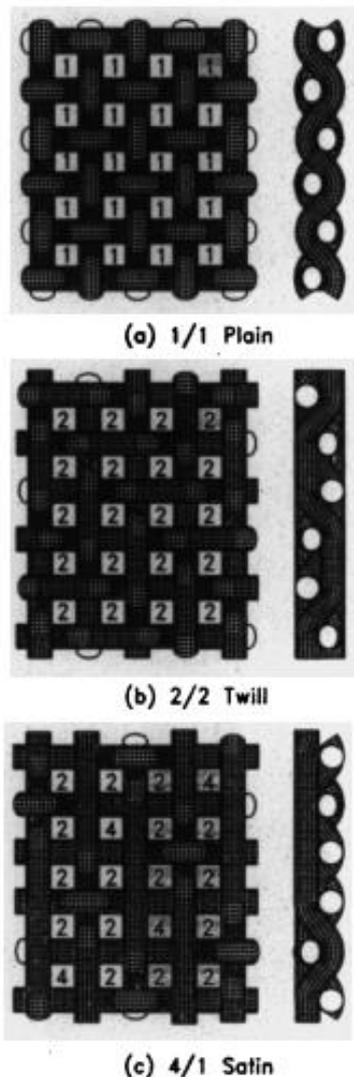
Se puede hacer una clasificación de la construcción del poro en función de su geometría (Ilustración 2):

- Tipo de poro 1: Cada hilo alterna el plano superior e inferior.



- Tipo de poro 2: Un hilo de trama y una urdimbre (hilos paralelos para pasar por ellos la trama y formar el tejido) alternan de plano mientras los otros dos se mantienen en su mismo plano.
- Tipo de poro 3: Dos hilos de trama y dos hilos de urdimbre alternan de plano.
- Tipo de poro 4: Los hilos de la trama y de la urdimbre se mantienen en su mismo plano (Lu, 1996).

A pesar de la alta complejidad de la geometría de cada tipo de poro, se podría determinar el flujo que habría en cada uno de ellos. Para facilitar los cálculos se puede suponer los hilos como un cilindro recto en los tramos rectos y una sección de toro en los tramos en los que el hilo alterna de plano. También se pueden asumir los cuerpos impermeables y completamente lisos. Estas construcciones tienen unas consecuencias significativas sobre la dinámica del flujo. La velocidad del flujo a través del tipo de poro 1 es mayor a la del tipo de poro 3 ya que la geometría del tejido es más compacta en el tipo 1, por lo que el área de los poros será menor y, consecuentemente, la velocidad del flujo en los intersticios será mayor (Lu, 1996).



*Ilustración 3. Tipos de tejido (Lu, 1996).*

Las texturas principales del tejido en función del entrecruzamiento de los hilos son las siguientes (Ilustración 3):



Tejido tafetán (a): En este tipo de tejido, cada hilo pasa por la parte superior e inferior de cada hilo de urdimbre.

Tejido asargado (b): Esta geometría de tejido consiste en alternar cada hilo de trama sobre dos y bajo dos hilos de urdimbre, de manera que se forme un patrón diagonal.

Tejido satinado (c): En el tejido satinado el entrecruzamiento entre la trama y la urdimbre es mucho menos frecuente que en los anteriores tipos (Lu, 1996).

Uno de los factores más importantes en cuanto a la turbidez retenido por el tejido es el espaciamiento entre hilos. A medida que aumenta el espaciamiento entre hilos, hay una disminución de la velocidad del flujo en los intersticios. El régimen del flujo también tiene cierta influencia en el proceso de filtrado y en su ensuciamiento. Considerando el número de Reynolds en función del diámetro de poro y velocidad a través del poro, se ha concluido que hay una zona de transición, en el rango  $3 < Re < 7$ , en el cual el flujo pasa de laminar a turbulento (Lu, 1996).

En general, se ha demostrado que el tejido tafetán proporciona una resistencia al paso del fluido mayor que otras geometrías, mientras que el tejido satinado ofrece la menor resistencia con la misma cantidad de material (Lu, 1996). El tejido asargado estaría en un punto intermedio entre las otras dos geometrías.

En cuanto a la aplicabilidad, se puede mencionar su extrema sencillez al uso, su coste prácticamente nulo y su utilidad para eliminar turbidez. Una desventaja sería su inviabilidad de operar como tratamiento único, siendo únicamente factible considerarlo como herramienta complementaria.

### **4.2.3. Filtro de arena**

La filtración consiste en el paso del agua turbia por un lecho filtrante, de tal manera que mejore sus propiedades. La filtración de arena se puede dividir en dos tipos: el filtro rápido y el filtro lento de arena.

Las características de un lecho filtrante son las siguientes:

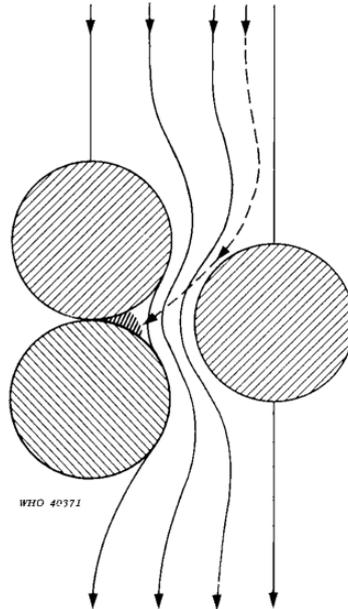
- Material granular: Se suele emplear arena silíceo, granate y antracita.
- Granulometría: Se define a partir del tamaño de partícula y coeficiente de uniformidad ( $d_{60}$  es el diámetro el cual el 60% de la masa de la muestra está compuesta por partículas de diámetro menor.  $d_{10}$  tendría la misma definición que el  $d_{60}$  pero para el 10%).

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

- Formas de los granos: Pueden ser angulosos o redondos, en función de su procedencia.
- Atacabilidad: Se define por la tendencia a degradarse ante agentes agresivos.
- Friabilidad: El material a emplear debe ser duro y resistente y evitar que se formen finos debido al desgaste.
- Geometría del lecho: El diámetro de la sección y el espesor son variables influyentes en el proceso de filtración (Suárez et al., 2014).

Durante el proceso de filtrado ocurren distintos fenómenos: el propio filtrado de partículas, fuerzas inerciales y centrífugas, sedimentación, difusión, atracción de masa o fuerzas electrostáticas. El filtrado en sí es el proceso más obvio y consiste en la retención de partículas de mayor tamaño que los poros. La sedimentación puede ocurrir sobre toda la superficie

superior de los granos del filtro de arena. La ilustración 4 muestra cómo las fuerzas inerciales y centrífugas actúan en partículas con densidad relativa mayor que el agua que lo rodea, provocando que se desvíen de la línea de corriente y entrando en contacto con la partícula de arena. El fenómeno de la difusión actúa de forma independiente a la velocidad de filtrado (se trata de un proceso de menor influencia). La atracción de masa (fuerzas de Van der Waals) es un fenómeno universal relativo a fuerzas intermoleculares, siendo más influyente si la partícula ha hecho contacto con la arena ya que las distancias entre los centros de masa son mucho menores. Por último, las fuerzas electrostáticas influirán en la partícula antes de que entre en contacto con la arena. Un grano de arena con la misma carga repelerá la partícula, y está continuará su curso hasta encontrar un grano del polo opuesto (Huisman, 1974).



*Ilustración 4. Fuerzas inerciales y centrífugas sobre una partícula (Huisman, 1974).*

#### **4.2.3.1. Filtro de arena rápido**

La filtración rápida consiste en el paso del agua del agua turbia a una velocidad entre 4 y 50 m/h. Se trata de un proceso en el que los fenómenos físicos son predominantes y los biológicos son insignificante. El filtro se va ensuciando a medida que se le da uso y llega un punto en el que la calidad del agua es menor o la pérdida de carga es excesiva (Suárez et al., 2014). Dicho punto se conoce como carrera de filtro.

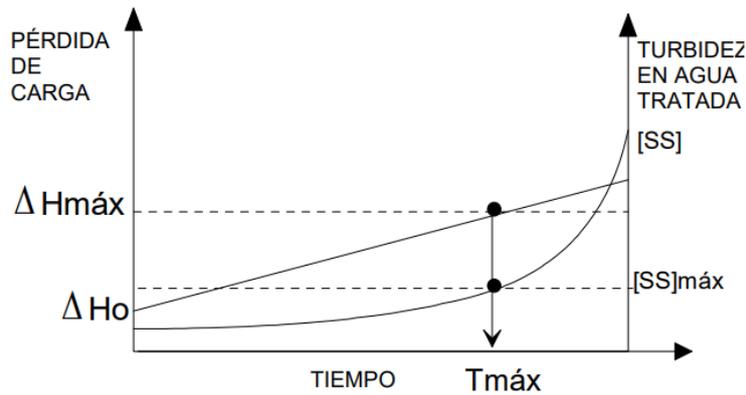
La ley de Darcy rige el paso de un fluido por un medio poroso:

$$\frac{dP}{dl} = k V$$

Siendo:

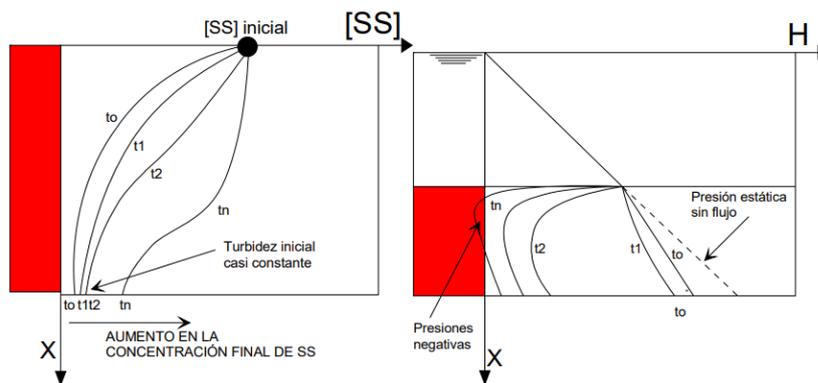
- $\frac{dP}{dl}$  el gradiente hidráulico  $\left(\frac{m}{m}\right)$
- K el coeficiente de Darcy  $\left(\frac{d}{m}\right)$
- V la velocidad del flujo  $\left(\frac{m}{d}\right)$

La pérdida de carga se puede expresar como una función lineal respecto al tiempo. Durante el proceso de maduración del filtro, en el período inicial la turbidez desciende el rendimiento de eliminación de turbidez hasta que se estabiliza y, al de un tiempo, aumenta bruscamente produciéndose la rotura de filtro. La carrera de filtro queda perfectamente delimitada en el punto en el que coincide la pérdida de carga máxima con la turbidez máxima (Gráfica 1). Los factores que influyen en el período de atascamiento y el tiempo el cual se alcanza la pérdida de carga máxima son la velocidad de filtración, la altura de la capa filtrante, la variación de pérdida de carga, la granulometría y la turbidez del agua a tratar. Para estar por el lado de la seguridad, se toma una pérdida de carga de diseño para la cual el tiempo de pérdida de carga máxima sea mayor que el período de atascamiento (Suárez et al., 2014).



Gráfica 1. Pérdida de carga y turbidez a lo largo del tiempo (Suárez et al., 2014).

En los primeros centímetros de filtro se producen fuertes pérdidas de carga ya que las partículas en suspensión del agua quedan retenidas en esa franja (Gráfica 2). Se pueden generar presiones negativas si la pérdida de carga en un punto es mayor que la presión ejercida por la columna de agua. Si esto ocurre, se genera succión, liberando el oxígeno disuelto en el agua y formando burbujas de aire que aumentan la velocidad del flujo al reducirse la sección. Esto conlleva a un mayor impedimento al paso del agua (Suárez et al., 2014).



Gráfica 2. Pérdida de carga en función de la profundidad del lecho (Suárez et al., 2014).

Una vez se haya alcanzado la rotura del filtro, hay que limpiar el lecho filtrante. El filtro se lava mediante un flujo de agua y aire en sentido contrario, de esta manera las partículas retenidas en el filtro son retiradas y la suciedad adherida a la arena es eliminada debido al movimiento de la arena (Suárez et al., 2014).



En función del objetivo del filtro de arena se optará por una granulometría concreta del medio filtrante (Suárez et al., 2014):

- Tamaño efectivo de 0,3 a 0,5 mm: Filtración muy rápida a presión (25-50 m/h) para aguas muy poco turbias.
- Tamaño efectivo de 0,6 a 0,8 mm: Filtración de agua decantada (7 m/h).
- Tamaño efectivo de 0,9 a 1,2 mm: Se emplea en capas homogéneas para aguas poco turbias o decantadas (15-20 m/h)
- Tamaño efectivo de 1,3 a 1,5 mm: Se emplea como capa soporte. Eficaz en el desbaste y filtración para aguas decantadas y coaguladas.
- Tamaño efectivo de 1,5 a 2,5 mm: Desbaste para aguas brutas sin coagular.
- Tamaño efectivo de 3 a 25 mm: Exclusivamente para capa soporte.

Para dimensionar el tamaño efectivo de cada una de las capas, Huisman (1974) adoptó los criterios siguientes:

- El  $d_{10}$  y  $d_{90}$  de cada capa no deben diferir un valor mayor a  $\sqrt{2}$ . En el caso de que sea dificultoso, se puede aceptar un factor de 2.
- La capa superior debe tener un  $d_{10}$  mayor a 4 veces el  $d_{15}$  de la capa inferior.
- La capa superior debe tener un  $d_{10}$  menor a 4 veces el  $d_{85}$  de la capa inferior.
- El espesor de cada capa soporte debe ser mayor que 3 veces el diámetro más grande de su granulometría, aunque por motivos prácticos se pueden adoptar unos valores constantes para las capas soporte de 5-7 cm para capas de finos y 8-12 cm para capas de gravas.

La tipología de filtros rápidos se puede clasificar en función de la fuerza impulsora (filtros de gravedad y de presión), de la estructura (abiertos y cerrados/a presión), del funcionamiento (continuo en el cual la filtración y lavado se hacen simultáneamente y cerrado en el cual el funcionamiento del filtro se detiene para limpiarlo), de las capas del material filtrante (monocapa o multicapa), del sentido del flujo (ascendente o descendente) o de la metodología de lavado (agua, agua y aire o lavado superficial) (Suárez et al., 2014).

En cuanto al control del proceso, se debe evitar fuertes oscilaciones del caudal entrante para evitar que las partículas que estuvieran retenidas se volvieran a suspender. Para ello, existen diferentes técnicas, como el mantener el caudal de entrada constante, la columna de agua sobre el filtro constante mediante un flotador o el caudal de salida constante (Suárez et al., 2014).

Las características que deben cumplir un filtro rápido se muestran en la Tabla 3:

Características del lecho	Monocapa	Bicapa
Material	Arena silícea	Antracita Arena silícea
Espesor (m)	0,7 (0,5 - 1,0)	0,6 (0,45 - 0,70) 1,0 (0,85 - 1,30)
Tamaño efectivo (mm)	0,8 - 1,0 (0,6 - 1,2)	1,3 (1,25 - 2,50) 0,6 (0,50 - 0,80)
Coef. de uniformidad	1,5 - 1,8 (<2)	1,5 - 1,8 (<2)
Velocidad de filtración (m/h)	< 7,5 lav. (4 - 15)	< 10 lav. (4 - 15)
Pérdida de carga máxima (m)	1,5 m.c.a.	1,5 m.c.a.

Tabla 3. Características de un filtro rápido. Fuente: Elaboración propia a partir de Suárez et al. (2014).



Como ventajas del filtro de arena rápido, se puede mencionar su utilidad para eliminar la turbidez, la alta velocidad de filtración, puede haber grandes variaciones respecto a la turbidez del agua de entrada, el contraflujo para la limpieza solo requiere de unos pocos minutos y requiere poca superficie de terreno (Bruni y Spuhler, 2018).

En cuanto a las desventajas, no es efectivo para eliminar microorganismos, tiene un alto coste y mantenimiento, requiere frecuente limpieza, supone un alto gasto energético, el agua para el lavado a contracorriente requiere pretratamiento y supervisión del control de flujo (Bruni y Spuhler, 2018).

#### **4.2.3.2. Filtro lento de arena**

A grandes rasgos, la filtración lenta es un proceso que tiene como finalidad el tratamiento de aguas muy poco turbias. Para que se considere como tal, debe cumplir ciertas características, como que la velocidad de filtración se encuentre entre 0,1 y 0,4 m/h, que el coeficiente de uniformidad sea menor a 3, que el  $d_{10}$  del lecho filtrante esté entre 0,15 y 0,35 mm y que la turbidez del agua de entrada sea baja (aproximadamente menor a 15 UNT) (Suárez et al., 2014).

El funcionamiento del filtro lentos se rige por fenómenos físicos, químicos y biológicos.

En cuanto al funcionamiento, a medida que pasa el tiempo en la superficie del lecho filtrante se creará una biopelícula compuesta de diversos tipos de microorganismos. Con el tiempo, dicha biopelícula crece por la retención de partículas y la multiplicación biológica, aumentando la resistencia al paso del flujo. Es capaz de filtrar en la superficie coliformes o materia orgánica disuelta. Sin embargo, el período de maduración para que eso ocurra es muy variable y depende de muchos factores. Para un filtro completamente nuevo, el período de maduración depende de la temperatura, condiciones de explotación y tipología del agua y, en función de esos parámetros, supondrá entre 5 y 30 días. Para obtener unos buenos resultados, los parámetros más influyentes son la granulometría y la velocidad de filtración (Visscher y Galvis, 1987).

Para dimensionar el tamaño de granulometría de cada capa, se puede emplear el criterio empleado anteriormente (Huisman). Para determinar la altura del filtro, hay que tener en cuenta que una altura insuficiente produciría rendimientos deficientes y una colmatación precipitada del lecho (Suárez et al., 2014). Visscher y Galvis (1987) recomiendan una altura mínima de 50 cm para garantizar una buena calidad del agua. Por otro lado, para garantizar la continuidad del abastecimiento recomiendan, como mínimo, dos filtros lentos operando en paralelo.

La carrera del filtro dura entre 2 y 3 meses, y su limpieza supone una duración aproximada de 1 día. Una vez haya alcanzado la pérdida de carga de diseño hay que proceder a un lavado de filtro para retornar a los valores adecuados. Normalmente es necesario cambiar la arena cada 3 o 5 años (Suárez et al., 2014).

Como ventajas del filtro lento de arena, se puede mencionar la larga vida útil (superior a 10 años), la simplicidad en la operación, la construcción no requiere una formación específica, la facilidad de instalación en áreas rurales ya que se puede construir con materiales locales, no requiere productos químicos, su alta fiabilidad, su eficacia en eliminación de virus y bacterias gracias a la biopelícula (en el caso de que se forme), su rendimiento en eliminación de la turbidez y no requiere electricidad si funciona por gravedad (Bruni, 2018).



En cuanto a desventajas, requiere un agua de baja turbidez (inferior a 20 UNT) y baja contaminación de algas o se debe realizar un pretratamiento, pérdida de eficiencia de eliminación biológica a bajas temperaturas, no hay efectividad en el proceso de maduración, requiere un mantenimiento y monitorización continuo, la tasa de filtración es baja y los compuestos químicos, como el flúor, no se eliminan (Bruni, 2018).

#### **4.2.4. Filtro de rama de pino**

Un pequeño trozo de rama de pino puede ser capaz de filtrar el 99,9% de las bacterias (Boutilier et al., 2014). Esta solución consiste en emplear el xilema vegetal como material filtrante.

La sección de una rama consta de las siguientes partes (Barclay, 2015):

- **Duramen:** Parte central de la rama, compuesta por células biológicamente muertas. Es de color más oscuro que las capas exteriores y su permeabilidad es muy baja. Se caracteriza por ser duro, resistente, pesado y proporciona al árbol resistencia estructural para resistir su propio peso.
- **Albura:** Parte exterior respecto al duramen. Representa la parte joven de la madera y es de color más claro. Supone la parte funcional del xilema ya que conduce ascensionalmente la savia y almacena material de reserva. En este contexto, su finalidad es filtrar las bacterias, virus y demás impurezas del agua. También aporta cierta resistencia estructural. Está compuesta principalmente de células muertas, pero también contiene células fisiológicamente activas (parénquima), de manera que a medida que estas mueran se transforma gradualmente la albura en duramen. Por lo tanto, es evidente que cuanto más seco esté la rama de pino, peor será su capacidad filtrante y menor será su permeabilidad.
- **Corteza:** Es la capa más externa. Protege la madera y está compuesta de varias capas. En este contexto carece de importancia ya que la corteza se retira para un correcto funcionamiento del filtro.

Las plantas han desarrollado unos tejidos de manera que la resistencia al paso de la savia es muy baja. El flujo de la savia se impulsa mediante la transpiración de las hojas, lo que crea una diferencia de presiones que propicia la circulación del fluido. Además, la albura comprende de una estructura microporosa que evita la formación de cavitación, ya que la nucleación de burbujas de aire puede detener el flujo de savia y producirse la muerte de la planta. El tamaño de los microporos oscila alrededor de 500 nm, dependiendo del tipo de planta, lo cual resultaría idóneo para filtrar patógenos o impurezas mayores que los poros (Boutilier et al., 2014).

El pino forma parte de la subdivisión de las coníferas, de hojas persistentes, en forma de escamas o aguja. La gimnosperma es el grupo de plantas que se pueden identificar por su semilla que está al descubierto fuera del fruto (Sánchez, 2021). Los experimentos se harán utilizando una rama de pino, pero cualquier rama de planta que pertenezca al grupo de gimnospermas pueden dar resultados, ya que el mecanismo y la estructura microporosa son similares (Boutilier et al., 2014).

Los conductos de las gimnospermas, llamados traqueidas, se forman a partir de células muertas y pueden alcanzar diámetros de 80  $\mu\text{m}$  y 10 mm de longitud. Las traqueidas están estructuradas entre ellas de forma paralela, longitudinalmente cerradas y conectadas adyacentemente. Dichas conexiones tienen membranas que evitan que las burbujas crucen de un conducto a otro y retienen partículas del rango de 200  $\mu\text{m}$ . Las conexiones contribuyen a una fracción significativa de la resistencia al flujo (30%-80%), valor relativamente bajo teniendo en cuenta que su tamaño



es varios ordenes de magnitud inferior que la traqueida, ya que la disposición en la que se estructuran las membranas de las conexiones es tal que ofrece baja resistencia al fluido (Boutillier et al., 2014).

En cambio, las angiospermas (plantas con flores) tienen vasos de xilema más grandes, lo cual es más eficaz para transportar la savia. Sin embargo, la fracción porosa de la sección es menor por lo que es menos recomendable para una filtración del agua eficaz. A parte, los conductos tienen mayor longitud, por lo que requeriría una mayor longitud de rama (Boutillier et al., 2014).

El caudal está definido por la siguiente expresión (Boutillier et al., 2014):

$$Q = KA \frac{\Delta P}{l}$$

Donde

- Q es el caudal  $\left(\frac{m^3}{s}\right)$
- K es la conductividad  $\left(\frac{m^2}{Pa \cdot s}\right)$
- $\Delta P$  es la diferencia de presión (Pa)
- A es el área de la sección filtrante ( $m^2$ )
- l es la longitud del filtro (m)

Este método está limitado a zonas en los que haya pinos u otras plantas coníferas.

#### **4.2.5. Filtro cerámico**

El filtro de cerámica consiste en un recipiente con forma de tiesto en el que se vierte el agua contaminada y se filtra por gravedad. Los filtros están hechos de agua, arcilla y un material orgánico como cáscara de huevo, aserrín o granos de café triturados. La idea de la inclusión de materia orgánica es que cuando el filtro se ponga a cocción a 990°C, se queme y se forme una red de poros para filtrar el agua. La arcilla debe tener plasticidad elevada y una sinterización en torno a los 900°C. La arcilla debe triturarse y tamizarse para obtener una granulometría entre 0,6 y 0,7 mm, y el tamaño de la materia orgánica debe situarse entre los 0,25 y 0,6 mm. Una proporción adecuada se sitúa en torno a 1 kg de materia orgánica por cada 3 kg de arcilla. Tras aportar agua y moldear la masa, se introduce en el horno en atmósfera oxidante (atmósfera que contiene moléculas de oxígeno como elemento predominante) durante aproximadamente 8 horas. Se puede asumir que los tamaños de poro son lo suficientemente pequeños para remover protozoos o bacterias (Guerrero, 2016).

En cuanto a los procesos de desinfección por el material cerámico en sí, se pueden resumir en el filtrado por tamaño y la adsorción de las paredes. Sabiendo que los virus entéricos tienen una carga superficial neta negativa (Mich y Graule, 2010, como se citó en Guerrero, 2016), la cocción de la cerámica en una atmósfera reductora (insuficiencia de oxígeno que provoca que se cedan electrones desde la cerámica a la atmósfera, cargando positivamente la cerámica y formando la llamada cerámica negra) conlleva a una mejora en la eficiencia de eliminación de virus hasta de 3 órdenes de magnitud debido al fenómeno de adsorción. Las interacciones hidrofóbicas, el medio ambiente y la química podrían ser también parámetros influyentes (Guerrero, 2016).

Según Lantagne (2001), Sten Eriksen desarrolló para la cruz roja, a partir de la ecuación de Darcy, un modelo matemático para cuantificar el flujo en el filtro. Despejando la conductividad hidráulica, se obtiene la siguiente expresión:



$$k = \frac{b}{T} \ln \left( \frac{H \left( 1 + 2 \frac{x}{D} \right)}{x \left( 1 + 2 \frac{H}{D} \right)} \right)$$

Siendo:

- k la conductividad hidráulica  $\left(\frac{m}{h}\right)$
- b el grosor de la cerámica (m)
- T el tiempo (h)
- H la altura máxima del agua en el interior del filtro cerámico (m)
- X es la altura de agua en el interior del filtro cerámico (m)
- D es el diámetro del filtro (m)

Por otro lado, también se puede aplicar plata coloidal para aumentar la eficacia de eliminación microbiológica.

Un coloide es una macromolécula en la que al menos una de sus dimensiones se encuentre entre  $10^{-9}$  y  $10^{-6}$  metros. La plata coloidal consiste en una solución en un conjunto de partículas pequeñas suspendidas en agua destilada o proteínas. La plata es transformada a plata coloidal mediante la activación eléctrica, siendo el ión plata el responsable de la inactivación microbiológica. El mecanismo por el cual la plata inactiva los microorganismos son los cambios estructurales en las membranas de las células bacterianas, interacción con los ácidos nucleicos y reacción con el grupo sulfhidrilo, grupo de proteínas funcionales de las células bacterianas. La plata se aplica tanto por dentro como por fuera de la cerámica para lograr un 100% de la inactivación de bacterias. Esta no afecta a la filtración, conductividad ni al pH del agua filtrada (Lantagne, 2001).

Cabe destacar que, en los resultados arrojados por Ceramistas por la Paz, se logró que tres de cuatro filtros cerámicos removiesen *E. Coli* sin necesidad de impregnar el filtro de plata coloidal. A parte, se ensayaron filtros cerámicos de más de 7 años y se comprobó que aún removían la totalidad de coliformes. Aún no se ha determinado la vida útil de la plata coloidal en cuanto a la eliminación de bacterias, por lo que se podrían considerar de duración indefinida (Lantagne, 2001).

Como ventaja, se puede mencionar su simpleza, su bajo coste y facilidad al uso y mantenimiento. Es eficaz eliminando microorganismos y medianamente útil eliminando virus. Se puede construir con materiales locales y su vida útil es muy larga. Se puede transportar con facilidad (Shrestha y Shrestha, 2018).

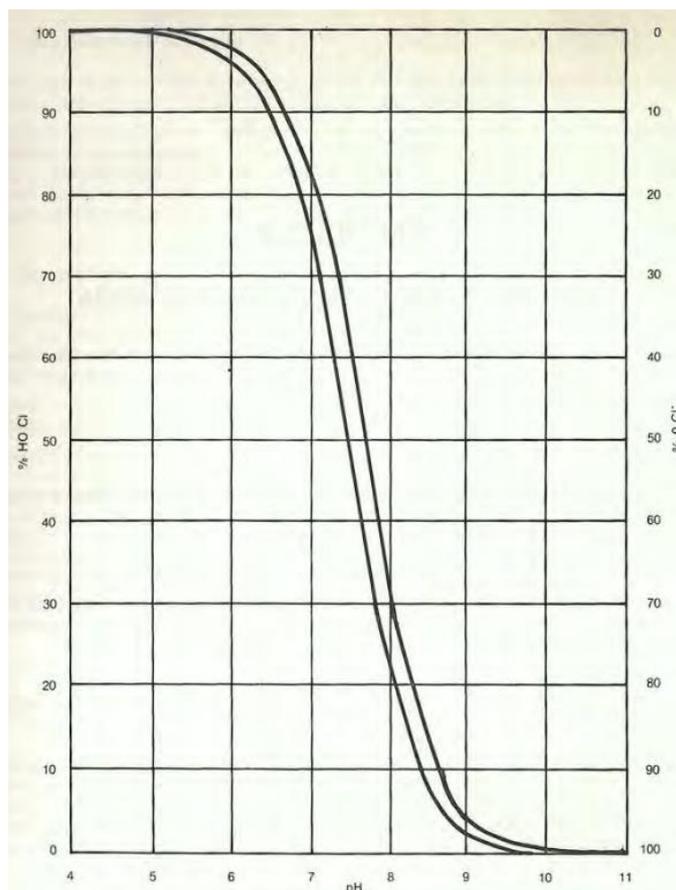
En cuanto a las desventajas, se puede mencionar su bajo caudal, no elimina todos los patógenos ni contaminantes químicos, gran fragilidad, dificultad para garantizar un control de calidad si se trata de un producto local, fisuras o grietas pueden disminuir el rendimiento (Shrestha y Shrestha, 2018).

#### **4.2.6. Cloración**

El objetivo principal de la cloración es la eliminación de bacterias, virus y demás patógenos que pudieran ser perjudiciales para la salud. Esta técnica consiste básicamente en la adición de cloro sobre el agua, la cual reacciona químicamente formando distintos productos tal y como se verá a continuación. Al añadir cloro al agua se forman 2 tipos de moléculas: ácido clorhídrico (HCl) y

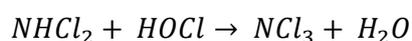
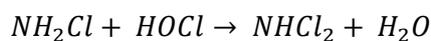
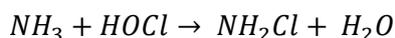


ácido hipocloroso (HOCl). A su vez, el ácido hipocloroso se disocia prácticamente al instante en ión hipoclorito (OCl<sup>-</sup>) e ión hidrógeno (H<sup>+</sup>). Este proceso es reversible y el porcentaje de cada producto será función de la temperatura y el pH. Para niveles de pH inferiores a 6 el cloro predominante será el ácido hipocloroso, mientras que un pH superior a 8 supondrá una preponderancia de del ión hipoclorito (Gráfica 3). El cloro inicial tiende a reducir el pH mientras que el ión hipoclorito tiende a aumentarlo. El cloro haya en el agua en forma de ión hipoclorito, ácido hipocloroso y cloro molecular se le denomina cloro libre (*Manual de Cloración, 1984*).



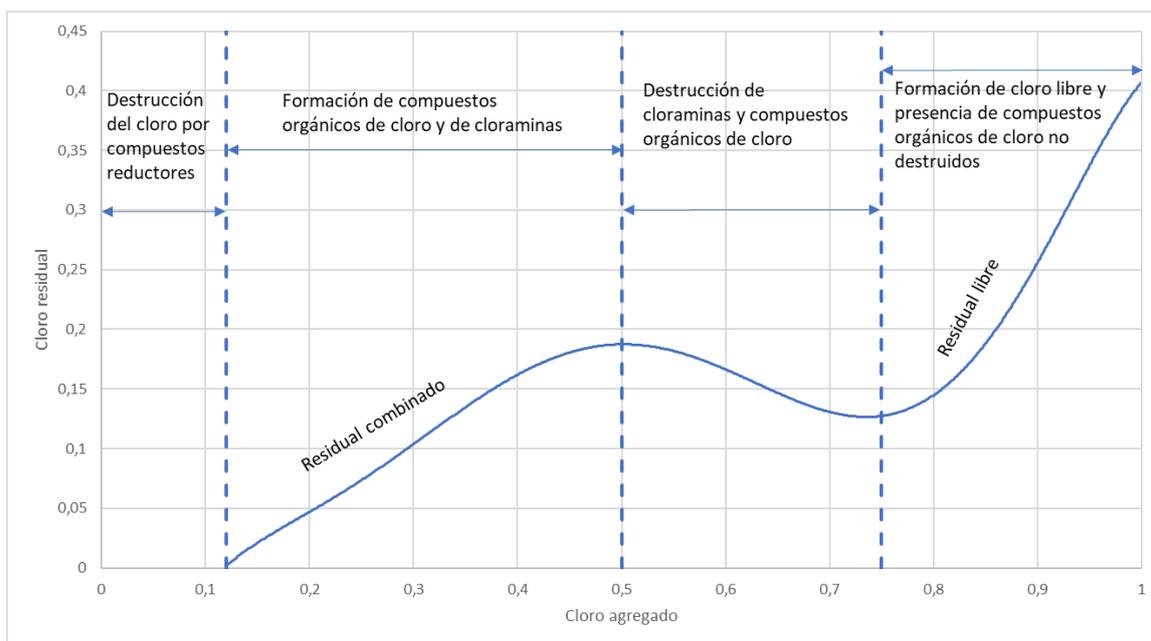
Gráfica 3. Correlación del pH con HOCl y OCl<sup>-</sup> (*Manual de Cloración, 1984*).

En cuanto a las reacciones entre el cloro y el amoníaco, el amoníaco reacciona con el ácido hipocloroso formando la monocloramina (NH<sub>2</sub>Cl). A continuación, dicho producto reacciona de nuevo con el ácido hipocloroso formando dicloramina (NHCl<sub>2</sub>). Por último, una tercera reacción formaría la tricloramina (NCl<sub>3</sub>). La proporción de estos productos será función del pH, temperatura, tiempo y de la proporción entre el cloro y el amoníaco (*Manual de Cloración, 1984*).



El cloro también puede reaccionar con otras sustancias, como el hierro o el manganeso. Para suprimir el manganeso es necesario que el cloro esté en forma de cloro libre y no en cloro combinado, y el pH óptimo es de 10. Para suprimir el hierro es necesario un pH de 7 o mayor. Por otro lado, los nitritos son oxidados en presencia de cloro produciendo nitratos. Algunas sustancias orgánicas pueden reaccionar con el cloro originando compuestos con baja capacidad bactericida, entorpeciendo la cloración (*Manual de Cloración*, 1984).

En el proceso de cloración (Gráfica 4), el cloro irá reaccionando con distintos elementos. Primero, reaccionará con compuestos reductores (ácido sulfhídrico, manganeso, hierro y nitritos). Una vez satisfecha la demanda inmediata, el exceso de cloro reaccionará con la materia orgánica presente, formando compuestos orgánicos de cloro que, como se ha mencionado anteriormente, su capacidad bactericida es baja. También reaccionará con el amoníaco para formar cloraminas, dicloraminas y tricloraminas. Posteriormente se destruyen parcialmente las cloraminas que se han formado. Una vez haya reaccionado con los elementos ya mencionados, el exceso de cloro a partir de este punto será cloro residual libre disponible. Dicho punto se denomina *break-point* y es esencial ya a partir de él se garantiza la seguridad al consumo. La gráfica que se muestra a continuación se trata de la curva de demanda en la que existen distintas fases (*Manual de Cloración*, 1984).



Gráfica 4. Curva de demanda de cloro. Fuente: Elaboración propia a partir de *Manual de Cloración* (1984).

En cuanto a las ventajas de la cloración, se puede mencionar su simplicidad, fiabilidad y asequibilidad económica. Elimina eficazmente los microorganismos ofreciendo una garantía, que es el cloro libre disponible. Está ampliamente disponible en múltiples países (Shrestha y Dangol, 2018).

Como desventajas, hay que conocer exactamente la dosis a emplear. Puede conllevar a la formación de subproductos que conlleven a un riesgo para la salud. En medios rurales puede ser de difícil acceso, además requiere una compra continua. Sin embargo, se podría adquirir lejía habilitada para la cloración de agua en mercados locales. Por último, no desactiva parásitos como la *Giardia*, *cryptosporidium* y huevos de gusanos (Shrestha y Dangol, 2018).



#### **4.2.7. Tratamientos térmicos**

##### **4.2.7.1. Hervor**

El hervido es un método muy eficaz para desinfectar el agua. La ebullición con combustible es de los métodos más comunes para tratamientos de agua.

Los coliformes fecales son organismos mesófilos y tienen un crecimiento estable con temperaturas entre 25 y 40°C. A partir de 50°C, estos mueren (Cota-Espericueta y Ponce-Corral, 2008).

El tiempo de ebullición es un factor de gran importancia por razones económicas, por lo que conviene acotarlo de la forma más exacta posible. Según la OMS, el agua debe calentarse hasta que aparezcan las primeras burbujas grandes para garantizar que está libre de patógenos.

Cabe destacar que el punto de ebullición varía en función de la presión atmosférica, y esta varía con la altitud sobre el nivel del mar. El punto de ebullición se alcanza cuando la presión de vapor de saturación del agua coincide con la presión atmosférica. Al estar a mayores altitudes, la presión atmosférica será menor, por lo que dicha igualdad se dará a una menor temperatura.

Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (2015), se requiere un hervido mayor a 1 minuto para garantizar la eliminación y un mínimo de 3 minutos de hervido para altitudes mayores a 1000 m, tras un filtrado de sólidos en suspensión mediante filtros de tela, toalla de papel o filtro de café. Tras esto se deja enfriar y se guarda en contenedores tapados.

En cuanto al diseño, no hay ningún requerimiento específico debido a la simpleza del proceso. Los materiales pueden conseguirse prácticamente en cualquier parte y es conveniente que sea lo más económico posible. Partiendo de estas premisas, el envase para hervir el agua y almacenarla puede ser una olla y el combustible puede ser madera, butano, queroseno, electricidad... La localización convendría que fuera un lugar seguro, como una cocina (Shrestha y Shrestha, 2018).

Como ventajas, se puede mencionar la efectividad de eliminación de la mayoría de patógenos. Destaca su simpleza y facilidad al uso (Shrestha y Shrestha, 2018).

En cuanto a las desventajas, el combustible que normalmente se emplea (leña o queroseno) contaminan el aire de los hogares y contribuyen a la deforestación. Puede resultar peligroso, especialmente si hay niños cerca. Requiere tiempo para que sea efectivo. No elimina la turbidez, productos químicos, sabor, olor y color. El alto consumo de combustible puede conllevar a un gasto significativo (Shrestha y Shrestha, 2018). En el caso de utilizar electricidad o gas, sabiendo que un litro de agua para alcanzar los 100°C desde los 20°C requiere de 80 kcal o, lo que es lo mismo, 0,0011 kWh, el coste será función del precio del kWh pudiendo llegar a costar, por ejemplo, 0,01 €/L.

##### **4.2.7.2. Pasteurización**

No es necesario alcanzar el punto de ebullición para eliminar los microorganismos del agua. A 60°C se inactivan los coliformes, y aplicando una temperatura de 65°C aseguran la eliminación de estos (Ciocchetti y Metcalf, 1983).

Sin embargo, a diferencia del punto de ebullición, no hay ningún indicativo natural de que el agua haya alcanzado dicha temperatura. Por ello, a pesar de ser más sencillo alcanzar dicha



temperatura, si no se dispone de la tecnología adecuada no hay certezas de que se haya alcanzado los 65°C.

Para comprobar que se ha llegado a esa temperatura, se puede emplear un termómetro. Se podría emplear un dispositivo llamado WAPI. El indicador consiste en un pequeño tubo de policarbonato con una cera en su interior que cuando se derrite indica que el agua ha alcanzado los 65°C. El WAPI está diseñado para que cuando la cera se haya derretido, el agua esté completamente pasteurizada (Metcalf, 2006).

No obstante, no se trata de una tecnología apropiada ya que se trata de un producto de importación, aunque se podría estudiar su adaptación fabricándolo con recursos locales.

Para alcanzar los 65°C, se podría emplear la energía del sol junto a algún mecanismo que produzca efecto invernadero para amplificar el calor. También se podría usar reflectores, envoltorios de colores que absorban el calor o, simplemente, un combustible.

La pasteurización requiere un tiempo excesivamente prolongado para que resulte eficaz, por lo que en el caso de que la ebullición sea técnicamente viable, sería una opción más económica. En el caso de que, por la razón que fuera, no fuera posible la ebullición, la pasteurización es una solución muy eficaz, ya sea empleando combustible, mediante energía solar o cualquier otra fuente de energía.

#### **4.2.8. Desinfección solar (SODIS)**

La naturaleza policromática de la radiación solar muestra un amplio espectro de longitudes de onda (Tabla 4). Se pueden clasificar en 2 grupos en función de su capacidad ionizante:

- Radiación ionizante (rayos X y rayos gamma).
- Radiación no ionizante (UVR, luz visible y radiación infrarroja).



Banda	Longitud de onda (m)	Frecuencia (Hz)	Energía (J)
Rayos gamma	< 10 pm	> 30,0 EHz	> 20 · 10 <sup>-15</sup> J
Rayos X	< 10 nm	> 30,0 PHz	> 20 · 10 <sup>-18</sup> J
Ultravioleta extremo	< 200 nm	> 1,5 PHz	> 993 · 10 <sup>-21</sup> J
Ultravioleta cercano	< 380 nm	> 789 THz	> 523 · 10 <sup>-21</sup> J
Luz Visible	< 780 nm	> 384 THz	> 255 · 10 <sup>-21</sup> J
Infrarrojo cercano	< 2,5 μm	> 120 THz	> 79 · 10 <sup>-21</sup> J
Infrarrojo medio	< 50 μm	> 6,00 THz	> 4 · 10 <sup>-21</sup> J
Infrarrojo lejano/submilimétrico	< 1 mm	> 300 GHz	> 200 · 10 <sup>-24</sup> J
Microondas	< 30 cm	> 1 GHz	> 2 · 10 <sup>-24</sup> J
Ultra Alta Frecuencia - Radio	< 1 m	> 300 MHz	> 19,8 · 10 <sup>-26</sup> J
Muy Alta Frecuencia - Radio	< 10 m	> 30 MHz	> 19,8 · 10 <sup>-28</sup> J
Onda Corta - Radio	< 180 m	> 1,7 MHz	> 11,22 · 10 <sup>-28</sup> J
Onda Media - Radio	< 650 m	> 650 kHz	> 42,9 · 10 <sup>-29</sup> J
Onda Larga - Radio	< 10 km	> 30 kHz	> 19,8 · 10 <sup>-30</sup> J
Muy Baja Frecuencia - Radio	> 10 km	< 30 kHz	< 19,8 · 10 <sup>-30</sup> J

Tabla 4. Longitudes de onda de las bandas espectrales (Casanova, 2012).

La atmósfera atenúa parcialmente la radiación solar a medida que penetra en las capas de la atmósfera. Esto ocurre debido a la dispersión, reflexión y absorción en la estratosfera y la troposfera. La dispersión es causada por los gases, neblina, vapores y moléculas de gas que se encuentran en la troposfera, y es más eficaz cuanto menor sea la longitud de onda. La absorción es eficaz ante longitudes de onda inferiores a 280 nm, por lo tanto, las bandas espectrales referentes a la ultravioleta de vacío y UV-C se disipan en la atmósfera. Solo una fracción del espectro de UV-B y UV-A alcanzan el suelo. Debido a estos fenómenos, el porcentaje de radiación ultravioleta que llega al nivel del mar no supera el 5%. Este valor fluctúa en función de diversos parámetros: latitud, ubicación, cobertura de nubes, estación, contaminación atmosférica, elevación sobre el nivel del mar y altitud solar (Brooks y Miller 1963; McVeigh 1977; Sabins 1978; Michels 1979; WHO 1979, como se citó en Acra et al., 1990).

La inactivación por luz solar se da a través de dos procesos: la fotoinactivación directa e indirecta. La directa consiste en la incidencia de ondas UV-B sobre el genoma del ADN o ARN y se forman varios subproductos que bloquean la replicación de los microorganismos afectados. La fotoinactivación indirecta consiste en la excitación de los cromóforos (conjunto de átomos responsables de la absorción de ondas UV como resultado de la excitación de los electrones hacia estados de mayor energía) para luego reaccionar con el oxígeno disuelto y así formar especies reactivas. Tanto las especies reactivas como los cromóforos excitados pueden inactivar los microorganismos por oxidación (Carratalà et al., 2015).

La inactivación de bacterias en función de la intensidad solar se puede cuantificar mediante una función cinética de primer orden  $s$  (Severin et al. 1984; White et al. 1986; Scheible 1987, como se citó en Acra et al., 1989):

$$\frac{N}{N_0} = e^{-KIT}$$

Donde:



- $N$  es la densidad de bacterias tras la exposición (UFC)
- $N_0$  es la densidad de bacterias inicial (UFC)
- $K$  es la constante de inactivación  $\left(\frac{cm^2}{\mu W \min}\right)$
- $I$  es la intensidad solar de la radiación UV-A ( $\mu W \text{ cm}^2$ )
- $T$  es el tiempo de exposición (min)

La intensidad de la radiación solar será función de la localización en la Tierra, variando en función de la latitud o condiciones atmosféricas. En función de la localización, el ángulo de incidencia variará entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , siendo más la luz solar intensa para ángulos de incidencia cercanos a  $0^\circ$  sobre la vertical (Dietz, 1963, como se citó en Acra et al., 1990).

Se pueden clasificar las distintas franjas del hemisferio norte paralelas al ecuador en función de la intensidad de la radiación solar (se puede hacer un paralelismo con el hemisferio sur) (Acra et al., 1990):

- La zona más favorable es la franja entre la latitud  $15^\circ$  y  $35^\circ N$ . Dicha franja tiene más de 3000h/año de sol y baja nubosidad.
- Franja entre latitud  $0^\circ$  y  $15^\circ N$ : Esta franja es levemente debido a su alta humedad atmosférica y cantidad de nubes que aumenta la dispersión. Dicha franja tiene aproximadamente 2500 h/año de sol.
- Franja entre la latitud  $35^\circ$  y  $45^\circ N$ : Esta franja es menos favorable debido a la contaminación atmosférica, nubosidad y baja altitud solar que conllevan una reducción drástica de la intensidad solar.
- Las regiones más allá de la latitud  $45^\circ$  son poco efectivas para el aprovechamiento de la radiación solar efectiva.

La radiación solar se atenúa por reflexión y absorción en el proceso de penetración en el agua. La transmisión de la luz solar en el agua dependerá de los siguientes parámetros (Acra et al., 1990):

- Profundidad del agua: El espectro UV-A tiene un mayor poder de penetración en el agua que el UV-B o el espectro visible.
- Turbidez: Referente a partículas en suspensión tanto de origen orgánico como inorgánico. Dicha materia suspendida absorbe y dispersa la radiación UV y protege a las bacterias durante el proceso de desinfección.
- Sustancias que absorben la luz: Materiales colorantes, sales minerales y humatos diluidos pueden modificar las propiedades ópticas del agua.
- Longitud de onda incidente: La longitud de onda determinará la banda espectral en la que se encuentre la onda y estará condicionado en mayor o menor medida por los fenómenos de la dispersión, reflexión y absorción.

La transmitancia depende del tipo del envase que contendrá el agua y del espesor de este. A mayor espesor se reduce la transmitancia. Los tipos de materiales pueden ser el vidrio de sílice, arena y sosa, siendo capaz de transmitir alrededor del 90% de la radiación UV-A. Sin embargo, no transmite la radiación UV-B y UV-C. También se puede emplear vidrio de borosilicato, cuyas propiedades son su opacidad a la radiación UV-B y su transmitancia que se alcanza el punto máximo en longitudes de onda de 340 nm y superiores (UV-A) (Acra et al., 1984, como se citó en Acra et al., 1990). Se pueden emplear plásticos como el metacrilato debido a su capacidad para transmitir radiación UV (Acra et al., 1990).



Según Carratalà et al. (2015), se puede emplear el tereftalato de polietileno (botellas PET) para la desinfección solar. Las botellas PET no transmiten radiación UV-B, no permitiendo la inactivación directa. Por el contrario, se transmiten las ondas tipo UV-A, permitiendo únicamente la inactivación indirecta. En dicho estudio se demuestra la eficacia de las botellas PET para eliminar bacterias y los virus entéricos, y no resultando tan eficaz para remover otros tipos de virus, como el adenovirus. Sin embargo, varios tipos de virus sí pueden ser susceptibles a las especies de oxígeno reactivo o al aumento de temperatura como consecuencia del calor del sol.

Cabe mencionar que, tal y como sugieren Alotaibi y Heaselgrave (2011), la adición de aditivos como la riboflavina o el peróxido de hidrógeno puede amplificar la efectividad del método SODIS.

Como ventajas, este fenómeno puede aprovechar una fuente de energía ilimitada como es el sol. Hay bajas posibilidades de recontaminación debido a que se consume del mismo recipiente. Es muy fácil de entender y de usar, por lo que puede ser aceptado culturalmente. Su costo es minúsculo (Spuhler, 2018).

Como desventajas se puede mencionar su dependencia a las condiciones meteorológicas. Puede ser insuficiente para abastecer a una familia, siendo útil como herramienta complementaria. Solo puede ser tratado en pequeños volúmenes. Requiere un pretratamiento para aguas turbias (Spuhler, 2018).

#### **4.2.9. Otros**

##### **4.2.9.1. Yodo**

Como método similar al cloro, se puede emplear el yodo. El yodo es un halógeno que, en forma de yodo elemental o ácido hipoyodoso es capaz de desinfectar el agua gracias a sus propiedades oxidantes. El yodo es muy eficaz frente a bacterias, aunque los virus, protozoos o quistes son más resistentes. Una forma del yodo altamente recomendable es la resina de yodo, ya que es una forma muy estable del yodo que se puede añadir como complemento a filtros y es capaz de eliminar microorganismos mediante fuerzas electrostáticas (Backer, 2000).

Existe cierta controversia respecto a su uso, ya que un exceso de consumo puede inducir a trastornos de tiroides, especialmente el hipotiroidismo, pudiendo causar bocio. Por ello, se debe realizar un balance riesgo-beneficio para asegurarse que los beneficios son mayores que los problemas que pueda desencadenar. Si se considera que es la mejor alternativa, ya sea por tener una buena accesibilidad al yodo o por ausencia de medios para llevar a cabo otro tratamiento, se recomienda limitar la dosis a 1-2 mg/L para que su consumo sea saludablemente viable a lo largo del tiempo. Se desaconseja su consumo para mujeres embarazadas, personas susceptibles a tiroides o con hipersensibilidad al yodo, personas con antecedentes de enfermedad tiroidea o localidades con deficiencia crónica de yodo. Como ventaja se puede mencionar su baja reactividad frente a compuestos orgánicos nitrogenados, a diferencia del cloro que origina cloraminas (Backer, 2000).

##### **4.2.9.2. Condensación**

La condensación del vapor de agua es un fenómeno que puede ser aprovechado para obtener agua de consumo, siendo más eficaz en atmósferas húmedas con temperaturas bajas.



La obtención de agua condensada a partir de la humedad del aire entra dentro del campo de estudio de la psicrometría. La psicrometría estudia las propiedades termodinámicas del aire húmedo y el efecto que este tiene en los materiales y el confort humano. Para determinar el comportamiento del aire húmedo se emplean los diagramas psicrométricos, que, para una presión dada, considera el punto de rocío (temperatura que alcanza una mezcla vapor-gas a presión constante y que, por debajo de dicha temperatura, comienza la condensación del vapor), volumen específico (volumen por unidad de masa), temperatura seca, y humedad relativa (relación entre la presión parcial de vapor y la presión de vapor a la misma temperatura). También puede haber líneas auxiliares relativas al grado de saturación del aire, entalpía específica (contenido de calor entre la masa del sistema) u otras. Por ejemplo, a partir del diagrama se podría deducir la humedad absoluta y la temperatura de rocío de un lugar conociendo la temperatura seca y la humedad relativa (Pilatowsky, 2021).

En el diagrama (Ilustración 5) se representa la temperatura del bulbo seco como abscisas y la humedad absoluta en ordenadas. Para entender el concepto de bulbo seco es necesario explicar el funcionamiento del psicrómetro. El psicrómetro es un instrumento que contiene dos termómetros de mercurio, uno de ellos descubierto y otro cubierto con una gasa humedecida. Al psicrómetro se le induce una corriente de aire y la temperatura de los bulbos disminuye. Sin embargo, el bulbo con la gasa humedecida desciende aún más su temperatura debido a la evaporación del agua de la gasa húmeda. Cuanta más humedad haya en la corriente de aire, la diferencia de temperatura entre el bulbo húmedo y seco será menor, llegando a ser equivalente en condiciones de saturación (la humedad de la gasa no se evapora por lo que la  $T^{\circ}$  del bulbo húmedo no desciende aún más). A partir de esta diferencia de  $T^{\circ}$  se puede determinar la humedad relativa (Pilatowsky, 2021).

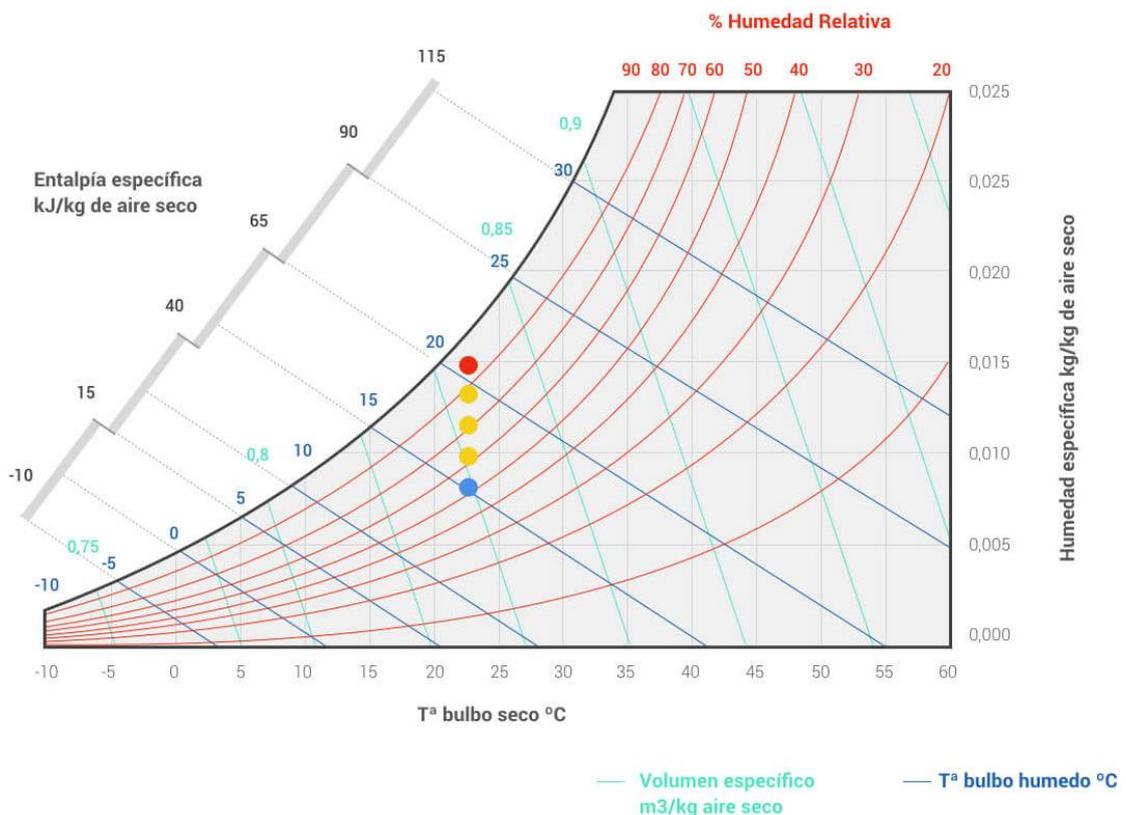


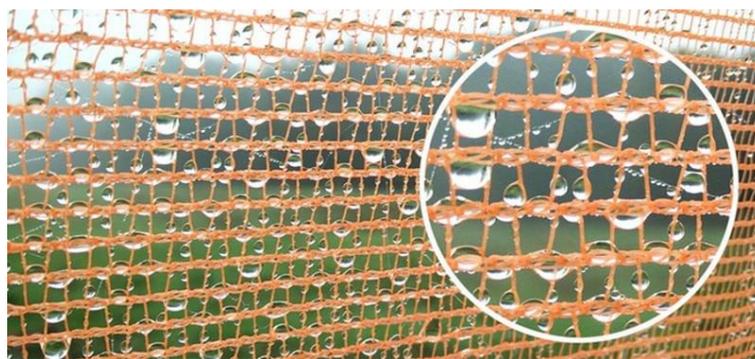
Ilustración 5. Diagrama psicrométrico (S&P, 2019).

Si una corriente de aire entra en contacto con una superficie cuya temperatura es superior al punto de rocío del aire inicial, el aire se humecta. En cambio, si dicha superficie está a una temperatura inferior al punto de rocío, la corriente de aire se deshumecta, produciéndose una condensación del vapor (Pilatowsky, 2021).

La obtención de agua a partir de la humedad se puede conseguir gracias a numerosos inventos y patentes. Aunque muchos de ellos consigan condensar el agua, elementos como desecantes o serpentines suponen una alta dificultad en cuanto a la elaboración por lo que sería necesaria su importación. Sin embargo, *Architecture and Vision* ha diseñado *Warka Water* (Ilustración 6 y 7): una torre construida con bambú capaz de recolectar agua de la lluvia, rocío y niebla y dirigirla a un depósito sin gastar energía, únicamente con la fuerza de la gravedad. Otra ventaja es que se puede fabricar con recursos locales y sin necesidad de estar altamente cualificado.



*Ilustración 6. Warka Water («Warka Water. La torre de bambú que produce hasta 100 litros de agua al día»,2021).*



*Ilustración 7. Condensación en el bambú Water («Warka Water. La torre de bambú que produce hasta 100 litros de agua al día»,2021).*

### **4.2.9.3. Destilación**

La destilación consiste en separar sustancias de un líquido mediante la ebullición y la posterior condensación. Industrialmente está en desuso, aunque en situaciones de emergencia se puede emplear esta técnica para obtener agua de consumo a partir de agua sucia, agua de mar o,



incluso, orina. Para que ebulle el agua se puede recurrir a combustibles o energía solar y para condensar el agua, se podría emplear un plástico que retenga el vapor, dispuesto con una inclinación para que se vierta el agua condensada sobre un recipiente (Cervera, 2016).

Podría tener utilidad en el caso extremo de no disponer de agua natural, sino el método SODIS o el hervido resultan más eficientes.

#### **4.2.9.4. Sistemas naturales**

Otra posible alternativa sería el aprovechamiento de medios naturales para la filtración y eliminación de nutrientes y patógenos a través de las plantas macrófitas (especies vegetales adaptadas al medio acuático). Dichos medios naturales podrían ser humedales, lagunas, entre otros.

Un humedal es un terreno que permanece saturado durante largos períodos de tiempo, de manera que coexisten el ecosistema acuático y el terrestre. Se pueden diseñar humedales artificiales que simulen el comportamiento y los procesos que se dan en un humedal natural. En un humedal, las partículas del agua entrante se asientan, los patógenos se eliminan y los nutrientes son absorbidos por las plantas (Tilley et al., 2018).

Se puede fabricar con recursos locales, los costos de operación son muy bajos y no requiere energía eléctrica. Además, elimina eficazmente partículas sólidas y DBO, y moderadamente los patógenos. En cuanto a las desventajas, se requiere mano de obra cualificada para el mantenimiento, favorece la proliferación de mosquitos, requiere gran cantidad de terreno y período de maduración largo hasta obtener unos resultados aceptables (Tilley et al., 2018).

Las lagunas de plantas flotantes consisten en unas plantas que flotan en la superficie del agua, como los jacintos o las lentejas de agua, cuyas raíces se extienden bajo la superficie y filtran el agua y adquieren sus nutrientes. Pueden ser construidas con recursos locales y los costes de fabricación y operación son bajos. Además, es muy eficaz eliminando sólidos y DBO. Como desventajas se puede decir que requiere grandes cantidades de terreno y que no es eficaz eliminando patógenos (Tilley et al., 2018).

## **5. Metodología general**

### **5.1. Agua natural sintética**

El agua que se ha emulado se trata de agua natural, ya sea procedente de un pozo, de la lluvia, río, embalse, costa o lago. En función de su procedencia tendrá unas u otras características. Por ejemplo, el agua de un pozo o de la lluvia puede ser menos turbias que el agua de un río. Vertimientos puntuales en los ríos o lagos pueden concentrar colonias de coliformes u otros agentes transmisores. Las letrinas cercanas a un pozo, si no está bien aislada, también pueden contaminar el agua. Un almacenamiento de agua tratada en condiciones de baja salubridad puede poner en riesgo la salud del consumidor. Por ello, es necesario analizar agua de distintas características para abarcar el mayor número de situaciones posibles.

Para preparar artificialmente el agua, se recurrió a agua diluida de grifo. Se le aplicaron partículas de arcilla molida para simular la turbidez (Ilustración 8) y se diluyó agua residual procedente de una EDAR para representar el agua a caracterizar.

A pesar de haber numerosos parámetros que influyen en la calidad del agua, para simplificar el estudio se analizan dos parámetros:

- La turbidez, que sintetizaría el estudio de compuestos químicos de distinta índole.
- La eliminación de microorganismos que representaría el conjunto de procesos biológicos.



*Ilustración 8. Roca de arcilla de la que se extrae la turbidez del agua.*

Tomando como referencia que a partir de 40 mgSS/mL (120 UNT) es necesaria una decantación previa. Por ello, se puede tomar como valores característicos 5, 20, 50 y 100 UNT.

En escorrentía urbana la concentración de Coliformes Totales se encuentra en el rango de  $10^2$  a  $10^5$  UFC/100mL. Por ello, para la contaminación microbiológica se diluyó agua residual en agua destilada en las siguientes proporciones: 1/1.000, 1/10.000 y 1/100.000 AR. Esto implica que, teóricamente, el agua sintética tiene desde 0,001 UFC/100mL hasta 100 UFC/100mL.

De esta forma, se estudiaron diversas situaciones reales, de agua natural con distintas concentraciones sintéticas. Por ejemplo, una turbidez de 5 UNT se puede asociar al agua de un pozo o al agua de lluvia. Turbideces de 20, 50 y 100 UNT pueden representar aguas de río, embalse, lago, costa o escorrentía. En cuanto a la contaminación bacteriológica, una dilución 1/1.000 se puede asociar con el agua de un pozo cercano a una letrina o agua de escorrentía urbana. Diluciones de 1/10.000 y 1/100.000 pueden representar agua de lluvia, de lagos, de embalses o de costa.

Para medir dichos parámetros, se ha considerado como base el libro “Standard Methods For The Examination and Wastewater” (2012).

Para el medir la turbidez se insertan 10 mL del agua turbia en el turbidímetro y este da el resultado (en UNT), basándose en el apartado “2130 B. Turbidity. Nephelometric Method” del libro mencionado.

Para medir las colonias, se basa en el apartado “9222 B. Membrane Filter Technique For Members of the Coliform Group. Standard Total Coliform Membrane Filter Procedure” del mismo libro. Se emplearán 100 mL, a menos que se indique lo contrario. Primero se calienta (Ilustración 9) el agar para coliformes Chromocult, el medio de cultivo que detecta las colonias, hasta que alcance el estado líquido y se vierte su contenido en las placas de Petri:



*Ilustración 9. Fusión del medio de cultivo.*

Por otro lado, se coloca el filtro de celulosa de nitrato en el equipo de filtración y se filtra el agua mediante un tubo de succión (Ilustración 10). Después se coloca y se le da la vuelta a la placa de Petri. Por último, se inserta la placa en la estufa y se calienta a 36,5°C durante 24-48 horas para que los coliformes se puedan analizar visualmente.



*Ilustración 10. Equipo de filtración.*

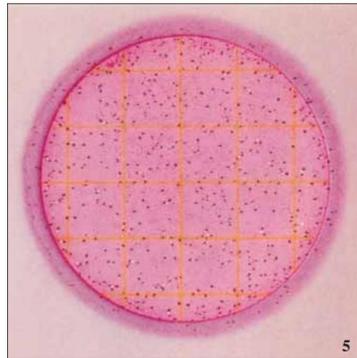
## **5.2. Interpretación de resultados**

En cuanto a la turbidez, su evaluación se hace mediante una medida directa con el turbidímetro, que facilita el resultado en unidades UNT. Este resultado no da lugar a interpretaciones, obteniéndose en cada ensayo un valor único. En cambio, la interpretación de los cultivos es más compleja.

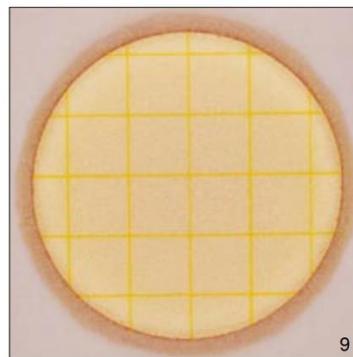
Basándose en la Guía de Interpretación de Petrifilm se puede hacer el recuento o la estimación de los microorganismos del cultivo. El color da información acerca de la naturaleza del agente:



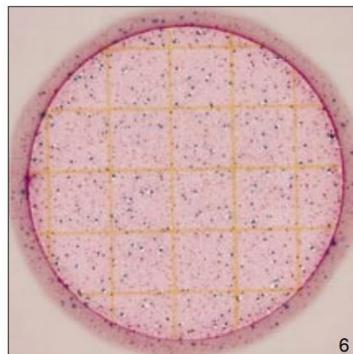
los *E. Coli* producen una precipitación azul. Los coliformes totales, excluyendo *E. Coli*, se manifiestan en un tono rojizo. Los coliformes pueden tornar de rojo anaranjado a amarillo por una disminución de pH. El número de colonias se pueden contar siempre que sea un número razonable. Cuando el número es superior a 300, se puede estimar el número total contando las colonias de una cuadrícula y multiplicándola por 20 (Ilustración 11). Microorganismos no-coliformes, como las *Pseudomonas* pueden confirmar su presencia tornando el color de la placa en amarillo (Ilustración 12). Si en los bordes aparecen altas concentraciones de colonias suponer resultado incontable. No se cuentan las colonias puntuales que se encuentren en las esquinas ya que han sido removidas por influencia del medio. En las Ilustraciones 13, 14 y 15 se da la referencia del número de colonias para concentraciones muy elevadas. Concentraciones mayores a la Ilustración 15 se considera incontable.



*Ilustración 11. Recuento estimado: 310 (3M, 2010).*



*Ilustración 12. Cultivo de no coliforme (3M, 2010).*



*Ilustración 13. Recuento de colonias: 10<sup>6</sup> (3M, 2010).*

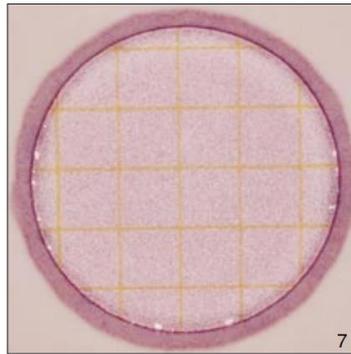


Ilustración 14. Recuento de colonias:  $10^7$  (3M, 2010).

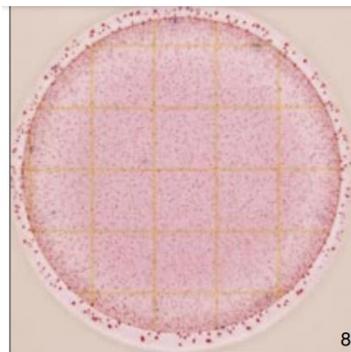


Ilustración 15. Recuento de colonias:  $10^8$  (3M, 2010).

## 6. Ensayos experimentales

### 6.1. Microfiltración, ultrafiltración y ósmosis inversa

#### 6.1.1. Materiales y procedimiento

El filtro que se empleó para los experimentos es el modelo 1822-047 GF/C Glass Microfiber Filters (Ilustración 16), cuyo tamaño de poro es de  $1.2 \mu\text{m}$ , por lo que el proceso se encontraría dentro del rango de la microfiltración. En este tipo de filtración, la diferencia de presión que hay que aplicar se encuentra entre 0,1 y 2 bares. Se aplicó una presión en torno a los 0,5 bares en todos los casos.

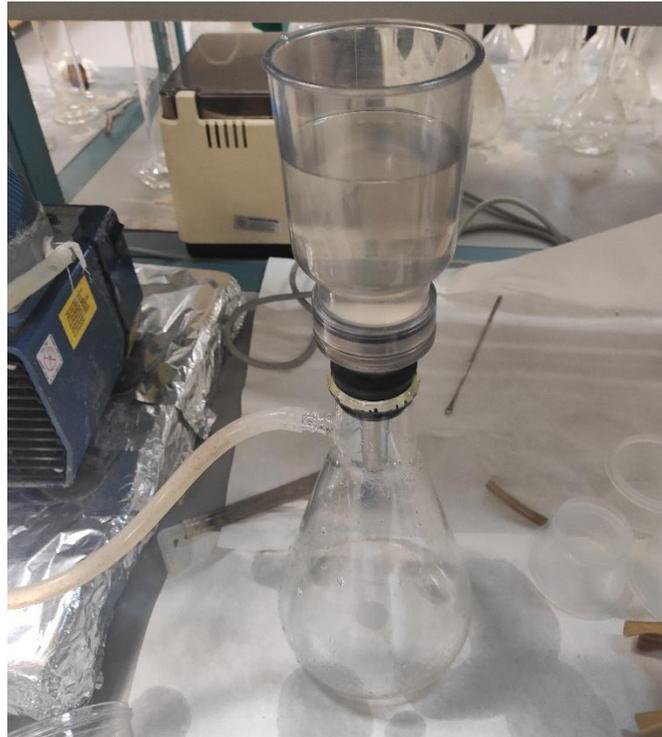


Ilustración 16. Microfiltración.

Se han realizado 4 experimentos, empleando en cada uno de ellos las siguientes turbideces: 100,0, 57,8, 21,9 y 5,2 UTN. Para cada uno de ellos se ha medido la turbidez final y se ha deducido el rendimiento.

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Turb. } i - \text{Turb. } f}{\text{Turb. } i} \cdot 100$$

Por otro lado, se midió cuánto volumen es capaz de filtrar cada filtro antes de alcanzar el punto de saturación. Para ello, se filtraron 250 mL de agua turbia en serie y se midió el tiempo que ha tardado en filtrar. Se realizó este procedimiento tantas veces como sea necesario hasta alcanzar el punto de saturación.

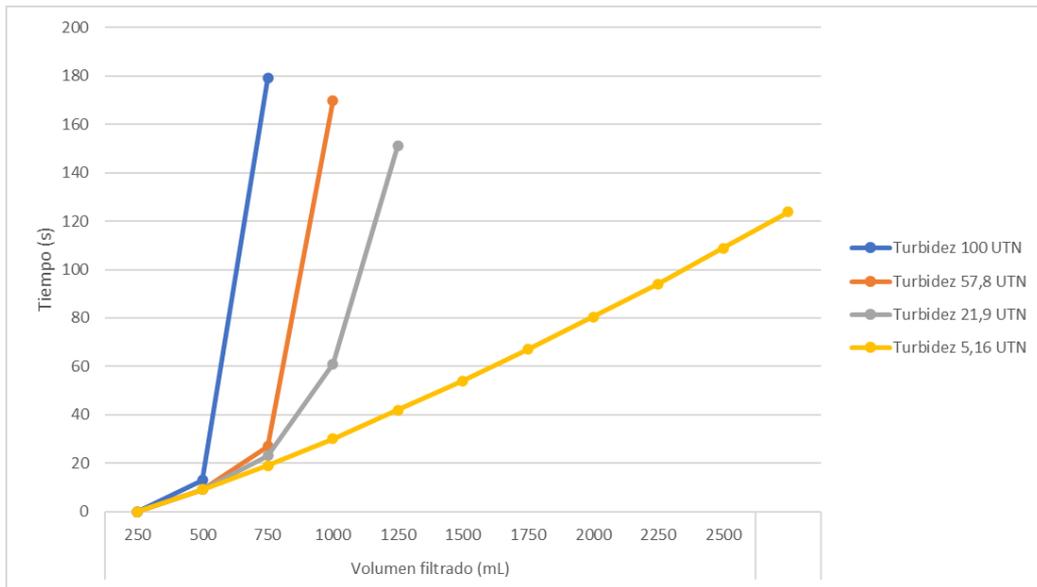
### 6.1.2. Resultados

Los rendimientos se muestran en la Tabla 5.

Turbidez inicial (UTN)	Turbidez final (UTN)	Rendimiento (%)
100	30,4	69,6
57,8	18,9	67,3
21,9	2,8	87,4
5,2	1,9	63,6

Tabla 5. Eliminación de la turbidez (microfiltración).

En la Gráfica 5 se muestra el volumen que se filtró y el tiempo (acumulativo) que se empleó en filtrar cada volumen de agua (la altura máxima de la columna de agua es de 10 cm).



Gráfica 5. Tiempo de saturación para distintas turbideces (microfiltración).

En la Ilustración 17 se puede observar cada uno de los filtros tras ser sometido al proceso de filtrado. Cabe destacar que el filtro correspondiente al agua turbia de 5,16 UTN se resquebrajó antes de poder alcanzar el punto de saturación debido a la presión aplicada.



Ilustración 17. Estado de los filtros saturados.

## 6.2. Filtro de tela

### 6.2.1. Materiales y procedimiento

Para el filtrado mediante telas, se emplearon distintos materiales. El primero de ellos es una camiseta de algodón con elastano elaborada con ligamento tafetán. El segundo es un pantalón vaquero confeccionado con tejido asargado. El último de ellos es una tela de mantel de algodón puro tejida con ligamento tafetán (Ilustraciones 18, 19, 20 y 21).



Ilustración 18. De izquierda a derecha: tela de algodón con elastano, vaquera y de algodón puro.

El procedimiento consiste en verter 1L de agua turbia sobre la tela. La experimentación se dividió en dos fases. La primera de ellas consiste en medir el rendimiento de eliminación de distintas turbideces. La segunda fase consiste en aplicar una turbidez constante dentro de un rango ( $50 \text{ UTN} \pm 20$ ) y determinar la variación de tiempo que tarda en filtrar el litro de agua turbia. Para determinar el rendimiento a distintas turbideces, se hizo un número de ensayos suficiente para abarcar un amplio espectro de posibilidades. Para determinar la evolución del tiempo que se tarda en filtrar 1 L se realizaron entre 10 y 21 ensayos.

Los filtros de tela se colocaron bajo una altura de agua establecida:  $7 \pm 2 \text{ cm}$  sobre el punto más bajo de la tela, y se ha plegado la tela dos veces para que filtren 4 capas en serie.



Ilustración 19. Filtro de tela de mantel



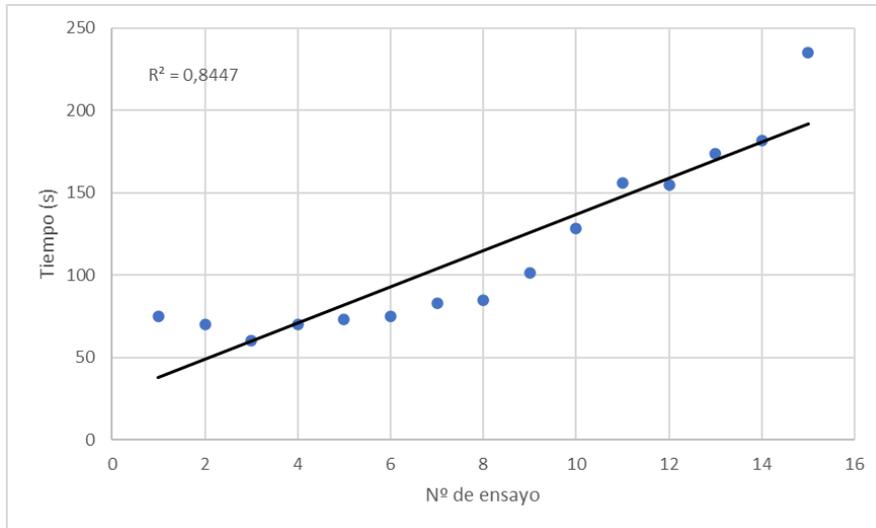
*Ilustración 20. Filtro de tela vaquera.*



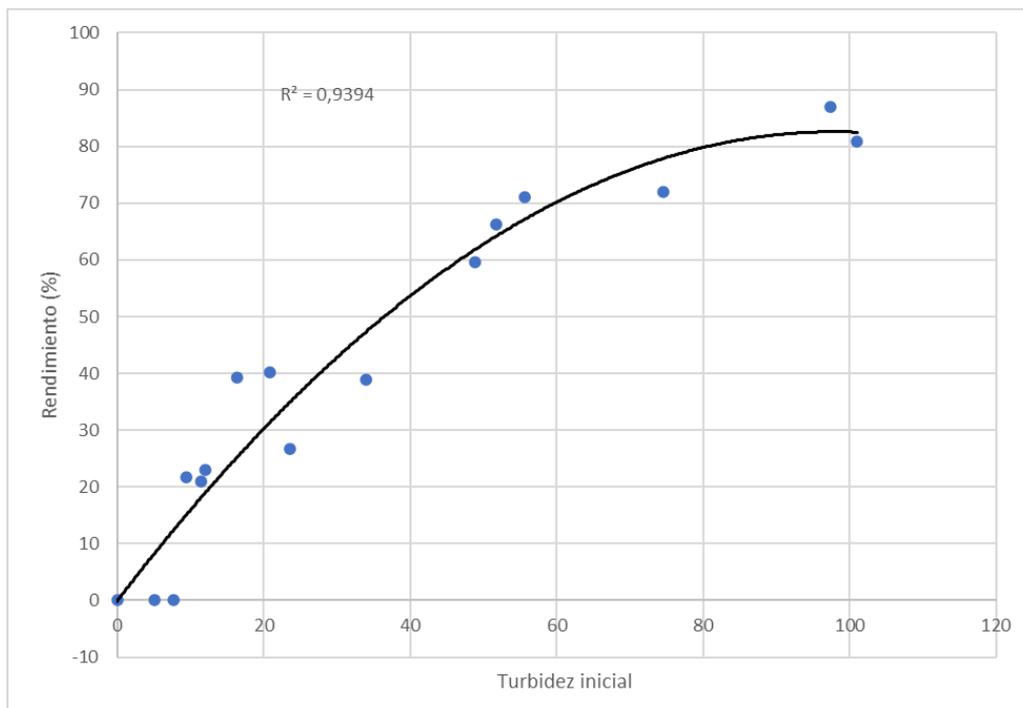
*Ilustración 21. Filtro de tela de camiseta*

### 6.2.2. Resultados

Los resultados del filtro de tela de mantel se muestran en las gráficas 6 y 7.

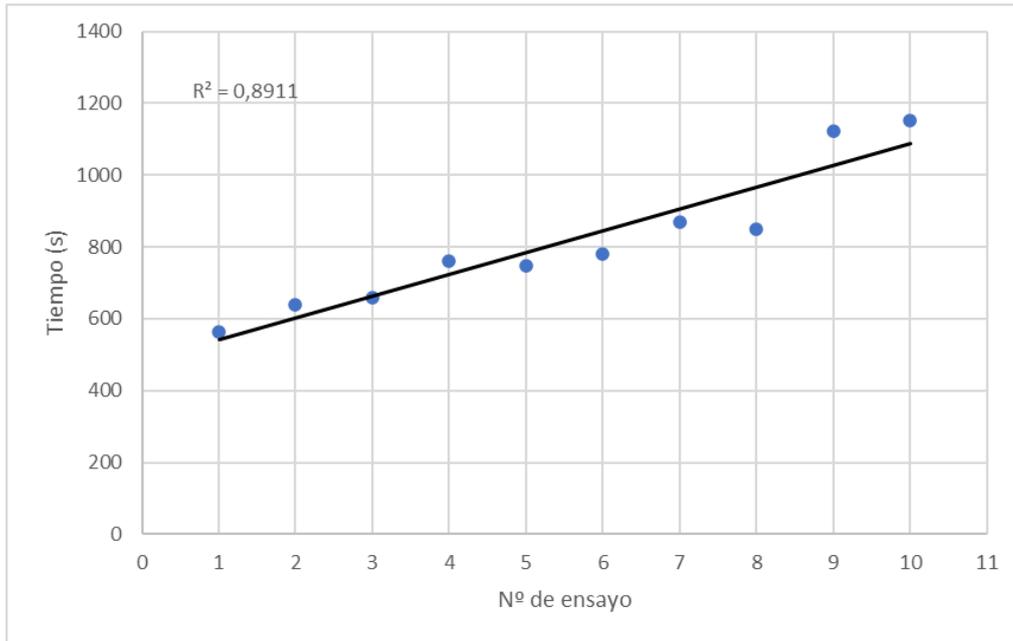


Gráfica 6. Tiempo en filtrar 1 L (tela de mantel).

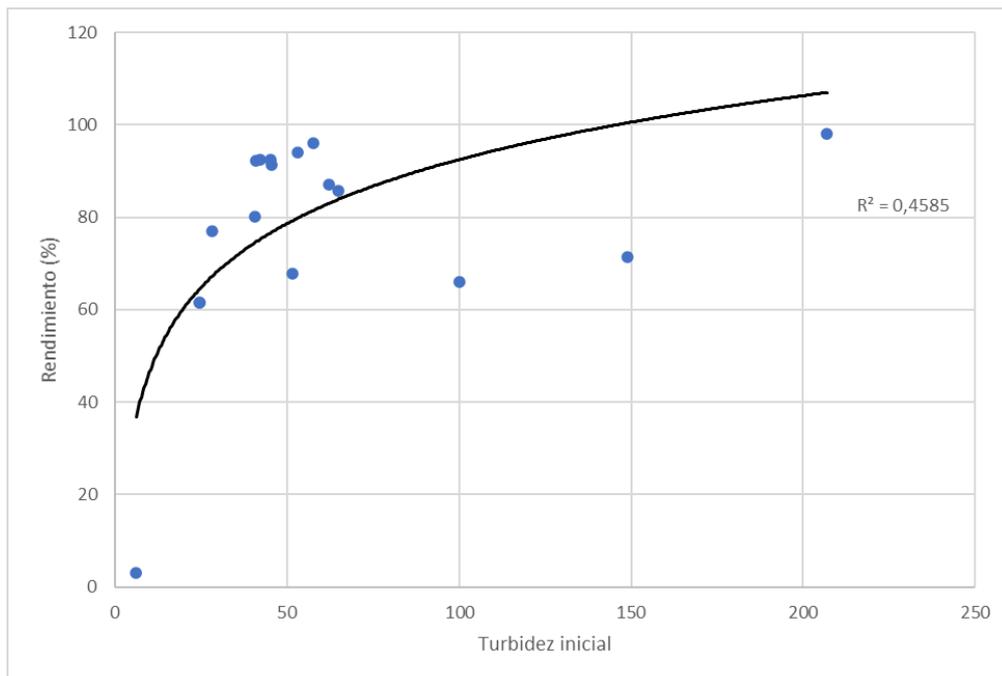


Gráfica 7. Rendimiento de eliminación de turbidez en filtros de tela de mantel.

En cuanto al filtro de tela vaquera, los resultados se muestran en las gráficas 8 y 9.

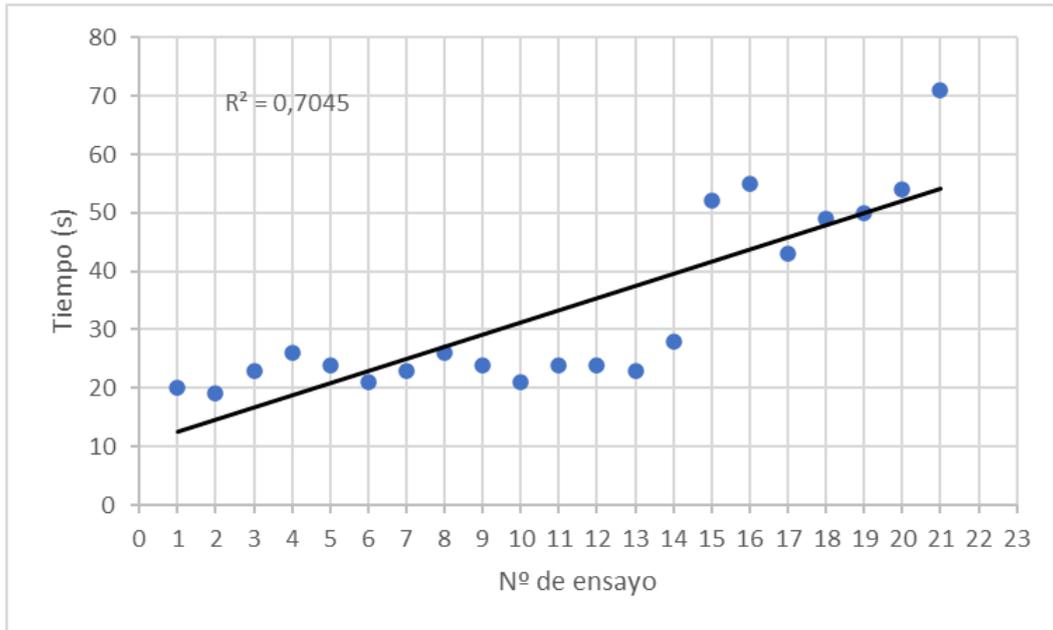


Gráfica 8. Tiempo en filtrar 1 L (tela vaquera).

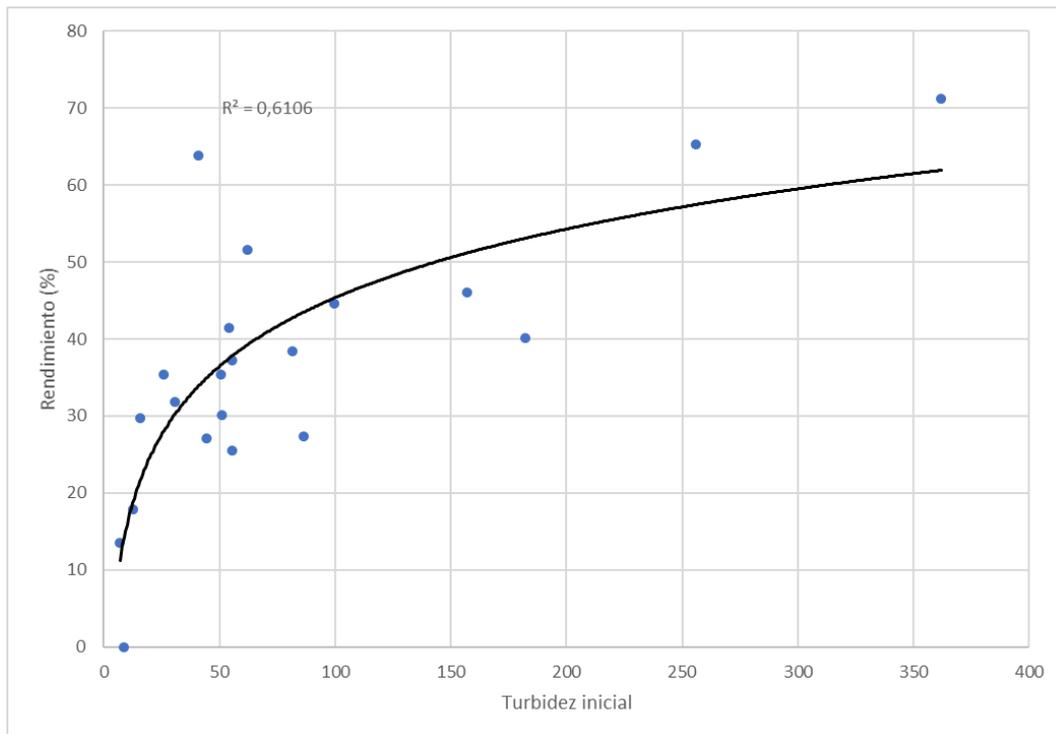


Gráfica 9. Rendimiento de eliminación de turbidez en filtros de tela vaquera.

Finalmente, los resultados del filtro de tela de algodón se muestran en las gráficas 10 y 11.



Gráfica 10. Tiempo en filtrar 1 L (tela de camiseta).



Gráfica 11. Rendimiento de eliminación en filtros de tela de camiseta.

Como conclusión de estas gráficas, cabe destacar que el tiempo que emplea cada uno de los filtros en filtrar varía en el tiempo debido al ensuciamiento, tal y como se esperaba. La variación de tiempo se ajusta a una función lineal y la dispersión no es muy elevada. El tiempo promedio de filtración es mucho más elevado en la tela de mantel y camiseta que en la tela vaquera a pesar de que el tejido tafetán ofrece más resistencia al paso del fluido que el tejido asargado.



Esto puede deberse a que el tejido de la tela vaquera es mucho más compacta, por lo que la permeabilidad es menor.

Por otro lado, el rendimiento en cuanto a la eliminación de turbidez en cualquiera de los filtros de tela se podría aproximar a una función logarítmica o polinómica de grado 2. Como se puede observar, el rendimiento es mucho menor con bajas turbideces. Esto es posible que se deba a que la alta presión de agua aplicada reduzca el rendimiento en turbideces pequeñas. La dispersión resulta elevada, sobre todo en la tela vaquera y de algodón. Esto puede deberse a la naturaleza del material o a que, a pesar de que la tela se limpie, el ensuciamiento remanente repercute ligeramente en resultados posteriores. Sin embargo, no se encontró ninguna tendencia a lo largo del tiempo en cuanto a pérdida de rendimiento.

El filtro de tela con mejores rendimientos ha sido, indudablemente, la tela vaquera con tejido asargado, obteniendo en gran parte de los resultados rendimientos de eliminación entre el 80-95%. Sin embargo, la pérdida de carga es mucho más elevada en este tejido debido, posiblemente, al tamaño de poro.

### **6.3. Filtros de arena**

#### **6.3.1. Filtro de arena rápido**

##### **6.3.1.1. Materiales y procedimiento**

El árido empleado fue mayoritariamente calizo. Se tomó una granulometría de diseño para el lecho filtrante de un tamaño entre 0,9 – 1,2 mm. Siguiendo el criterio de granulometría anteriormente mencionado y teniendo en cuenta la disponibilidad de material en el laboratorio, se construyó el filtro con las capas soporte de la siguiente manera:

- Filtro de arena: 0,9 – 1,2 mm (Espesor = 0,5 m)
- 1ª capa soporte: 4 – 8 mm (Espesor = 6 cm)
- 2ª capa soporte: 16 – 23 mm (Espesor = 12 cm)

Se colocó un bidón a una cota superior al filtro de arena y, para evacuar el agua tratada, se dispuso de un balde (Ilustración 22). Para el recipiente del filtro, se aprovechó un cilindro de metacrilato de 1,35 m de altura y 20 cm de diámetro.



*Ilustración 22. Montaje del filtro rápido de arena.*

El experimento del filtro rápido consistió en determinar el rendimiento de eliminación de turbidez para distintas turbideces. Al mismo tiempo, se ha determinado la pérdida de carga a lo largo del tiempo. Para determinar la pérdida de carga se aplicó una carga variable (de  $h_2$  a  $h_1$ ) y se midió el tiempo que ha tardado en filtrar (de  $t_1$  a  $t_2$ ) a través de un lecho filtrante de longitud  $L$ . El agua entrante se vertió muy lentamente para evitar que un impacto hidráulico resuspenda las partículas del lecho. A continuación, se calculó a lo largo del tiempo la variación del coeficiente de permeabilidad  $k$  y se determinó la correspondiente pérdida de carga.

$$Q \text{ entrante} = Q \text{ saliente}$$

$$- \text{Área} \cdot \frac{dh}{dt} = \text{Área} \cdot k \cdot i$$

$$\int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{h} = \frac{k}{L} \int_{t_1}^{t_2} dt$$

$$\ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) = \frac{k}{L} (t_2 - t_1) \rightarrow k = \frac{L}{(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$$

Una vez deducido el coeficiente de permeabilidad para una carga variable, se determina la correspondiente pérdida de carga (siendo  $k$  en este caso el coeficiente de permeabilidad, inverso al coeficiente de Darcy mencionado anteriormente):

$$\frac{dP}{dl} = \frac{V}{k}$$

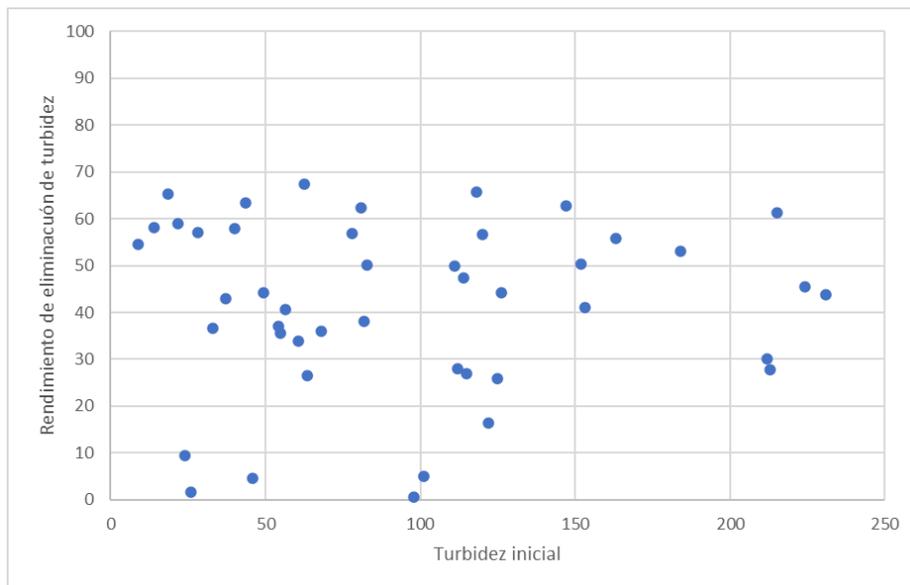
$$P = \int_0^L \frac{V}{k} dl$$

$$P = \frac{V \cdot L}{k}$$



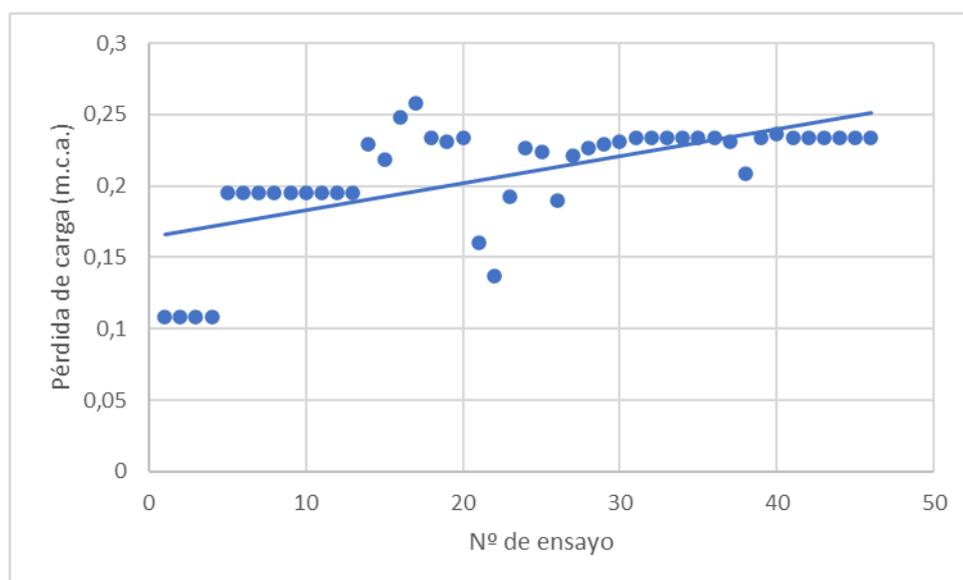
### 6.3.1.2. Resultados

Tal y como se puede observar en la Gráfica 12, la dispersión es demasiado elevada, encontrándose la mayoría de rendimientos entre el 30 y el 70%, independientemente de la turbidez inicial. Esto puede deberse a un tamaño de granulometría del filtro relativamente alto. Valores cercanos a 0 de rendimiento pueden indicar que puede que se hayan resuspendido partículas del lecho. El filtro no se ha limpiado entre ensayo y ensayo, aun así, no se ha apreciado una variación apreciable a lo largo del tiempo en cuanto a rendimiento. Es necesario mencionar la alta dispersión de los resultados, pudiéndose mejorar en cuanto a precisión de medición, debido a que, al trabajar con volúmenes de agua tan grandes, la muestra de turbidez podría no ser representativa de todo el volumen existente.



*Gráfica 12. Rendimiento de eliminación de turbidez en filtros de arena rápidos.*

En cuanto a la pérdida de carga, se ve cómo va aumentando gradualmente (Gráfica 13), siendo la del último ensayo de 0,23 m.c.a., valor aún lejos de la pérdida de carga máxima (1,5 m.c.a.).



*Gráfica 13. Variación de pérdida de carga frente al tiempo (filtro de arena rápido).*

Como conclusión, el rendimiento del filtro de arena diseñado es reducido, pudiéndose deber al diseño de la granulometría, a que el filtro no maduró lo suficiente o, simplemente, la forma de experimentación.

### **6.3.2. Filtro lento de arena**

#### **6.3.2.1. Materiales y procedimiento**

El medio soporte del filtro de arena es un tubo de metacrilato de sección circular, 20 cm de diámetro. Teniendo en cuenta los criterios de Huisman y la disponibilidad de material, se dimensionó el siguiente filtro lento de arena:

- Filtro de arena: 0,25 – 0,63 mm (Espesor = 60 cm)
- 1ª capa soporte: 0,63 – 2 mm (Espesor = 8 cm)
- 2ª capa soporte: 2 – 6 mm (Espesor = 8 cm)
- 3ª capa soporte: 6 – 12 mm (Espesor = 8 cm)
- 4ª capa soporte: 18 – 24 mm (Espesor = 12 cm)

Se dispuso de dos bidones a una altura superior a la cota superior al filtro y a la altura del suelo se ha colocado un balde de plástico (Ilustración 23). Al igual que con el filtro rápido, se aprovechó un cilindro de metacrilato de 20 cm de diámetro.



*Ilustración 23. Montaje del filtro lento de arena.*

El procedimiento consistió en llenar un bidón con agua de grifo y dejarlo reposar un plazo mínimo de 24 horas para que el cloro se evapore. Una vez esperado el plazo, se diluyó la cantidad de agua residual correspondiente para que la dilución sea aproximadamente 1/1.000. Además, también se le añadió partículas de arcilla molida para dotar al agua de una baja turbidez. A

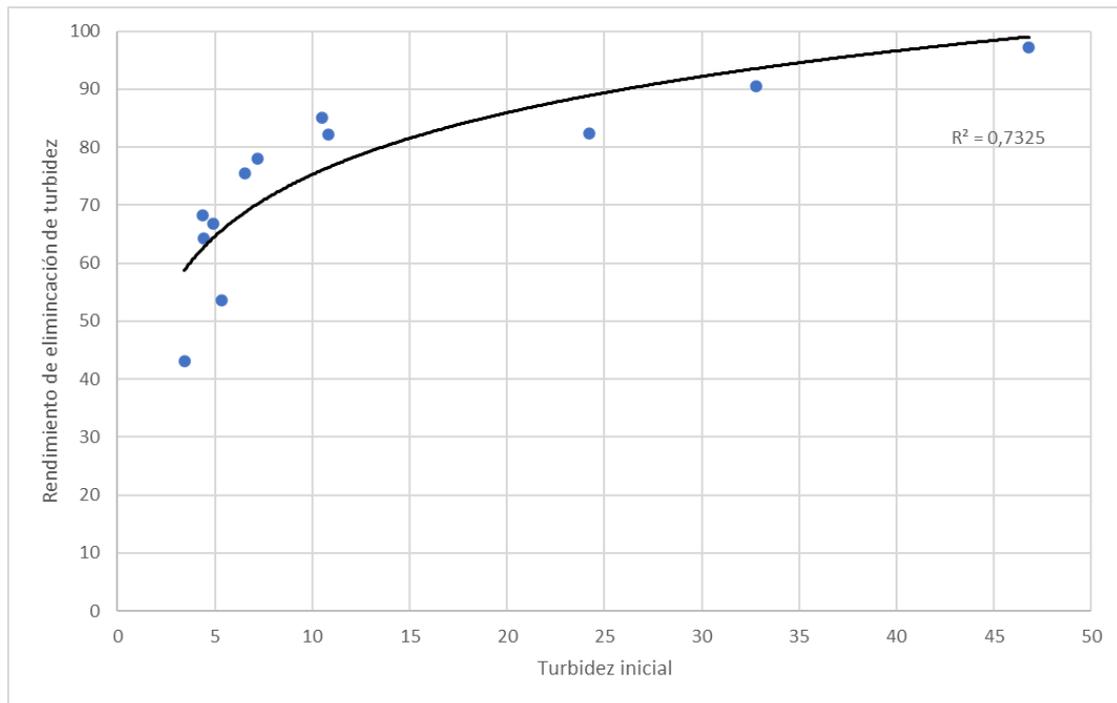


continuación, se vertió el agua en el filtro mediante goteo (0,1 – 0,4 m/h) y el agua filtrada se recogió en el balde inferior. Para dar continuidad al proceso, se contó con un segundo balde para alternarlos en los procesos de reposo y vertido.

Se ha repetido el proceso todos los días durante un mes con el objetivo de que se desarrolle una biopelícula que elimine los microorganismos. Sin embargo, no se formó ninguna.

### 6.3.2.2. Resultados

En cuanto al rendimiento de eliminación de turbidez, ha demostrado ser muy eficaz para turbideces medias (5 – 40 UNT) y bajas (< 5 UNT), tal y como se muestra en la Gráfica 14.



Gráfica 14. Rendimiento de la eliminación de la turbidez.

Por otro lado, a lo largo de un mes, se analizó semanalmente la concentración de coliformes en el agua, por si pudiera haber una reducción a pesar de no formarse la biopelícula. Sin embargo, no se observó ninguna eliminación de coliformes.

Como conclusión, en aguas poco turbias el filtro lento de arena alcanza un rendimiento de eliminación de turbidez que otras tecnologías como el filtro de tela o el filtro rápido no consiguen. La formación de la biopelícula es un proceso complejo en el que el período de maduración depende muchas variables, entre ellas el agua de entrada (Suárez et al., 2014). Por ello, el fenómeno requiere un estudio más específico.

## 6.4. Filtro de rama de pino

### 6.4.1. Materiales y procedimiento

Como tareas preliminares, se cortó la rama (Ilustración 24) con una sierra y se retiró la corteza. Si la corteza se puede retirar fácilmente con la mano (Ilustración 25) puede ser un indicativo de que el pino aún no está seco, por lo que aún puede ser efectivo. Si la corteza solo se puede

separar de la albura con cuchillo puede indicar que la rama de pino está seca. Otro indicativo de que el pino sigue fresco es el contraste entre el duramen y la albura. Si las fases están claramente diferenciadas (Ilustración 26) quiere decir que la rama de pino está fresca. En cambio, si no hay contraste alguno y predomina el área del duramen el pino es probable que esté seco.



*Ilustración 24. Rama de pino.*



*Ilustración 25. Corteza de la rama de pino.*



*Ilustración 26. Diferencia de sección entre un pino seco y fresco.*

El montaje (Ilustración 27) consistió en un tubo de silicona transparente dispuesto de forma vertical en el que se hinca la rama de pino por la parte inferior, orientado para que el agua fluyese en la misma dirección que la savia. La rama se apretó con una brida. Sin embargo, al analizar mediante cultivos el agua filtrada se ha constatado que no ha habido ninguna mejoría en cuanto a eliminación de coliformes. La hipótesis que se planteó fue que una fracción del agua filtrada se colaba entre el tubo y la rama, y más aún si la rama tenía irregularidades (Ilustración 28) que pudieran desacoplar el tubo con la superficie del pino, tales como puntos donde no haya albura o saliente debido a una rama lateral.



*Ilustración 27. Montaje del filtro de pino.*



*Ilustración 28. Irregularidades en la rama de pino.*

Por lo tanto, lo que se hizo a continuación fue lijar la superficie hasta que quedase completamente lisa y aplicar un pegamento epoxi para impermeabilizar completamente el plano situado entre el tubo y el pino. Una vez aplicado el pegamento y esperado 2 horas a que fraguase se vertió el agua en el tubo.

Se desconoce la conductividad de la rama del pino debido a que cada porción de rama tendrá características ligeramente distintas y a que el envejecimiento de cada trozo en el momento de realizar el ensayo será distinto. Empleando la fórmula que define el caudal se puede deducir la conductividad del trozo de pino:

En cuanto a la longitud del pino, se optó por un valor muy pequeño ya que en experimentos anteriores una longitud grande filtró volúmenes irrisorios o, directamente, no filtró nada. La longitud de la rama sería de 3 cm. El diámetro de la sección es de 1,5 cm. La altura de agua inicial es de 1,10 m.c.a. En el primer ensayo, se filtró 38 mL en 12 h, con lo cual el caudal sería  $3,45 \frac{mL}{h}$ .

Por lo tanto, la conductividad sería  $4,08 \frac{cm^2}{m.c.a. \cdot h}$ . En los tres ensayos que se han realizado los resultados se muestran en la Tabla 6.

	V (mL)	t (h)	Q (mL/h)	k (cm <sup>2</sup> /m.c.a. h)
AR 1/1.000	38	11,5	3,30	4,08
AR 1/10.000	45	12,5	3,6	4,44
AR 1/100.000	173,5	77	2,25	2,78

Tabla 6. Conductividad hidráulica de la rama de pino.

Se considera la conductividad como la media entre los dos primeros valores ( $k = 4,26$ ), ya que en el tercer caso la filtración transcurrió durante el fin de semana y pasaron muchas horas sin que se filtrase nada una vez la presión de la columna de agua fuera insuficiente.

Se comprobó visualmente con azul de metileno ( $C_{16}H_{18}N_3Cl_1S_1$ ) la eficacia de la filtración y si realmente se fuga el agua entre el tubo y el pino. A continuación, se muestra como el azul de metileno no se fuga por la superficie del pino, logrando que filtre por los poros interiores del pino, concluyendo así que el filtro de pino es efectivo (Ilustraciones 29 y 30).

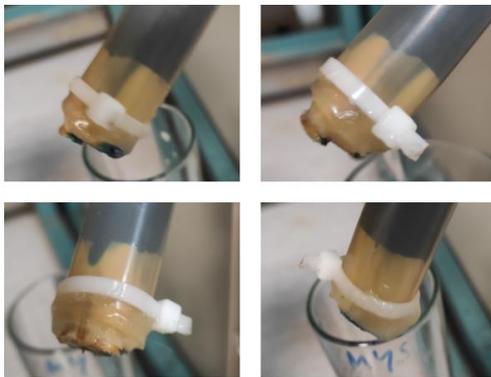


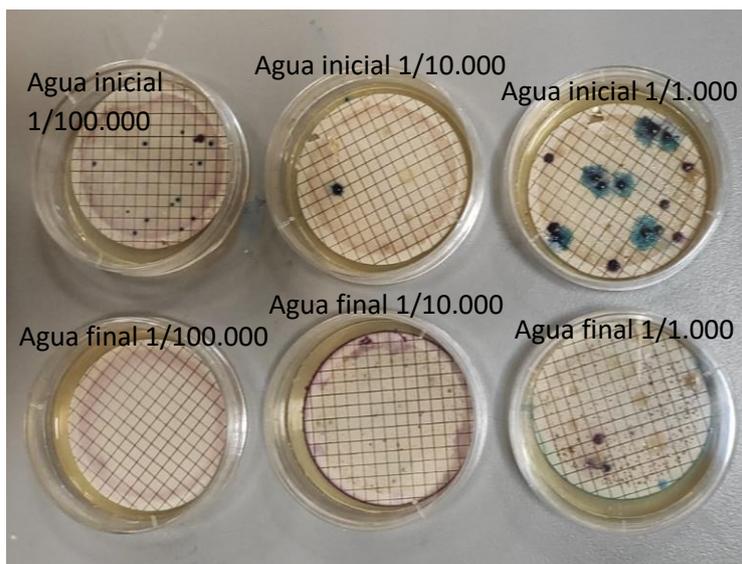
Ilustración 29. Comprobación de que el flujo no fuga lateralmente.



Ilustración 30. Azul de metileno en el filtro de pino.

#### 6.4.2. Resultados

Los resultados en cuanto a la eliminación de los coliformes se muestran en la Ilustración 31 y los resultados cuantitativos en la Tabla 7. Tal y como se puede observar, ha habido una reducción notable en cuanto a E. Coli y, en los casos del agua 1/10.000 y 1/100.000, una disminución considerable de coliformes totales.



*Ilustración 31. Muestras de cultivo (filtro de pino).*

Filtro de pino	Coliformes totales iniciales (UFC/100mL)	E. Coli iniciales (UFC/100mL)	Coliformes totales finales (UFC/100mL)	E. Coli finales (UFC/100mL)
1/1.000	Incontable	14	~ 280	3
1/10.000	Incontable	2	Incontable	Incontable
1/100.000	Incontable	14	Incontable	0

*Tabla 7. Eliminación de coliformes (filtro de pino).*

El filtro de pino es una herramienta que se ha demostrado ser eficaz pero muy poco eficiente: la eliminación de microorganismos ha quedado constatada, aunque el irrisorio caudal que se filtra implicaría que, para que fuera una tecnología que se pueda trasladar a una situación real, los recursos a emplear tengan que ser muy altos, tanto en cantidad de filtros de pino como en presión de agua aplicada. Otras variantes de pino u otras coníferas podrían ser más eficientes en cuanto a caudal filtrado. Por otro lado, se ha demostrado que apretar el pino con una brida resulta insuficiente para evitar las fugas, siendo necesaria la aplicación de una resina o pegamento epoxi, material que puede ser inaccesible en muchos casos. Además, el bajo caudal que aporta limita la utilidad real de abastecimiento, incluso a nivel familiar, requiriendo una cantidad muy elevada de filtros de pino, lo cual no sería rentable. Por ello, bajo estas condiciones no es método que se pueda aplicar a una situación real, aunque su eficacia en cuanto a la eliminación de microorganismos pone de manifiesto su gran potencial, que se podría estudiar de una manera más amplia.

## **6.5. Filtros cerámicos**

### **6.5.1. Materiales y procedimiento**

Se realizaron los ensayos con dos filtros cerámicos, uno cocido con viruta de madera y otro con polvo de madera (Ilustraciones 32 y 33). Para fabricar los filtros cerámicos se precisó de la ayuda de la alfarera Mamen Restegui. Para la elaboración, se empleó barro rojo completamente seco y machacado. A continuación, se le añadió polvo o virutas de madera y se mezcló todo con agua durante 1 hora mientras se le da forma con el molde. Finalmente, se introdujo en un horno a 980°C para sinterizarlo. Durante la cocción se quema la madera, formándose una red de poros.

En cuanto a la explotación del filtro, simplemente se colocó sobre un recipiente limpio y se vertió agua en su interior. El agua filtrada atraviesa por gravedad la cerámica y caerá sobre el recipiente, de donde se recogió.



*Ilustración 32. Filtro cerámico cocido con polvo de madera.*



*Ilustración 33. Filtro cerámico cocido con viruta de madera.*

### 6.5.2. Resultados

Se ha analizado el rendimiento de ambos filtros en cuanto a eliminación de microorganismos (Ilustraciones 34, 35 y 36).



*Ilustración 34. Resultados de cultivos. 1/1.000 (filtro cerámico).*



Ilustración 35. Resultados de cultivos. 1/10.000 (filtro cerámico).

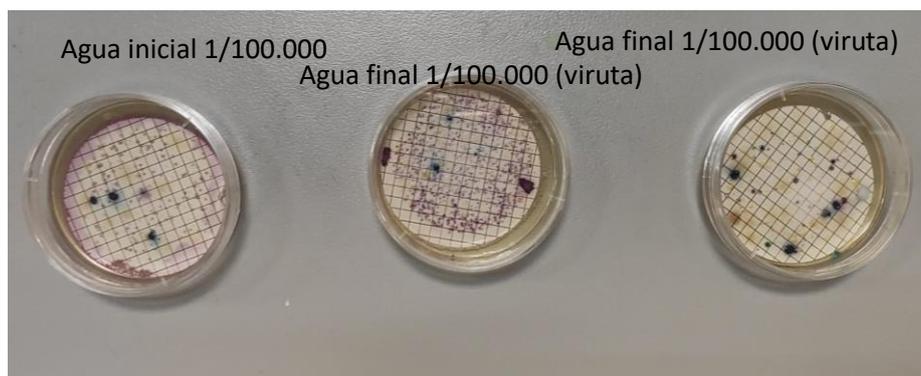


Ilustración 36. Resultados de cultivos. 1/100.000 (filtro cerámico).

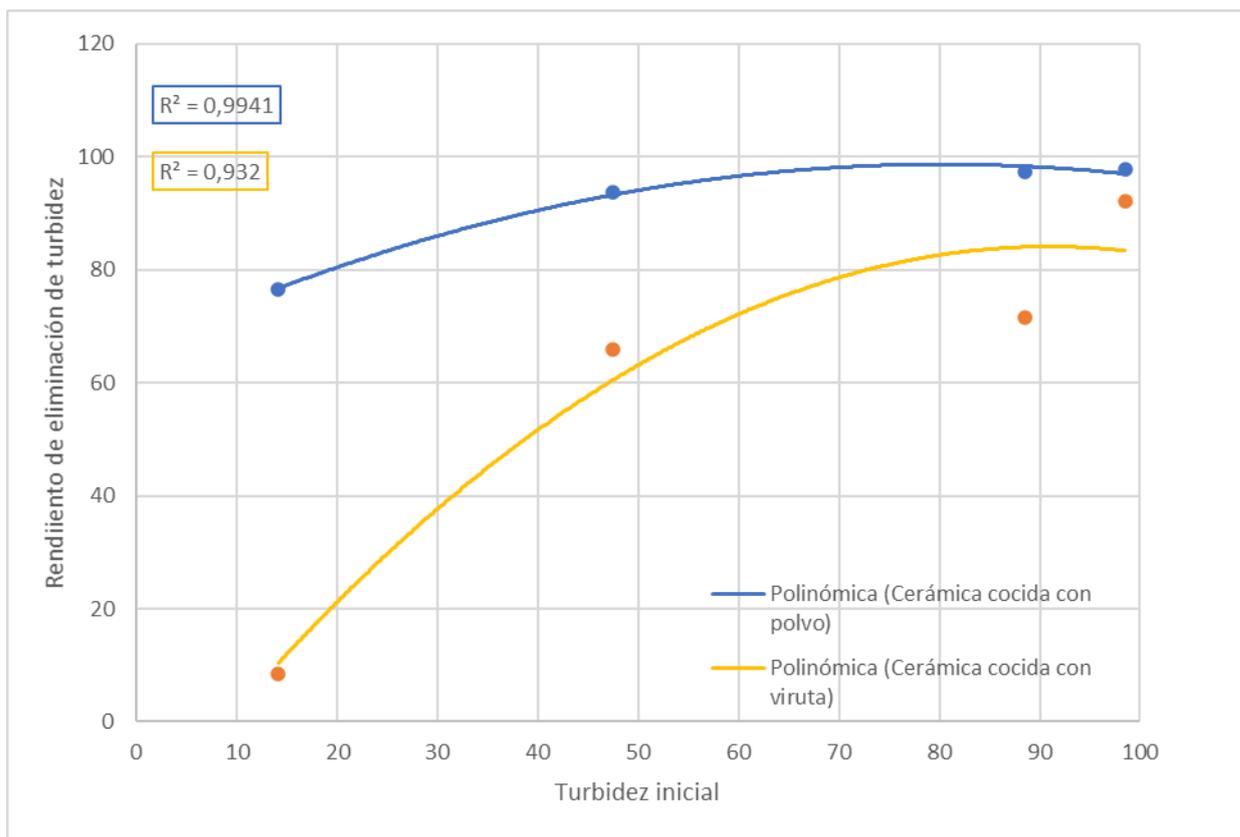
Los resultados cuantitativos se muestran en la Tabla 8, mostrándose cierta mejoría, aunque no se ha observado gran contraste entre ambos filtros. Los resultados podrían mejorarse empleando plata coloidal.

Filtro cerámico	Coliformes totales iniciales (UFC/100mL)	E. Coli iniciales (UFC/100mL)	Coliformes totales finales en filtro de cerámico cocido con viruta (UFC/100mL)	E. Coli finales en filtro de cerámico cocido con viruta (UFC/100mL)	Coliformes totales finales en filtro de cerámico cocido con polvo (UFC/100mL)	E. Coli finales en filtro de cerámico cocido con polvo(UFC/100mL)
1/1.000	Incontable	Incontable	Incontable	Incontable	~ 100	8
1/10.000	Incontable	Incontable	~ 210	18	Incontable	Incontable
1/100.000	Incontable	Incontable	~ 1000	~ 800	~ 65	16

Tabla 8. Resultados cuantitativos de eliminación de coliformes en filtros cerámico.

En cuanto al rendimiento respecto a la turbidez, los resultados se muestran en la Gráfica 15. Se puede apreciar cómo la cerámica cocida con polvo elimina mejor la turbidez, ofreciendo mejores resultados en cuanto a la filtración de aguas poco turbias.

Por otro lado, el volumen filtrado en un período de 50 min ha resultado ser de 42 mL, en el caso del filtro cocido en viruta, y de 10 mL, en el caso del filtro cocido en polvo. Como se puede deducir, la viruta origina una red de poros más interconectada y amplia que en el otro caso, ofreciendo una mayor tasa de filtración.



Gráfica 15. Rendimientos de eliminación de turbidez (filtro cerámico).

## 6.6. Cloración

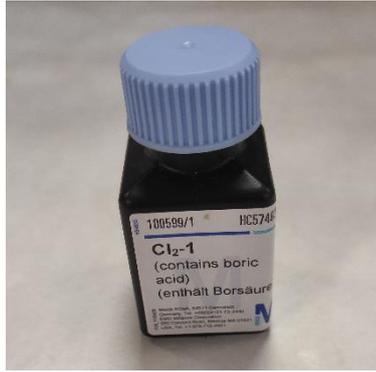
### 6.6.1. Materiales y procedimiento

Según la OMS, la concentración de cloro libre en el agua tratada debe estar entre 0,2 y 0,5 mg/l para que no suponga ningún problema para la salud. Por lo tanto, se darán por válidos los resultados que se encuentren en ese intervalo tras comprobar la eliminación de coliformes mediante cultivos.

El volumen de agua a tratar en cada experimento es de 100 mL, y se experimentó paralelamente con 3 aguas de distintas concentraciones bacteriológicas: agua residual diluida a 1/1.000, 1/10.000 y 1/100.000.

Para clorar el agua se empleó lejía de la marca “El Galgo” cuya disolución es de 40 gramos de cloro activo por litro.

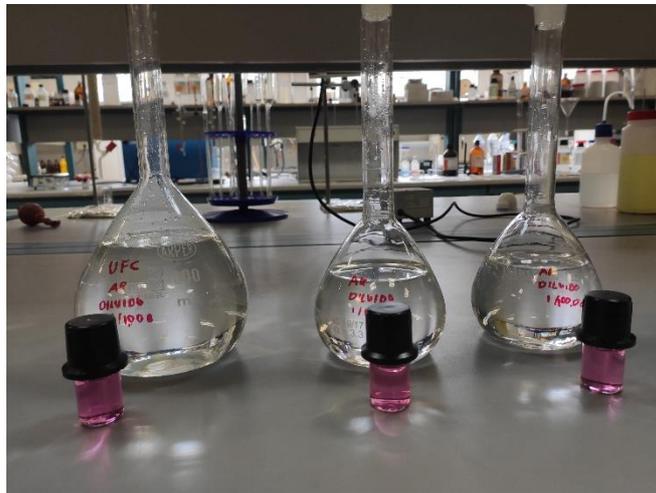
El material empleado es el reactivo del cloro Cl<sub>2</sub>-1 Spectroquant (Ilustración 37) y el HI 96711 Fotómetro Cloro Libre y Total (Ilustración 38). El reactivo disuelto en el agua dota al agua de un amplio abanico de color rosado (Ilustración 39). La intensidad de color será función del cloro libre que haya: cuanto menos cloro libre haya más tibio será el color rosado y viceversa. El resultado se puede comparar con una escala cromática e interpolar en el caso de que sea necesario. Sin embargo, se empleó un fotómetro para conseguir una mayor precisión.



*Ilustración 37. Reactivo del cloro Cl<sub>2</sub>-1 Spectroquant.*



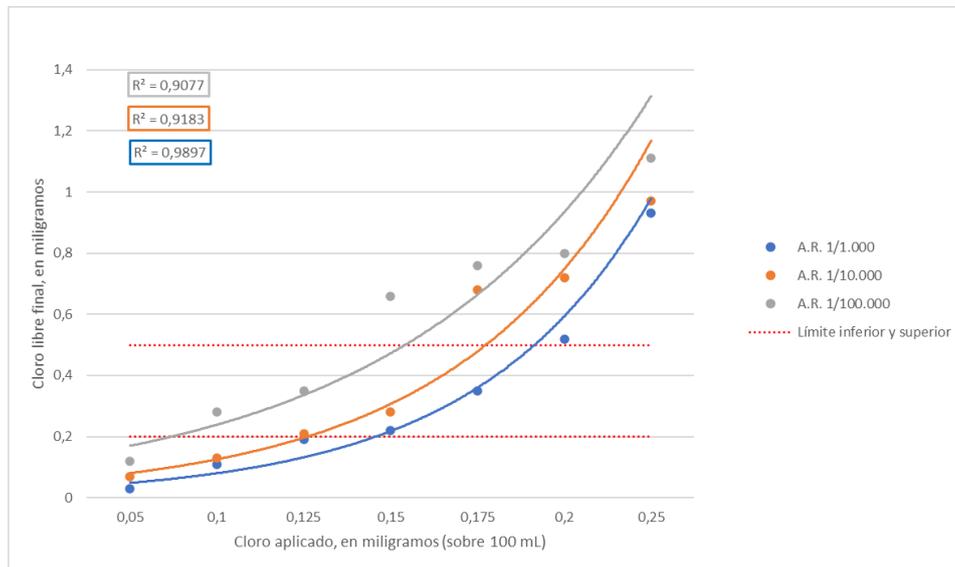
*Ilustración 38. Fotómetro Cloro Libre y Total.*



*Ilustración 39. Efecto del reactivo del cloro sobre el agua.*

### 6.6.2. Resultados

En la Gráfica 16 se muestran los resultados experimentales para cada tipo de agua y los límites marcados por la OMS.



Gráfica 16. Cloro aplicado frente a cloro libre.

Se ha comprobado mediante cultivos la eficacia de la cloración (Ilustración 40) y se ha determinado cuantitativamente la eliminación de microorganismos (Tabla 9). En el caso del agua diluida por 1/1.000, ha resultado insuficiente la aplicación de 0,15 mg/100 mL. Se aplicó 0,175 mg/100 mL y se comprobó una eficacia prácticamente del 100%. En cuanto al agua diluida por 1/10.000, se puede observar que no se han eliminado el 100% de los coliformes aplicando 0,125 miligramos. Sin embargo, al redondear posteriormente el resultado a un valor superior (de 2,5 a 3 gotas) se asegura una eliminación bacteriológica prácticamente completa. Por último, se aplicó 0,1 mg/100 mL al agua diluida por 1/100.000 y se comprobó una eficacia aproximadamente del 100%.



Ilustración 40 Resultados de los cultivos (cloración)

Cloración	Coliformes totales iniciales (UFC/100mL)	E. Coli iniciales (UFC/100mL)	Coliformes totales finales (UFC/100mL)	E. Coli finales (UFC/100mL)
1/1.000	~ 10 <sup>5</sup>	~ 10 <sup>5</sup>	0	0
1/10.000	50	50	3	3
1/100.000	7	7	1	1

Tabla 9. Resultados cuantitativos de eliminación de coliformes (cloración).

A partir de los resultados obtenidos, se han determinado los siguientes límites para 100 mL de agua a tratar (Tabla 10).

	A.R. 1/1.000	A.R. 1/10.000	A.R. 1/100.000
Límite superior	0,2 g	0,1625 g	0,1375 g
Límite inferior	0,175 g	0,15 g	0,1 g

Tabla 10. Límites de cloración.

En la Tabla 11 se extrapolan los resultados a distintos volúmenes. Cuando la situación lo ha requerido, los resultados se han redondeado a un valor superior para manejar valores más prácticos. Posteriormente, se ha comprobado que dichos valores están dentro de los límites aceptables (sobre 100 mL).

Lejía de 40 g Cl/L	Cloro necesario		
	A.R. 1/1.000	A.R. 1/10.000	A.R. 1/100.000
Demanda para 4 L	3 gotas	3 gotas	2 gotas
Demanda para 100 L	4,4 mL	3,75 mL	2,5 mL
Demanda para 500 L	22 mL	18,75 mL	12,5 mL
Demanda para 1000 L	44 mL	37,5 mL	25 mL
Comprobación	0,2 g	0,15 g	0,1 g

Tabla 11. Cloro necesario para lejía de 40g Cl/L.

A continuación, se muestra en la Tabla 12 y Tabla 13 el volumen de cloro necesario para distintas concentraciones de cloro en la lejía.

Lejía de 20 g Cl/L	Cloro necesario		
	A.R. 1/1.000	A.R. 1/10.000	A.R. 1/100.000
Demanda para 4 L	6 gotas	6 gotas	4 gotas
Demanda para 100 L	8,8 mL	7,5 mL	5 mL
Demanda para 500 L	44 mL	37,5 mL	25 mL
Demanda para 1000 L	88 mL	75 mL	50 mL

Tabla 12. Cloro necesario para lejía de 20g Cl/L.

Lejía de 10 g Cl/L	Cloro necesario		
	A.R. 1/1.000	A.R. 1/10.000	A.R. 1/100.000
Demanda para 4 L	12 gotas	12 gotas	8 gotas
Demanda para 100 L	17,6 mL	15 mL	10 mL
Demanda para 500 L	88 mL	75 mL	50 mL
Demanda para 1000 L	176 mL	150 mL	100 mL

Tabla 13. Cloro necesario para lejía de 10g Cl/L.

## 6.7. Tratamientos térmicos

### 6.7.1. Materiales y procedimiento

En cuanto a la ebullición (Ilustración 41), primero se hirvió el agua residual diluida a 1/1.000 y se mantuvo hasta un minuto después de que aparecieran las primeras burbujas grandes. El segundo experimento consistió en lo mismo que lo anterior, pero manteniéndolo 10 minutos tras las primeras burbujas grandes. Para ambos casos se dejó enfriar antes de tomar una muestra.



Ilustración 41. Hervor.

Para la pasteurización (Ilustración 42) se empleó un baño térmico para regular el agua a la temperatura deseada, por lo que resulta muy útil para este experimento. Para llevarlo a cabo, simplemente se insertó un matraz con agua residual diluida a 1/1.000 en su interior y se calentó a 65°C durante 30 min (tomando como minuto 0 una vez el agua haya alcanzado los 65°C). Finalmente, se dejó enfriar y se ha tomado una muestra.



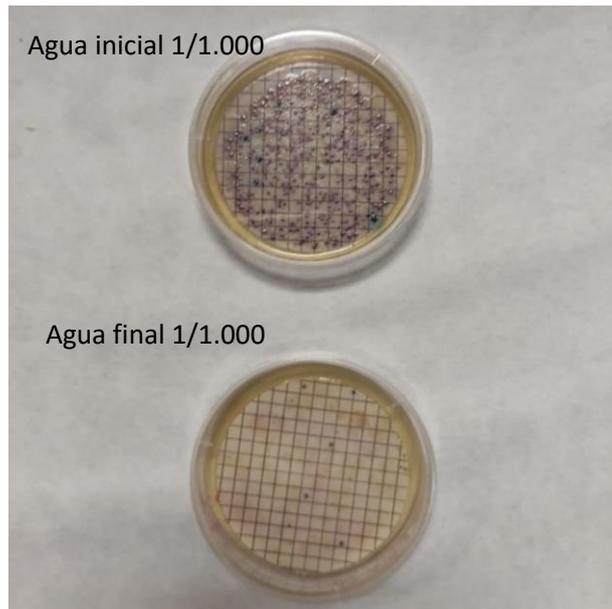
*Ilustración 42. Pasteurización.*

### **6.7.2. Resultados**

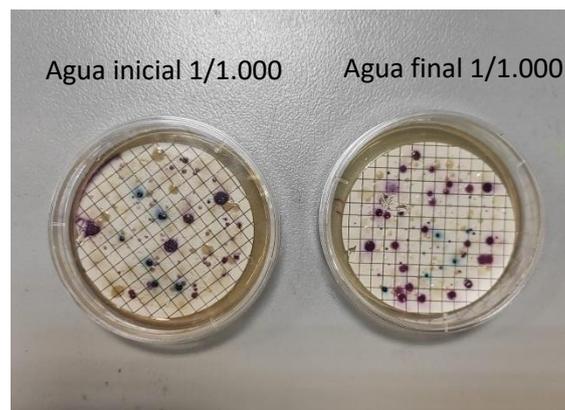
En las ilustraciones 43 y 44 se pueden observar los resultados de eliminación de microorganismos durante el hervor. En las ilustraciones 45 y 46 los resultados referentes a la pasteurización.



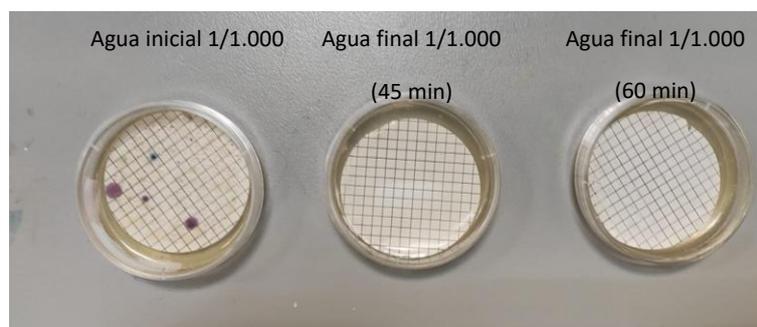
*Ilustración 43. Muestra de cultivo (hervor durante 1 min).*



*Ilustración 44. Muestra de cultivo (hervor durante 10 min).*



*Ilustración 45. Muestra de cultivo (65°C durante 30 min).*



*Ilustración 46. Muestra de cultivo (65°C durante 45 y 60 min).*

Como se puede observar, tanto el hervido como la pasteurización a 65°C son métodos muy eficaces para eliminar microorganismos, recomendándose un tiempo de hervido mayor a 10 minutos y una pasteurización mayor a 30 minutos. En las tablas 14 y 15 se muestran los resultados cuantitativos de eliminación de coliformes.



Hervido	Coliformes totales iniciales (UFC/100mL)	E. Coli iniciales (UFC/100mL)	Coliformes totales finales (UFC/100mL)	E. Coli finales (UFC/100mL)
1/1.000 (1 min)	~ 120	48	120	12
1/1.000 (10 min)	~ 500	50	12	5

Tabla 14. Eliminación de coliformes (hervor).

Pasteurización	Coliformes totales iniciales (UFC/100mL)	E. Coli iniciales (UFC/100mL)	Coliformes totales finales (UFC/100mL)	E. Coli finales (UFC/100mL)
1/1.000 (30 min)	250	12	70	12
1/1.000 (45 min)	500	50	0	0
1/1.000 (60 min)	~ 140	4	0	0

Tabla 15. Eliminación de coliformes (pasteurización).

## 6.8. Desinfección solar (SODIS)

### 6.8.1. Materiales y procedimiento

Se realizaron dos experimentos por el método SODIS. La localización en ambos casos fue Santander (Cantabria, España), cuyas coordenadas son 43°28'15.9"N 3°47'44.7"W. Según el criterio de localización anteriormente mencionado, la franja sería no muy favorable en cuanto a latitud. Ambos experimentos se realizaron en primavera, por lo que los resultados no serán tan eficaces como si fuera verano, aunque ambos días fueron soleados sin apenas nubosidad.

El procedimiento consistió en el llenado de la botella y, mientras tanto, ir agitando la botella para favorecer la oxigenación. A continuación, reposar las botellas al sol (Ilustración 47) durante aproximadamente 6 horas.

El material empleado fueron 3 botellas de plástico tipo PET de 1,5 litros de capacidad, de 7,5 cm de diámetro. Cada botella se llenó de agua residual diluida a 1/1.000, 1/10.000 y 1/100.000 UFC. En el proceso de llenado se iba agitando para oxigenar el agua y favorecer la inactivación indirecta. La turbidez del agua es muy baja (inferior a 5 UTN), por lo que su influencia en los resultados finales será insignificante. Visualmente el agua es completamente transparente, con lo cual no hay ningún colorante ni se ha añadido ningún aditivo para amplificar la inactivación.



*Ilustración 47. Método SODIS con botellas PET.*

El primer experimento se realizó el día 27 de mayo de 2021, durante un total de 6 horas: de 10:00 a 16:00. Según la base de datos meteorológica de AEMET, el 27 de mayo hubo un total de 13,3 horas de sol y se dio una temperatura máxima de 16,9°C a las 12:20 y la mínima, de 11,5°C, se dio a las 02:10, fuera de las horas de ensayo.

El segundo experimento se realizó el 7 de junio de 2021, durante un total de 6 horas y media: de 10:00 a 16:30. Durante ese período, el cielo estaba completamente despejado. Según la misma base de datos, hubo una temperatura máxima de 19,1 °C, que se dio en distintas horas, y una temperatura mínima de 13,3°C, que se dio a las 04:20.

### **6.8.2. Resultados**

Los resultados obtenidos se muestran en las ilustraciones 48 y 49.

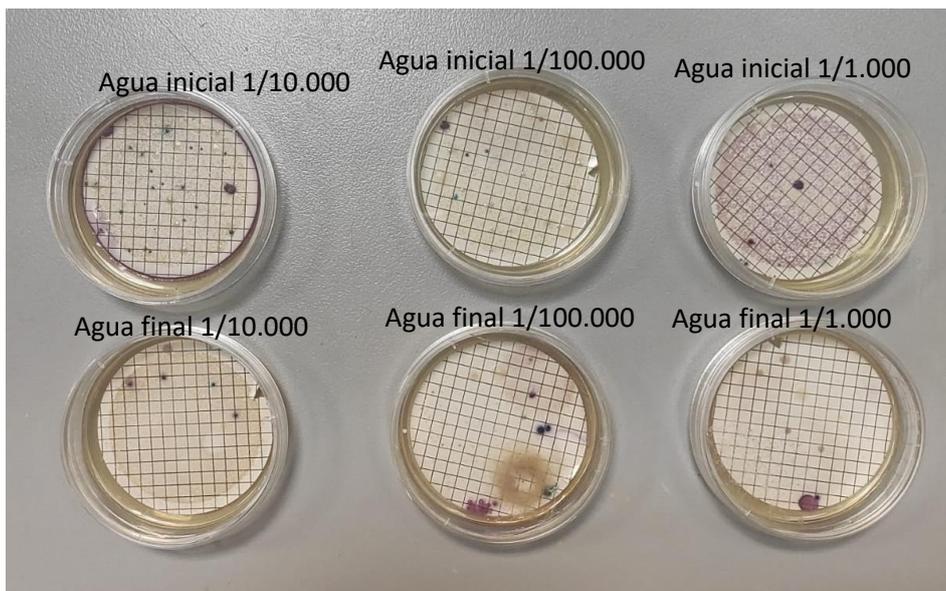


Ilustración 48. Resultados del primer experimento SODIS (27-05-2021).

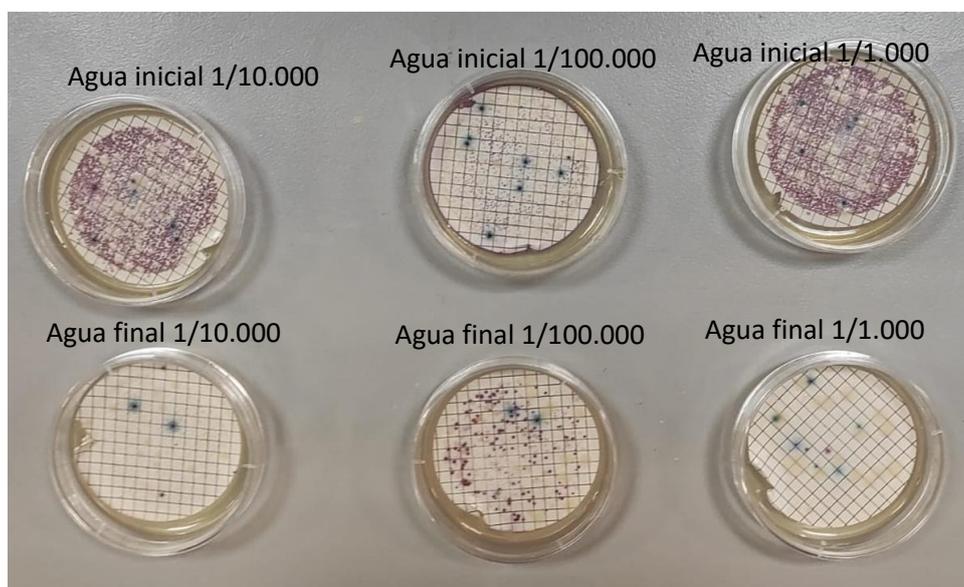


Ilustración 49. Resultados del segundo experimento SODIS (07-06-2021).

Como se puede observar en las ilustraciones 2 y 3, en el primer experimento ha habido cierta reducción de coliformes en el agua diluido a 1/1.000 y 1/10.000, no habiendo resultados muy apreciables en el agua diluida a 1/100.000. En cuanto al segundo experimento, ha habido una reducción drástica de coliformes, salvo en el agua 1/100.000, que la reducción ha sido ligeramente menor. Esto quizá se pueda deber a una inadecuada agitación de la botella durante el llenado o a una posición más desfavorable respecto a las otras 2 botellas durante la exposición solar. En las tablas 16 y 17 se muestran los resultados cuantitativos de eliminación de coliformes.

1er ensayo	Coliformes totales iniciales (UFC/100mL)	E. Coli iniciales (UFC/100mL)	Coliformes totales finales (UFC/100mL)	E. Coli finales (UFC/100mL)
1/1.000	~ 10 <sup>6</sup>	~ 10 <sup>6</sup>	~ 100	2
1/10.000	~ 10 <sup>8</sup>	28	~ 10 <sup>8</sup>	4
1/100.000	~ 10 <sup>6</sup>	4	~ 100	4

Tabla 16. Eliminación de coliformes (27-05-2021).



2o ensayo	Coliformes totales iniciales (UFC/100mL)	E. Coli iniciales (UFC/100mL)	Coliformes totales finales (UFC/100mL)	E. Coli finales (UFC/100mL)
1/1.000	~ 10 <sup>6</sup>	~ 10 <sup>6</sup>	~ 100	4
1/10.000	~ 100.000	~ 10.000	~ 300	~ 150
1/100.000	~ 10 <sup>6</sup>	~ 10 <sup>6</sup>	23	8

*Tabla 17. Eliminación de coliformes (07-06-2021).*



## 7. Conclusiones

Una vez estudiadas las distintas alternativas, conviene hacer una comparativa entre ellas, condensando la información que se ha ido aportando a lo largo del estudio. Los criterios seleccionados para analizar cada una de las alternativas son los siguientes:

- Eficiencia en eliminación de turbidez: Relación entre la turbidez eliminada y la turbidez inicial.
- Eficiencia en eliminación de microorganismos: Relación entre los microorganismos eliminados y los microorganismos iniciales.
- Caudal tratado: Se entiende por el volumen de agua tratado por unidad de tiempo. Cuanto mayor sea podrá abastecer a un mayor número de personas.
- Recursos y accesibilidad: Engloba tanto la cantidad de recursos empleados y su vida útil, como la accesibilidad a ellos. Se penaliza si se requiere importación de piezas de repuesto o materiales y se valora positivamente si el montaje se puede realizar con recursos locales.
- Sencillez en el montaje y explotación: Supone la complejidad en el entendimiento para población con baja cualificación técnica. Abarca tanto la fase de montaje como la de explotación. En el caso de que haya cierto grado de peligrosidad se valorará negativamente.
- Flexibilidad frente al agua a tratar: Se entiende por la capacidad de la tecnología para asimilar aguas de características dispares.
- Requisito climático: Las tecnologías que dependan de factores ambientales son penalizadas ya que se consideran menos accesibles.

Cada uno de los anteriores criterios se valorará numéricamente del 1 al 5 (salvo el requisito climático). Un valor de 1 no cumpliría dicho requisito y un valor de 5 lo cumple totalmente. Un guión indica que el requisito no se aplica a esa tecnología. Una vez establecidos los criterios y sistema de puntuación, conviene justificar cuantitativamente cada una de las tecnologías (para puntuar los criterios referentes a la eficiencia se considera los resultados obtenidos en este estudio). Cabe destacar que el factor cultural no se considera ya que varía para cada lugar y requeriría un estudio más concreto de la zona específica.

En cuanto a la cloración, su eficiencia frente a los microorganismos ha quedado patente. Además, requiere muy poca cantidad de cloro para grandes volúmenes de agua, aunque en ciertas zonas rurales requeriría una constante importación. No requiere montaje y su sencillez al uso es obvia, aunque puede haber cierta peligrosidad si no se dosifica correctamente. Baja flexibilidad frente al agua de entrada ya que no debe contener turbidez.

El filtro cerámico es relativamente eficaz frente a los microorganismos y extremadamente eficaz eliminando la turbidez. Sin embargo, el caudal aportado es bajo. Los recursos pueden ser locales y su vida útil es prácticamente ilimitada, aunque puede suponer un gasto energético elevado para sinterizar la cerámica. El montaje puede conllevar una limitación ya que requiere de la construcción de un horno y, además, supone cierta dificultad debido a que hay que controlar correctamente la proporción de agua, madera y barro. Su explotación no supone ningún problema, teniendo en cuenta que hay que revisar el filtro periódicamente para comprobar que no haya fisuraciones. El filtro cerámico es capaz de filtrar aguas de distintas turbideces y concentraciones de colonias.

La eficacia del hervido es muy elevada y en un tiempo relativamente corto. No obstante, requiere grandes cantidades de energía. Aunque la madera de combustible pueda ser un elemento al alcance de una gran parte de la población, el alto gasto energético implica una



limitación. Además, existe un componente de peligrosidad tanto por una posible inhalación de humos como por accidentes puntuales. Su montaje y uso es muy sencillo e intuitivo. Por último, al igual que en el caso de la cloración, no eliminaría la turbidez.

La eficacia de la pasteurización, al igual que el hervor, es muy elevada y en un período de tiempo aceptable. Para lograrlo, los recursos que se necesitan son pocos. Para tener constancia de que se ha alcanzado dicho fenómeno, se necesitaría un termómetro u otro artilugio. A pesar de que el hecho de tener que comprarlo penalice, es un insumo asumible debido a que es un gasto puntual y se podría conseguir, por ejemplo, en centros de salud. Por otro lado, si se emplea combustible supondría un gasto energético extra, y si se recurre a la energía solar habría una limitación atmosférica. Por ello, se considera insuficiente en cuanto al criterio de recursos y accesibilidad. Su sencillez en el montaje depende de los recursos que se dispongan, pudiéndose alcanzar a los 65°C de diversas maneras. La explotación de esta tecnología no entraña dificultad alguna (siempre que se disponga de los aparatos de medición adecuados). Por último, este método es eficaz para eliminar concentraciones de microorganismos, no así los sólidos en suspensión.

El filtro lento de arena ha demostrado ser muy eficiente frente a aguas poco turbias. No obstante, al funcionar por goteo, el caudal aportado es bajo. Además, aunque no se hayan obtenido resultados respecto a la eliminación de coliformes, muchos autores aseguran que es realmente competente una vez se haya formado la biopelícula. La fabricación se puede realizar con recursos locales, no obstante, convendría disponer de tamices para obtener una correcta granulometría, ya que de esta dependerá la formación de la biopelícula. Su montaje es relativamente sencillo, aunque hay que emplear una correcta granulometría para que no haya pérdidas de arena ni excesiva pérdida de carga. Su explotación no supone grandes dificultades siempre que se tenga bajo control la velocidad de entrada y el tipo de agua que se filtra. Puede filtrar aguas de gran turbidez, pero no es recomendable ya que se obstruiría con facilidad. A pesar de ello, el filtro lento ofrece cierta flexibilidad frente al agua entrante.

En cuanto al filtro de tela, ha demostrado, dentro de sus limitaciones, una adecuada eficiencia frente a la eliminación de turbidez. La tela puede ser de muchos materiales y está al alcance de cualquiera. Su sencillez al montaje y al uso es indudable. Gran flexibilidad respecto a un amplio espectro de turbideces.

La eficacia del filtro de pino es correcta, no así el caudal que aporta. Su uso se restringe a zonas con plantas coníferas y requiere una unión eficaz para impermeabilizar el plano entre el pino y el soporte, lo cual su uso se restringe aún más. Si se dispone de los materiales, su montaje y uso son sencillos e intuitivos. Ofrece cierta flexibilidad ya que, teóricamente, podría retener sólidos en suspensión, aunque habría métodos más eficientes.

En cuanto a la desinfección solar (SODIS), ha demostrado ser eficiente eliminando concentraciones de colonias. Sin embargo, requiere de una cantidad de tiempo considerable para que se eliminen los microorganismos. Requiere de pocos recursos, aunque puede que no sean locales. La vida útil, en el caso de usar plástico, es limitada. Su dependencia a la energía solar hace que esta tecnología sea menos accesible. Es un método muy sencillo e intuitivo, no obstante, hay que conocer el material que se utiliza y su tiempo de uso, ya que puede no haber penetración de radiación solar o haber traslado de partículas de plástico al agua. Su flexibilidad se limita a aguas sin turbideces.

Aunque haya tecnologías que sean mejores que otras en ciertos aspectos, desde una perspectiva global no se puede hacer una clasificación conjunta, ya que cada método tiene un área de



aplicación distinta: depende de los recursos locales, del tipo de agua a tratar, de la solvencia económica, de la aceptación cultural...

Una vez justificados todos los criterios de cada tecnología, las valoraciones cuantitativas finales se muestran en la Tabla 18.

	Eficiencia en eliminación de turbidez	Eficiencia en eliminación de microorganismos	Caudal tratado	Recursos y accesibilidad	Sencillez en el montaje y explotación	Flexibilidad frente al agua a tratar	Requisito climático
Cloración	-	5	5	2	4	1	No
Filtro cerámico	5	3	2	2	3	4	No
Hervor	-	5	4	2	3	1	No
Pasteurización	-	5	3	2	3	1	Sólo si la fuente de energía es solar
Filtro lento de arena	5	-	3	4	3	3	No, aunque bajas T <sup>o</sup> pueden causar congelación
Filtro rápido de arena	3	-	5	4	3	5	No
Filtro de tela	3	-	2	5	5	5	No
Filtro de rama de pino	-	3	1	1	4	2	No
Desinfección solar (SODIS)	-	3	2	4	4	1	Sí

*Tabla 18. Valoración numérica de las alternativas.*

Una vez valorada cuantitativamente cada alternativa, se expondrá a continuación dos casos ficticios de ejemplo para analizar qué tratamiento se emplearía.

El primer caso trata de un pequeño poblado que dispone del agua de un lago para abastecerse. El agua de dicho lago apenas tiene partículas sólidas en suspensión, sin embargo, hay riesgo de contraer enfermedades por la presencia de microorganismos. Por ello, las alternativas con mayor eficiencia serían la cloración, el hervor, la pasteurización y el filtro lento de arena. Entre ellas, la que más capacidad para abastecer tiene es la cloración, ya que se puede aplicar una dosis proporcional a volúmenes muy grandes y obtener agua tratada en muy poco tiempo. También se podría hervir y pasteurizar el agua, aunque para abastecer poblados requeriría grandes cantidades de energía. En el caso de no disponer de cloro ni de poder permitirse tal gasto energético, invertir en un filtro lento de arena sería una muy buena solución ya que, aunque el caudal aportado es relativamente bajo, no requiere de productos consumibles, como el cloro, ni de gasto energético, por lo que aporta estabilidad a lo largo del tiempo. Por último, en el caso de que las condiciones climáticas sean propicias, la desinfección solar es una solución adecuada, ya que puede abastecer a tantas personas como botellas se dispongan y no supone ninguna dificultad de operación.

En cuanto al segundo caso, se trata de un núcleo familiar que necesita agua potable y dispone del agua de un río turbio. En este caso, lo ideal sería concatenar varias alternativas para lograr el tratamiento completo. Por ello, una de las soluciones sería aplicar el filtro de tela y, posteriormente, desinfectar el agua mediante cloro, hervor, pasteurización o desinfección solar. Otras soluciones sería invertir en un filtro cerámico o un filtro lento de arena, de tal manera que



se abarque la eliminación de turbidez y de microorganismos en una sola etapa. Además, garantizaría el suministro durante un largo período de tiempo.

Como se podido observar de estos ejemplos, no hay una única solución que abarque todos los problemas, sino que cada alternativa se aplica a una circunstancia concreta, abriéndose un amplio abanico de posibilidades para cada situación.



## 8. Referencias

- 3M. (2010). *Guía de Interpretación. 3MTM Petrifilm™ Placas para Recuento de Aerobios*.  
[https://jornades.uab.cat/workshopmrama/sites/jornades.uab.cat/workshopmrama/files/Pettrifilm\\_guias.pdf](https://jornades.uab.cat/workshopmrama/sites/jornades.uab.cat/workshopmrama/files/Pettrifilm_guias.pdf)
- A. (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (22nd Revised ed.). Clearway Logistics Phase 1a.
- Acra, A., International Development Research Centre (Canada), Jurdi, M., Mu'Allem, H., Karahagopian, Y., & Raffoul, Z. (1990). *Water Disinfection by Solar Radiation*. International Development Research Centre.
- AEMET. (2021, 27 mayo). *Base de datos meteorológica. Consulta Datos diarios* [Conjunto de datos]. <https://datosclima.es/Aemethistorico/Meteosingleday.php>
- Alotaibi, M. A., & Heaselgrave, W. (2011). *Solar Disinfection of Water for Inactivation of Enteric Viruses and its Enhancement by Riboflavin* (N.º 3). *Food and Environmental Virology*. <https://doi.org/10.1007/s12560-011-9058-5>
- Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento. (1984). *Manual de cloración*. <https://www.asoaeas.com/sites/default/files/Documentos/AEAS.%20Manual%20de%20la%20Cloracion.pdf>
- Backer, H., & Hollowell, J. (2000). Use of iodine for water disinfection: iodine toxicity and maximum recommended dose. *Environmental Health Perspectives*, 108(8).  
<https://doi.org/10.1289/ehp.00108679>
- Barclay, G. F. (2015). *Anatomy and Morphology of Seed Plants*. eLS. Published.  
<https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0002068.pub2>
- Boutilier, M. S. H., Lee, J., Chambers, V., Venkatesh, V., & Karnik, R. (2014). Water Filtration Using Plant Xylem. *PLOS ONE*, 9(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0089934>
- Bruni, M. A., & Spuhler, D. (2018). *Filtración lenta de arena*. SSWM.  
<https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/filtraci%C3%B3n-lenta-de-arena>



- Carratalà, A., Meierhofer, R., Mattle, M. J., & Kohn, T. (2015, octubre). *Solar disinfection (SODIS) of viruses in PET bottles*. <https://doi.org/10.1128/AEM.02897-15>
- Casanova, V. (2012, 28 Junio). *¿Qué es el Espectro Electromagnético?*  
<https://www.astrofisicayfisica.com/2012/06/que-es-el-espectro-electromagnetico.html>
- Cervera, C. (2016, 13 mayo). *¿Cómo se puede obtener agua potable en alta mar usando una simple bolsa?* ABC. [https://www.abc.es/ciencia/abci-como-puede-destilar-agua-mar-usando-simple-bolsa-201605131810\\_noticia.html](https://www.abc.es/ciencia/abci-como-puede-destilar-agua-mar-usando-simple-bolsa-201605131810_noticia.html)
- Ciochetti, D. A., & Metcalf, R. H. (1983). *Pasteurization of Naturally Contaminated Water with Solar Energy*.  
[http://static3.wikia.nocookie.net/\\_\\_cb20101207224924/solarcooking/images/a/a0/Granda06\\_robert\\_metcalf.pdf](http://static3.wikia.nocookie.net/__cb20101207224924/solarcooking/images/a/a0/Granda06_robert_metcalf.pdf)
- Córdoba Parada, J.D., Acosta Alarcón R., Pacheco J. F., & Ramírez C. (2016, 27 marzo). *RECOPIACIÓN DE EXPERIENCIAS EN LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA POR MEDIO DEL USO DE FILTROS*. <https://hdl.handle.net/10656/8942>
- Estándares de la calidad del agua de la OMS*. (s. f.). Lenntech.  
<https://www.lenntech.es/estandares-calidad-agua-oms.htm>
- Fundación iO. (2020, 14 diciembre). *Los 10 países con menos agua potable*.  
<https://fundacionio.com/los-10-paises-con-menos-agua-potable/>
- García, E. V., Oria, J. S., Ayats, J. D., & Associació Catalana d'Enginyeria sense Fronteres. (2006). *Energía, participación y sostenibilidad*. Associació Catalana d'Enginyeria Sense Fronteres.
- Guerrero Latorre, L. (2016). *Estudis sobre la contaminació i desinfecció de virus entèrics en contexts d'ajuda humanitària*. <http://hdl.handle.net/2445/104249>
- Hernandez, A., Tejerina, F., Arribas, J. I., Martínez, L., & Martínez, F. (1990). *Microfiltración, ultrafiltración y osmosis inversa* (Vol. 4). Editum. Ediciones de la Universidad de Murcia.



- Huisman, L. (1974). *SLOW SAND FILTRATION*. World Health Organization.  
<https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/38974/9241540370.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Lantagne, D. S., & Ambiental, A. (2001, diciembre). *Investigación del filtro de barro impregnado con plata coloidal promovido por Ceramistas Por La Paz*. USAID.  
<http://www.recintodesign.com/filtroekofil.com/estudios/Daniele%20S.%20Lantagne%20USAID%202001.pdf>
- Lenntech. (s. f.). *Tecnología de membrana*. <https://www.lenntech.es/tecnologia-de-membrana.htm>
- Lu, W.-M., Tung, K.-L., & Hwang, K.-J. (1996). *Fluid Flow Through Basic Weaves of Monofilament Filter Cloth*. *Textile Research Journal*.  
<https://doi.org/10.1177/004051759606600505>
- Metcalf, R. (2006). *THE MICROBIOLOGY OF SOLAR WATER PASTEURIZATION, WITH APPLICATIONS IN EAST AFRICA*.  
[http://static3.wikia.nocookie.net/\\_\\_cb20101207224924/solarcooking/images/a/a0/Granda06\\_robert\\_metcalf.pdf](http://static3.wikia.nocookie.net/__cb20101207224924/solarcooking/images/a/a0/Granda06_robert_metcalf.pdf)
- Metcalf, R., & PONCE-CORRAL, C. (2008). *THE MICROBIOLOGY OF SOLAR WATER PASTEURIZATION, WITH APPLICATIONS IN EAST AFRICA*.  
[http://static3.wikia.nocookie.net/\\_\\_cb20101207224924/solarcooking/images/a/a0/Granda06\\_robert\\_metcalf.pdf](http://static3.wikia.nocookie.net/__cb20101207224924/solarcooking/images/a/a0/Granda06_robert_metcalf.pdf)
- Michen, B., Graule, T. (2010). *Isoelectric points of viruses*. *J. Appl. Microbiol.* 109, 388–97.  
[doi:10.1111/j.1365-2672.2010.04663.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2010.04663.x)
- Moro González, A. (2011, 31 marzo). *Contaminación del agua potable: problemas microbiológicos*. Interempresas. <https://www.interempresas.net/Agua/Articulos/50288-Contaminacion-del-agua-potable-problemas-microbiologicos.html>
- Mourato, D. (1998). *Microfiltración y nanofiltración en el área de agua potable*. ZENON Environmental Inc. <https://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/1/13/18/677.pdf>



- Organización Mundial de la Salud. (2009). *Medición del cloro residual en el agua* (N.º 11).  
 Guías técnicas sobre saneamiento, agua y salud. <http://www.disaster-info.net/Agua/pdf/11-CloroResidual.pdf>
- Organización Mundial de la Salud. (2019, 14 junio). *Agua*. Who. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Pilatowsky, Isaac. (2021). *Psicrometría, métodos de humidificación y dehumidificación y sus aplicaciones en el diseño*
- R. (2021, 8 junio). *Warka Water. La torre de bambú que produce hasta 100 litros de agua al día*. EcoInventos. <https://ecoinventos.com/warkawater/>
- S. (2019, 15 abril). *Humedad relativa, específica y absoluta [Carta Psicométrica] | S&P*. S&P Sistemas de Ventilación. <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/humedad-relativa-especifica-absoluta/>
- Sánchez, J. (2021, 18 enero). *Plantas gimnospermas: qué son, características y ejemplos*. [ecologiaverde.com. https://www.ecologiaverde.com/plantas-gimnospermas-que-son-caracteristicas-y-ejemplos-1970.html](https://www.ecologiaverde.com/plantas-gimnospermas-que-son-caracteristicas-y-ejemplos-1970.html)
- Shrestha, L. G., Shrestha, R., & Spuhler, D. (2018). *Ebullición*. SSWM. <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/ebullici%C3%B3n>
- Shrestha, R., Spuhler, D., & Dangol, B. (2018). *Cloración*. SSWM. <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/cloraci%C3%B3n>
- Spuhler, D., & Meierhofer, R. (2018). *Desinfección solar (método SoDis)*. SSWM. <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/manejo-seguro-en-el-hogar/desinfecci%C3%B3n-solar-%28m%C3%A9todo-sodis%29>
- Suárez López, J., Jácome Burgos, A., & Ures Rodríguez, P. (2014, septiembre). *FILTRACIÓN EN MEDIO GRANULAR (FT-TER-002)*.



<https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Filtraci%C3%B3n+en+medio+granular.pdf>

Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., & Zurbrügg, C. S. R. Y. (2018, 11 diciembre). *Humedal artificial de flujo superficial libre*. SSWM - Find tools for sustainable sanitation and water management! <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-saneamiento/tratamiento-semi-centralizado/humedal-artificial-de-flujo-superficial-libre>

Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., & Zurbrügg, C. S. R. Y. (2018b, diciembre 12). *Laguna de plantas flotantes*. SSWM - Find tools for sustainable sanitation and water management! <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-saneamiento/uso-yo-disposicion-final/laguna-de-plantas-flotantes>

UNESCO. (2021). *Valorar los servicios de suministro de agua y de saneamiento*.

<http://www.unesco.org/reports/wwdr/2021/es/valorar-los-servicios-de-suministro-de-agua-y-de-saneamiento>

United States Environmental Protection Agency. (2015, junio). *EMERGENCY DISINFECTION OF DRINKING WATER*.

[https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/EPA%202015.%20Emergency%20disinfection%20of%20drinking%20water.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/EPA%202015.%20Emergency%20disinfection%20of%20drinking%20water.pdf)

Visscher, J. T., & Galvis C., G. (1987). *Filtración Lenta en Arena y Pretratamiento*.

<https://es.ircwash.org/sites/default/files/255.1-87FI-4892.pdf>

Zabala, N., & Pérez De Armiño, K. (s. f.). *Tecnología apropiada*. Hegoa.

<https://www.dicc.hegoa.ehu.eus/listar/mostrar/214>