

**EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DEL AGENTE ACTIVO QUÍMICO PARA EL
CONTROL DE BACTERIAS EN CAMPOS PETROLEROS**

VÍCTOR MANUEL PATIÑO PORRAS



**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE METALÚRGIA
Tunja
2019**

**EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DEL AGENTE ACTIVO QUÍMICO PARA EL
CONTROL DE BACTERIAS EN CAMPOS PETROLEROS**

VÍCTOR MANUEL PATIÑO PORRAS

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
MAGISTER EN GESTIÓN DE INTEGRIDAD Y CORROSIÓN**

**Director
PhD ENRIQUE VERA LÓPEZ**



**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE METALURGIA
TUNJA
2019**

“La autoridad científica de la Facultad de Ingeniería reside en ella misma, por lo tanto, no responde por las opiniones expresadas en este proyecto”.

Se autoriza la reproducción indicando su origen.

Nota de aceptación:

Firma del Director

Firma Presidente del jurado

Firma del jurado

Santa fe de Bogotá, Mayo de 2019

*Al Dios todopoderoso, por ser la verdad, el camino,
la vida y permitirme hacer realidad este sueño
y poder compartirlo con mis padres.*

*Al mi esposa Frika por el Amor, la confianza y el apoyo
invaluable que me brinda en todo momento.*

Al mi hijo Manuel José, tu eres mi mundo.

*Al mis Padres y hermanos, ustedes saben que también
son importantes en mi vida, porque estuvieron en los
momentos que más los necesite, los quiero.*

Al mis Mentores: Mi eterna gratitud

Al mi equipo de trabajo Clariant: Mi lealtad y amistad sincera

Al la empresa Clariant: El enriquecimiento de las experiencias adquiridas

VÍCTOR MANUEL PATIÑO PORRAS

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios

A la Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Por abrirme las puertas del saber y formarme como Magister en Gestión de Integridad y Corrosión

Al PhD. Enrique Vera López. Director del Proyecto. Por la confianza depositada en mí, por sus consejos, comentarios que me han servido de mucho, así como por el enriquecimiento a este trabajo a través de sus conocimientos y experiencia, muchas gracias

A la empresa Clariant y en especial a los ingenieros Ana María Santiago y Jorge Ávila. Por sus consejos, colaboración y apoyo que me facilitaron la realización de esta tesis.

Sin ustedes todo hubiese sido difícil.

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN	12
1. MARCO TEÓRICO	14
1.1. INYECCION DE AGUA	14
1.2. TIPOS DE INYECCION	15
1.2.1. Inyección Periférica o Externa.....	15
1.2.2. Inyección en arreglos o dispersa.....	17
1.3. CORROSIÓN INDUCIDA MICROBIOLÓGICAMENTE (MIC)	18
1.4. MICROORGANISMOS PERTURBADORES EN LOS SISTEMAS DE INYECCION DE AGUA	23
1.5. BACTERIAS SULFATO REDUCTORAS. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	23
1.6. ESTRUCTURA CELULAR.	25
1.7. METABOLISMO DE LAS BSR	26
1.8. REDUCCION DE SULFATOS.....	28
1.9. CRECIMIENTO MICROBIANO	30
1.10. MEDICIÓN DEL CRECIMIENTO DE MICROORGANISMOS	32
1.10.1. Métodos para calcular el Número de Células.....	32
1.11. FORMACION Y FUNCION DE LA BIOPELICULA	35
1.11.1. Etapas de formación de la biopelícula.....	35
1.11.2. Estratificación de la biopelícula en medios naturales	37
1.12. PREVENCIÓN Y CONTROL DE BIOCORROSION Y BIOENSUCIAMIENTO.....	38
1.12.1. Métodos usados para prevenir y controlar la Biocorrosion.....	38
1.12.2. Biocidas.....	39
1.13. SURFACTANTES Y COSURFACTANTES	44
1.13.1. Propiedades de los surfactantes	45
1.13.2. Tipos de Surfactantes	47
1.14. TÉCNICAS PARA EVALUACIONES DE BIOCIDAS.....	48
1.14.1. Prueba de densidad relativa de población Sesil.....	48
1.14.2. Técnica de Inhibición.....	48
1.14.3. Técnica del Número más probable (NMP)	48
1.15. PROCESO PRODUCTIVO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES COLOMBIA_1	49
1.15.1. INYECCIÓN DE QUÍMICA	55
2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	57

2.1. Seguimiento de las condiciones de operación de la planta	57
2.1.1. Evaluación de la naturaleza y características físico-químicas del agua. 57	
2.1.2. Tratamiento químico aplicado y puntos de inyección.	58
2.2. Pruebas de laboratorio para la selección del biocida más eficiente.	59
2.3. Preparación de los Medios de Cultivos.	62
2.4. Retiro de la biocuponera en Planta.	62
2.5. Proceso de inoculación.	62
2.6. Ensayo y/o Prueba de Matanza.	63
2.6.1. Evaluación de los Biocidas.....	64
2.6.2. Observación de Viales.	67
2.6.3. Selección del Biocida.	67
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	68
3.1. CARACTERIZACION DEL AGUA	68
3.2. EVALUACION DE LOS BIOCIDAS	70
3.2.1. Biocidas con base THPS.....	70
3.2.2. Biocidas con base Aldehidos.....	74
3.2.3. Biocidas con base sales de amonio cuaternaria (SAC).....	77
3.3. Análisis Económico	84
CONCLUSIONES	87
RECOMENDACIONES.....	88
BIBLIOGRAFÍA.....	89

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema del desplazamiento de petróleo por agua en un canal de flujo.	15
Figura 2. Inyección de agua externa o periférica	16
Figura 3. Inyección de agua en un arreglo de 5 pozos	17
Figura 4. Mecanismo propuesto de MIC en la corrosión del hierro y el acero al carbono	22
Figura 5. Esquema de una célula bacteriana.....	26
Figura 6. Visión simplificada del metabolismo célula	27
Figura 7. Bioquímica de la reacción de sulfato (a) Dos formas de sulfato activo. (b) Esquema de la Reducción asimilatoria y desasimilatoria	29
Figura 8. Curva de crecimiento de un microorganismo.....	30
Figura 9. Proceso de Fisión Binaria	31
Figura 10. Contaje microscópico directo	33
Figura 11. Métodos para realizar un contaje de viables.....	34
Figura 12. Función de la Biopelícula.....	37
Figura 13. Estructura molecular de las Sales de amonio cuaternario	41
Figura 14. Estructura molecular del THPS.....	43
Figura 15. Estructura de la molécula de surfactante.....	45
Figura 16. Fenómeno de adsorción de un surfactante.....	46
Figura 17. Fenómeno de asociación de un surfactante.	47
Figura 18. Separador API	49
Figura 19. Formación de lodo en un DAF	50
Figura 20. Contacto de las partículas con el medio filtrante.	52
Figura 21. Mecanismos que producen el transporte de las partículas hasta los granos del lecho filtrante	53
Figura 22. Esquema de la acción de los polímeros en un medio granular.....	54
Figura 23. Esquema de la Planta de Tratamiento de Efluentes Colombia 1.....	56
Figura 24. Biocuponera.....	59
Figura 25. Ubicación de la biocuponera en la Planta Colombia_1.....	60
Figura 26. Materiales utilizados para la inoculación de BSR Sésiles.....	63
Figura 27. Bio-reactor	63
Figura 28. Diagrama de la prueba de matanza.....	65
Figura 29. Detalle del contacto de los cupones con la solución de biocida	65
Figura 30. Diluciones Seriadas	66
Figura 31. Incubadora.....	66
Figura 32. Valores de hierro y sólidos obtenidos en la entrada de los filtros	68
Figura 33. Temperatura y pH del agua a la entrada de los filtros.	68

Figura 34. Contenido de oxígeno y H ₂ S en la entrada de los filtros	69
Figura 35. Valores de dureza total, alcalinidad y cloruros en la entrada de los filtros	69
Figura 36. Numero de BSR presentes en el sistema	70
Figura 37. Comportamiento de los biocidas base THPS a los 15 días de incubación y 2 horas de contacto.....	79
Figura 38. Comportamiento de los biocidas base aldehídos a los 15 días de incubación y 2 horas de contacto.....	79
Figura 39. Comportamiento de los biocidas base SAC a los 15 días de incubación y 2 horas de contacto.....	80
Figura 40. Comportamiento de los biocidas más eficientes a los 15 días de incubación y 2 horas de contacto.....	81
Figura 41. Comportamiento de los biocidas base THPS a los 15 días de incubación y 3 horas de contacto.....	82
Figura 42. Comportamiento de los biocidas base SAC a los 15 días de incubación y 3 horas de contacto.....	82
Figura 43. Comportamiento de los biocidas base SAC a los 15 días de incubación y 3 horas de contacto.....	83
Figura 44. Comparación del comportamiento de los biocidas más eficientes a los 15 días de incubación y 3 horas de contacto.	83
Figura 45. Costo anual del tratamiento por producto	86

LISTADO DE TABLAS

Pág.

Tabla 1.: Géneros conocidos de BSR. Características principales	24
Tabla 2.: Tipos de biocidas y su sitio de acción	44
Tabla 3.: Nomenclatura de los biocidas	59
Tabla 4.: Cálculo del Caudal de la biocuponera	61
Tabla 5.: Cálculo del caudal de la biocuponera para obtener un Flujo Laminar	61
Tabla 6.: Esquema de evaluación de los biocidas	64
Tabla 7.: Resultados de la evaluación de los biocidas con base THPS a 3 y 5 días después de la inoculación	71
Tabla 8.: Resultados de la evaluación de los biocidas con base THPS a los 15 y 21 días después de la inoculación.....	72
Tabla 9.: Resultados de la evaluación de los biocidas con base aldehídos a 3 y 5 días después de la inoculación	75
Tabla 10.: Resultados de la evaluación de los biocidas con base aldehídos a los 15 y 21 días después de la inoculación.....	76
Tabla 11. Resultados de la evaluación de los biocidas con base sal de amonio cuaternario (SAC) a los 3 y 5 días después de la inoculación	77
Tabla 12.: Resultados de la evaluación de los biocidas con base sal de amonio cuaternario (SAC) a los 15 o 21 días después de la inoculación	78
Tabla 13.: Parámetros de Inyección	84
Tabla 14.: Cantidad de biocida y costos para un año de tratamiento	85

INTRODUCCIÓN

La corrosión microbiológicamente inducida (MIC) es una corrosión afectada por la presencia y/o actividad de microorganismos. Estos típicamente se encuentran en un Biofilm o tapiz bacteriano en la superficie del material corrosivo. Muchos materiales incluyendo la mayoría de los metales y algunos no-metales, pueden degradarse por este mecanismo; una de las técnicas de mitigación de este fenómeno es la aplicación de un tratamiento químico de Biocidas donde la tarea principal es mantener en control o disminuir (aniquilar) las bacterias, y por tanto reducir la probabilidad de MIC; en lo posible este tratamiento químico debe ser dirigido a la fuente original de las bacterias en lugar de tratar toda la tubería. Los biocidas se clasifican en dos grandes grupos: Oxidantes y No oxidantes.

Para poder determinar el biocida a aplicar se debe realizar:

- Evaluación sucesiva del sistema
- Caracterización fisicoquímica del fluido
- Pruebas de laboratorio sobre mortalidad
- Pruebas de campo en bacterias planctónicas (flujo libre)
- Compatibilidad Química
- Costo vs eficiencia.

Actualmente el agente químico base en los biocidas más usados para el tratamiento químico de control MIC son:

- THPS
- Aldehídos
- Sales de Amonio Cuaternaria (SAC)

Para lograr un control adecuado al crecimiento microbacteriano se hace necesario caracterizar el tipo de especie de bacteria que se encuentra en el sistema y establecer mediante pruebas de laboratorio y de campo la eficacia del biocida a emplear. Dado que actualmente en la industria se aplican biocidas para el control de bacterias como recetas sin tener en cuenta la molécula que debe ser atacada seleccionando correctamente el agente activo químico que da lugar al Biocida.

Se tomarán muestras de campo en condiciones reales de operación y se realizan siembras de muestras en las que se evaluará el tiempo de crecimiento y la cuantificación de las bacterias presentes en el sistema, posteriormente se

plantearan y seleccionaran los posibles agentes químicos activos para su control en las menores dosis posibles de inyección logrando la mejor relación de agente activo y dosis de inyección.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. INYECCIÓN DE AGUA¹

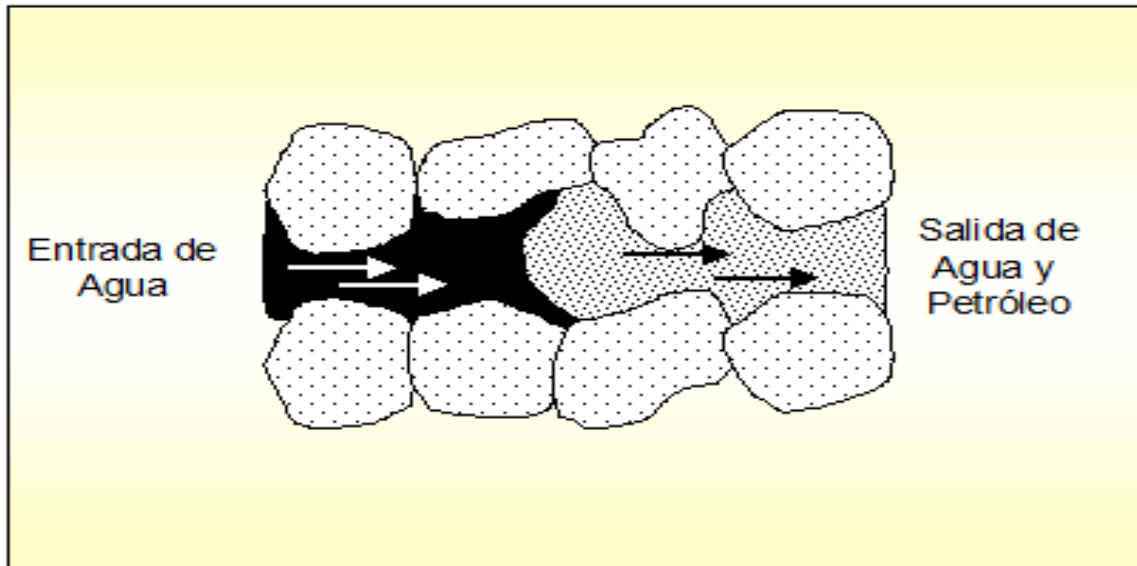
La inyección de agua tuvo sus comienzos en la ciudad de Pithole, al oeste de Pennsylvania, en el año 1865. Como sucede frecuentemente en el desarrollo de nuevas tecnologías, la primera inyección ocurrió accidentalmente cuando el agua, proveniente de algunas arenas de acuíferas poco profundas o de acumulaciones de aguas superficiales, se movía a través de las formaciones petrolíferas, entraba al intervalo productor en los pozos perforados e incrementaba la producción de petróleo en los pozos vecinos. En esa época se pensó que la función principal de la inyección del agua era la de mantener la presión del yacimiento y no fue sino hasta los primeros años de 1890, cuando los operadores notaron que el agua que había entrado a la zona productora había mejorado la producción.

Para 1907, la práctica de la inyección de agua tuvo un apreciable impacto en la producción de petróleo del Campo Bradford. El primer patrón de flujo, denominado una invasión circular, consistió en inyectar agua en un solo pozo; a medida que aumentaba la zona invadida y que los pozos productores que la rodeaban eran invadidos con agua, estos se iban convirtiendo en inyectores para crear un frente más amplio. Este método se expandió lentamente en otras provincias productoras de petróleo debido a varios factores, especialmente a que se entendía muy poco y a que muchos operadores estuvieron en contra de la inyección de agua dentro de la arena. Además, al mismo tiempo que la inyección de agua, se desarrolló la inyección de gas, generándose en algunos yacimientos un proceso competitivo entre ambos métodos.

En 1921, la invasión circular se cambió por un arreglo en línea, en el cual dos filas de pozos productores se alternaron en ambos lados con una línea igual de pozos inyectores. Para 1928, el patrón de línea se reemplazó por un arreglo de 5 pozos. Después de 1940, la práctica de la inyección de agua se expandió rápidamente y se permitieron mayores tasas de inyección producción. En la actualidad, la inyección de agua es el principal y más conocido de los métodos de recuperación secundaria, constituyéndose en el proceso que más ha contribuido al recobro del petróleo extra. Hoy en día, más de la mitad de la producción mundial de petróleo se debe a la inyección de agua. La Figura 1 presenta el esquema del desplazamiento de petróleo por agua en un canal de flujo.

¹ PARIS DE FERRER, M. Inyección de agua y gas en yacimientos petrolíferos. Segunda Edición. Ediciones Astro. Maracaibo, Venezuela, 2001

Figura 1. Esquema del desplazamiento de petróleo por agua en un canal de flujo.



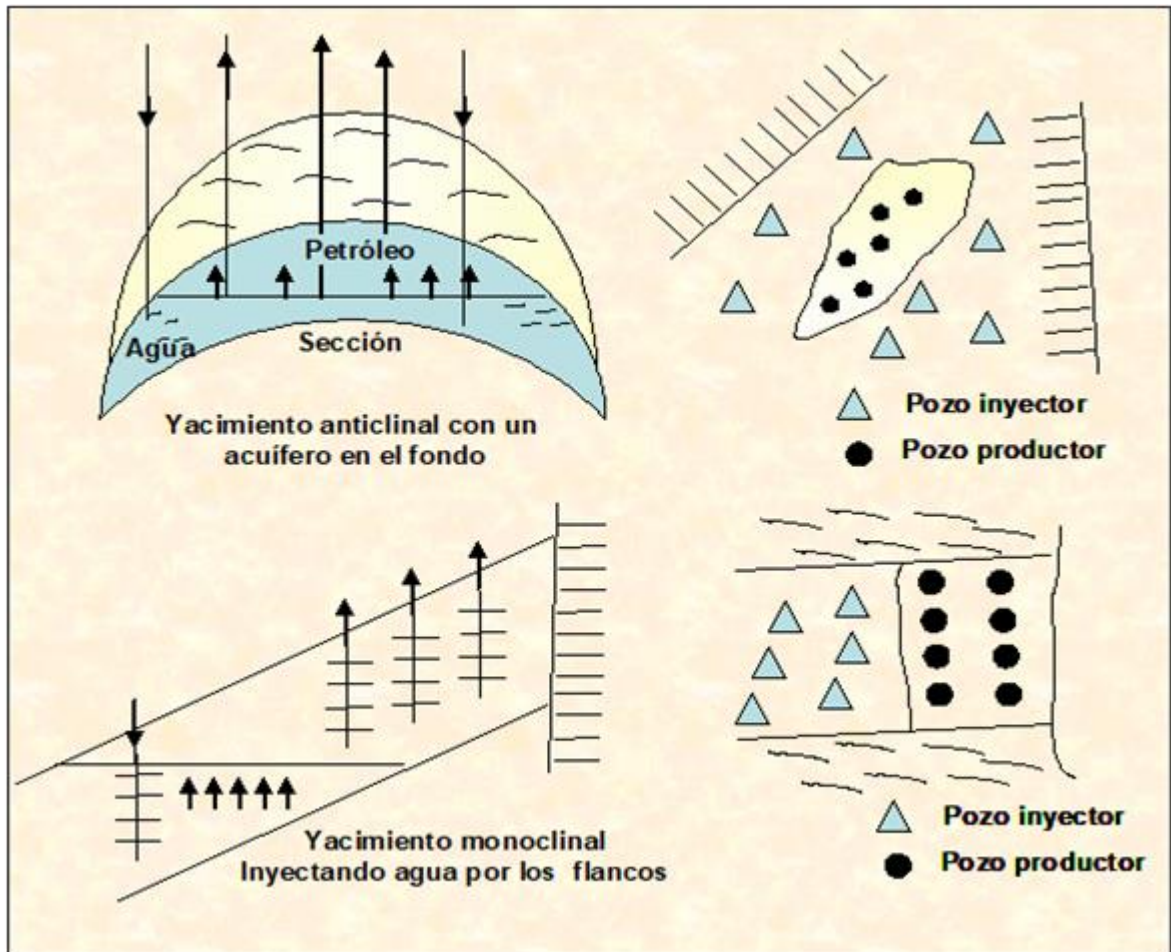
Fuente: Inyección de agua y gas en yacimientos petrolíferos. Segunda Edición. Ediciones Astro. Maracaibo, Venezuela. 2001. **Paris de Ferrer, M.**

1.2. TIPOS DE INYECCIÓN

De acuerdo con la posición de los pozos inyectoros y productores, la inyección de agua se puede llevar a cabo de dos formas diferentes: inyección periférica o externa y la inyección por arreglos o dispersa.

1.2.1. Inyección Periférica o Externa. La inyección periférica o externa consiste en inyectar el agua fuera de la zona de petróleo, en los flancos del yacimiento. Se conoce también como inyección tradicional y en este caso, como se observa en la Figura 2, el agua se inyecta en el acuífero cerca del contacto agua - petróleo.

Figura 2. Inyección de agua externa o periférica



Fuente: Inyección de agua y gas en yacimientos petrolíferos. Segunda Edición. Ediciones Astro. Maracaibo, Venezuela. 2001. **Paris de Ferrer, M.**

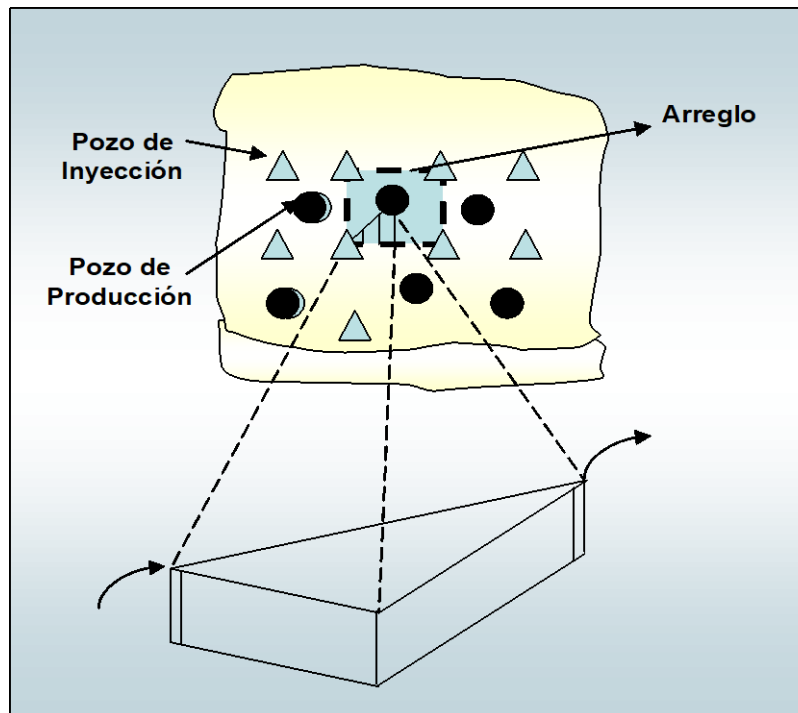
Características:

1. Se utiliza cuando no se posee una buena descripción del yacimiento y/o la estructura del mismo favorece la inyección de agua.
2. Los pozos de inyección se colocan en el acuífero, fuera de la zona de petróleo.

1.2.2. Inyección en arreglos o dispersa

La inyección en arreglos o dispersa consiste en inyectar el agua dentro de la zona de petróleo. El agua invade esta zona y desplaza los fluidos (petróleo/gas) del volumen invadido hacia los pozos productores. Este tipo de inyección también se conoce como inyección de agua interna, ya que el fluido se inyecta a la zona de petróleo a través de un número apreciable de pozos inyectoros que forman un arreglo geométrico con los pozos productores, tal como se observa en la Figura 3.

Figura 3. Inyección de agua en un arreglo de 5 pozos



Fuente: Inyección de agua y gas en yacimientos petrolíferos. Segunda Edición. Ediciones Astro. Maracaibo, Venezuela. 2001. **Paris de Ferrer, M.**

Características:

1. La selección del arreglo depende de la estructura y límites del yacimiento, de la continuidad de las arenas, de la permeabilidad (k), de la porosidad (ϕ) y del número y posición de los pozos existentes.
2. Se emplea, particularmente, en yacimientos con poco buzamiento y una gran extensión areal.

3. A fin de obtener un barrido uniforme, los pozos inyectoros se distribuyen entre los pozos productores, para lo cual se convierten los pozos productores existentes en inyectoros, o se perforan pozos inyectoros interespaciados. En ambos casos, el propósito es obtener una distribución uniforme de los pozos, similar a la utilizada en la fase primaria de recobro.

1.3. CORROSIÓN INDUCIDA MICROBIOLÓGICAMENTE (MIC)²

La Corrosión Inducida Microbiológicamente (MIC) puede definirse como un fenómeno de destrucción en el cual los microorganismos, actúan directamente o indirectamente por medio de sustancias provenientes de su metabolismo. Los microorganismos desempeñan un papel importante al acelerar el proceso de corrosión establecido o al crear condiciones favorables para que ésta se produzca.

La corrosión microbiológica está directamente relacionada con el proceso de corrosión electroquímico, interviniendo en el proceso un tercer elemento: los microorganismos. La acción de los microorganismos, se hará presente en cualquier lugar donde existan las condiciones ambientales adecuadas y el elemento necesario para obtener energía y reproducirse. La presencia de iones como Fe^{+2} , Mn^{+2} , SO_4^- , o derivados azufrados en medios acuosos, independientemente de que el agua sea dulce o salada, favorece la proliferación de microorganismos como las bacterias; ya que son iones que ellas utilizan para obtener la energía necesaria para su crecimiento.

La investigación de un proceso de MIC envuelve el estudio de la adhesión de los microorganismos al sustrato metálico, el metabolismo de las colonias en la superficie del metal y las interacciones bacteria-metal. En todos los casos se encuentra una zona **anódica** donde se produce la disolución del metal, mientras ocurre simultáneamente la reducción de algún componente del medio a través de la correspondiente reacción catódica.

Algunas de las condiciones que dan lugar a la corrosión microbiana son:

- Aparición de celdas de aireación diferencial por un desigual consumo de oxígeno en zonas localizadas, lo cual propicia las condiciones necesarias para que los microorganismos proliferen.

² ROMERO, M. Estudio Mecánico de la acción de las BSR en la Corrosión del acero al carbono utilizando Permeación de Hidrógeno y Polarización Catódica. Tesis de Doctorado. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela, 2004.

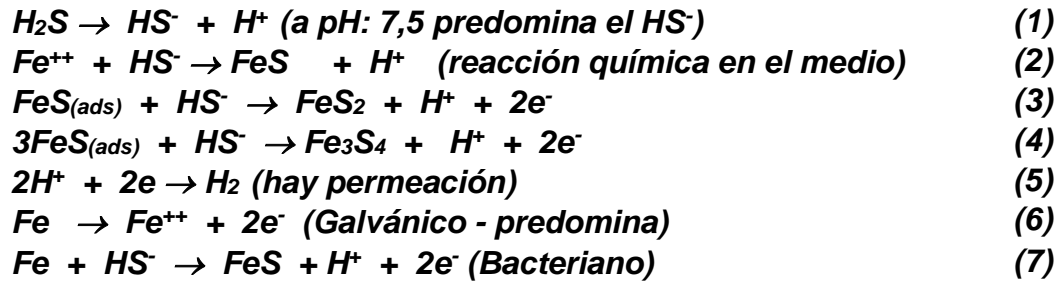
- Producción de sustancias corrosivas generadas por el crecimiento o metabolismo de los microorganismos, transformando un medio originalmente inerte en agresivo.
- Alteración microbiana de películas protectoras, productos de corrosión o revestimientos, formados natural o artificialmente.
- Consumo, por acción de los microorganismos, de sustancias inhibidoras de corrosión, facilitando de esta forma la acción de iones agresivos presentes en el medio o producidos por el metabolismo bacteriano.
- Despolarización de los procesos catódicos y/o anódicos, provocando un aumento de la velocidad de corrosión.

A continuación, se describe el mecanismo de acción de la corrosión inducida microbiológicamente desarrollado por Romero (2004), para la acción de las bacterias sulfato reductoras (BSR) en la corrosión del acero al carbono, utilizando técnicas de permeación de hidrógeno y polarización catódica.

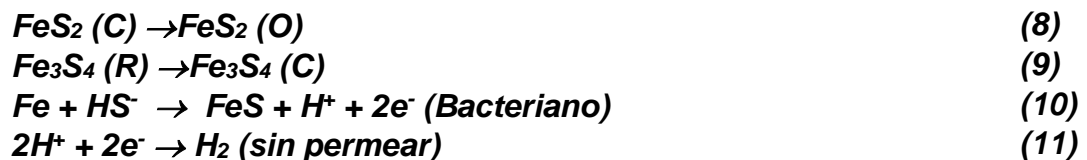
El mecanismo de acción bacteriana con iones ferrosos se puede establecer en varias etapas (Figura 4), el cual muy probablemente se presente en un sistema construido de acero al carbono y expuesto a un medio contaminado con bacterias y con iones ferroso, siendo esto lo más común en las aguas de inyección para la recuperación secundaria de crudo. De hecho, existen kilómetros de tuberías sumergidas en el Lago que nunca han sido sometidas a un proceso de Mantenimiento de limpieza, con acumulación de lodo, depósitos y productos de corrosión donde las bacterias se desarrollan sin ningún tipo de limitación a nivel de interface.

Etapa I (3-9 h): En la primera etapa hay una disminución progresiva del potencial en circuito abierto a valores más negativos, indicativos de la activación del metal por la adsorción de la Mackinawita (FeS) proveniente del medio y su transformación a Pirita, Esmitita y Greigita mediante un proceso de sulfidación vía electroquímica con formación de átomos de hidrógenos que permean. En esta etapa el proceso está controlado principalmente por una corrosión por picaduras muy pequeñas generadas galvánicamente, pero generalizadas en toda la superficie; ya que la corrosión bacteriana es mínima, tal y como se observa en las morfologías de ataque. Los efectos galvánicos entre los productos de sulfuro de hierro y el metal al igual que la sulfidación predominan.

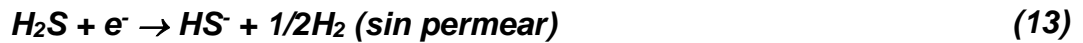
Así, las reacciones químicas y electroquímicas que controlan el proceso corrosivo en esta primera etapa son las siguientes:



Etapa II (9-15 h): En la segunda etapa, el potencial comienza a aumentar hacia valores más positivos, reflejando un cambio de mecanismo por la formación de una película que ennoblecce ligeramente el material conformada por: Mackinawita, Pirita, Marcasita y Griegita entremezclados con el exopolímero generado planctónicamente, predominando la Pirita. En esta etapa la adhesión de células bacterianas se mantiene constante, la velocidad de corrosión general disminuye y la corriente de permeación a las 9 horas también disminuye rápidamente a su línea base, debido probablemente al efecto barrera o antidifusional del exopolímero. En esta etapa lo que mayormente sucede es la corrosión bacteriana y la estabilización de la película. Así, esta etapa podría estar controlada por las siguientes reacciones:



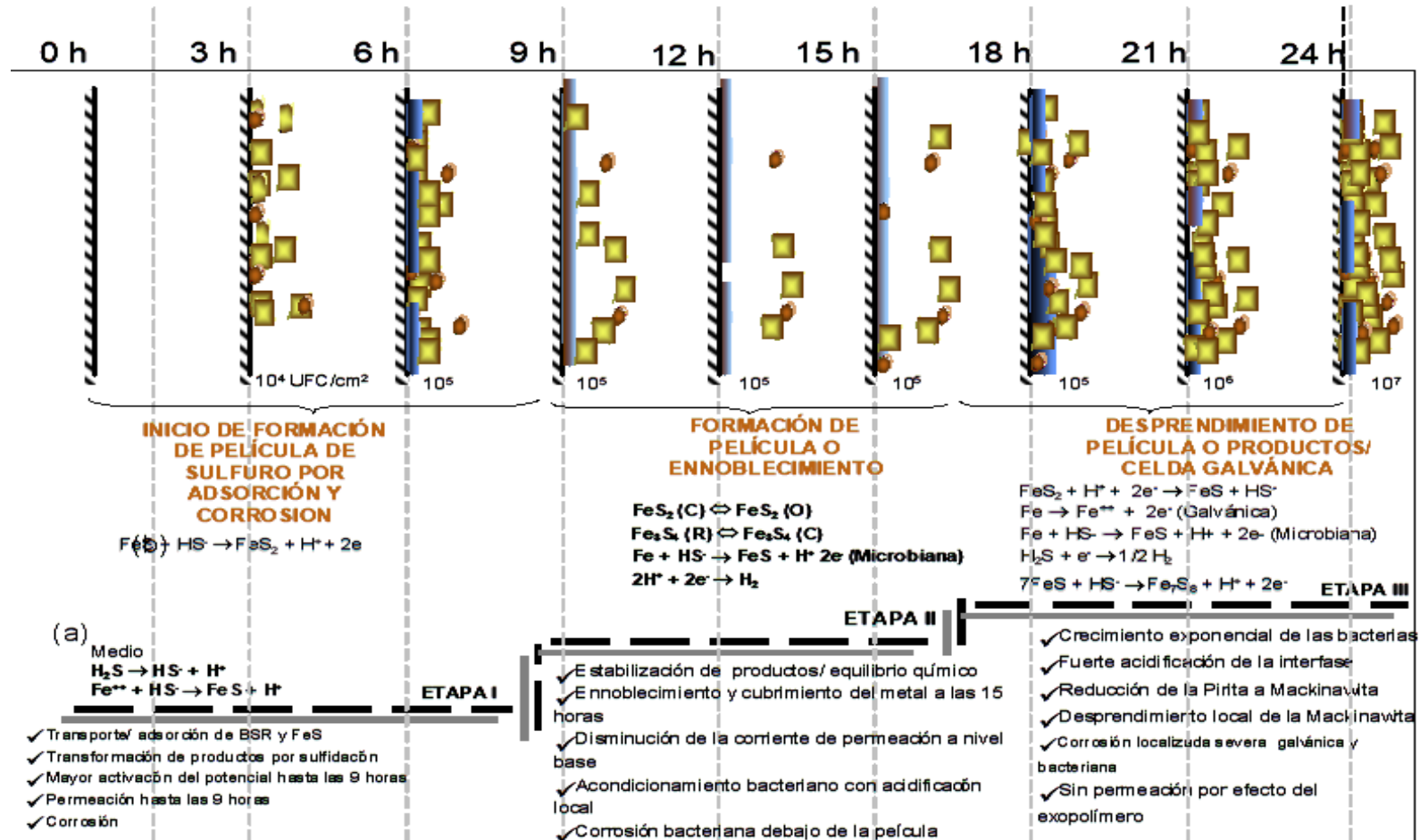
Etapa III (>15 h): En la tercera etapa, el potencial comienza a disminuir nuevamente, pero muy levemente; debido a una disminución local del pH, producto de la corrosión bacteriana del acero en presencia del HS⁻; lo cual hace que la Pirita localmente se reduzca a Mackinawita y el metal sea corroído severamente mostrando una morfología de ataque localizada severa en forma de hoyuelos, magnificado por el desprendimiento o agrietamiento de la Mackinawita y la subsecuente corrosión galvánica generada entre el metal anódico y los productos de sulfuro de hierro catódicos, conformado por: Mackinawita, Pirita, Esmitita, Marcasita, Greigita, Troilita y Pirrotita. En esta etapa las bacterias crecen exponencialmente en el orden de 10⁸ UFC/cm² generando suficiente H₂S para que la corrosión se acelere sin ocurrir la absorción de hidrógeno atómico. Localmente las siguientes reacciones pueden estar ocurriendo:



Según lo planteado por Romero (2004), queda demostrado que las BSR pueden actuar independientemente de una superficie polarizada, siendo la acidez local generada por la corrosión del hierro en presencia del HS^- biótico, la reducción de la Pirita y los efectos galvánicos generados por el desprendimiento de la Mackinawita localmente en un cátodo muy grande de productos de sulfuro de hierro, los principales causantes de la severidad de la corrosión por BSR en un medio contaminado con iones ferrosos.

Estos resultados permiten orientar los esfuerzos de la industria para el control de corrosión microbiológica en planta, hacia el uso no solamente de biocidas para el control de las bacterias; sino también, de inhibidores de corrosión y limpiezas periódicas para mantener el sistema protegido contra la corrosión inorgánica y libre de iones ferrosos.

Figura 4. Mecanismo propuesto de MIC en la corrosión del hierro y el acero al carbono



Fuente: Estudio Mecanístico de la acción de las BSR en la Corrosión del acero al carbono utilizando Permeación de Hidrógeno y Polarización Catódica. Tesis de Doctorado. Universidad de los Andes.2004. **Romero, M.**

1.4. MICROORGANISMOS PERTURBADORES EN LOS SISTEMAS DE INYECCIÓN DE AGUA³

Las especies de bacterias son las que ocasionan la mayoría de los problemas en muchos sistemas abiertos de inyección de agua. De vez en cuando, algas pueden causar problemas en tanques en donde llegan directamente los rayos solares. Las bacterias más problemáticas pertenecen fundamentalmente a cuatro tipos, según sus efectos:

- ***Bacterias Sulfato Reductoras (BSR)***: son bacterias capaces de reducir sulfato a sulfuro. Un crecimiento acelerado de las BSR causa problemas de corrosión microbiológica.
- ***Bacterias Formadoras de Limo***: este tipo de bacterias forma limo denso, pegajoso, con el subsiguiente ensuciamiento. Puede ocasionar impedimentos en los flujos normales de agua y promueve el crecimiento de otros microorganismos.
- ***Bacterias Ferro oxidantes***: son bacterias que obtienen la energía de la oxidación del hierro ferroso (Fe^{+2}) La mayor parte crecen solo a pH ácido y se presentan asociadas a menudo con la polución ácida derivada de actividades mineras.
- ***Bacterias Sulfuro oxidantes***: son bacterias que obtienen su energía de la oxidación de sulfuro y producen sulfatos, que luego es utilizado por las BSR.

Sin embargo, la mayor parte de los problemas en el campo petrolero aparece por causa de bacterias del primer grupo.

1.5. BACTERIAS SULFATO REDUCTORAS. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

El nombre de Bacterias Sulfato Reductoras (BSR) es convencionalmente reservado para una clase de microbios que conducen a la reducción desasimilativa del sulfato. En este proceso el ión sulfato actúa como un agente de oxidación para la desasimilación de la materia orgánica, como hace el oxígeno en la respiración convencional. Una cantidad pequeña de azufre reducido es asimilada por el organismo, pero virtualmente todo se libera al medio ambiente como ión sulfuro, el cual es hidrolizado como H_2S .

³ BAKER Petrolite. La Microbiología en los sistemas de inyección de agua del campo petrolero.1998

Para entender la manera como los microorganismos están relacionados con el proceso corrosivo, su constante desarrollo en una extensa variedad de ambientes y cómo su actividad puede ser controlada o prevenida, es necesario conocer acerca de su ecología y sus requerimientos fisiológicos y nutricionales.

Las BSR pueden considerarse un grupo heterótrofo unificado fisiológicamente, es decir, que obtienen el carbono de la materia orgánica, presentando una morfología diversa; siendo anaerobios estrictos que para respirar utilizan el sulfato como aceptor terminal de electrones, generando sulfuro en la reducción desasimilatoria del sulfato, y diferentes compuestos orgánicos de cadenas cortas e inclusive CO₂, en la oxidación de la materia orgánica para la obtención de energía (ATP). Son frecuentemente encontradas en suelos húmedos con valores de pH cercanos a la neutralidad, en agua de mar, agua salobre, aguas de ríos, etc., especialmente en ambientes polutos como los encontrados normalmente en los alrededores de las zonas industriales.

Se reconocen varios géneros de bacterias reductoras de sulfato, divididos en dos subgrupos fisiológicos (Tabla 1). Los géneros del grupo I utilizan lactato, piruvato, etanol o ciertos ácidos grasos como fuentes de carbono y energía, reduciendo el sulfato a sulfuro. Los géneros del grupo II se especializan en la oxidación de ácidos grasos, en particular el acetato, reduciendo el sulfato a sulfuro.

Tabla 1.: Géneros conocidos de BSR. Características principales

Características de las Bacterias Sulfato Reductoras				
Género	Rango de Desarrollo		Valor Óptimo	
	pH	T (°C)	pH	T (°C)
Grupo I: No Oxidantes de Acetato				
Desulfovibrio	-	0-44	7.5	25-37
Desulfotomaculum	6.6-7.6	20-70	7.1	37-55
Desulfobulbus	6.8-8.6	10-43	7.2	28-39
Grupo II: Oxidantes de Acetato				
Desulfobacter	6.2-8.5	10-37	7.3	28-32
Desulfococcus	-	-	-	30-36
Desulfonema	6.7-8.8	10-37	7.0	32
Desulfosarcina	6.7-9.0	15-38	7.4	28-33

Fuente: Estudio Mecanístico de la acción de las BSR en la Corrosión del acero al carbono utilizando Permeación de Hidrógeno y Polarización Catódica. Tesis de Doctorado. Universidad de los Andes.2004. **Romero, M.**

Las BSR se encuentran ampliamente distribuidas en ambientes acuáticos y terrestres que se convierten en anaerobios por los procesos microbianos de descomposición. El género mejor conocido es **Desulfovibrio**, perteneciendo al grupo I, encontrado comúnmente en estuarios naturales o ambientes terrestres

que presenten las condiciones adecuadas para su desarrollo, como lo es la anaerobiosis y presencia de niveles satisfactorios de sulfatos.

Este género **desulfovibrio** es uno de los encontrados con mayor frecuencia en los casos de Corrosión Inducida Microbiológicamente (MIC) y por ende, uno de los más estudiados. Presenta una morfología de bastoncillos ligeramente curvos de 0.5 a 1.5 μm de espesor y de 3 a 5 μm de longitud, pueden encontrarse aislados o en pequeñas cadenas. Son móviles gracias a un flagelo polar. Existe un amplio rango de temperaturas donde se pueden desarrollar (0-44 °C), encontrándose su temperatura óptima de crecimiento entre los 25 y 37 °C, y un pH óptimo de 7.5. Son gramnegativas y no forman esporas.

Como ya se ha indicado las BSR son anaeróbicas estrictas, sin embargo, ellas pueden existir de una forma inactiva en la mayoría de los ambientes acuosos aeróbicos y se vuelven activas cuando las condiciones son favorables. Las BSR se han vuelto particularmente importantes en la industria del crudo, sobre todo donde se utilizan cantidades grandes de agua de mar o agua salobre; como lo es el agua del Lago de Maracaibo utilizada, para la recuperación secundaria de crudo, donde se han reportado una gran cantidad de fallas asociadas a este fenómeno de corrosión.

1.6. ESTRUCTURA CELULAR.

Las estructuras celulares de los seres vivos son semejantes: todos tienen una pared celular rígida o flexible. En la célula bacteriana se distinguen los siguientes rasgos estructurales: la pared celular de material rígido, protege la célula de daños por acción mecánica u osmótica; la membrana del citoplasma es una membrana flexible que actúa como una barrera selectiva entre el contenido de la célula y el medio que la rodea, es semipermeable y por allí entran o salen materiales de la célula. En algunas bacterias la célula está rodeada por una capa externa gelatinosa llamada cápsula.

Dentro de la célula se pueden distinguir dos zonas diferentes, tal como se muestra en la Figura 5: el citoplasma y el núcleo.

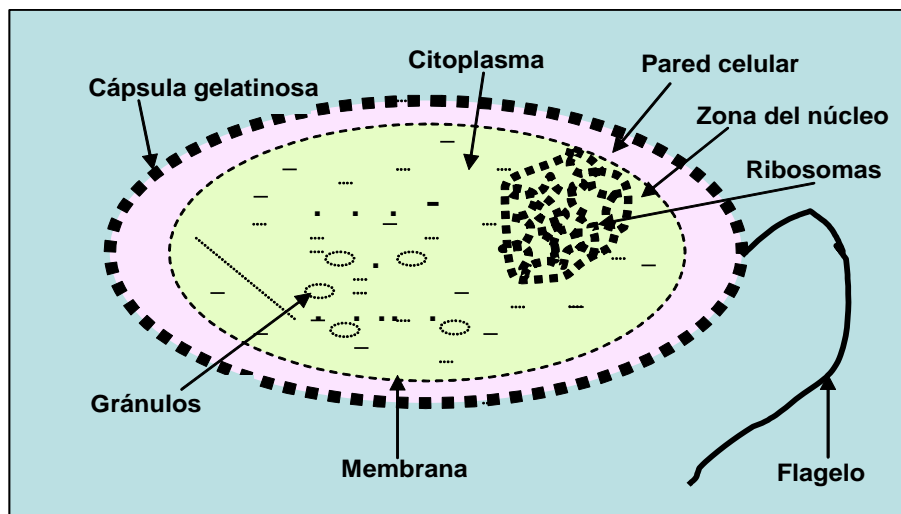
La zona del núcleo contiene **Ácido Desoxirribonucleico (ADN)**, el cual retiene la información genética de la célula. Su composición determina cuáles enzimas puede sintetizar; sus concentraciones son reguladas por mecanismos de retroalimentación; el proceso de división de la célula, el material se divide o replica en las células⁴.

⁴ MADIGAN M., MARTINKO, J. y PARKER, J. Brock Biología de los Microorganismos. Octava Edición. Prentice Hall INC. Madrid, España, 1997.

En el citoplasma hay partículas pequeñas llamadas *ribosomas*, que contienen **Ácido ribonucleico (ARN)** y son el sitio donde se sintetizan las enzimas. Hay enzimas extracelulares encargadas de desdoblar las moléculas más grandes y las partículas en compuestos simples, que pueden ser absorbidos por las células, y enzimas intracelulares, responsables principalmente de las transformaciones conducentes a la síntesis del material celular⁵.

Algunas células bacterianas tienen un flagelo que utilizan para la locomoción o para desplazarse en el medio líquido.

Figura 5. Esquema de una célula bacteriana



Fuente: Brock Biología de los Microorganismos. Octava Edición. Prentice Hall INC. Madrid, España. 1997. **Madigan M., Martinko, J. y Parker, J**

1.7. METABOLISMO DE LAS BSR

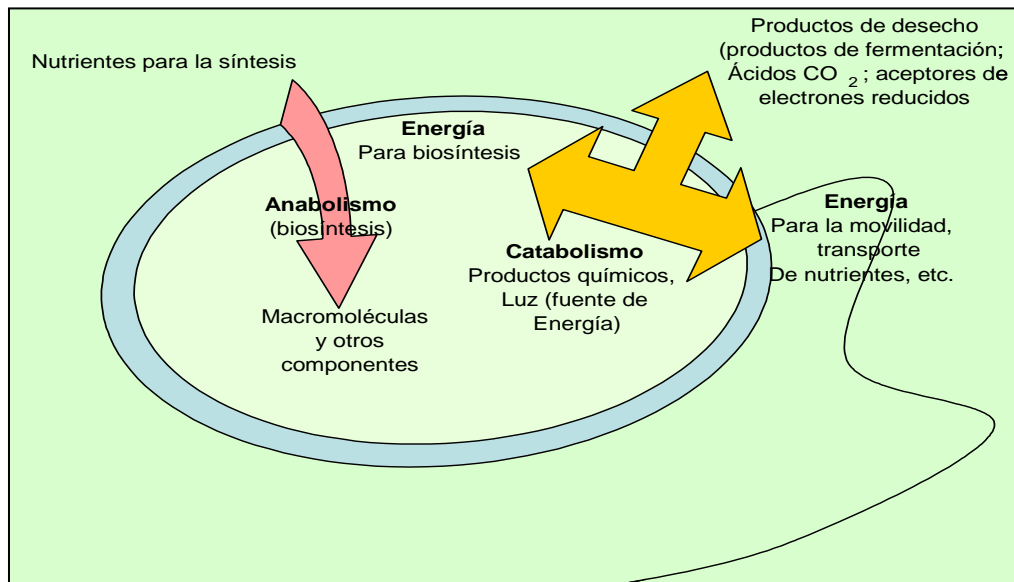
El conocimiento del metabolismo celular es esencial para entender la bioquímica del crecimiento microbiano y engloba a todos los procesos químicos que tienen lugar dentro de la célula. Representa una gran ayuda para el desarrollo de procedimientos de laboratorio para el cultivo de microorganismos; así como también, para la obtención de procedimientos útiles que impidan el crecimiento de microorganismos indeseables.

El metabolismo microbiano constituye un proceso bioquímico por medio de la cual las bacterias transforman las sustancias alimenticias en nuevos tejidos de reposición y energía. Se divide en dos procesos generales: el **anabolismo**

⁵ BAKER Petrolite. La Introducción a la Microbiología del campo petrolero. 1998

proceso mediante el cual una célula se construye a partir de nutrientes simples, dando como resultado la síntesis bioquímica de nuevo material celular, también se le conoce como biosíntesis o asimilación, y el **catabolismo** o desasimilación, no es más que el proceso que genera energía, mediante la oxidación o degradación de componentes químicos para transformarlos en otros más sencillos. La Figura 6 muestra una visión simplificada del metabolismo celular. En ella se indica como las reacciones degradativas suministran la energía necesaria para las funciones celulares y como las reacciones anabólicas llevan a cabo la síntesis de componentes celulares a partir de nutrientes.

Figura 6. Visión simplificada del metabolismo célula



Fuente: Brock Biología de los Microorganismos. Octava Edición. Prentice Hall INC. Madrid, España. 1997. **Madigan M., Martinko, J. y Parker, J**

La energía liberada como consecuencia de las reacciones de oxidación-reducción debe ser conservada para las funciones celulares. En organismos vivos, la energía química liberada como resultado de estas reacciones es comúnmente transferida a una diversidad de compuestos fosforilados para formar enlaces fosfatos de alta energía; estos compuestos funcionan entonces como la fuente de energía en aquellas reacciones que la requieran dentro de la célula.

El compuesto fosfatado de alta energía más importante en organismos vivos es el **Adenosin Trifosfato (ATP)**. Un ribonucleótido de adenosina al que se unen tres moléculas de fosfato en serie, el cual sirve como acarreador energético primario de los organismos vivos durante ciertas reacciones de oxido-reducción y empleadas durante las reacciones biosintéticas.

Las BSR llevan a cabo su proceso de transporte de electrones mediante citocromos: los cuales son proteínas con anillos porfirínicos que contienen el hierro que participa en las reacciones de oxido-reducción, mediante la pérdida o ganancia de un electrón del átomo de hierro situado en el centro del mismo.



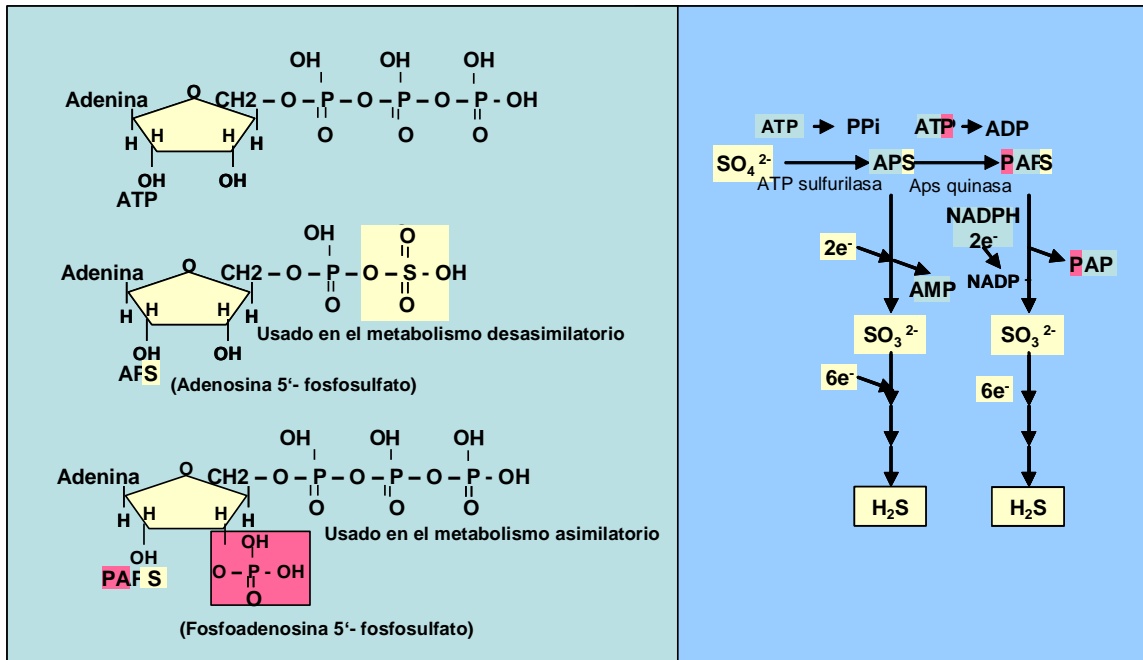
El citocromo de las bacterias sulfato reductoras es muy electronegativo, y es llamado ***citocromo c₃***. En las BSR, el hidrógeno H₂, bien sea procedente del medio o generado de algunos donadores orgánicos de electrones como lactato, transfiere electrones a la enzima ***hidrogenasa***, situada en el periplasma en estrecha asociación con el citocromo c₃. Los protones del hidrógeno (H⁺) permanecen fuera de la membrana generando una fuerza motriz protónica la cual se utiliza para síntesis de ATP. Los electrones transportados al interior de la célula se utilizan en la reducción del ASP, hasta llegar al último aceptor de electrones de donde los sulfatos finalmente se reducen a sulfuro⁶.

1.8. REDUCCIÓN DE SULFATOS

Varios compuestos inorgánicos son aceptores de electrones importantes en la respiración anaeróbica. El sulfato, la forma más oxidada del azufre, es uno de los aniones mayoritarios del agua de mar y es usado por las BSR, que constituyen un grupo con amplia distribución en la naturaleza. El producto final de la reducción de sulfato es H₂S, un importante producto natural que participa en muchos biogeoquímicos. Es importante distinguir entre la reducción asimilatoria y desasimilatoria del sulfato. Muchos organismos, como las plantas superiores, algas, hongos y la mayoría de los procariontes, usan sulfato como fuente de azufre en la biosíntesis. Pero la capacidad de utilizar sulfato como aceptor de electrones para procesos que generan energía, implica una reducción de SO₄⁻² a gran escala y está limitada a las bacterias sulfato reductoras. En la reducción asimilatoria del sulfato, el H₂S formado se convierte inmediatamente en azufre orgánico bajo forma de aminoácidos, pero en la desasimilatoria el H₂S se secreta.

⁶ The University of Arizona (2004). Toxicología Ambiental. [On-line]. Disponible en; <http://superfund.pharmacy.arizona.edu/toxamb/c1-1-1-4.html>.

Figura 7. Bioquímica de la reacción de sulfato (a) Dos formas de sulfato activo. (b) Esquema de la Reducción asimilatoria y desasimilatoria



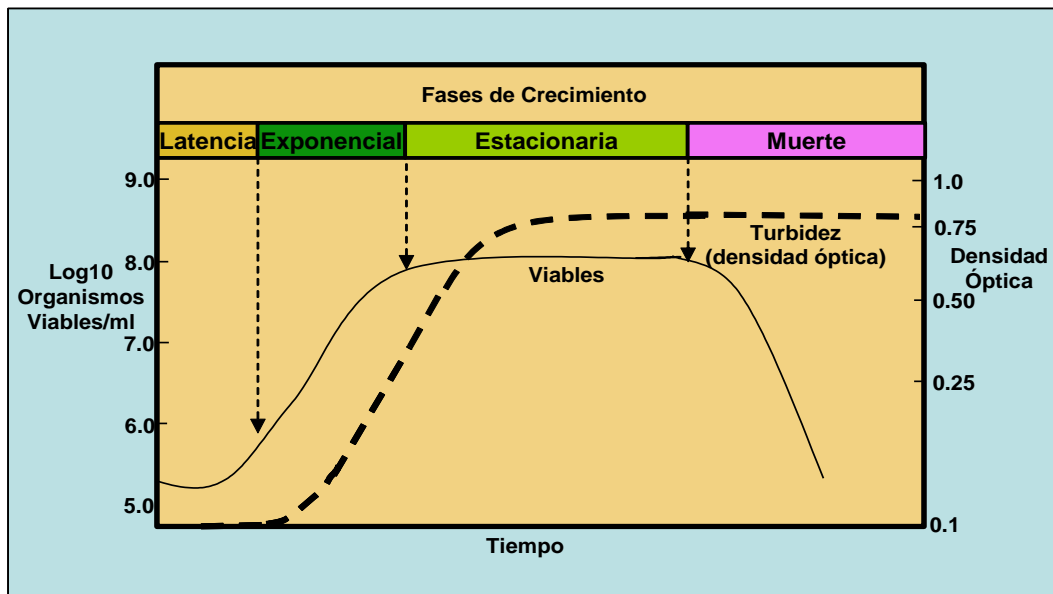
Fuente: Brock Biología de los Microorganismos. Octava Edición. Prentice Hall INC. Madrid, España. 1997. **Madigan M., Martinko, J. y Parker, J**

La reducción de SO_4^{2-} a sulfuro de hidrogeno, una reducción de ocho electrones, ocurre mediante ciertas fases intermedias. El ion sulfato es estable y no puede usarse sin que antes se active. El sulfato se activa por el ATP. La enzima *ATP sulfurilasa* cataliza la unión del ion sulfato a un fosfato ATP, originando la formación de adenosina fosfosulfato (APS) como se indica en la Figura 7. En la reducción desasimilatoria de sulfato, la porción sulfato de la APS se reduce directamente a sulfito (SO_3^{2-}) con la separación de AMP. En la reducción asimilatoria se añade otro P a APS para formar fosfoadenosina fosfosulfato (PAPS), y solo entonces se reduce la porción sulfato. Una vez formado el SO_3^{2-} , las reducciones siguientes son muy rápidas.

1.9. CRECIMIENTO MICROBIANO

los microorganismos se estudian como poblaciones y no como células individuales; algunas razones de ello son las siguientes. No es posible medir el peso de un microorganismo y en cambio se puede hacer un recuento de células o colonias mediante cultivos principalmente. El crecimiento y la reproducción de los microorganismos, a medida que éstos utilizan el alimento disponible, se pueden representar gráficamente. Se obtiene una curva como la Figura 8 cuando se agrega cierto número de microorganismos a una cantidad conocida de sustrato o alimento y se representa el logaritmo del número de células versus el tiempo transcurrido en el ensayo. Esta curva de crecimiento se puede dividir en varias fases: de **latencia**, **exponencial**, **estacionaria** y de **muerte**, tal como se muestra en la Figura 8:

Figura 8. Curva de crecimiento de un microorganismo.



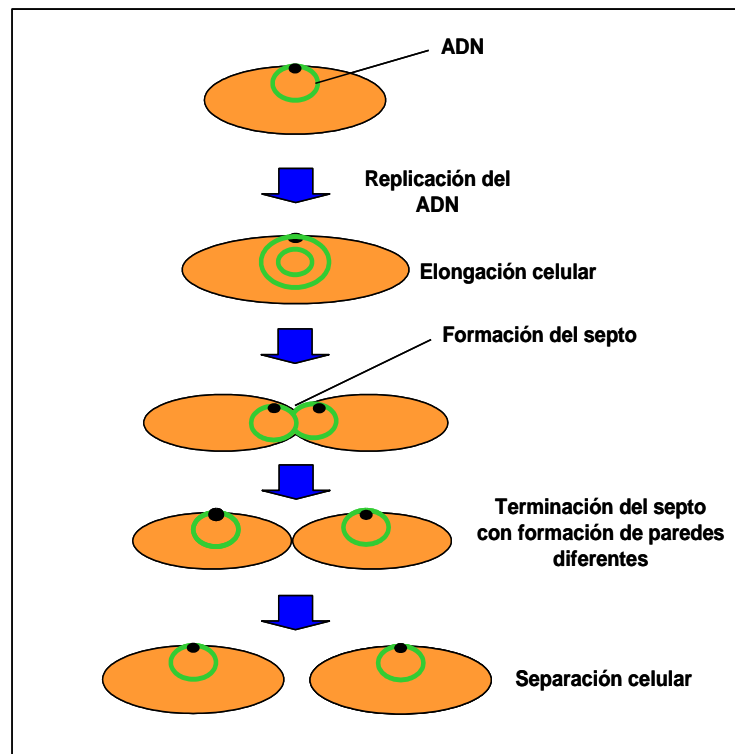
Fuente: Brock Biología de los Microorganismos. Octava Edición. Prentice Hall INC. Madrid, España. 1997. **Madigan M., Martinko, J. y Parker, J**

Fase de Latencia: Cuando una población microbiana se inocula en medio fresco, no ocurre crecimiento inmediatamente, sino después de cierto tiempo, el cual, se llama *fase de latencia*, que puede ser más larga o más corta dependiendo de muchos factores. Si un cultivo en crecimiento exponencial se inocula exactamente en el mismo medio, no se observa esta fase sino que sigue creciendo exponencialmente. Sin embargo, si el inóculo se toma a partir de un cultivo viejo, entonces tiene lugar una fase de adaptación, incluso si todas las células presentes en el inóculo son viables, esto es, capaces de reproducirse. Esto ocurre

porque las células, en estas condiciones, carecen de determinados componentes esenciales y tiene que transcurrir un cierto tiempo para que se proceda su síntesis. También se requiere de una fase de adaptación cuando las células han sido dañadas mediante tratamientos por calor, radiaciones, tóxicos, etc., porque se requiere tiempo para reparar el daño sufrido. Por último, también se requiere una fase de adaptación cuando se transfieren células de un medio rico a un medio pobre. Para adaptarse a este nuevo medio, es preciso que se sinteticen enzimas que permitan metabolizar los compuestos presentes en el nuevo medio.

Fase Exponencial: La fase exponencial es la consecuencia de que una célula se divida en dos, éstas en otras dos y así sucesivamente (Fisión binaria). La mayoría de los microorganismos unicelulares crecen exponencialmente, pero las velocidades de crecimiento exponencial pueden variar esencialmente. Tal velocidad es influenciada por las condiciones ambientales (temperatura, composición del medio de cultivo), así como por las características genéticas del microorganismo en cuestión⁷. La Figura 9 muestra el proceso de fisión binaria.

Figura 9. Proceso de Fisión Binaria



Fuente: Brock Biología de los Microorganismos. Octava Edición. Prentice Hall INC. Madrid, España. 1997. **Madigan M., Martinko, J. y Parker, J**

⁷ RAMOS, R. (2002) Crecimiento Microbiano. [On-line]. Disponible en; http://www.geocities.com/roberto_raul/crecimiento.html

Fase Estacionaria: En la fase estacionaria no hay incremento o decremento neto del número de células, pues cuando el alimento llega a ser limitativo del crecimiento, cesa la fase exponencial y se inicia una etapa en la que las velocidades de crecimiento y muerte son iguales; en este caso, las células liberan alimento almacenado para su utilización.

Fase de Muerte: Finalmente, se agota el alimento disponible y se inicia la fase de muerte celular. En algunos casos la muerte va acompañada de *lisis* celular (ruptura de la célula y pérdida del material celular). Esta fase es también una función exponencial; sin embargo, en muchos casos, la velocidad de muerte celular es mucho más lenta que el crecimiento exponencial. Al final de esta fase hay organismos vivos que se alimentan de material celular muerto.

1.10. MEDICIÓN DEL CRECIMIENTO DE MICROORGANISMOS

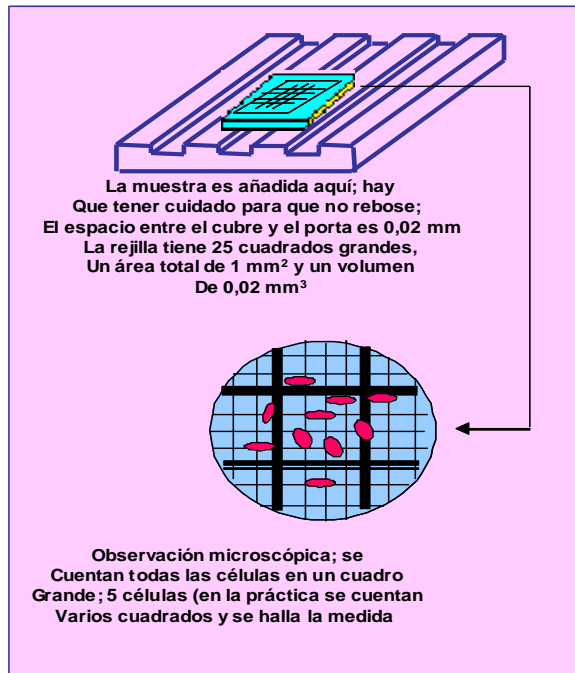
El crecimiento de una población microbiana se mide siguiendo los cambios en el número de células o el peso de la biomasa celular. Existen diversos métodos para contar el número de células o para estimar la masa celular dependiendo del microorganismo que se trate.

1.10.1. Métodos para calcular el Número de Células.

1.10.1.1. Contaje total de células

El número de células de una población puede medirse directamente al microscopio, es el método denominado contaje directo. Se pueden realizar dos tipos de contaje, bien muestras secas o en muestras líquidas. Estas últimas requieren cámaras especiales de contaje. En ellas la superficie de la porta objeto lleva marcada una rejilla como la indicada en la Figura 10. Encima de cada cuadro de la rejilla se coloca un volumen conocido de muestra. El número de células por unidad de área de la rejilla se encuentra directamente en el microscopio, lo que nos da un número de células por unidad de volumen. Convertir este valor a número de células por mililitro de suspensión se hace fácilmente: el valor obtenido por un valor de conversión.

Figura 10. Contaje microscópico directo



Fuente: Brock Biología de los Microorganismos. Octava Edición. Prentice Hall INC. Madrid, España. 1997. **Madigan M., Martinko, J. y Parker, J**

El contaje microscópico directo es una manera rápida de estimar el número de células microbianas. Sin embargo, tiene una serie de limitaciones:

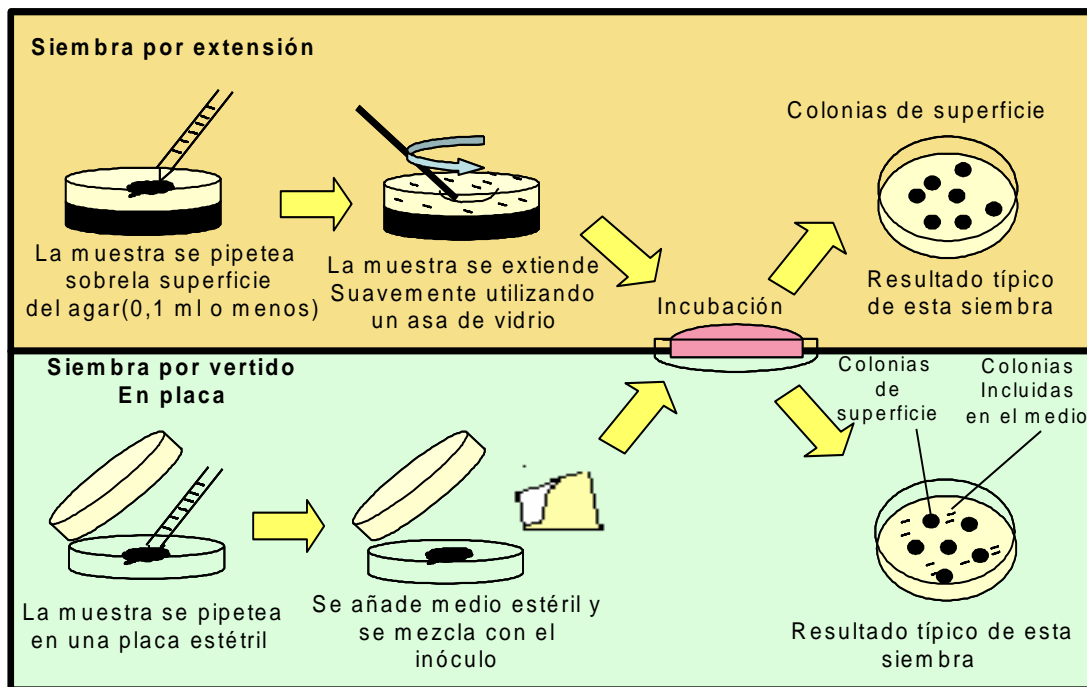
- 1.- Las células muertas no se distinguen de las vivas.
- 2.- Las células pequeñas son difíciles de ver al microscopio y algunas de ellas probablemente no se cuentan.
- 3.- Se requiere tiempo y habilidad para conseguir precisión por este método.
- 4.- Se requiere de un microscopio de contraste de fases cuando la muestra no está teñida.

1.10.1.2. Contaje de viables

En el método anterior, se cuentan tanto células vivas como muertas, pero, en muchos casos sólo es necesario contar las vivas y para ello se han desarrollado métodos de contaje para *viables*. Una célula viable se define como la que es capaz de dividirse para dar lugar a descendencia y la forma habitual de llevar a cabo un contaje de este tipo, es determinado en números de células capaces de generar colonias sobre la superficie de un medio sólido. Por esta razón, a menudo a este método se le denomina **contaje en placa** o **contaje de colonias**.

Hay dos maneras de llevar a cabo un conteo en placa: por **siembra en superficie** o por **vertido en placa** (Figura 11). En el método en **siembra en superficie**, un volumen no mayor de 0,1 mL de la dilución apropiada se extiende por toda la superficie del medio utilizando una barra de vidrio doblada y estéril. La placa se incuba hasta que aparezcan las primeras colonias contadas. Es importante que la superficie que la superficie esté bien seca de modo que el líquido que se extiende por la superficie se empape rápidamente en el medio. Raramente se usan volúmenes mayores de 0,1 mL porque no se absorben y esto dificultara el conteo posterior. En el **método de vertido**, (Figura 11) se pipetea un volumen conocido (0,1-10 mL) en el medio de cultivo fundido previamente y enfriado hasta aproximadamente 40 °C; después de mezclado se vierte rápidamente en una caja Petri y se incuba. Debido a que la muestra se mezcla con medio fundido el volumen puede ser muy superior al primer método. Sin embargo, el organismo que vaya a ser contado debe resistir temperaturas de 40 o 45 °C.

Figura 11. Métodos para realizar un conteo de viables



Fuente: Brock Biología de los Microorganismos. Octava Edición. Prentice Hall INC. Madrid, España. 1997. **Madigan M., Martinko, J. y Parker, J**

1.10.1.3. Diluciones

Con los dos métodos anteriores el número de colonias que se desarrolla en las placas no debe ser muy elevado para poder contar adecuadamente y por otra parte el número de colonias no debe ser muy bajo para que el conteo tenga

significado estadístico. La práctica habitual es que el número de colonias oscile entre 30 y 300 por placa.

Para obtener el número de colonias apropiado la muestra casi siempre debe ser *diluida*. Ya que casi nunca se conoce el número de viables a priori, normalmente es necesario hacer más de una dilución, generalmente seriadas en base 10. En la mayoría de los casos hay que hacer las diluciones seriadas para obtener el número de colonias deseadas.

1.11. FORMACIÓN Y FUNCIÓN DE LA BIOPELÍCULA

1.11.1. Etapas de formación de la biopelícula

Generalmente el nivel nutricional de muchos “hábitats” microbianos es demasiado bajo para sustentar un crecimiento activo de microorganismos, siendo esto uno de los factores que determina la orientación selectiva de los microorganismos hacia superficies donde materiales nutritivos (iones, macromoléculas y coloides) están concentrados. En ecosistemas naturales, la población microbiana es controlada, en gran medida, por la naturaleza del sustrato y los nutrientes disponibles en el medio. En superficies metálicas, ésta depende de la naturaleza química del sólido y de la fase líquida con la cual está en contacto. Entonces, en “hábitats” naturales muy deficientes de nutrientes, como los suelos y el agua, las superficies metálicas ofrecen una condición adecuada, al actuar como depósitos donde se encuentran los niveles de nutrientes adecuados para sustentar el crecimiento bacteriano mediante la formación de una biopelícula; la cual no es más que una interfase bioorgánica entre el metal y la solución constituida por un material polimérico que sirve de adhesivo de poblaciones bacteriana.

La biopelícula contiene un exopolímero (Estructura celular polimérica-EPS) que cumple con una serie de funciones de importancia vital para los microorganismos que habitan en ella. Además de servir como anclaje, ésta atrapa los nutrientes suspendidos en el cuerpo de la solución y los hace accesible a las bacterias; protege a los microorganismos de moléculas antagónicas (biocidas, surfactantes, antibióticos, etc.) las cuales son capturadas por los exopolisacáridos retardando o eliminando su acción, así como también la de los predadores y bacteriófagos. El exopolímero ha sido caracterizado como una cadena larga de polisacáridos (Glycocalix) formada por una enzima bacteriana llamada polimerasa.

En ambientes acuáticos, los microorganismos pueden encontrarse suspendidos libremente en el cuerpo de agua (existencia planctónica) o adheridos a un sustrato o superficie inmóvil (existencia sésil), siendo las condiciones ambientales

las que determinan el estado de existencia de estos microorganismos. Sobre la superficie metálica, específicamente en la interfase sólido-líquido ocurre una modificación de la energía libre por la adsorción espontánea de películas macromoleculares que adecuan la superficie a una colonización microbiana posterior; ocurriendo el transporte de estas macromoléculas y materiales orgánicos desde el volumen del fluido hacia la superficie metálica. Luego, ocurre la colonización de la superficie, interviniendo fuerzas de corto alcance (hidrofóbicas y de van der Waals) capaces de retener los microorganismos en la superficie metálica. Durante la primera etapa del desarrollo de la biopelícula las bacterias colonizadoras se encuentran distribuidas como células individuales de manera heterogénea sobre la superficie.

Luego de un tiempo, que pueden ser minutos, algunas de las especies que se encuentran sobre la superficie producen exopolímeros adhesivos que recubren la célula y se extienden desde la superficie de la célula hacia el sustrato y hacia el fluido. En esta etapa, la biocapa posee menos de 10 μm de espesor, existiendo una matriz discontinua de exopolímeros y células. En esta etapa de la formación de la biopelícula, los microorganismos son fácilmente removidos por lo que es denominada Etapa de Adsorción Reversible.

En este momento las células inmóviles excretan más material exopolimérico incrementando el grosor y la extensión de la biopelícula sobre la superficie. Al mismo tiempo, especies bacterianas planctónicas y partículas suspendidas se unen a la biopelícula contribuyendo al incremento de la población. Este proceso puede tomar desde unos pocos días hasta semanas, dependiendo de la morfología y la consistencia observada de los tipos de microorganismos presentes y de las condiciones del medio ambiente. Paulatinamente, con el incremento del espesor de la biopelícula, la difusión de gases disueltos y otros nutrientes desde el volumen del líquido hacia ella se dificulta, provocando condiciones poco apropiadas para algunos de los microorganismos, acentuándose esta condición en la base de la biopelícula, en la interfase sólido-líquido, y eventualmente estos organismos mueren, debilitando la fijación de la biopelícula, lo que causa su desprendimiento en ciertas zonas, exponiendo la superficie al líquido nuevamente. Estas áreas son colonizadas nuevamente, por lo que si las condiciones ambientales permanecen constantes y adecuadas, la biopelícula es constantemente renovada (Figura 12).

Figura 12. Función de la Biopelícula



Fuente: Estudio Mecanístico de la acción de las BSR en la Corrosión del acero al carbono utilizando Permeación de Hidrógeno y Polarización Catódica. Tesis de Doctorado. Universidad de los Andes.2004. **Romero, M.**

1.11.2. Estratificación de la biopelícula en medios naturales

Una vez desarrollada la biopelícula sobre la superficie metálica, ésta no es de naturaleza uniforme, más bien se puede considerar como un conjunto de capas estratificadas diferenciadas entre sí por la difusión de especies moleculares oxidadas o reducidas desde y hacia el sustrato metálico.

Dependiendo de los requerimientos de oxígeno de los diferentes microorganismos, así como de los nutrientes y sustancias disponibles en el medio, una o varias poblaciones predominarán en la superficie de la biopelícula. En capas superiores se establecerán las bacterias aerobias o anaerobias facultativas que puedan utilizar los productos metabólicos finales de las localizadas en capas inferiores. La concentración de oxígeno a medida que se avanza en los distintos estratos de la biopelícula va disminuyendo, bien sea por dificultad en la difusión del mismo hacia capas más profundas o a causa de su consumo por parte de los microorganismos que conforman la biopelícula. Esto origina un gradiente de concentración de oxígeno provocando la aparición de **celdas de aireación diferencial**. La corrosión microbiológica tenderá a ocurrir en sitios donde el consumo de oxígeno por parte de las bacterias aeróbicas sea máximo (zonas anaerobias).

Un grupo de bacterias aerobias denominadas Bacterias del Hierro como la *Gallionella* causan la formación de tubérculos de hidróxido férrico a partir de la

oxidación de iones ferrosos (Fe^{+2}) a iones férricos (Fe^{+3}) y la subsiguiente precipitación de hidróxido férrico, formando depósitos en los cuales ocurre una disminución en la concentración de oxígeno, dando lugar a la formación de una celda de aireación diferencial, presentando en su interior condiciones óptimas para la aparición y desarrollo de las BSR.

1.12. PREVENCIÓN Y CONTROL DE BIOCORROSIÓN Y BIOENSUCIAMIENTO

La regla para prevenir y controlar la biocorrosión y el bioensuciamiento en los sistemas industriales es mantener limpio el sistema. En el campo industrial los depósitos de bioensuciamiento están relacionados por diversos tipos de ensuciamiento abiótico, para su prevención control se debe considerar no solo la actividad y crecimiento microbiano, sino también las condiciones fisicoquímicas de la interfase metal-solución, y las relaciones químicas en el fluido circundante. Para la prevención y control de la biocorrosión (BC) y bioensuciamiento (BE), es primordial, un adecuado seguimiento de las condiciones de operación del sistema⁸.

1.12.1. Métodos usados para prevenir y controlar la Biocorrosión

- a) Limpieza. Se considera que la limpieza en general esta originada a la remoción de depósitos en la superficie metálica de un sistema, basándose en dos criterios:
 - Tipos de Incrustaciones
 - Tipos de Sedimentos o limo
- b) El uso de Inhibidores de Corrosión. Esto es una capa que separa o aísla el metal o la aleación del ambiente corrosivo.
- c) Eliminación de los microorganismos por la aplicación de bactericidas (biocidas)

⁸ SANCHEZ, J. M. (1997). Biocorrosión. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México. [On-line]. Disponible en; <http://www.monografias.com/trabajos15/biocorrosion/biocorrosion.shtml>.

1.12.2. Biocidas

Son sustancias químicas que permiten erradicar o controlar el crecimiento de bacterias en un sistema determinado.

1.12.2.1 Tipos de Biocidas.

1.12.2.1.1 Biocidas Oxidantes

Este tipo de biocida oxida irreversiblemente los grupos proteicos, causando la pérdida de la actividad enzimática normal y, finalmente la muerte de la célula. Dentro de este grupo tenemos al Cloro y compuestos clorados.

- **Cloro**: es un poderoso agente oxidante que se combina fácilmente con el protoplasma formando uniones N-Cl estable con las proteínas. Es tóxico para todos los organismos vivos y en alta concentración produce una verdadera acción devastadora sobre las células.

Cuando el gas cloro llega al agua se hidroliza y forma dos ácidos el hipocloroso y el clorhídrico:



A su vez, el ácido hipocloroso puede ionizarse de acuerdo con la reacción:



La cantidad de ácido hipocloroso, opuesta al ión hipoclorito (ClO^-), determina la eficacia del biocida. El ácido hipocloroso es un poderoso agente oxidante, que difunde fácilmente a través de la pared celular de los microorganismos y reacciona con compuestos citoplasmáticos para producir enlaces cloro-nitrógeno estable con las proteínas celulares.

A mayor pH se favorece la producción de hipoclorito y la actividad disminuye. A pH 8 la actividad del cloro es débil, y a pH 9 es casi despreciable.

El cloro oxida los sitios activos de ciertos grupos sulfhidrilos (SH^-) de algunas coenzimas que constituyen etapas intermedias en la producción de ATP (Adenosin Trifosfato), que es esencial en el proceso de respiración celular. Está

determinado que el ácido hipocloroso es 20 veces más efectivo (reactivo) como microbicida que el ión hipoclorito (ClO^-)⁹

- **Hipocloritos:** Estos son sales de ácido hipocloroso, y se formulan en muy distintas maneras. Principalmente están compuestas de hipoclorito de sodio (ClONa) e hipoclorito de calcio $(\text{ClO})_2\text{Ca}$. Se agregan al sistema de aguas de enfriamiento y actúan de la misma forma que el cloro

- **Cloroisocianuratos:** Estos compuestos se hidrolizan en el agua y lentamente van liberando cloro y ácido cianúrico.

Se usaron primero en piscinas, y se observó que el ácido cianúrico actúa como un estabilizador del cloro, reduciendo la pérdida de éste por la reacción fotoquímica con la luz ultravioleta. Esta estabilidad, sumada a la lenta disolución y liberación de cloro, los hace aptos para torres de enfriamiento. La disociación es como sigue:



1.12.2.1.2 Biocidas No Oxidantes

La acción de estos biocidas se desarrolla según diversos mecanismos: algunos alteran la permeabilidad de la pared celular interfiriendo en procesos vitales de los microorganismos; los hay del tipo que atraviesan la pared celular penetrando el citoplasma y destruyendo grupos proteicos esenciales para la vida (metales pesados); otros modifican la permeabilidad de la pared celular reduciéndola y perturbando el flujo normal de nutrientes y desechos (tensioactivos aniónicos y catiónicos), determinados compuestos pasan la pared celular y forman una suspensión coloidal con el citoplasma precipitando proteínas (compuestos fenólicos clorados), finalmente, otro grupo de compuestos compite con enzimas o las bloquean impidiendo la reacción enzimática normal necesaria para la vida (compuestos organosulfurosos). En muchos casos, los biocidas no oxidantes pueden ser más efectivos, aunque en general se usan junto a los oxidantes para ampliar el espectro de acción microbicida. En este grupo se tiene:

- **Clorofenoles:** Probablemente son los más usados en sistemas de enfriamiento. Son el *pentaclorofenato* y varios tipos de *triclorofenatos*. Los fenólicos clorados actúan adsorbiéndose sobre la pared celular de los microorganismos.

El proceso de adsorción se atribuye a los lugares de enlaces de hidrógeno de la pared celular, antes de que a alguna reacción química del compuesto. Después de que se adsorbe, el compuesto fenólico difunde al interior de las estructuras

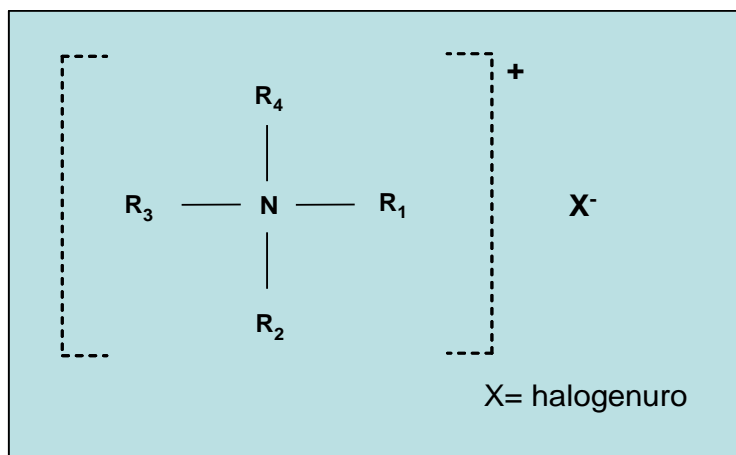
⁹ VIDELA, H.A. SALVAREZZA, R. C. Introducción a la corrosión microbiológica. Primera Edición. Biblioteca Mosaico. Librería Agropecuaria. Buenos Aires, Argentina, 1984.

celulares, donde forma soluciones coloidales con el citoplasma y precipita proteínas. En forma contraria al cloro, la presencia de materia orgánica no afecta su acción.

Se ha reportado que la mezcla de compuestos fenólicos con ciertos detergentes aniónicos, la magnitud y el efecto del biocida se incrementan mucho. Esto se explicaría por una disminución de la tensión intersticial de la pared celular, lo que aumentaría la tasa de penetración del compuesto fenólico a través de la pared y hacia el citoplasma celular. Se usan para pretratamientos o en mezclas generalmente más activas que cada compuesto aislado. Su uso está limitado por la toxicidad que presentan para la vida animal

- *Sales de amonio cuaternario*: Estos compuestos químicos tensioactivos catiónicos son compuestos de nitrógeno sustituidos orgánicamente. La estructura general corresponde a la siguiente fórmula mostrada en la Figura 13:

Figura 13. Estructura molecular de las Sales de amonio cuaternario



Fuente: Introducción a la corrosión microbiológica. Primera Edición. Biblioteca Mosaico. Buenos Aires, Argentina. 1984. **Videla, H.A. Salvarezza, R. C.**

Donde R son radicales arilos, alquilos o heterocíclicos sustituidos que contienen de 8 a 25 átomos de carbono unidos al nitrógeno. La totalidad de la parte catiónica está asociada con un halogenuro (cloruro, bromuro etc.). Estos compuestos son más efectivos generalmente para algas y bacterias en intervalos de pH alcalinos.

Su acción se atribuye a su carga catiónica, que forma una ligadura electrostática con lugares de la pared celular cargados negativamente. Este enlace electrostático crea un disturbio en la pared celular, causando lisis y hasta la muerte. También ocasiona la muerte celular por desnaturalización de proteínas

mediante alteración de la permeabilidad de la membrana celular, reduciendo el flujo normal de nutrientes vitales hacia el interior de la célula.

Hay circunstancias que limitan el uso de estos compuestos. Su nivel de actividad cae en sistemas sucios con polvo, aceites o fibras. Los aceites consumirían su actividad de superficie actuando como mecanismo de competencia que debilita el programa de control. No tienen efecto sobre esporas pero presentan actividad fungicida a altas concentraciones (100-300 ppm). Además, un agregado en exceso de estos compuestos puede traer el problema de la excesiva producción de espuma.

- **Compuestos organosulfurosos:** En general, estos compuestos actúan como microbicidas por inhibición competitiva o no competitiva del crecimiento celular.

La inhibición competitiva se asemeja a la de los agentes quelantes. Normalmente, en la respiración microbiana, un citocromo de baja energía con iones férricos (Fe^{+++}) acepta un electrón y se transforma en un citocromo ferroso (Fe^{++}), estado de alta energía. Esta reacción resulta en la generación de energía necesaria para la vida. El tipo de inhibición competitiva del organosulfuroso hace que elimine el ión férrico (Fe^{+++}) de la reacción, complejándolo como sal de hierro. La eliminación del ión Fe^{+++} detiene la transferencia de energía causando la muerte celular.

La inhibición no competitiva debido a ciertos organosulfurosos consiste en su estructura química, más que en la inducción del microorganismo a aceptar una sustancia química que eventualmente lo llevaría a la muerte.

La muerte microbiana se produce por aceptar un compuesto organosulfuroso suficientemente similar en estructura a un metabolito (nutriente) esencial que se combinaría con la enzima apropiada, pero necesariamente diferente como para no producir la reacción requerida para mantener la vida.

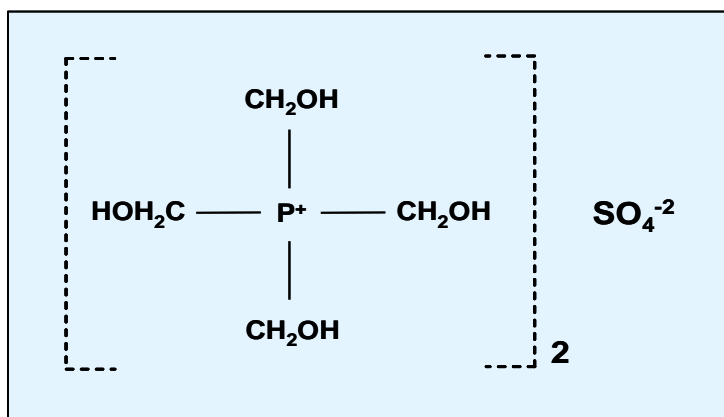
- **Bistiocianato de metileno:** Este compuesto es efectivo para inhibir algas, hongos, y bacterias, más notablemente, las *bacterias sulfato reductoras* como *Desulfovibrio desulfuricans*. Su acción microbicida es por inhibición competitiva, por lo que inactiva la transferencia de electrones en los citocromos del microorganismo.

El fragmento tiocianato ($NCS-CH_2-SCN$) del éster entre el metileno y el ácido tiociánico reacciona para bloquear la transferencia de electrones en el microorganismo y producir su muerte. Así, el bistiocianato de metileno es un microbicida muy efectivo en circuitos de refrigeración, pero tiene la desventaja de no ser muy soluble en agua, por lo que se formula junto con dispersantes; éstos ayudan a su penetrabilidad en las algas y en las capas de mucílagos bacterianos. Es sensible al pH y se hidroliza rápidamente a valores de pH 8. Por

esa razón no se aconseja en circuitos donde el agua de recirculación supere el pH de 8.

- **Sulfato de tetrakishidroximetilo fosfónico (THPS)** es un microbiciida organosulfuroso de acción competitiva. La estructura molecular del THPS se muestra en la Figura 14:

Figura 14. Estructura molecular del THPS



Fuente: Introducción a la corrosión microbiológica. Primera Edición. Biblioteca Mosaico. Buenos Aires, Argentina. 1984. **Videla, H.A. Salvarezza, R. C.**

Esta formulación es ampliamente usada en el sector petrolero, así como también en agua de enfriamiento, en la industria de pulpa y papel y en la preservación de soluciones y emulsiones.

Entre las características más importantes del THPS se encuentran:

- Provee una rápida inhibición y control superior de las BSR.
- Disuelve sulfuro de hierro.
- Evita la formación de capa aceitosa que aparece cuando en agua producida es descargada al mar.
- Estable en formaciones petroleras.
- Se degrada rápidamente a moléculas inocuas.
- Se manipula fácilmente y presenta un mínimo impacto ambiental.

Entre las propiedades físico químicas de del THPS, se puede resaltar que se disuelve en todo tipo de agua, no produce espuma y permanece completamente en fase acuosa. Además, el THPS es estable hasta por 12 meses a 40 °C, incluso después de congelarse y descongelarse; las sales o dureza del agua no le afectan y funciona a un rango de pH entre 3-9. El THPS actúa penetrando la pared celular, destruyéndola en poco tiempo de contacto (30 minutos), también

inhibe la actividad de la enzima *lactato deshidrogenasa* y termina con la actividad metabólica.

En la Tabla 2 se muestra un resumen de los biocidas empleados con mayor frecuencia en el campo industrial y su mecanismo de acción.

Tabla 2.: Tipos de biocidas y su sitio de acción

	OXIDANTES	NO OXIDANTES	
COMPUESTO	Cloro y sus derivados	Metales pesados (Sales), aldehídos y Compuestos Organo-sulfurosos	Clorofenoles y Sales de Amonio Cuaternario
SITIO DE ACCIÓN	Oxida sitios activos de ciertos grupos SH de algunas coenzimas en etapas intermedias de la producción de ATP	Bloquean la acción de las enzimas respiratorias, dificultando la respiración celular.	Alteran el ingreso y egreso de sustancias a la célula

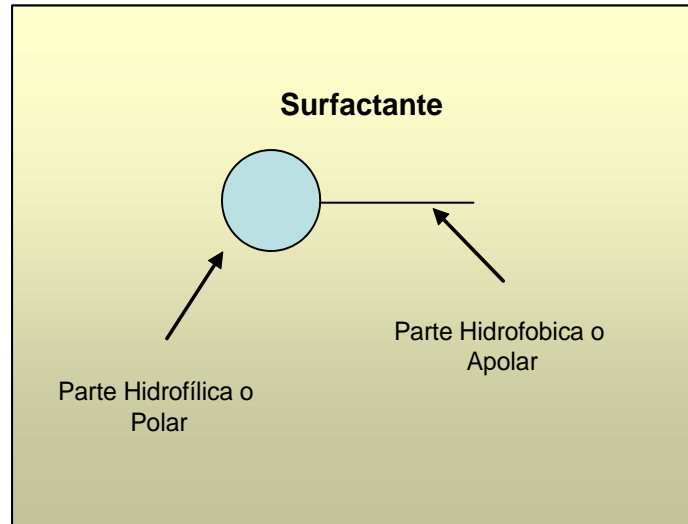
Fuente: Introducción a la corrosión microbiológica. Primera Edición. Biblioteca Mosaico. Buenos Aires, Argentina. 1984. **Videla, H.A. Salvarezza, R. C.**

1.13. SURFACTANTES Y COSURFACTANTES

Un **surfactante** es una sustancia que tiene una actividad superficial o interfacial. Los surfactantes poseen una molécula que presenta a la vez un grupo polar (o hidrofílico) y un grupo apolar (hidrófobo). En vista de su dualidad, cuando una molécula de surfactante se coloca en una interfase, ella puede orientarse de manera que el grupo polar esté en el agua¹⁰, mientras que el grupo apolar se ubica fuera del agua, tal como se muestra en la Figura 15.

¹⁰ SALAGER, J. L. Cuaderno FIRP 300. Surfactantes. Laboratorio de Fenómenos Interfaciales y recuperación del petróleo. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela. 1993

Figura 15. Estructura de la molécula de surfactante



Fuente: Cuaderno FIRP 300. Surfactantes. Laboratorio de Fenómenos Interfaciales y recuperación del petróleo. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela. 1993. **Salager, J. L.**

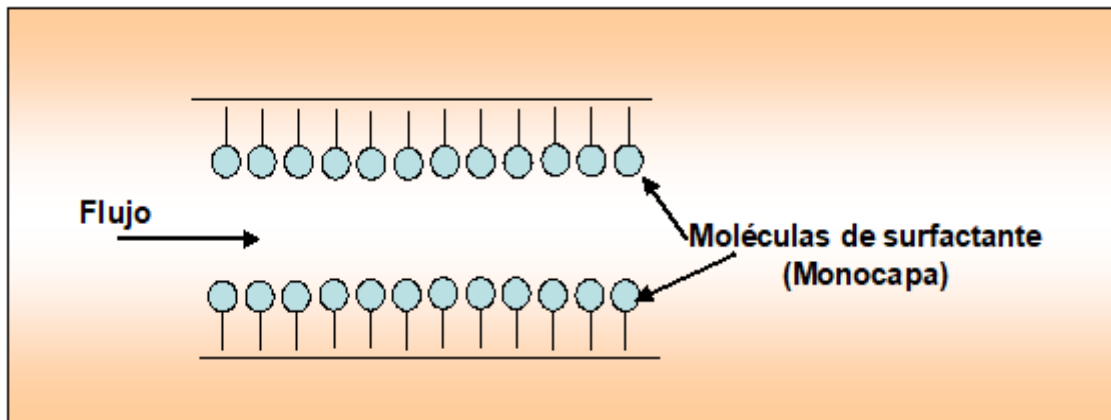
Los **cosurfactantes** son compuestos que facilitan la acción del surfactante de distintas formas; ya sea disminuyendo la tensión superficial, aumentando la movilidad de la cola hidrocarbonada, mejorando la solubilidad, entre otras.

1.13.1. Propiedades de los surfactantes

Todos los usos de los surfactantes provienen de dos propiedades fundamentales: su **capacidad de adsorberse** a las interfases y de otra parte su **tendencia a asociarse** para formar estructuras organizadas.

- **La adsorción** es un fenómeno de acumulación bidimensional de una sustancia en una superficie o interfase. La fuerza motriz de la adsorción en una superficie líquido-sólido, puede incluir uno o varios de los efectos siguientes: atracción polar por la presencia de cargas eléctricas en el sólido, efecto hidrófobo, formación de estructuras de baja energía, así como otros efectos de menor interés. En la Figura 16 se muestra el fenómeno de adsorción de un surfactante.

Figura 16. Fenómeno de adsorción de un surfactante



Fuente: Cuaderno FIRP 300. Surfactantes. Laboratorio de Fenómenos Interfaciales y recuperación del petróleo. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela. 1993. **Salager, J. L.**

Cualquiera sea el caso, siempre es la presencia de una capa (en general monocapa) del surfactante a la interfase que es responsable de un cierto número de fenómenos utilizados en las aplicaciones.

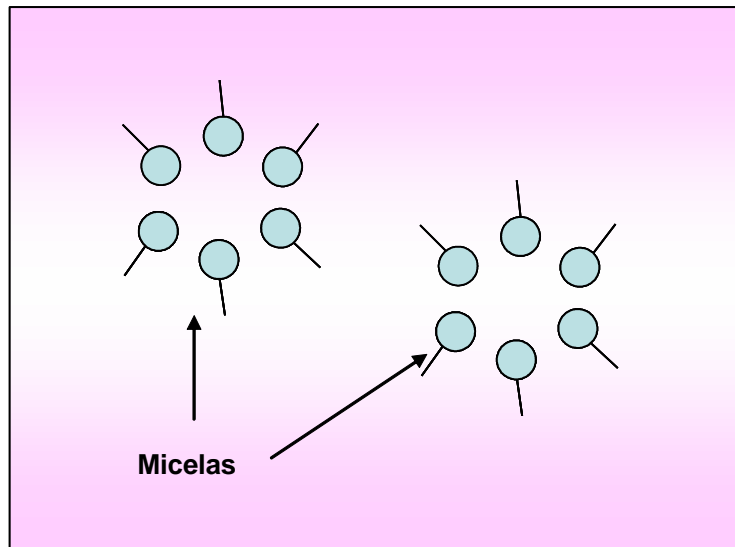
La adsorción de surfactantes en las interfases puede modificar los equilibrios trifásicos sólido-fluido-fluido y conducir la extensión en forma de una monocapa o al cambio de mojabilidad de una superficie, fenómenos que son ampliamente utilizados en procesos industriales, tal como: la hidrofiliación y la hidrofobación, la flotación, el secado, la lubricación, la detergencia, etc.

- **La asociación** viene dada por la "micela", la cual es un polímero de asociación en el cual el surfactante alcanza una posición favorable. En solución acuosa la fuerza motriz principal que favorece la formación de micelas es el efecto hidrófobo, es decir, la sustracción de la parte apolar del surfactante del contacto con las moléculas del agua y la formación de un contacto más favorable desde el punto de vista energético con las partes apolares de otras moléculas de surfactante.

La micelización es entonces un tipo de microprecipitación en la cual el surfactante se sustrae de la fase acuosa, y se produce a una concentración determinada llamada "**Concentración Micelar Crítica (CMC)**". La **CMC** se define como la concentración mínima para que el surfactante forme agregados llamados micelas, tal como se muestra en la Figura 17, los cuales son responsables de las propiedades de solubilización y de detergencia. Sin embargo, la presencia de solutos en la fase acuosa puede modificar tanto las interacciones favorables como

las desfavorables a la micelización. Entre sus aplicaciones se encuentra la detergencia, la separación y la extracción selectiva.

Figura 17. Fenómeno de asociación de un surfactante.



Fuente: Cuaderno FIRP 300. Surfactantes. Laboratorio de Fenómenos Interfaciales y recuperación del petróleo. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela. 1993. **Salager, J. L.**

1.13.2. Tipos de Surfactantes

En función de su estructura o más exactamente según la forma de disociación en el agua, los surfactantes se clasifican en:

a) Surfactantes Aniónicos: Son aquellos que se disocian en un anión anfífilo y un catión, el cual es en general un metal alcalino o un amonio cuaternario. A este grupo pertenecen los jabones (sales de sodio de ácidos grasos), agentes espumantes humectantes, etc.

b) Surfactantes Noiónicos: En solución acuosa no se ionizan, puesto que ellos poseen grupos hidrófilos de tipo alcohol, fenol, éter o amida.

c) Surfactantes Catiónicos: Estos se disocian en solución acuosa en un catión orgánico anfífilo y un anión generalmente del tipo halogenuro. La gran mayoría de estos surfactantes son compuestos nitrogenados del tipo sal de amina y grasa o de amonio cuaternario.

1.14. TÉCNICAS PARA EVALUACIONES DE BIOCIDAS

El programa de tratamiento con biocidas debe adaptarse a cada situación en particular, debiendo considerarse las características de las especies sésiles microbianas aisladas, las características fisicoquímicas del medio y las particularidades del sistema industrial a controlar. Dentro de las técnicas más empleadas para la evaluación de biocidas podemos mencionar:

1.14.1. Prueba de densidad relativa de población Sésil

Consiste en incubar muestras del sistema a controlar con varios biocidas a diferentes concentraciones. La reducción porcentual de los microorganismos se determina por recuento de colonias en placa antes y después del tratamiento con el biocida. El biocida que produzca una mayor disminución porcentual de los microorganismos a la concentración menor será el producto elegido.

1.14.2. Técnica de Inhibición

En una placa de Petri conteniendo una solución adecuada de la muestra en un medio de cultivo sólido se depositan discos de papel embebidos con concentraciones conocidas de diversos biocidas. Se evaluará la eficiencia del producto en función del diámetro del halo de inhibición (donde no se observa crecimiento) obtenido alrededor de cada disco. Cuando mayor sea la zona de inhibición mayor será la eficiencia del biocida.

1.14.3. Técnica del Número más probable (NMP)

Este método se basa en la utilización de una serie de frascos de volumen pequeño (10 mL aproximadamente), conteniendo una cantidad fija de medio líquido selectivo para el microorganismo sobre el cual se quiere evaluar determinado biocida. Para ello, se inoculará el primer frasco de la serie con una alícuota determinada de la muestra mediante una jeringa estéril (por lo general de 1 ml), y a partir de allí se realizarán transferencias de alícuotas iguales de frasco en frasco hasta cubrir una serie de 6 a 10 frascos, implicando en cada caso una dilución de 1:10.

1.15. PROCESO PRODUCTIVO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES COLOMBIA_1

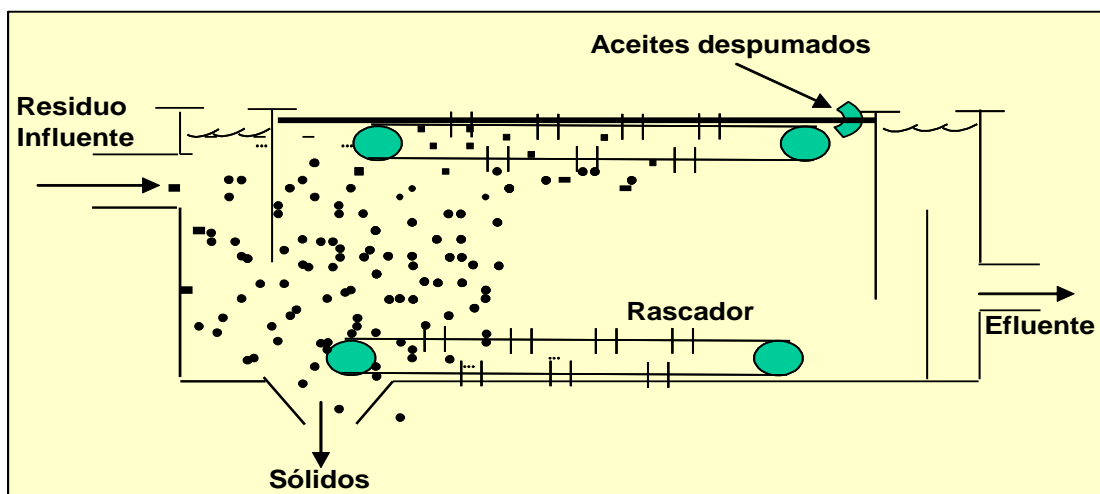
La Planta de Tratamiento de Efluentes Colombia_1 fue diseñada para manejar una producción de agua de 240 MBD, dando las facilidades para poner fuera de servicio parte de los equipos principales sin afectar la capacidad ni calidad de los efluentes. La Planta cuenta con las siguientes fases y equipos:

- **ALIMENTACIÓN:** recibe el agua producto de la deshidratación del crudo de las segregaciones Lagomar y Lagomedio. El crudo de estas segregaciones es liviano de gravedad 32 ° API y 39 ° API respectivamente.

- **SEPARADORES API:** La función principal de los separadores API consiste en separar el aceite libre de las aguas residuales; sin embargo, no pueden separar las impurezas solubles ni romper las emulsiones. Los separadores por gravedad funcionan por el principio de la diferencia de densidades y las fuerzas de flotación resultantes, que causan que las gotitas de aceite libre asciendan a la superficie.

El separador API consta de una artesa o estanque rectangular donde el agua residual sigue un flujo horizontal, mientras que las gotitas de aceite ascienden verticalmente hasta la superficie (Figura 18) El aceite libre que se reúne en la superficie del separador es despumado y almacenado. La Planta COLOMBIA_1 posee dos API, cada una con una capacidad de 240 MBD, con un contenido máximo de crudo de 10.000 ppm. Después de esta etapa el crudo recolectado pasa a la Fosa de Recolección de Crudo (Fosa N° 1), mientras el agua pasa a la Fosa Home.

Figura 18. Separador API



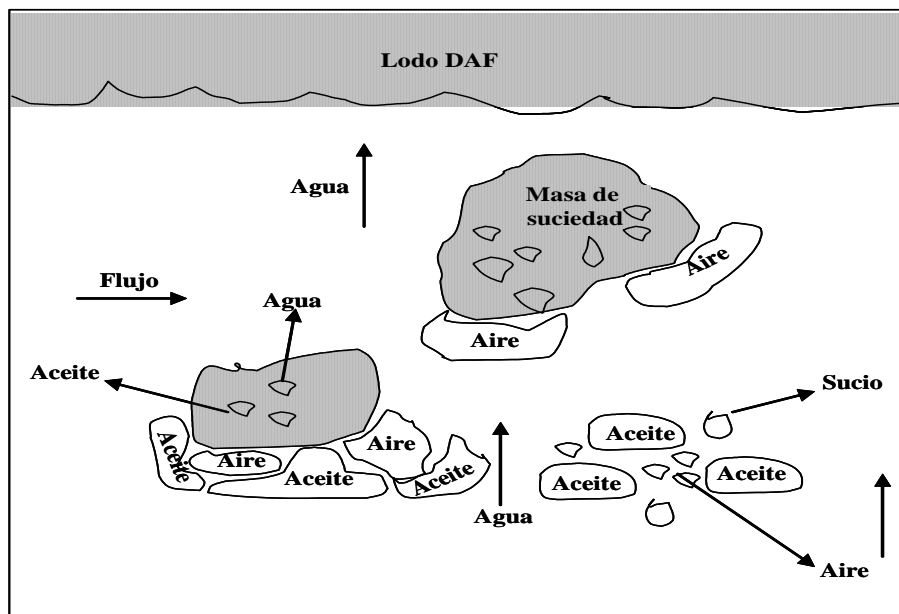
Fuente: Autor

- **SISTEMA DE FLOTACIÓN DAFS¹¹** estas unidades utilizan agua a presión que se sobresatura de aire al liberar la presión. Se forman burbujas de aire de 30 a 130 micras que fomentan la flotación.

La flotación con aire disuelto funciona alternando la densidad del particulado, incorporando aire sobre o dentro de la estructura del floculado. Las burbujas se unen por:

1. Adhesión de la burbuja a una partícula, sea por choque o como punto de condensación.
2. Inclusión de la burbuja en la estructura del floculado.
3. Adsorción de la burbuja en la estructura del floculado.
4. La Figura 19 muestra la formación de un lodo oleoso. Las burbujas de aire se forman en y alrededor de los sólidos en suspensión y las gotas de aceite emulsificado. Al unirse las gotitas, el aire queda atrapado dentro y sobre la estructura del floculado, produciendo un floculado menos denso que el agua. Finalmente, el floculado se convierte en un lodo oleoso continuo.

Figura 19. Formación de lodo en un DAF



Fuente: Giralt, A. C. (2004) Técnicas de Flotación. [On-line]. Disponible en; <http://www.monografias.com/trabajos16/tecnicas-flotacion/tecnicas-flotacion.shtml>

El agua entra por la parte inferior de los tanques, sin embargo, un porcentaje de esta agua es desviada y saturada con aire. Esta saturación se basa en la

¹¹ Giralt, A. C. (2004) Técnicas de Flotación. [On-line]. Disponible en; <http://www.monografias.com/trabajos16/tecnicas-flotacion/tecnicas-flotacion.shtml>

solubilidad del aire en el agua sometida a presión. Básicamente consiste en someter el agua ya floculada a presión durante cierto tiempo, introduciendo simultáneamente aire comprimido hasta lograr la dilución del aire en el agua. Luego el agua se despresuriza formando gran cantidad de burbujas de aire, las cuales logran que gotas de petróleo y algunos sólidos suban a la superficie y sean retirados por los desnatadores.

En la planta hay tres unidades de flotación por aire inducido dispuestas en paralelo, cada una con una capacidad de 120 MBD. El crudo recuperado es enviado a una fosa de recuperación de crudo (Fosa N° 2), y el agua es enviada a la Fosa Post Daf, para luego ser enviada a la piscina de agua semi-limpia.

- **PISCINA DE AGUASEMI-LIMPIA Y PISCINA DE AGUA LIMPIA:** es la tercera fase de separación y consiste en someter al agua a largos tiempos de residencia (de 3 a 5 días) para retirar el crudo remanente. La Piscina de Agua Limpia recibe el agua de la Piscina de Agua Semi-Limpia.

Las capacidades de las piscinas son 200 y 300 MBD respectivamente. El crudo recuperado es enviado a la Fosa N° 2 y el agua es enviada al equipo de filtración.

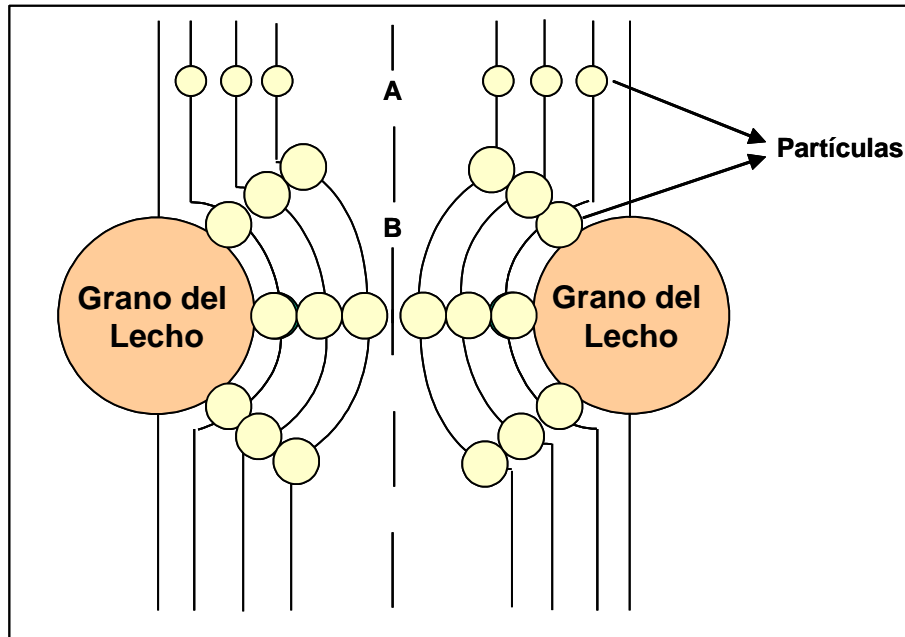
- **SISTEMA DE FILTRACIÓN:** El objetivo básico de la filtración es separar las partículas y microorganismos objetables, que no han quedado retenidos en los procesos de coagulación y sedimentación. El proceso de filtración se realiza en dos etapas distintas pero complementarias:

1. La de transporte de las partículas dentro de los poros.
2. La de adherencia a los granos del medio.

El transporte de partículas: es debido a fenómenos físicos e hidráulicos, y se lleva a cabo por los siguientes mecanismos:

- a) *Cernido*, solo actúa en las capas más superficiales del lecho y con partículas relativamente fuerte capaces de resistir los esfuerzos cortantes producidos por el flujo, cuya velocidad aumenta en las constricciones.
- b) *Sedimentación*, la remoción de partículas menores que el tamaño de los poros, se debe a que estas pueden quedar depositadas por sedimentación.
- c) *Intercepción*, la Figura 20 representa este mecanismo. Si se supone que las partículas (A) viajan con las líneas de flujo, lo cual es cierto para velocidades bajas, resulta claro que al producirse el estrechamiento de dichas líneas en la constricción (B) estas se ven forzadas a ponerse en contacto entre si y con el medio filtrante, quedando interceptadas por este.

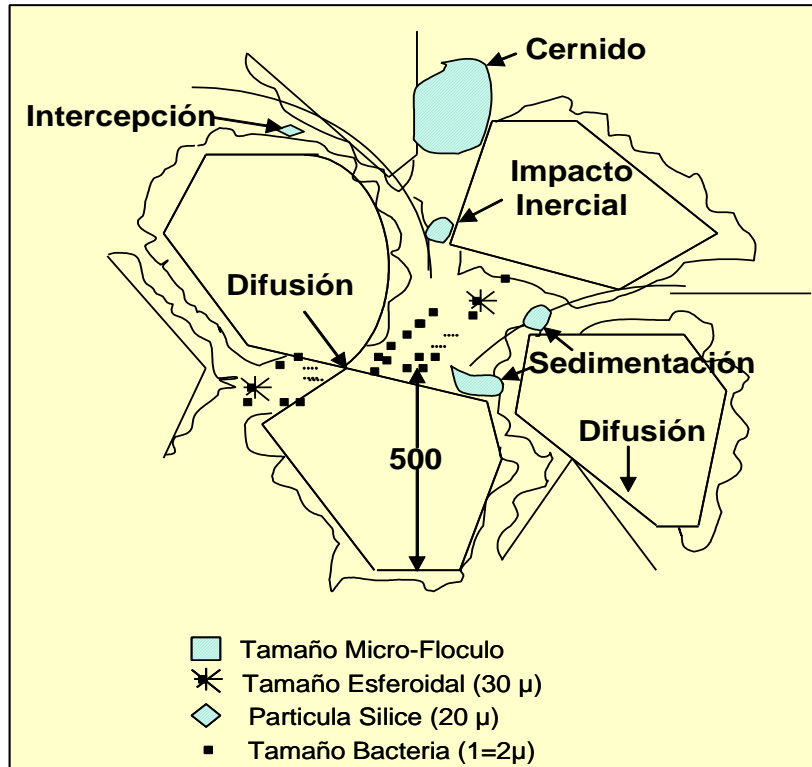
Figura 20. Contacto de las partículas con el medio filtrante.



Fuente: ARBOLEDA V., J. Teoría y práctica de la purificación del Agua. Tercera Edición. Editorial Nomos, S.A. Bogota, Colombia. 2000.

- d) *Impacto Inercial*, cuando la velocidad es alta y la partícula es grande, deben tenerse en cuenta los efectos de la inercia, los cuales hacen que aquella pueda seguir una trayectoria distinta a la de las líneas de flujo si adquiere suficiente cantidad de movimiento para eso. Mientras las líneas de flujo se curvan, las partículas pueden continuar su trayectoria original impulsadas por las fuerzas de inercia, y chocar con el grano del filtro quedando adheridas a él. Sin embargo, la viscosidad del fluido hace difícil que la materia suspendida pueda adquirir suficiente cantidad de movimiento, como para que el impacto inercial sea de significación.
- e) *Difusión*, debido al movimiento browniano, existe una tendencia de las partículas pequeñas a difundirse de las áreas de mayor concentración a las áreas de menor concentración.
- f) *Hacino Hidrodinámica*, partículas de tamaño grande en un medio viscoso en movimiento laminar podrán tener en sus extremos velocidades diferentes. Las diferencias de estas velocidades hacen que la partícula sea conducida a una región de velocidad más baja. La Figura 21 muestra un esquema de los diferentes mecanismos de transporte:

Figura 21. Mecanismos que producen el transporte de las partículas hasta los granos del lecho filtrante



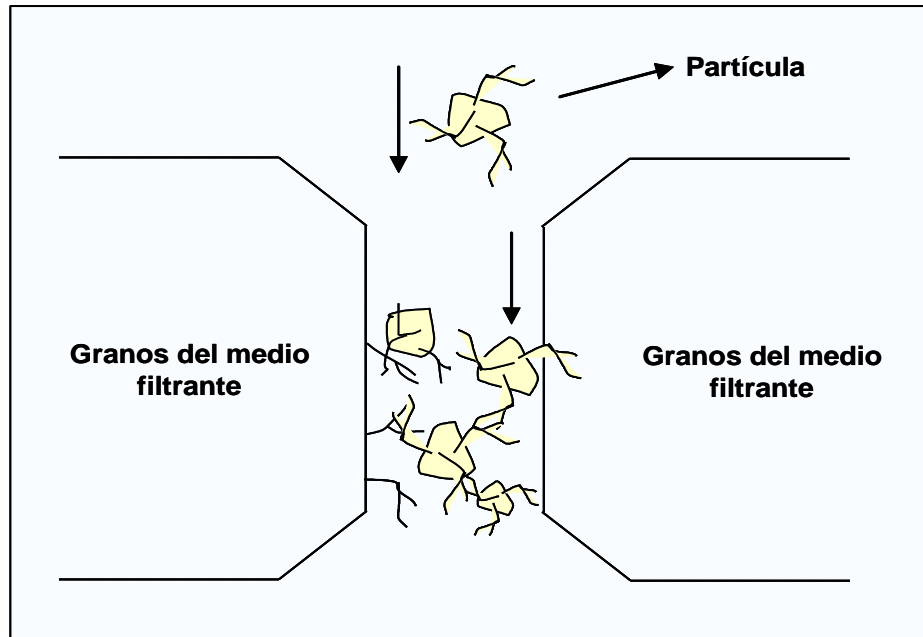
Fuente: ARBOLEDA V., J. Teoría y práctica de la purificación del Agua. Tercera Edición. Editorial Nomos, S.A. Bogota, Colombia. 2000.

La Adherencia: esta propiedad depende más que de mecanismos puramente físicos, de una serie de factores químicos y electroquímicos. Los más importantes son:

- Fuerzas de Van der Waals,** según esta teoría, el floc más denso se adhiere con más fuerza al medio filtrante.
- Fuerzas Electrostáticas,** la combinación de las fuerzas electrostáticas con las de Van der Waals, las que determinan, dentro de ciertas circunstancias, la adsorción entre partículas.
- Puente Químico,** el uso de ayudantes de filtración o polielectrolitos inyectados en el efluente al filtro, puede ser de gran utilidad para aumentar la adhesión. Las partículas con sus segmentos poliméricos adheridos, al atravesar las constricciones del medio filtrante, se enlazan con los segmentos sueltos adsorbidos por los granos o por los de

partículas ya adheridas al lecho filtrante y quedan de esta forma retenidas (Figura 22).

Figura 22. Esquema de la acción de los polímeros en un medio granular



Fuente: ARBOLEDA V., J. Teoría y práctica de la purificación del Agua. Tercera Edición. Editorial Nomos, S.A. Bogota, Colombia. 2000.

La planta de tratamiento de efluentes Colombia_1 consta de 6 filtros horizontales presurizados (cerrados) con una capacidad de 50 MBD cada uno. El lecho filtrante está compuesto por: grava, antracita y arena.

El tiempo de operación es de 12 horas aproximadamente. Al finalizar este tiempo viene un proceso de retrolavado de los filtros. El retrolavado de 30 minutos mediante la inyección de agua y aire para remover los sólidos y el crudo del lecho filtrante. El agua de lavado es tomada del mismo proceso (tomada a la salida de los filtros) mientras que el aire es provisto por un soplador.

- **DESAERACIÓN:** está compuesta por las torres desaeradoras A y B de 140 MBD cada una, en las cuales el agua filtrada entra por el tope y desciende a través de empaques. Estas torres trabajan al vacío, con la finalidad de disminuir la concentración de oxígeno en el agua, evitando la corrosión del sistema de tuberías. El Diagrama de la planta de tratamiento de efluentes Colombia_1 se muestra en la Figura 23.

1.15.1. Inyección de química:

El agua de formación se somete a un tratamiento físico, el cual viene dado por los equipos nombrados anteriormente. Este tratamiento es complementado con la dosificación de distintos productos químicos, los cuales además de mejorar algunas propiedades del agua, resguardan las líneas y equipos de la planta de problemas de corrosión, incrustaciones, entre otros. A continuación, se nombran los productos aplicados y sus puntos de inyección:

- **Agente Clarificante y Ayudante de Filtración:** son polielectrolitos que neutralizan las cargas eléctricas que rodean a las gotas de crudo y los sólidos, permitiendo la formación de flóculos resistentes que capturen la mayor cantidad posible de contaminantes, facilitando su separación del agua. El clarificante se inyecta a dosis de 3 a 4 ppm (dependiendo del volumen de agua a tratar) en la salida de la Fosa Home (en la descarga de las bombas). Mientras que el ayudante de filtración se aplica en la entrada de los filtros a dosis de 0,3 ppm.

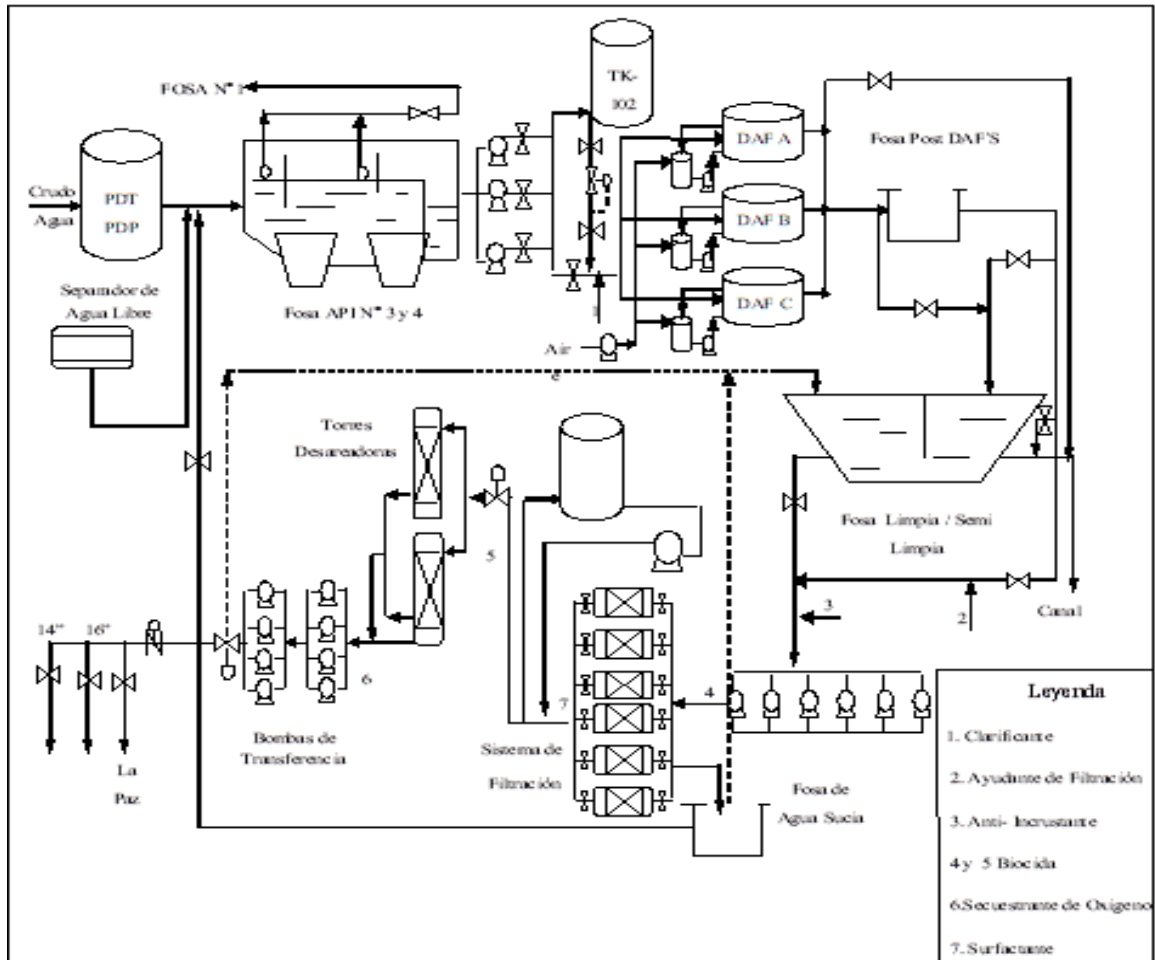
- **Inhibidores de Incrustaciones:** son sustancias químicas que controlan rápidamente la formación de carbonatos de calcio (CaCO_3). Estos productos se dosifican en la succión de las bombas de filtrado a una dosis continua de 15 ppm.

- **Biocida:** es un producto químico utilizado para controlar la población de microorganismos perjudiciales. Este químico se aplica en la entrada general de los filtros y opcionalmente se tiene otro punto de inyección a la salida de los filtros. La aplicación de biocida se realiza cada ocho días, a una dosis de 300 ppm con un tiempo de contacto de 3 horas.

- **Surfactante:** Es una molécula que busca una interfase. Químicamente un surfactante tiene afinidad tanto por el agua como por el aceite, tiene una actividad superficial o interfacial y le da a las emulsiones cierto grado de estabilidad. En la planta este compuesto se inyecta a los filtros junto al agua de retrolavado. Por cada lavado del filtro se consumen aproximadamente 5 galones (18 litros) de surfactante. Tiene como objetivo remover el crudo que se encuentre adherido al lecho.

- **Secuestrante de Oxígeno:** es un compuesto cuya finalidad es disminuir químicamente la concentración de oxígeno. Se inyecta a una dosis de 1 ppm en la salida de las torres desaireadoras.

Figura 23. Esquema de la Planta de Tratamiento de Efluentes Colombia 1.



Fuente: El Autor

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1. SEGUIMIENTO DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA PLANTA

Durante la evaluación de los biocidas se chequearon todos los aspectos operacionales (Producción, abertura de válvulas y drenajes, etc.); que hubiesen podido afectar el crecimiento y desarrollo de las BSR.

2.1.1. Evaluación de la naturaleza y características físico-químicas del agua.

Se caracterizó el agua de la planta en la entrada de los filtros. Realizando los siguientes análisis:

a) El **pH**, se midió utilizando el procedimiento del Laboratorio de Clariant Oil services PIC 326 Determinación de pH en aguas¹², el cual está basado en el Método Covenin 676-81.

b) El **Contenido de Oxígeno**, fue determinado utilizando el PIC 327 Determinación de Oxígeno en agua a bajas concentraciones¹³, basado en la Norma ASTM D 5543-94.

c) El **Contenido de H₂S**, se contabilizo utilizando el PIC 345 Determinación de Sulfuro de Hidrógeno con el Kit HACH¹⁴.

d) El Contenido de **Sólidos Suspendidos**, se determinó mediante el PIC 301 Determinación de Sólidos Suspendidos¹⁵, el cual hace referencia al Método N° 2540D “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”.

e) La **Dureza Total**, se midió, utilizando el PIC 322 Dureza Soluble y Total por valoración con EDTA¹⁶, fundamentada en el Método No. 2340C, “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”.

¹² CLARIANT OMS. Método de Análisis para la Medida de pH en Aguas. PIC 326 Laboratorio de Clariant Oil Services. Cota, Colombia.

¹³ CLARIANT OMS. Método de Análisis para la Determinación de Oxígeno Disuelto en agua a bajas concentraciones. PIC 327 Laboratorio de Clariant Oil Services. Cota, Colombia.

¹⁴ CLARIANT OMS. Método de Análisis para la Determinación de Sulfuro de Hidrógeno utilizando el Kit HACH. PIC 345 Laboratorio de Clariant Oil Services. Cota, Colombia.

¹⁵ CLARIANT OMS. Método de Análisis para la Determinación de Sólidos Suspendidos PIC 301 Laboratorio de Clariant Oil Services. Cota, Colombia.

¹⁶ CLARIANT OMS. Método de Análisis para la Determinación Dureza Soluble y Total por Valoración con EDTA. PIC 322 Laboratorio de Clariant Oil Services. Cota, Colombia.

f) El contenido de **Cloruros** y de **Alcalinidad**, fue obtenido utilizando los procedimientos: PIC 315 Concentración de Cloruros por valoración con Nitrato de Plata¹⁷, basado en el Método D 512-89 (1999), “Annual Book Of ASTM Standards”, y el PIC 323 Alcalinidad Total por valoración directa¹⁸, el cual hace referencia al Método No. 2320B, “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”.

g) La población de **BSR** fue contabilizada con el procedimiento Microbiology Standard Operation Procedure MSP03/010¹⁹, basado en la Norma API²⁰ y Nace TMO194-94²¹.

h) La cantidad de **Hierro Total y Soluble** se midió, mediante el PIC 331 Determinación de Hierro²². Este procedimiento está basado en el método N° 3500 del “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”.

2.1.2. Tratamiento químico aplicado y puntos de inyección.

Se verifico la inyección de los distintos productos utilizados en planta, especialmente, la inyección de Biocida. La aplicación de este producto fue suspendida, mientras la biocuponera permanecía en las instalaciones de la planta, garantizando de esta forma el crecimiento de las bacterias.

¹⁷ CLARIANT OMS. Método de Análisis para determinar la Concentración de Cloruros por Valoración con Nitrato de Plata. PIC 315 Laboratorio de Clariant Oil Services. Cota, Colombia.

¹⁸ CLARIANT OMS. Método de Análisis para determinar Alcalinidad Total por Valoración Directa. PIC 323 Laboratorio de Clariant Oil Services. Cota, Colombia.

¹⁹ CLARIANT OMS. Evaluación de la eficiencia de Biocidas para el control de BSR sésiles. Microbiology Standard Operation Procedure-MSOP 03/010. Laboratorio Clariant Brasil.

²⁰ AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE - API RP 38 Recommended practice for biological analysis of subsurface injection waters. 1975.

²¹ NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS - NACE Standard TMO 194 “Field monitoring of bacterial growth in oilfield systems”. Houston, Texas. 1994.

²² CLARIANT OMS. Método de Análisis para la Determinación de Hierro. PIC 331 Laboratorio de Clariant Oil Services. Cota, Colombia.

2.2. PRUEBAS DE LABORATORIO PARA LA SELECCIÓN DEL BIOCIDA MÁS EFICIENTE.

Se realizaron estudios con trece biocidas diferentes para establecer el producto, dosis y tiempo de matanza e inhibir el crecimiento de BSR hasta 10^2 cel/ mL. Los productos que fueron evaluados se muestran en la Tabla 3:

Tabla 3.: Nomenclatura de los biocidas

Nomenclatura	Componente activo
TK-2416, C, D, E, F y G	THPS
H, I, J y K	Aldehídos
L, M y N	Sales de Amonio Cuaternario (SAC)

Fuente: El Autor

Las pruebas se llevaron a cabo en el Laboratorio de la Empresa Clariant Oil Services en un lapso de doce semanas, resaltando que cada una de ellas se realizó por duplicado y en dos ocasiones para cumplir con la duplicidad y repetibilidad de los resultados. Para ello, se instaló una biocuponera en la Planta Colombia_1, la cual se derivó de la línea principal a la entrada de los filtros como se muestra en la Figura 24, simulando las condiciones reales del sistema.

Figura 24. Biocuponera



Fuente: El Autor

Para la selección del biocida al nivel de laboratorio se realizaron los siguientes trabajos:

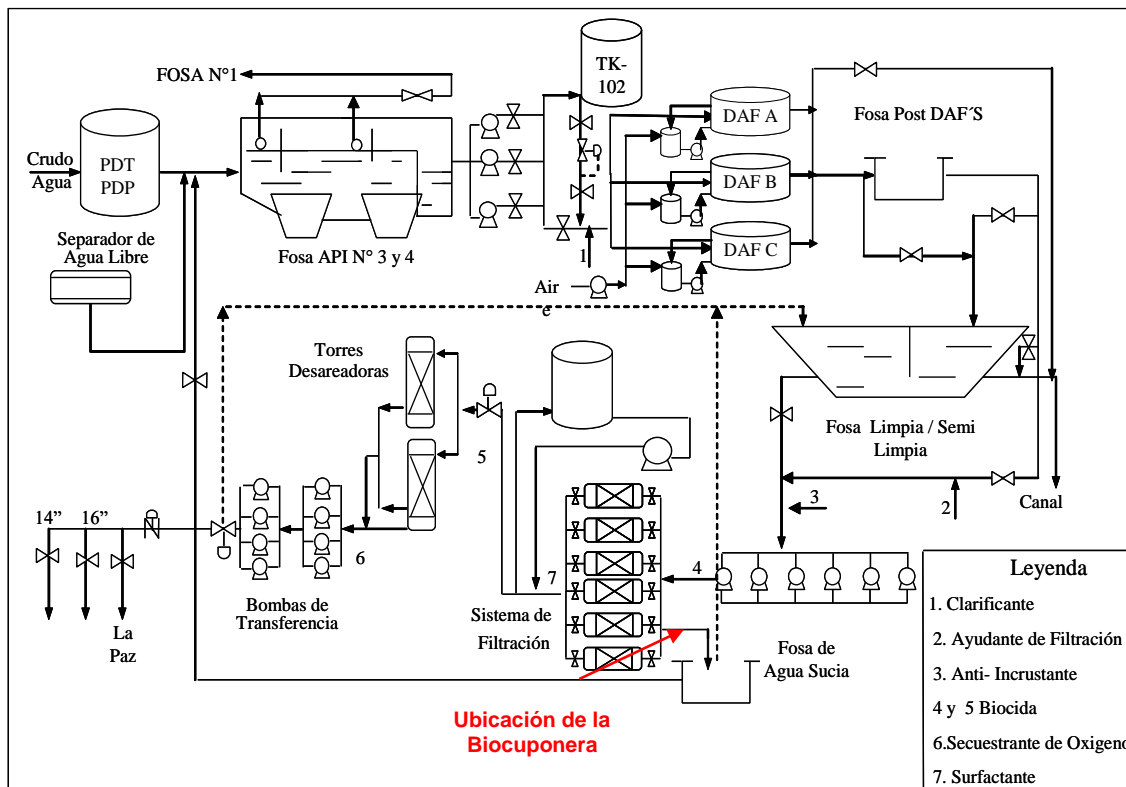
1.- Preparación de los cupones de acero al carbono

El procedimiento utilizado para la preparación de los cupones está citado por la Norma Nace Standard TMO194.

2.- Instalación de la biocuponera en la Planta COLOMBIA_1

Se instaló una biocuponera con 12 cupones de acero al carbono en la entrada general de los filtros, tal como se muestra en la Figura 25, la cual se monitoreo por un período de ocho días, utilizando una tubería limpia, en la cual se depositaron material orgánico y biológico presente en el agua del proceso²³.

Figura 25. Ubicación de la biocuponera en la Planta Colombia_1.



Fuente: El Autor

²³ SURINACH, P.P. (1986) A new concept of treating surfaces exposed to oilfield water systems.

Para tratar de igualar la velocidad de flujo del sistema en la biocuponera, se igualó la velocidad de flujo de la entrada de la biocuponera con la del sistema, según la siguiente ecuación:

$$\frac{Q_{biocuponera}}{A_{biocuponera}} = \frac{Q_{sistema}}{A_{sistema}} \quad (20)$$

Donde, Q = Caudal (m³/s)
A = Área de la tubería (m²).

El caudal del sistema, así como el área de la tubería de la entrada de los filtros y de la biocuponera eran datos conocidos, por lo tanto, se calculó el caudal de entrada a la biocuponera. En la Tabla 4 se muestran los valores obtenidos al aplicar la ecuación anterior:

Tabla 4.: Cálculo del Caudal de la biocuponera

Pto. de Muestreo	Caudal (m ³ /s)	Área (m ²)	Reynolds	Velocidad (m/s)	Velocidad (ft/s)
Tubería	0.27602	0,14434	96503	1,912	6,3
Biocuponera	1,501x10⁻⁴	7.85x10 ⁻⁵	2248		

Por los resultados obtenidos se determinó que el flujo en ambos casos era de Régimen Turbulento. Sin embargo, este flujo no se pudo obtener en la biocuponera, y además, para hacer más crítica las condiciones de la prueba (velocidad de flujo más baja y mayor deposición de biomasa), se procedió a calcular un flujo de agua de entrada a la biocuponera hasta lograr un Régimen Laminar (Reynolds < 2000)²⁴, midiendo el tiempo necesario para obtener 1 litro de agua. Esto para permitir una mayor adherencia de las bacterias a la superficie del metal, y la formación de la biopelícula necesaria para la evaluación de los biocidas. En la Tabla 5 se muestra el caudal obtenido:

Tabla 5.: Cálculo del caudal de la biocuponera para obtener un Flujo Laminar

Tiempo Promedio (s)	Caudal (L/s)	Caudal (m ³ /s)	Reynolds	Velocidad (m/s)	Velocidad (ft/s)
38	0.0263	2,63x10 ⁻⁵	394	0,335	1

Esta velocidad de 1 ft/s, aunque no simula velocidades de flujo en la planta, simula las

²⁴ MELÉNDEZ, J. E. Mecánica de Fluidos. Flujo compresible y flujo incompresible

condiciones más críticas encontradas en algunos pozos inyectoros, tal como el Pozo Inyector-019 (perteneciente a la PIA 1); donde se han registrado velocidades entre 0,85 – 1 ft/s.

2.3. Preparación de los Medios de Cultivos.

El procedimiento utilizado para la preparación de los medios de cultivos es el sugerido por la Norma “Microbiology Standard Operation Procedure MSP03.”²⁵

2.4. Retiro de la biocuponera en Planta.

Para garantizar que los cupones y el agua que contenía la biocuponera no se contaminaran con la presencia de oxígeno al momento de su retiro, se cerraron las válvulas que se encuentran en cada uno de sus extremos. La biocuponera fue llevada al Laboratorio para la realización de las evaluaciones.

2.5. Proceso de inoculación.

En un Bio-reactor se agregaron 400 mL de medio de cultivo, y 9 mL del agua que contenía la biocuponera. Simultáneamente a estas acciones, se inyectaba nitrógeno al reactor para desplazar el oxígeno presente en el mismo. Luego, el bio – reactor fue cerrado herméticamente, y para eliminar las trazas de oxígeno no desplazadas por el nitrógeno, se aplicaron 10,5 mL de Bisulfito de Sodio al 8%. Finalmente, este cultivo de bacterias se incubó a 35 ° C por 72 horas.

Por otra parte, con los cupones extraídos de la biocuponera, se determinó la carga bacteriana del sistema mediante diluciones seriadas³¹.

En las Figuras 26 y 27 se muestran algunos de los materiales utilizados en la inoculación de las BSR.

²⁵ CLARIANT OMS. Evaluación de la eficiencia de Biocidas para el control de BSR sésiles. Microbiology Standard Operation Procedure-MSOP 03/010. Laboratorio Clariant Brasil.

Figura 26. Materiales utilizados para la inoculación de BSR Sésiles



Fuente: Laboratorio OMS. Clariant

Figura 27. Bio-reactor



2.6. Ensayo y/o Prueba de Matanza.

Durante esta prueba fueron evaluados trece Biocidas diferentes. En la Tabla 7 se nombran los componentes activos de cada uno, incluyéndose el producto que actualmente se está utilizando en la Planta Colombia_1 (TK 2416).

Este producto se inyecta a una dosis de 300 ppm por 3 horas una vez a la semana; siendo este esquema de tratamiento el patrón de comparación para determinar o confirmar si los biocidas evaluados en el laboratorio, ofrecían mejoras con respecto al actual esquema utilizado en planta.

Las dosis evaluadas fueron 300, 500 y 1000 ppm con tiempo de contacto de 2 y 3 horas, tal como se muestra en la Tabla 6. Estas dosis fueron seleccionadas en función de evaluaciones anteriores, donde, se determinó que a 200 ppm los biocidas no eran eficientes en el control de las BSR.

Todos los ensayos se realizaron dos veces y por duplicado, incluyendo el blanco. El blanco es el cupón de control que ha sido expuesto a las mismas condiciones que el resto de los cupones, pero sin la aplicación de biocida.

Tabla 6.: Esquema de evaluación de los biocidas

Biocidas	TK-2416, C, D, E, F y G	H, I, J, K	L, M y N
Dosis (ppm)	300	300	300
	500	500	500
	1000	1000	1000
Tiempo de Contacto (hrs.)	2	2	2
	3	3	3

Fuente: EL Autor.

2.6.1. Evaluación de los Biocidas.

Todos los biocidas fueron evaluados de la siguiente manera: Se retiró un cupón del bio – reactor, el cual fue enjuagado con la solución de Buffer Anaerobio PBS. Luego, este cupón se introdujo en la solución de biocida a evaluar. Una vez, finalizado el tiempo de contacto establecido, se extrajo y se enjuago nuevamente con el Buffer PBS. Rápidamente, se colocó el cupón en el vial con medio de cultivo, se selló y se inyectaron 0,2 ml de Bisulfito de Sodio al 6%.

Asimismo, el vial fue sometido a ultrasonido por 1 minuto. Las Figuras 28 y 29 muestran el esquema de la prueba de matanza.

Figura 28. Diagrama de la prueba de matanza

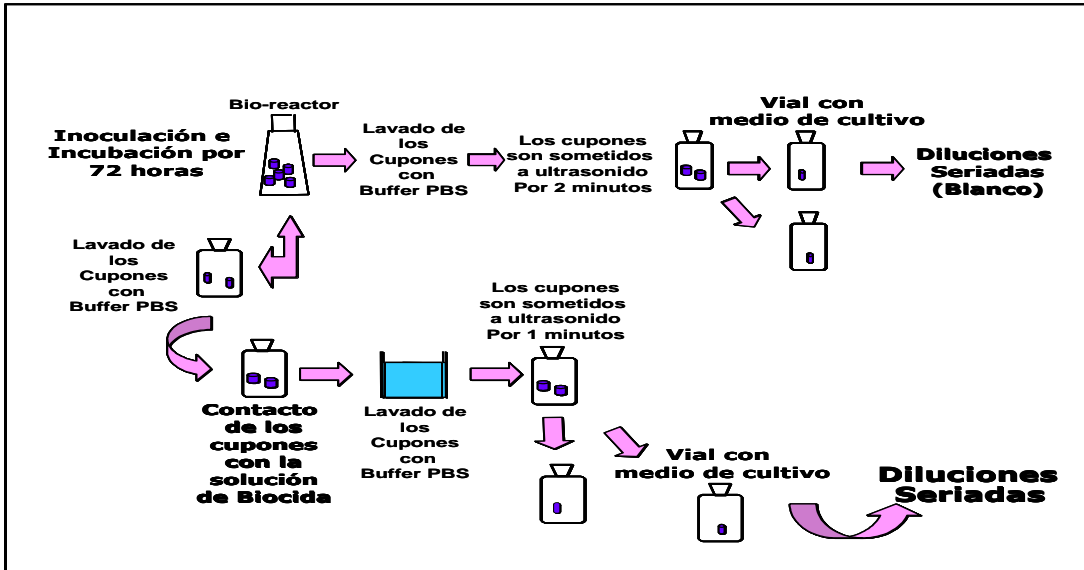
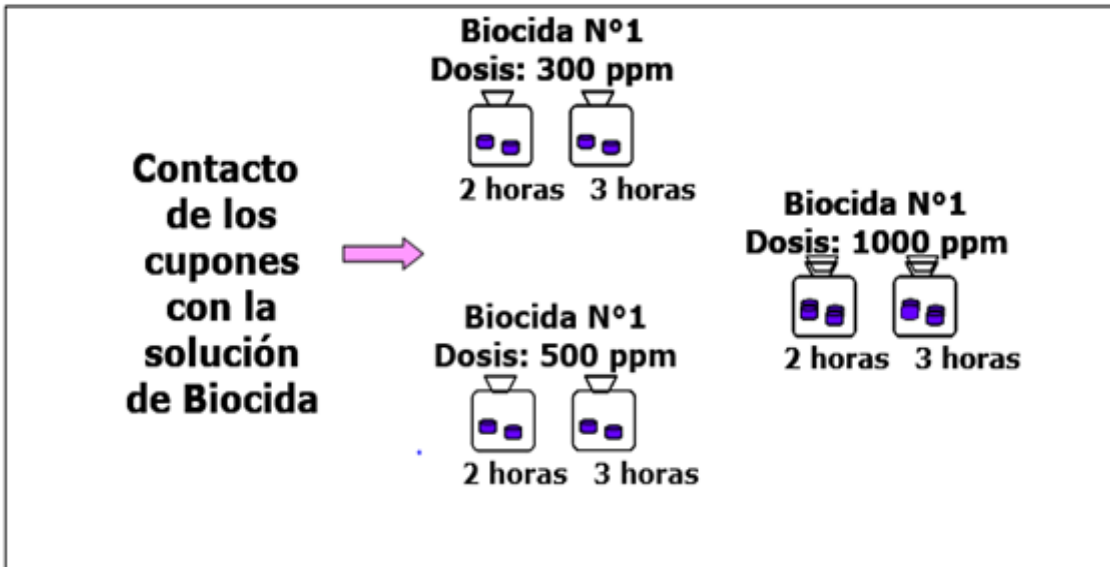
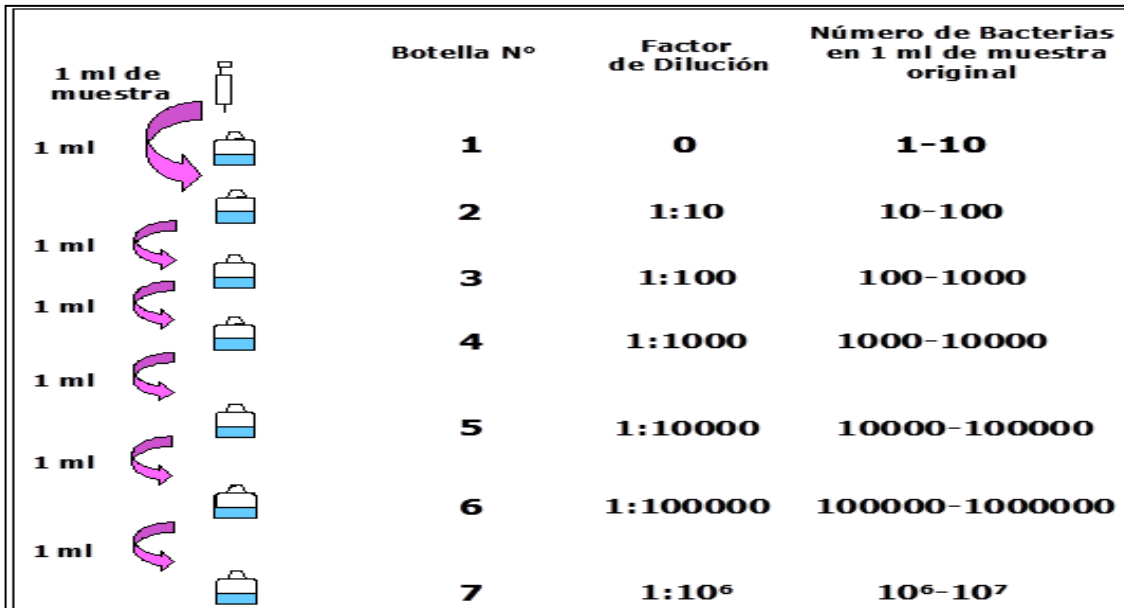


Figura 29. Detalle del contacto de los cupones con la solución de biocida



Finalmente, se realizó el Método de Diluciones Seriadas, mostrado en la Figura 30. Este procedimiento está basado en las Normas API RP 38 y en la Nace Standard TMO194-94 Monitoreo del Crecimiento Bacteriano en Sistemas del Campo Petrolero, y los viales fueron incubados a $35 \pm 2^\circ \text{C}$, tal como se muestra en la Figura 31.

Figura 30. Diluciones Seriadas



Fuente: Nace Standard TMO194-94 Monitoreo del Crecimiento Bacteriano en Sistemas del Campo Petrolero

Figura 31. Incubadora



Fuente: Laboratorio OMS Clariant.

2.6.2. Observación de Viales.

La Norma utilizada establece 21 días de incubación, pero para acelerar la obtención de resultados los viales fueron observados a los tres, cinco, quince y Veintiún días después de la inoculación

2.6.3. Selección del Biocida.

Se seleccionó el Biocida, a la dosis y tiempo de contacto que permitió inhibir el crecimiento de BSR hasta $\leq 10^2$ cel/mL.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA

En las Figuras 32, 33, 34 y 35 se muestran los resultados de la caracterización del agua a la entrada de los filtros de la Planta Colombia_1.

Figura 32. Valores de hierro y sólidos obtenidos en la entrada de los filtros

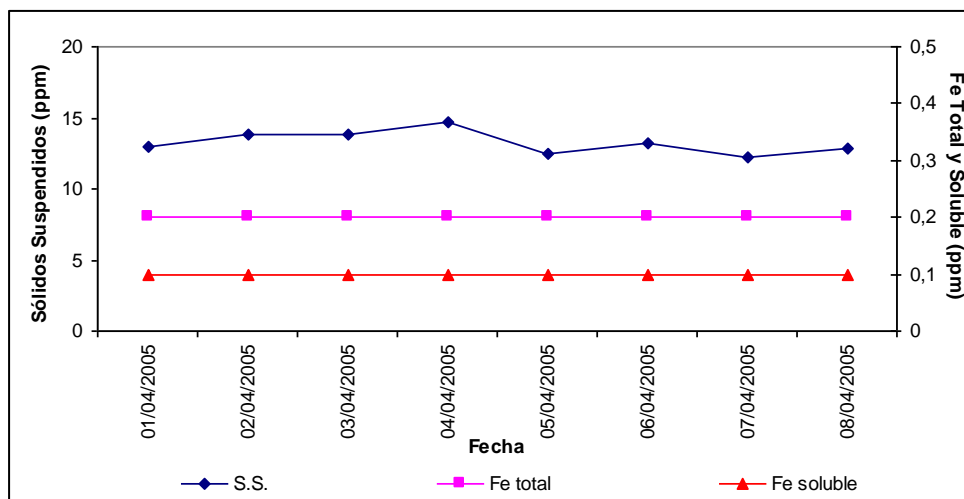
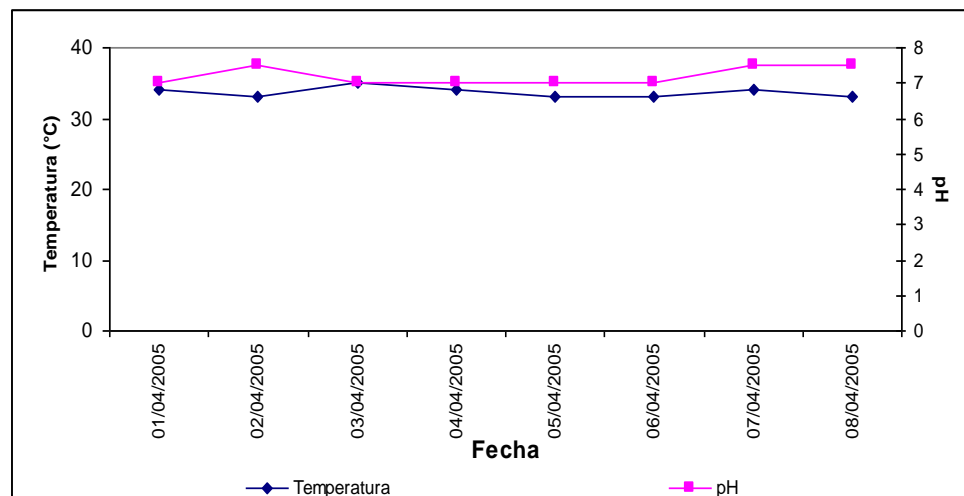


Figura 33. Temperatura y pH del agua a la entrada de los filtros.



En las Figuras 32 y 33 se observa que los sólidos suspendidos, el contenido de hierro total y soluble, la temperatura y el pH se mantuvieron prácticamente constantes durante la captación de las BSR sésiles. El nivel de sólidos se

encontraba aproximadamente en 13 ppm, mientras que el hierro total y soluble arrojó valores de 0,2 y 0,1 ppm respectivamente. El pH se mantuvo entre 7 – 7,5; y la temperatura entre los 30 – 35 ° C.

Figura 34. Contenido de oxígeno y H2S en la entrada de los filtros

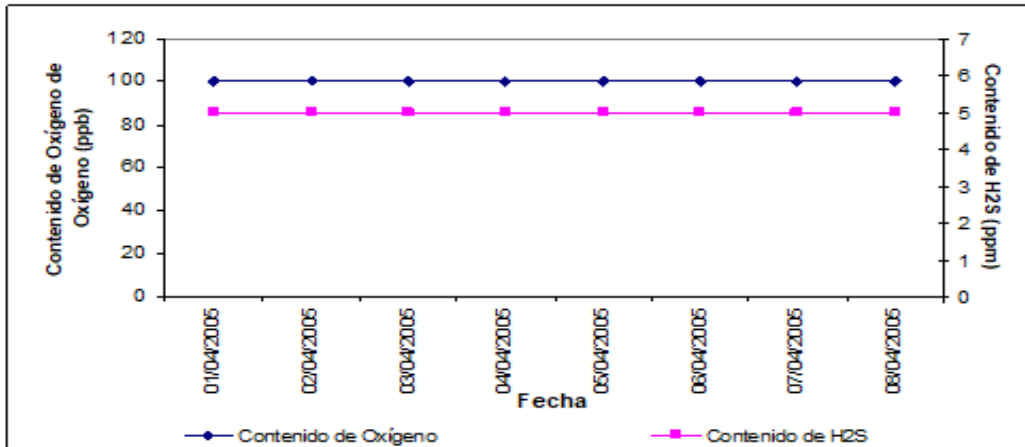
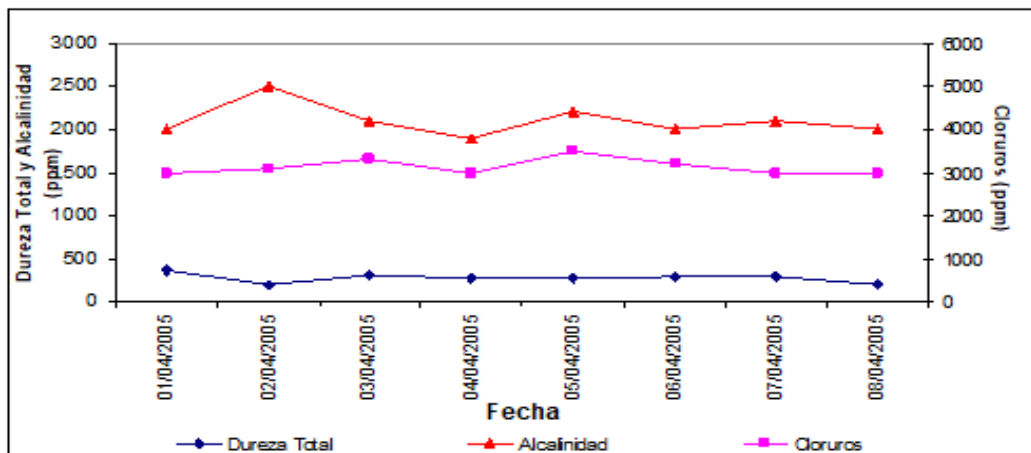


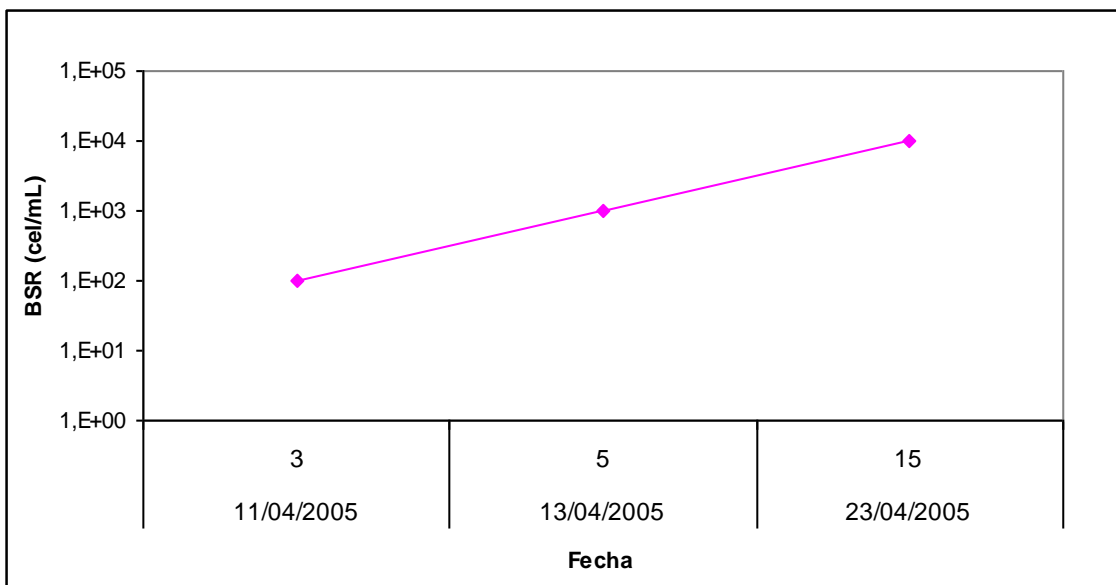
Figura 35. Valores de dureza total, alcalinidad y cloruros en la entrada de los filtros



En la Figura 34 se observa el contenido de oxígeno y H2S en la entrada de los filtros, y en la Figura 35 se muestran los valores de dureza total, alcalinidad y cloruros del agua en la entrada de los filtros. Al igual que para los parámetros anteriores tuvieron un comportamiento muy estable durante la evaluación. El contenido de oxígeno y H2S se mantuvo en 100 ppb y 5 ppm, respectivamente. La dureza total se encontró entre los 270 – 300 ppm, y la alcalinidad en 2100 ppm aproximadamente. Los cloruros estuvieron en el orden de 3100 ppm.

En la gráfica 36 se muestra el número de bacterias del sistema a los 3, 5 y 15 días de incubación, obtenidas por el Método de Diluciones Seriadas.

Figura 36. Número de BSR presentes en el sistema



Fuente: El autor

3.2. EVALUACIÓN DE LOS BIOCIDAS

3.2.1. Biocidas con base THPS

En las Tablas 7 y 8 se presenta el promedio y el rango de cel/mL para los biocidas de base THPS (a las 3 dosis y a los dos tiempos de contacto), después de 3, 5, 15 y 21 días de la inoculación.

Tabla 7.: Resultados de la evaluación de los biocidas con base THPS a 3 y 5 días después de la inoculación

Producto	Dosis (ppm)	2 Horas de Contacto		3 Horas de Contacto	
		Promedio (cel/mL)	Rango (cel/mL)	Promedio (cel/mL)	Rango (cel/mL)
Blanco	0	108	$10^8 - 10^9$	108	$10^8 - 10^9$
TK--2416	300	102	$10^2 - 10^3$	102	$10^2 - 10^3$
	500	101	$10^1 - 10^2$	0	$0 - 10^0$
	1000	104	$10^4 - 10^5$	103	$10^3 - 10^4$
C	300	101	$10^1 - 10^2$	101	$10^1 - 10^2$
	500	101	$10^1 - 10^2$	100	$10^0 - 10^1$
	1000	0	$0 - 10^0$	100	$10^0 - 10^1$
D	300	100	$10^0 - 10^1$	100	$10^0 - 10^1$
	500	100	$10^0 - 10^1$	100	$10^0 - 10^1$
	1000	101	$10^1 - 10^2$	100	$10^0 - 10^1$
E	300	0.	$0 - 10^0$	100	$10^0 - 10^1$
	500	101	$10^1 - 10^2$	100	$10^0 - 10^1$
	1000	0	$0 - 10^0$	100	$10^0 - 10^1$
F	300	0	$0 - 10^0$	100	$10^0 - 10^1$
	500	0	$0 - 10^0$	100	$10^0 - 10^1$
	1000	0	$0 - 10^0$	100	$10^0 - 10^1$
G	300	0	$0 - 10^0$	100	$10^0 - 10^1$
	500	0	$0 - 10^0$	100	$10^0 - 10^1$
	1000	100	$10^0 - 10^1$	100	$10^0 - 10^1$

Nota: El número de BSR contabilizado a los 3 días de inoculación es igual al observado a los 5 días para los 2 tiempos de contacto evaluados.

Tabla 8.: Resultados de la evaluación de los biocidas con base THPS a los 15 y 21 días después de la inoculación

Producto	Dosis (ppm)	2 Horas de Contacto		3 Horas de Contacto	
		Promedio (cel/mL)	Rango (cel/mL)	Promedio (cel/mL)	Rango (cel/mL)
Blanco	0	1010	$> 10^{10}$	1010	$> 10^{10}$
TK--2416	300	102	$10^2 - 10^3$	102	$10^2 - 10^3$
	500	101	$10^1 - 10^2$	101	$10^1 - 10^2$
	1000	105	$10^5 - 10^6$	105	$10^5 - 10^6$
C	300	103	$10^3 - 10^4$	103	$10^3 - 10^4$
	500	101	$10^1 - 10^2$	100	$10^0 - 10^1$
	1000	100	$10^0 - 10^1$	100	$10^0 - 10^1$
D	300	100	$10^0 - 10^1$	100	$10^0 - 10^1$
	500	100	$10^0 - 10^1$	100	$10^0 - 10^1$
	1000	100	$10^0 - 10^1$	100	$10^0 - 10^1$
E	300	102	$10^2 - 10^3$	101	$10^1 - 10^2$
	500	101	$10^1 - 10^2$	101	$10^1 - 10^2$
	1000	100	$10^0 - 10^1$	100	$10^0 - 10^1$
F	300	100	$10^0 - 10^1$	100	$10^0 - 10^1$
	500	100	$10^0 - 10^1$	100	$10^0 - 10^1$
	1000	100	$10^0 - 10^1$	100	$10^0 - 10^1$
G	300	103	$10^3 - 10^4$	101	$10^1 - 10^2$
	500	102	$10^2 - 10^3$	101	$10^1 - 10^2$
	1000	101	$10^1 - 10^2$	101	$10^1 - 10^2$

Nota: El número de BSR contabilizado a los 15 días de inoculación es igual al observado a los 21 días para los 2 tiempos de contacto evaluados.

Se hace evidente que las células viables en el blanco se desarrollan en su mayoría en los 3 primeros días de incubación (Tabla 7), registrándose valores de 108 cel/mL, y esto es lógico pues la muestra fresca se inoculó en un medio donde no hay limitación de nutrientes, además no existe la presencia de biocidas para el control de su crecimiento. Igualmente, se observa que el número de BSR al quinto día es exactamente el mismo valor observado a los 3 días de incubación (esto sucedió para todos los productos evaluados).

Para las diluciones correspondientes a los distintos biocidas, se observa que el crecimiento no es tan significativo como en el blanco debido a la acción de los distintos productos, inclusive con los biocidas D, F, luego de los 3 días de incubación no se apreció el crecimiento de las BSR.

En la Tabla 8 se observa el número promedio y el rango (en cel/mL) del blanco, como para las muestras sometidas a los distintos biocidas de base THPS, evaluados a 2 y 3 horas de contacto, después de 15 y 21 días de incubación.

Luego de 21 días se tiene que el intervalo de BSR para el blanco es >1011 cel/mL. En esta muestra no se pudo determinar con exactitud el rango de población de BSR, debido a que en la primera prueba se desconocía el número de BSR en la entrada de los filtros, y se realizaron 12 diluciones tornándose todas negras. En la segunda prueba (para la confirmación y/o validación de los resultados obtenidos) se realizaron 15 diluciones, tomando 12 botellitas la coloración negruzca característica de las BSR.

En líneas generales la tendencia de estos productos es que a mayor dosis se obtienen menor número de bacterias a los 2 tiempos de contacto evaluados, excepto con el TK-2416, pues se tiene que a este biocida reduce su efectividad al aumentar la dosis a la cual es aplicado. Esta situación fue consultada con el personal del laboratorio de Clariant, en su sede de Brasil (donde preparan las muestras de productos que serán evaluados), para chequear todas las posibles causas que pudiesen haber afectado la efectividad del TK -2416, pues el resto de las condiciones de la prueba fueron iguales para todos los biocidas. Revisando la formulación de este producto, se encontró que en su composición además de THPS, se encuentran compuestos de aminas, aldehídos, compuestos no iónicos, entre otros (surfactantes, y cosurfactantes, etc.), resaltando que el surfactante utilizado para la formulación de este producto es de naturaleza distinta al utilizado en el resto de las formulaciones.

Con este producto a 300, 500 y 1000 ppm, se observan valores de 102 cel/mL, 101 cel/mL y 105 cel/mL, respectivamente. A 500 ppm se tiene el menor número de células de BSR, mientras que a 1000 ppm se obtiene el mayor valor. Al aumentar la concentración del producto, aumenta de igual forma la concentración del surfactante, por lo cual, probablemente este haya excedido su "Concentración Micelar Crítica" (CMC).

En el caso de los biocidas, el papel del surfactante es el de ubicarse entre la biopelícula y el agua (interfase), es decir, “adsorberse” en la biopelícula. Asimismo, por ser la sal de THPS polar, hay una atracción entre sus moléculas y las moléculas polares del surfactante ubicadas en la interfase, esta afinidad provoca que el THPS penetre la biopelícula y cumpla su función desinfectante. Sin embargo, al aumentar la concentración del surfactante, se puede saturar la interfase con sus moléculas, y este cambia su propiedad de “adsorción” a la “asociación”, formando micelas alrededor de la biopelícula que obstaculizan y/o evitan la penetración del THPS en la misma, este fenómeno se conoce como “micelización”. La micelización ocurre a una concentración particular, llamada Concentración Micelar Crítica. Posiblemente, la concentración de surfactante a dosis por encima de 500 ppm sobrepasa la CMC, saturando la biopelícula con sus moléculas y evitando que el THPS penetrara la biopelícula lo suficiente como para tener un mayor control en el crecimiento de las BSR, y es por esta razón que a 1000 ppm se obtiene el mayor número de bacterias.

Es evidente que con la mayoría de las formulaciones evaluadas se obtienen niveles de BSR hasta por debajo del rango establecido ($\leq 10^2$ cel/mL), siendo los productos D y F a partir de 300 ppm los que presentan mayor reducción de la población de las BSR, observándose intervalos entre 100 - 101 cel/mL.

3.2.2. Biocidas con base Aldehídos

En las Tablas 9 y 10 se muestra los datos correspondientes a la aplicación de los Biocidas con base Aldehídos.

Tabla 9.: Resultados de la evaluación de los biocidas con base aldehídos a 3 y 5 días después de la inoculación

Producto	Dosis (ppm)	2 Horas de Contacto		3 Horas de Contacto	
		Promedio (cel/mL)	Rango (cel/mL)	Promedio (cel/mL)	Rango (cel/mL)
Blanco	0	108	$10^8 - 10^9$	108	$10^8 - 10^9$
H	300	104	$10^4 - 10^5$	102	$10^2 - 10^3$
	500	104	$10^4 - 10^5$	101	$10^1 - 10^2$
	1000	105	$10^5 - 10^6$	102	$10^2 - 10^3$
I	300	104	$10^4 - 10^5$	102	$10^2 - 10^3$
	500	102	$10^2 - 10^3$	103	$10^3 - 10^4$
	1000	101	$10^1 - 10^2$	102	$10^2 - 10^3$
J	300	101	$10^1 - 10^2$	101	$10^1 - 10^2$
	500	101	$10^1 - 10^2$	102	$10^2 - 10^3$
	1000	101	$10^1 - 10^2$	102	$10^2 - 10^3$
K	300	104	$10^4 - 10^5$	101	$10^1 - 10^2$
	500	102	$10^2 - 10^3$	102	$10^2 - 10^3$
	1000	102	$10^2 - 10^3$	102	$10^2 - 10^3$

Nota: El número de BSR contabilizado a los 3 días de inoculación es igual al observado a los 5 días para los 2 tiempos de contacto evaluados.

Tabla 10.: Resultados de la evaluación de los biocidas con base aldehídos a los 15 y 21 días después de la inoculación

Producto	Dosis (ppm)	2 Horas de Contacto		3 Horas de Contacto	
		Promedio (cel/mL)	Rango (cel/mL)	Promedio (cel/mL)	Rango (cel/mL)
Blanco	0	1010	$> 10^{10}$	1010	$> 10^{10}$
H	300	108	$10^8 - -10^9$	106	$10^6 - 10^7$
	500	108	$10^8 - -10^9$	104	$10^4 - 10^5$
	1000	108	$10^8 - 10^9$	104	$10^4 - 10^5$
I	300	108	$10^8 - -10^9$	104	$10^4 - 10^5$
	500	104	$10^4 - 10^5$	103	$10^3 - 10^4$
	1000	104	$10^4 - 10^5$	103	$10^3 - 10^4$
J	300	104	$10^4 - 10^5$	104	$10^4 - 10^5$
	500	103	$10^3 - 10^4$	104	$10^4 - 10^5$
	1000	103	$10^3 - 10^4$	103	$10^3 - 10^4$
K	300	107	$10^7 - 10^8$	104	$10^4 - 10^5$
	500	104	$10^4 - 10^5$	103	$10^3 - 10^4$
	1000	103	$10^3 - 10^4$	103	$10^3 - 10^4$

Nota: El número de BSR contabilizado a los 15 días de inoculación es igual al observado a los 21 días para los 2 tiempos de contacto evaluados.

A un tiempo de matanza de 2 horas se observa que, a mayor dosis, menor número de bacterias. Sin embargo, los resultados muestran que con la aplicación de estos productos la reducción de BSR no es tan significativa como la observada con la aplicación de los biocidas con base THPS, siendo el producto J el que presenta un mayor control del crecimiento de las BSR, pues a dosis de 500 y 1000 ppm se obtienen los menores valores de población bacteriana e intervalos entre $10^3 - 10^4$ cel/mL, sin embargo, supera los límites de BSR permisibles ($\leq 10^2$ cel/mL). Con la aplicación de los productos H, I y K (a las tres dosis evaluadas), se obtienen rangos de BSR por encima de las especificaciones establecidas. A un tiempo de matanza de 3 horas, los productos I y K son los más eficientes, obteniéndose intervalos de $10^3 - 10^4$ cel/mL a 500 y 1000 ppm, superando el rango de BSR establecido, al igual que el resto de los productos.

3.2.3. Biocidas con base sales de amonio cuaternaria (SAC)

En las Tabla 11 y 12 se muestra el comportamiento de los Biocidas L, M y N, luego de 3, 5, 15 y 21 días de incubación respectivamente.

Tabla 11. Resultados de la evaluación de los biocidas con base sal de amonio cuaternario (SAC) a los 3 y 5 días después de la inoculación

Producto	Dosis (ppm)	2 Horas de Contacto		3 Horas de Contacto	
		Promedio (cel/mL)	Rango (cel/mL)	Promedio (cel/mL)	Rango (cel/mL)
Blanco	0	108	$10^8 - 10^9$	108	$10^8 - 10^9$
L	300	102	$10^2 - 10^3$	102	$10^2 - 10^3$
	500	102	$10^2 - 10^3$	0	$0 - 10^0$
	1000	0	$0 - 10^0$	101	$10^1 - 10^2$
M	300	103	$10^3 - 10^4$	102	$10^2 - 10^3$
	500	102	$10^2 - 10^3$	101	$10^1 - 10^2$
	1000	102	$10^2 - 10^3$	101	$10^1 - 10^2$
N	300	103	$10^3 - 10^4$	101	$10^1 - 10^2$
	500	102	$10^2 - 10^3$	101	$10^1 - 10^2$
	1000	102	$10^2 - 10^3$	102	$10^2 - 10^3$

Nota: El número de BSR contabilizado a los 3 días de inoculación es igual al observado a los 5 días para los 2 tiempos de contacto evaluados

Tabla 12.: Resultados de la evaluación de los biocidas con base sal de amonio cuaternario (SAC) a los 15 o 21 días después de la inoculación

Producto	Dosis (ppm)	2 Horas de Contacto		3 Horas de Contacto	
		Promedio (cel/mL)	Rango (cel/mL)	Promedio (cel/mL)	Rango (cel/mL)
Blanco	0	1010	$> 10^{10}$	1010	$> 10^{10}$
L	300	105	$10^5 - 10^6$	104	$10^4 - 10^5$
	500	104	$10^4 - 10^5$	103	$10^3 - 10^4$
	1000	101	$10^1 - 10^2$	101	$10^1 - 10^2$
M	300	104	$10^4 - 10^5$	104	$10^4 - 10^5$
	500	103	$10^3 - 10^4$	103	$10^3 - 10^4$
	1000	103	$10^3 - 10^4$	102	$10^2 - 10^3$
N	300	104	$10^4 - 10^5$	103	$10^3 - 10^4$
	500	103	$10^3 - 10^4$	103	$10^3 - 10^4$
	1000	103	$10^3 - 10^4$	103	$10^3 - 10^4$

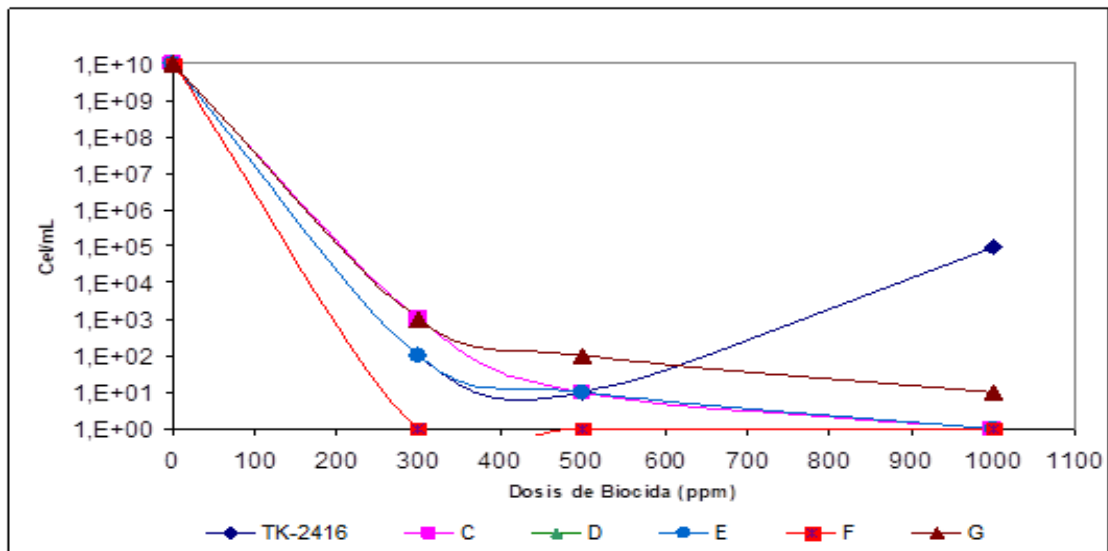
Nota: El número de BSR contabilizado a los 15 días de inoculación es igual al observado a los 21 días para los 2 tiempos de contacto evaluados

Es evidente que, a mayor dosificación de cada uno de estos productos a 2 y 3 horas de matanza, mayor control de la población de BSR. Sin embargo, estos valores no se encuentran dentro de los intervalos permisibles de BSR.

Comparando estos productos con los biocidas de base THPS se tiene, que los biocidas C, D, E, F y G son más eficientes que los biocidas con base SAC, pues ofrecen una mayor reducción en el número de bacterias. Sin embargo, se observa que el producto L a dosis de 1000 ppm y 2 horas de contacto, presenta un intervalo entre 101 – 102 cel/mL, el cual se encuentra dentro de los límites de bacterias permisibles.

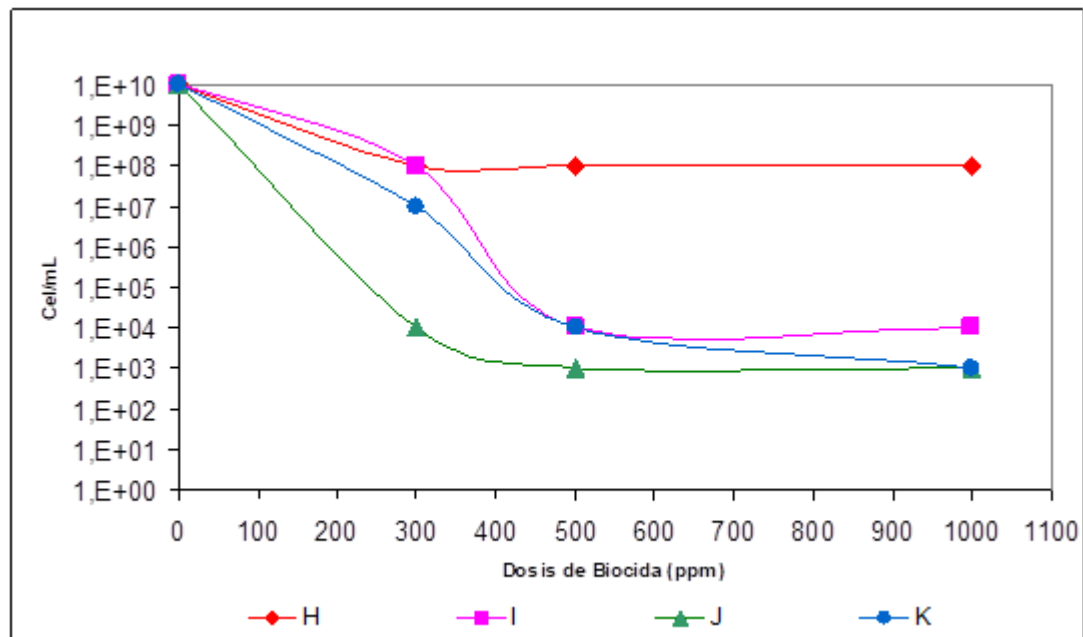
En las Figuras 37, 38 y 39 se muestra el comportamiento de los biocidas evaluados a 2 horas de contacto:

Figura 37. Comportamiento de los biocidas base THPS a los 15 días de incubación y 2 horas de contacto.



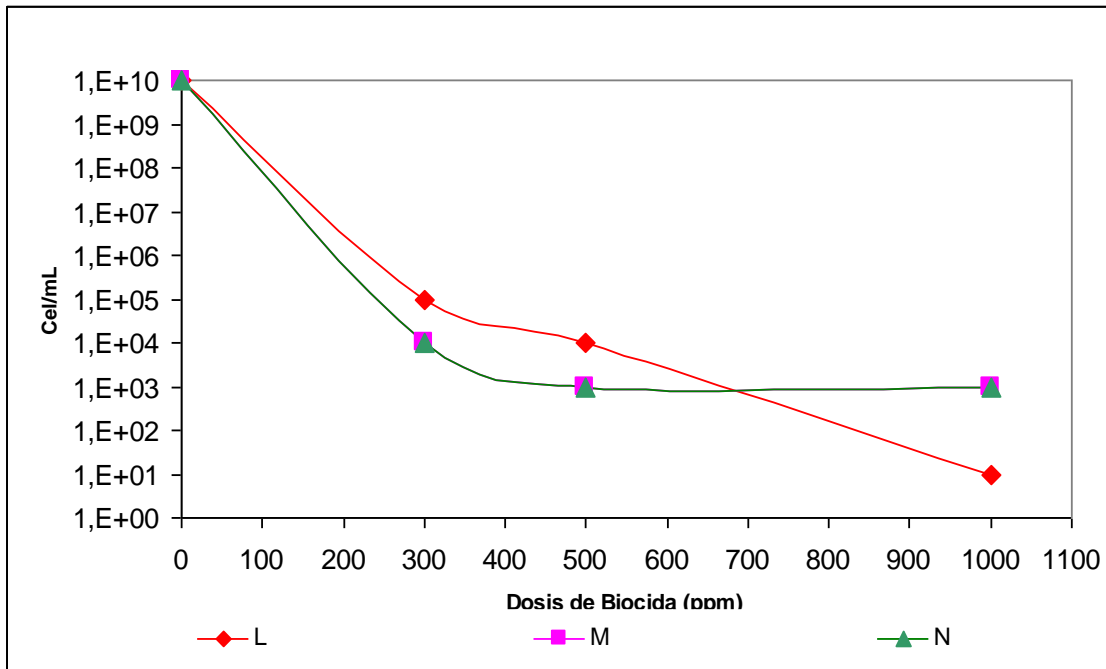
Fuente: Autor.

Figura 38. Comportamiento de los biocidas base aldehídos a los 15 días de incubación y 2 horas de contacto.



Fuente: Autor.

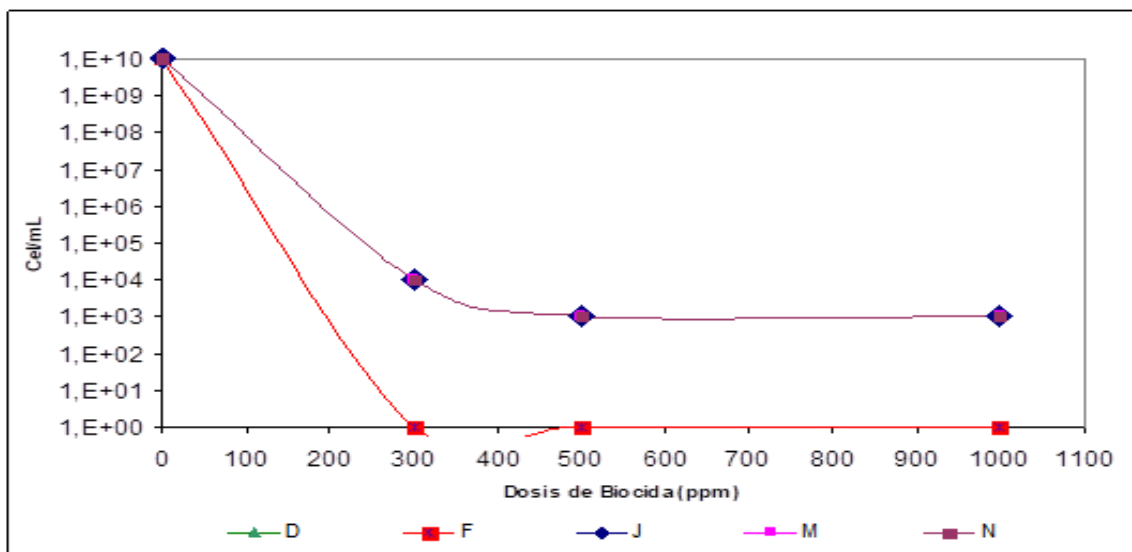
Figura 39. Comportamiento de los biocidas base SAC a los 15 días de incubación y 2 horas de contacto.



Fuente: Autor

En base a los resultados experimentales obtenidos y el análisis de las gráficas, mostradas se escogieron los biocidas más eficientes en base a su componente principal a un tiempo de contacto de 2 Horas. El comportamiento de cada uno de ellos se observa en la Figura 40, la cual se presenta como ayuda para seleccionar el más eficiente a las 3 dosis evaluadas.

Figura 40. Comportamiento de los biocidas más eficientes a los 15 días de incubación y 2 horas de contacto.



Fuente: Autor

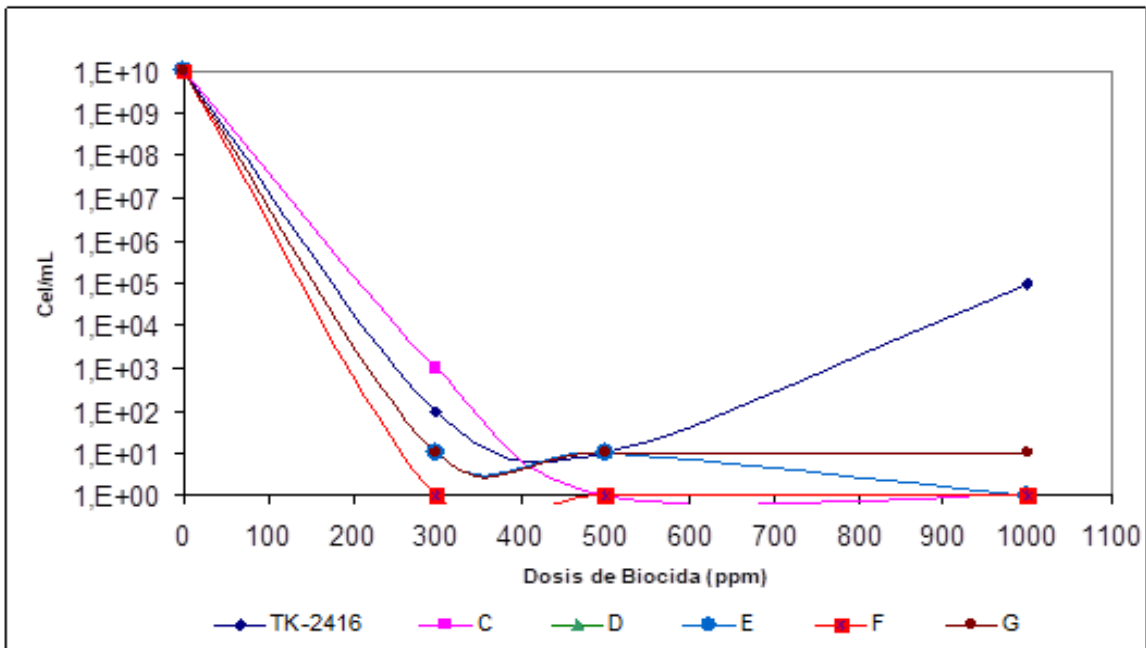
En la Figura 40, se observa que los biocidas que ofrecen una mayor reducción en el número de bacterias son los productos D y F (sus curvas se superponen en la gráfica), los cuales tienen como componente principal el THPS.

Estos productos tienen un comportamiento similar y son eficientes a partir de 300 ppm, obteniendo intervalos de BSR entre 100 - 101 cel./mL, valores por debajo del límite establecido (≤ 102 cel/mL).

El producto L, es eficiente para efectos de esta investigación a dosis de 1000 ppm, pues se obtiene un rango de BSR entre 101 – 102 cel/mL. Con respecto a los productos J, M y N se tiene que no cumplen con el número de bacterias permisibles.

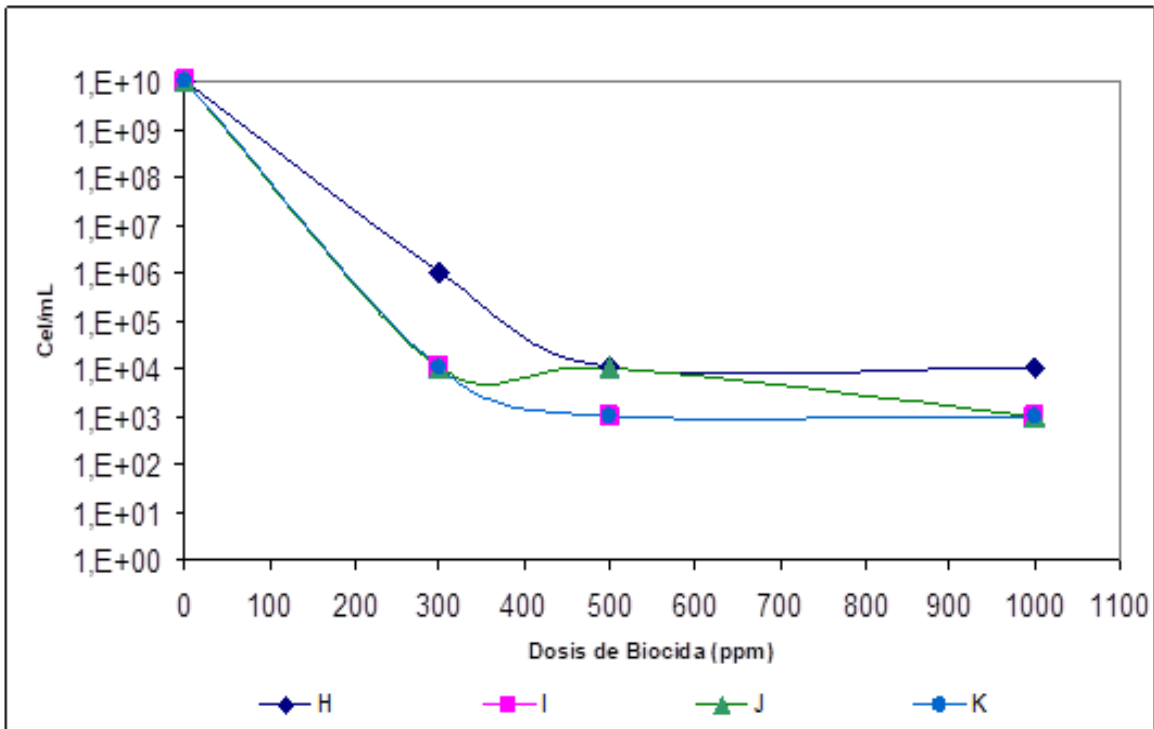
Las Figuras 41, 42 y 43 muestran el comportamiento de los biocidas a un tiempo de madanza de 3 horas y 15 días de incubación:

Figura 41. Comportamiento de los biocidas base THPS a los 15 días de incubación y 3 horas de contacto.



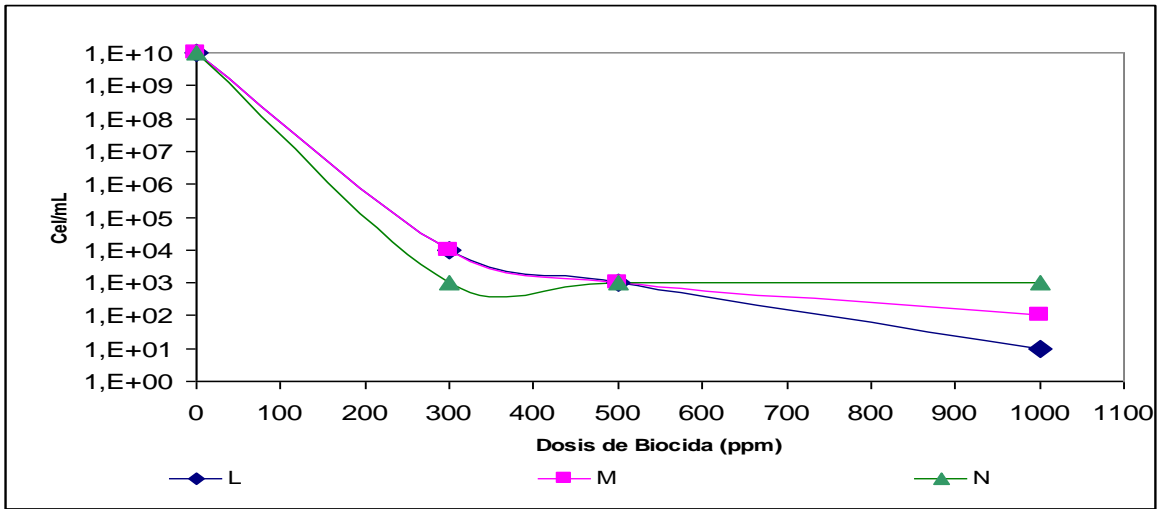
Fuente: Autor

Figura 42. Comportamiento de los biocidas base SAC a los 15 días de incubación y 3 horas de contacto.



Fuente: Autor

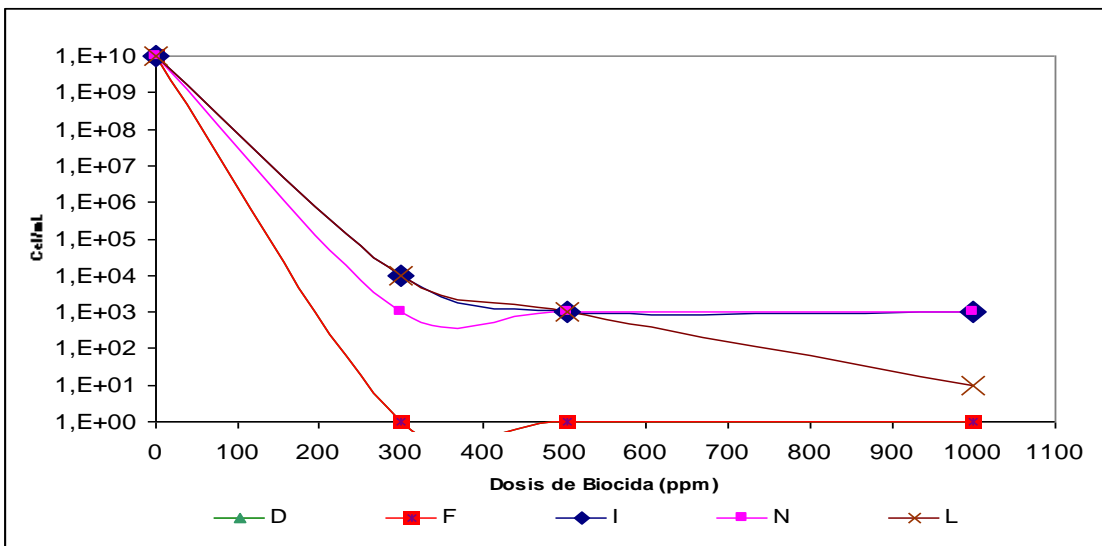
Figura 43. Comportamiento de los biocidas base SAC a los 15 días de incubación y 3 horas de contacto



Fuente: Autor

Al igual que a un tiempo de contacto de 2 horas, se graficaron los biocidas más eficientes a un tiempo de 3 horas, para seleccionar el más eficaz en el control del crecimiento de las BSR. Estos comportamientos se observan en la Figura 44.

Figura 44. Comparación del comportamiento de los biocidas más eficientes a los 15 días de incubación y 3 horas de contacto.



Fuente: Autor

Los productos más eficientes a este tiempo de contacto son los biocidas cuyo componente principal es el THPS (D y F), a partir de 300 ppm. Con la aplicación

de estos productos se obtiene una reducción considerable de la población de BSR, incluso por debajo del límite establecido, pues se obtiene un rango de bacterias entre 100 - 101 cel/mL (al igual que a un tiempo de matanza de 2 horas).

El producto I excede el número de bacterias permitidas para este tipo de sistema todas las dosis evaluadas, obteniéndose intervalos entre 103 – 104 cel/mL. Con respecto al producto N, el nivel de bacterias se encuentra igualmente, entre 103 - 104 cel/mL, pero para efectos de esta investigación supera el rango de bacterias requerido. Al igual que para un tiempo de contacto de 3 horas el producto L es eficiente a una dosis de 1000 ppm obteniéndose un intervalo de BSR entre 101-102 cel/mL.

Los biocidas que resultaron más eficaces en el control del crecimiento de las BSR a los dos tiempos de contactos evaluados fueron los productos D y F a partir de una dosis de 300 ppm. Debido a que la tendencia o el comportamiento de estos dos productos es muy similar, el parámetro de decisión para la selección del Biocida fue determinado por la rentabilidad económica que presentaba cada uno de ellos en su aplicación en el campo.

3.3. Análisis Económico

En la Tabla 13 se presentan los parámetros de inyección a considerar para los cálculos²⁶

Tabla 13.: Parámetros de Inyección

Producción de Agua (BPD/día)	150.000
Producción de Agua (BB/hrs.)	6.250
Dosis Biocida (ppm)	300
Tiempo de Contacto (hrs.)	2

²⁶ CLARIANT OMS. Instrucción de Servicio para Chequeo de la Dosis y Ajuste de la Inyección de Química. IS.9. Laboratorio de Clariant Oil Services. Cota, Colombia

➤ **Cálculo del volumen de Biocida a inyectar:**

$$Biocida \left(\frac{L}{2h} \right) = \frac{Produccion\ Agua\ (BPH) * Dosis\ Biocida\ (ppm) * 2h}{6300} \quad (22)$$

Sustituyendo los parámetros de inyección en la formula anterior:

$$Biocida \left(\frac{L}{2h} \right) = \frac{6250\ BPH * 300\ ppm * 2h}{6300} = 596\ L/2h$$

➤ **Cálculo del Costo Total del Tratamiento para cada producto**

$$Costo\ Total(\$) = Costo\ Mat.\ Prima(\$) + Costo\ Equipos(\$) + Costo\ M.\ Obra\ (\$) + Costo\ de\ Envio\ (\$) \quad (23)$$

Para efectos de esta investigación el costo de equipos, mano de obra y envío es igual para los 3 productos (es una constante), y por lo tanto no representan un factor determinante en la diferencia de costos entre los biocidas TK-2416, D y F. La ecuación 23 quedaría:

$$Costo\ Total(\$) = Costo\ Mat.\ Prima(\$) \quad (24)$$

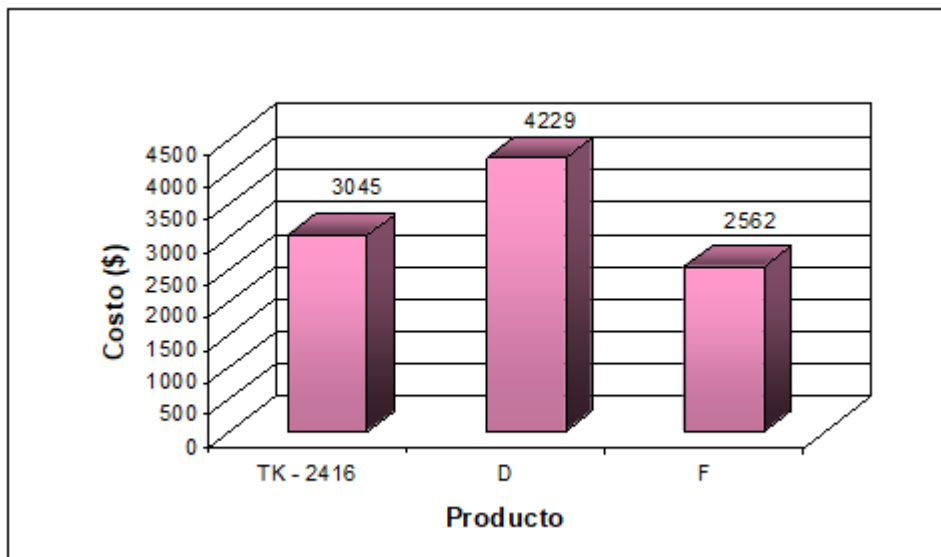
En la Tabla 14 se presentan los costos anuales del Tratamiento:

Tabla 14.: Cantidad de biocida y costos para un año de tratamiento

Biocida requerido (lts.)	28.800
Tambores requeridos	144
Costo TK-2416 (\$)	3.045
Costo D (\$)	4.229
Costo F (\$)	2.562

En la Figura 45 se muestra gráficamente los costos generados por cada tratamiento:

Figura 45. Costo anual del tratamiento por producto



En esta Figura, se observan los costos anuales para un año de tratamiento con los productos: TK-2416 y los biocidas que generaron mejores resultados en la disminución del número de BSR (D y F). Es evidente que económicamente la opción más factible es el biocida F, pues los costos por un año de tratamiento son menores que los generados por el producto D y por el biocida utilizado actualmente en planta. Este producto ofrece un 16% de reducción en los costos, lo que se traduce en el ahorro de \$488 al año.

CONCLUSIONES

- El mejor biocida desde el punto de vista técnico y económico es el **Biocida F**, el cual presenta en su formulación **THPS** y mayor concentración de surfactante. Esto, verifica que el THPS es eficiente en el control del crecimiento de BSR, acompañado de este tipo de compuestos. El esquema de tratamiento recomendado es de **300 ppm y 2 horas de contacto**, pues además de obtener intervalos de BSR entre 10^0 - 10^1 cel/mL a partir de la dosis mínima evaluada, presenta una reducción en los costos del 16%, con respecto al biocida utilizado actualmente en planta, superándolo en costos y efectividad.
- Para todos los biocidas evaluados se verifico que la población de BSR observada a los 3 días de incubación es igual a la observada a los 15 días. Igualmente, el número de bacterias contabilizado a los 15 días de incubación es exactamente el mismo que a los 21 días.
- Con los biocidas de base **THPS**, se puede concluir lo siguiente:
 - Es posible obtener rangos de BSR por debajo del límite establecido ($\leq 10^2$ cel/mL), con la aplicación de los **biocidas D, E y F** a 2 horas de contacto y dosis de 300 ppm. Mientras que con el resto de los biocidas evaluados este intervalo es alcanzado a partir de 500 ppm, con excepción del utilizado en planta.
 - Con un tiempo de contacto de 3 horas también se pueden obtener intervalos de población de BSR $\leq 10^2$ cel/mL con los biocidas D, E, F y G a partir de 300 ppm. Con el producto C este rango es alcanzado a partir de una dosis de 500 ppm. 1. Confirmando, de esta forma, la superioridad de los biocidas con base THPS en el control de las BSR sésiles.
 - El biocida **TK-2416** solo es eficiente hasta 500 ppm para los dos tiempos de contactos evaluados. Observándose que a dosis por encima de 500 ppm no es eficiente en el control de las BSR.
- Los productos, cuyo componente principal son Aldehídos, no son eficaces a las dosis y tiempos de contacto evaluados, pues superan los niveles de BSR permisibles.
- Los biocidas **L, M y N**, cuyo componente activo son Sales de Amonio Cuaternario, exceden el nivel de bacterias establecido a todas las dosis evaluadas, con excepción del producto **L** a dosis de 1000.

RECOMENDACIONES

En cuanto a la formulación de los productos, se recomienda analizar cuidadosamente cada uno de sus componentes, en especial, determinar las propiedades o características químicas del surfactante; en especial su Concentración Micelar Crítica. De esta forma se agregaría la concentración de surfactante requerida y se evitaría el fenómeno de la micelización.

Es recomendable al evaluar nuevos biocidas hacer las pruebas a nivel campo. Esto, debido a que en el laboratorio las muestras están en condiciones estáticas, mientras que si se coloca un equipo de monitoreo dinámico donde se simulen las condiciones del sistema a evaluar, los resultados obtenidos serán más representativos, y el producto seleccionado será más adecuado para las condiciones de la planta.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE - API RP 38 Recommended practice for biological analysis of subsurface injection waters. 1975.

ARBOLEDA V., J. Teoría y práctica de la purificación del Agua. Tercera Edición. Editorial Nomos, S.A. Bogota, Colombia. 2000.

BAKER Petrolite. La Introducción a la Microbiología del campo petrolero. 1998

_____ - La Microbiología en los sistemas de inyección de agua del campo petrolero. 1998

_____ - La Microbiología y la producción de Petróleo. 1998

CARLUCCI, A. Presentación de Microemulsiones. Disponible en: <http://www.ffyb.uba.ar/farmacotecnia%20I/microemulsion2005.ppt>

CLARIANT OMS. Evaluación de la eficiencia de Biocidas para el control de BSR sésiles. Microbiology Standard Operation Procedure-MSOP 03/010. Laboratorio Clariant Brasil.

_____ - Instrucción de Servicio para Chequeo de la Dosis y Ajuste de la Inyección de Química. IS.9. Laboratorio de Clariant Oil Services. Cota, Colombia

_____ - Método de Análisis para determinar la Concentración de Cloruros por Valoración con Nitrato de Plata. PIC 315 Laboratorio de Clariant Oil Services. Cota, Colombia.

_____ - Método de Análisis para determinar Alcalinidad Total por Valoración Directa. PIC 323 Laboratorio de Clariant Oil Services. Cota, Colombia.

_____ - Método de Análisis para la Determinación de Hierro. PIC 331 Laboratorio de Clariant Oil Services. Cota, Colombia.

_____ - Método de Análisis para la Determinación de Oxígeno Disuelto en agua a bajas concentraciones. PIC 327 Laboratorio de Clariant Oil Services. Cota, Colombia.

_____ - Método de Análisis para la Determinación de Sólidos Suspendidos PIC 301 Laboratorio de Clariant Oil Services. Cota, Colombia.

_____ - Método de Análisis para la Determinación de Sulfuro de Hidrógeno utilizando el Kit HACH. PIC 345 Laboratorio de Clariant Oil Services. Cota, Colombia.

_____ - Método de Análisis para la Determinación Dureza Soluble y Total por Valoración con EDTA. PIC 322 Laboratorio de Clariant Oil Services. Cota, Colombia.

_____ - Método de Análisis para la Medida de pH en Aguas. PIC 326 Laboratorio de Clariant Oil Services. Cota, Colombia.

GIRALT, A. C. (2004) Técnicas de Flotación. [On-line]. Disponible en; <http://www.monografias.com/trabajos16/tecnicas-flotacion/tecnicas-flotacion.shtml>

HERNÁNDEZ E. y PEDROZA, J. Manual de suministro de productos y servicios para el tratamiento químico en las plantas operadas por Simco. Maracaibo, Venezuela, 2004.

KEMMER, F. Nalco Manual del Agua. Editorial McGraw-Hill. México, 2001.

MADIGAN M., MARTINKO, J. y PARKER, J. Brock Biología de los Microorganismos. Octava Edición. Prentice Hall INC. Madrid, España, 1997.

MELÉNDEZ, J. E. Mecánica de Fluidos. Flujo compresible y flujo incompresible. [On-line]. Disponible <http://www.monografias.com/trabajos15/mecanica-fluidos/mecanica-fluidos.shtml#NUMERO>

NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS - NACE Standard TMO 194 "Field monitoring of bacterial growth in oilfield systems". Houston, Texas. 1994.

PARIS DE FERRER, M. Inyección de agua y gas en yacimientos petrolíferos. Segunda Edición. Ediciones Astro. Maracaibo, Venezuela, 2001.

RAMOS, R. (2002) Crecimiento Microbiano. [On-line]. Disponible en; http://www.geocities.com/roberto_raul/crecimiento.html

ROMERO, M. Estudio Mecánico de la acción de las BSR en la Corrosión del acero al carbono utilizando Permeación de Hidrógeno y Polarización Catódica. Tesis de Doctorado. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela, 2004.

SALAGER, J. L. Cuaderno FIRP 300. Surfactantes. Laboratorio de Fenómenos Interfaciales y recuperación del petróleo. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela. 1993

_____ - Cuaderno FIRP 311 El Mundo de los Surfactantes. Laboratorio de Fenómenos Interfaciales y recuperación del petróleo. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela.

SANCHEZ, J. M. (1997). Biocorrosión. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México. [On-line]. Disponible en; <http://www.monografias.com/trabajos15/biocorrosion/biocorrosion.shtml>.

SURINACH, P.P. (1986) A new concept of treating surfaces exposed to oilfield water systems.

The University of Arizona (2004). Toxicología Ambiental. [On-line]. Disponible en; <http://superfund.pharmacy.arizona.edu/toxamb/c1-1-1-4.html>.

TROS VENEZOLANA Sistema de Tratamiento de Agua Simco PDVSA, 1997

VIDELA, H.A. SALVAREZZA, R. C. Introducción a la corrosión microbiológica. Primera Edición. Biblioteca Mosaico. Librería Agropecuaria. Buenos Aires, Argentina, 1984.