

BACTERIAS SULFATO REDUCTORAS

Yuddy Yisel Monroy Cruz

Ingeniera Mecatrónica.

Especialización en Planeación Ambiental y Manejo Integral de los Recursos Naturales

Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá- Colombia

yuddy87@gmail.com

ABSTRACT

In recent years has been increased interest in understanding the behavior and effects produced by sulfate-reducing bacteria in different materials due to their involvement in corrosion processes in key industries such as oil. Sulfate-reducing bacteria are organisms that perform dissimilatory sulfate process, which occurs naturally in the sulfur cycle. The dissimilation process generates H₂S as a byproduct, a substance that is not only corrosive, but also has effects on air pollutants and is involved in processes of deterioration in the quality of products like oil.

KEY WORDS: Sulfate-reducing bacteria, bio-corrosion, dissimilatory reduction, metals, steel.

RESUMEN

En los últimos años se ha incrementado el interés por conocer el comportamiento y los efectos producidos por las bacterias sulfato-reductoras en diferentes materiales debido a su intervención en procesos de corrosión en industrias tan importantes como la petrolera. Las bacterias sulfato reductoras, son organismos que realizan un proceso desasimilario de sulfato, que ocurre de forma natural dentro del ciclo del azufre. El proceso desasimilatorio genera como subproducto H₂S, sustancia que no solo es corrosiva, sino que tiene también efectos contaminantes en el aire e interviene en procesos de deterioro de la calidad de productos como el petróleo.

PALABRAS CLAVES: Bacteria sulfato-reductora, bio-corrosión, reducción desasimilatoria, metales, acero.

INTRODUCCIÓN

La base del desarrollo, en la gran mayoría de actividades industriales y de infraestructura a nivel mundial, está sentada en la construcción de estructuras, máquinas, y diferentes dispositivos hechos en una amplia gama de materiales metálicos.

El estudio de los materiales, ha permitido establecer características moleculares, estructurales, físicas y químicas que permiten determinar, de acuerdo a la aplicación requerida, el tipo de material más apto, brindando confiabilidad y seguridad en su uso.

Las características de los materiales se ven afectadas por las condiciones a las que son sometidos. Se realizan estudios de cargas, elongaciones, resistencia, deformaciones, entre muchos otros, para modelar y “predecir” su comportamiento frente a las condiciones de operación que se requieren; pero no solo el uso afecta las características de los materiales, factores ambientales y pequeños microorganismos pueden causar deterioros graves y daños en diferentes aplicaciones.

La bio-corrosión es uno de los principales “fenómenos de deterioro metálico”[1] observables en los materiales metálicos, fomentada por diferentes factores y características ambientales y microorganismos. La acción de los microorganismos puede ser directa o a través de sustancias producto de su metabolismo (por ejemplo, las bacterias sulfato-reductoras generan ácido sulfhídrico H_2S , como producto de su metabolismo), y su efecto será acentuar un proceso de corrosión ya presente o fomentar condiciones para que este proceso de corrosión se genere. La bio-corrosión también se conoce como MIC (por sus siglas en inglés Microbially Induced Corrosion ó Microbiologically Influenced Corrosion).

Es de especial interés, determinar las características que fomentan la aparición de fenómenos como la bio-corrosión, los factores que favorecen su crecimiento y los

niveles de degradación que pueden producir, para establecer los procedimientos y mecanismos que permitan mitigar y reducir la afectación producida.

BIO-CORROSIÓN

La corrosión es un proceso eléctrico de flujo de cargas, debido a diferencias de potencial presentes entre dos puntos o partes implicadas, en el que existe un algo que cede electrones (ánodo – sufre oxidación) y un algo que los acepta (cátodo – sufre reducción), a través de un medio llamado electrolito (puede ser líquido o sólido, contienen iones libres). El traslado de cargas ocurre desde el metal (ánodo) a través del electrolito y llegando al cátodo. Hay disolución del metal en el ánodo, mientras que en el cátodo hay producción de Hidrógeno. Este hidrogeno catódico, en condiciones normales, se desprende formando una película de escala molecular en la superficie, generando un proceso de neutralización del efecto corrosivo, este fenómeno se conoce como polarización. Sin embargo, este “equilibrio” es roto cuando el oxígeno moviliza el hidrógeno catódico y es en ese momento que los microorganismos (como ferro bacterias y bacterias sulfato-reductoras) entran en acción en el proceso de corrosión.

Se reconocen diversos microorganismos asociados con procesos corrosivos: los hongos a través de su actividad enzimática, las algas por secreciones enzimáticas y procesos metabólicos y de manera relevante las bacterias. Las bacterias asociadas a procesos de deterioro de materiales metálicos es muy amplia, se encuentran bacterias aerobias y anaerobias, y pueden presentarse incluso en las condiciones ambientales más extremas: ambientes con altas temperaturas o con altos grados de salinidad. La afectación que causan no solo está determinada por su incidencia en los procesos de corrosión, sino que incluso contribuyen en la formación de depósitos, que pueden provocar bloqueos o taponamientos en las tuberías con la consecuente pérdida de eficiencia en los flujos e intercambios producidos en dichas tuberías.

Los materiales afectados por este tipo de procesos, también son diversos, existen reportes de corrosión microbiana en la gran mayoría de metales y aleaciones utilizadas en ingeniería, y se sugiere que el 50% de los costos causados por procesos corrosivos tienen incidencia de bio-corrosión [2]. Las industrias afectadas varían pasando por la producción de energía, transporte y almacenamiento de combustible y distribución de agua [3].

Existen diversos factores que pueden estimular los procesos corrosivos, es de importancia mencionar que el estado de los materiales (estructura, variaciones superficiales, concentradores de esfuerzos, huellas o marcas causadas por deterioros mecánicos) juega un papel relevante en los procesos corrosivos. En el ambiente, la presencia de oxígeno O_2 y CO_2 incidirá en los procesos de corrosión microbiana, ya que facilitan el crecimiento de organismos aerobios y son fuente de carbono para los organismos autótrofos, respectivamente. El pH incidirá por su acción directa sobre el metal y por su relación directa con los potenciales de reacción.

La acción efectuada por las bacterias sobre los materiales puede ser de tipo activo, en la que existe una interacción entre las bacterias y el material para producir reacciones químicas y electroquímicas, en algunos casos con la producción de sustancias como ácidos, que generan o aceleran los procesos corrosivos. Los efectos de este tipo de acción son en general puntuales, corresponden a procesos corrosivos más focalizados e intensos, con daños observables de tipo picado en el material. La acción de tipo pasivo corresponde a los efectos de la biomasa y de los productos biológicos [4].

Dentro de las bacterias con mayor incidencia en los procesos corrosivos, se encuentran las ferro-bacterias y las bacterias sulfato-reductoras. Las ferro-bacterias contribuyen en la formación acelerada de herrumbre en el ánodo obteniendo energía de la transformación de sales ferrosas en férricas, generando un proceso corrosivo continuado que puede llegar a perforaciones del material. Las bacterias sulfato-

reductoras producen una despolarización en el cátodo por la movilización de Hidrógeno [5].

Se realiza a continuación una revisión específica de las características de las Bacterias Sulfato-reductoras y su acción en los procesos corrosivos.

BACTERIAS SULFATO-REDUCTORAS.

Antecedentes Históricos. [6]

- 1877 – Plauchud: Se demuestra que la reducción de sulfato a sulfuro de hidrógeno es producto de un proceso biológico en presencia de vida.
- 1895 – Beijerinck: Se aisló el primer microorganismo que podría estar asociado con la reducción de sulfato a sulfuro, se denominó *Spirillum desulfuricans*: bacteria anaerobia estricta.
- 1903 – Van Delden: Se aísla la bacteria sulfato-reductora *Microspira aestuarride* sedimentos costeros y se determina que esta especie requiere altos niveles de salinidad para su crecimiento.
- 1924 – Elion: Se aísla la primera bacteria sulfato-reductora termofílica: *Vibrio thermodesulfuricans*, cuya temperatura óptima de crecimiento y desarrollo es 55°C.
- 1912 – Bar y Buchanan: Estudio de los efectos nocivos de la actividad microbiana en las estructuras de concreto: estudio sobre una planta de tratamiento de aguas residuales.
- 1919 – Mills y Wells, Rogers: Observaciones acerca del alto contenido de sulfuro (proporcional al decremento de sulfato) en aguas cercanas a yacimientos y formaciones petrolíferas,
- 1926 – Bastin: Estudio de muestras de efluentes 67 pozos petroleros. Concluye que un alto grado de responsabilidad en la producción de sulfuro en los yacimientos de petróleo, en los problemas de deterioro en la calidad de petróleo

(petróleo agrio) y en la corrosión de los pozos es de la Bacterias sulfato-reductoras.

- 1926 –Beckman: A través de su experimentación, evidenció la variación en la densidad del petróleo, lo que lleva a la conclusión de que algunas de las bacterias sulfato-reductoras pueden usar el petróleo como fuente de carbono y energía.
- 1930 – Ginter: Conclusión de la presencia de bacterias sulfato-reductoras en la profundidad de la Tierra.
- 1981 –Pfenning: Se aíslan nuevos géneros: Desulfobacterium, Desulfobacter, Desulfococcus, Desulfosarcina, Desulfonema, Desulfuromonas.
- 1910 – Gaines: Investigación acerca de la incidencia de las bacterias sulfato-reductoras en los procesos corrosivos del acero a partir de la medición de azufre en partes “sanas” y en partes con procesos de corrosión.
- 1934 – Von WolzogenKuhr y Van Der Vlugt: Proponen un esquema del mecanismo de despolarización catódica para explicar la corrosión en metales inducida por microbios.
- 1987 – Daniels: Se demuestra la participación de otros procesos como la metanogénesis en las reacciones de despolarización catódica.

Generalidades.

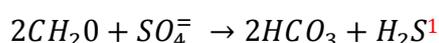
Se encuentran dentro del principal grupo de bacterias asociadas a fallas por corrosión.

Son bacterias anaeróbicas (aunque algunos géneros toleran el oxígeno y pueden crecer con oxígeno en bajas concentraciones), por esta razón es frecuente, que su población se encuentre bajo colonias activas de microorganismos aerobios, ya que ellos consumen el oxígeno y crean zonas anaeróbicas adecuadas para este tipo de bacterias [7].

Las bacterias sulfato-reductoras tienen la capacidad de utilizar a los sulfatos como aceptores finales de electrones en la respiración anaerobia, reduciendo el sulfato sin

asimilarlo, este proceso es conocido como reducción desasimilatoria de sulfato y hace parte del ciclo del azufre. El producto de este proceso es el H₂S (Sulfuro de hidrógeno, o ácido sulfhídrico), el cual es corrosivo. El proceso de reducción desasimilatoria indica que el H₂S producido por la reducción del sulfato no es incorporado a la biomasa.

La reacción química que representa el proceso de reducción desasimilatoria es la siguiente:



Metabolismo:

La fuente donadora de electrones para las bacterias sulfato-reductoras puede ser diversa: El sulfato (principalmente), pero otros compuestos de azufre también: sulfito o tiosulfato, incluso pueden desarrollarse en ambientes sin sulfato y usar al carbono como donador de y aceptor de electrones (Dismutación de piruvato, malato, glicerol).

Tabla 1: Componentes que pueden ser usados como sustratos para la reducción desasimilatoria de sulfato²

| Clase de Componente | Componente específico utilizado |
|--------------------------|---|
| Inorgánico | Hidrógeno, Monóxido de Carbono |
| Hidrocarburos | Alcanos (C ₁₂ a C ₂₀) |
| Ácidos Mono carboxílicos | Formiato, acetato, propionato, butirato, isometilbutirato, 2-metilbutirato, 3-metilbutirato, 3-metilvalerato, piruvato, lactato. |
| Ácidos Di carboxílicos | Succinato, fumarato, malato, oxalato, maleinato, glutaratodepimelato |
| Alcoholes | Metanol, etanol, propanol-1, butanol-1, pentanol-1, isobutanol, propanol-2, butanol-2, etilenglicol (mono-, di-, tri- y tetra-), 1-,2-propanodiol, 1,3-propanodiol, glicerol. |
| Animo ácidos | Glicina, serina, alanina, cisteína, cistina, |

¹ Fuente: VICENTE, Mariana S., Uso de bacterias sulfato-reductoras inmovilizadas para la precipitación de metales pesados. [en línea] Universidad Nacional de la Plata [Consultada: mayo 2014]. Disponible en: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/2191/Documento_completo.pdf?sequence=1

² Fuente: ODOM, J.M., The Sulfate-Reducing Bacteria: Contemporary Perspectives. 3ª ed. New York: Springer-Verlag, 1993. p.22. ISBN:0-387-97865-8

| | |
|------------------------|---|
| | treonina, valina, leucina, isoleucina, aspartato, glutamato, fenilalanina |
| Azúcares | Fructosa, glucosa, manosa, xilosa, ramnosa |
| Componentes aromáticos | Benzoato, 2-, 3-y4-hidroxibenzoato, fenol, p-cresol, catecol, resorcinol, hidroquinona, floroglucinol, pirogalol, 2-, 4-dihidroxibenzoato, 3-, 4-dihidroxibenzoato (protocatecuato), 2-aminobenzoato (antranilato), 4-aminobenzoato, aminobenceno(anilina), hipurato, ácido nicotic, indol, quinolina, fenilacetato, 4-hidroxifenilacetato, indolyacetate, 3-fenilpropionato, trimetoxibenzoato, m-anisato, p-anisato, vainillato, 3-metoxisalicilato, vainillina, siringaldehído, p-anisalaldehído, 2-y3-hidroxibenzaldehído |
| Otros | Colina, betaína, oxamato, acetona, dihidroxiacetona, furfural, ciclohexanona, ciclohexanol, ciclohexanocarboxilato y algunos otros compuestos alicíclicos. |

Clasificación:

Los tres (3) grupos básicos celulares: Eubacterias Gram-negativas, Eubacterias Gram-positivas y Archeas. A continuación se presenta información de los seis (6) principales subgrupos:

- G1 – Desulfotomaculum (DFM)
- G2 – Desulfobulbus (DBB)
- G3 – Desulfobacterium (DBM)
- G4 – Desulfobacter (DSB)
- G5 – Desulfococcus – Desulfonema - Desulfosarcina (DCC-DNM-DSS)
- G6 – Desulfovibrio- Desulfomicrobium (DSV-DMB)

BSR Gram-positivas formadoras de esporas.

Por su capacidad de formar esporas son más resistentes a la desecación y oxidación. Se han encontrado miembros de esta especie en suelos de cultivos de arroz y han sido aislados principalmente en sedimentos de agua dulce. Representante de este grupo es el género Desulfotomaculum. Este género forma

endosporas resistentes al calor, al oxígeno y la desecación, por lo pueden crecer en ambientes donde las condiciones anóxicas no son permanentes y en suelos de minas o lugares donde los niveles freáticos varían constantemente de forma significativa [8].

BSR Gram-negativas.

Este grupo está compuesto por dos líneas filogenéticas: mesofílicas (temperatura óptima de crecimiento entre 15 y 35 °C) y termófilas (crecen en condiciones extremas de temperatura). En las mesofílicas se encuentran las familias Desulfovibrionaceae (representantes: Desulfovibrio, Desulfomicrobium, Desulfohalobium y Desulfonatronum) y Desulfobacteriaceae (Representantes: Desulfobacter, Desulfobacterium, Desulfonema, Desulfococcus, Desulfosarcina, Desulfobulbus)

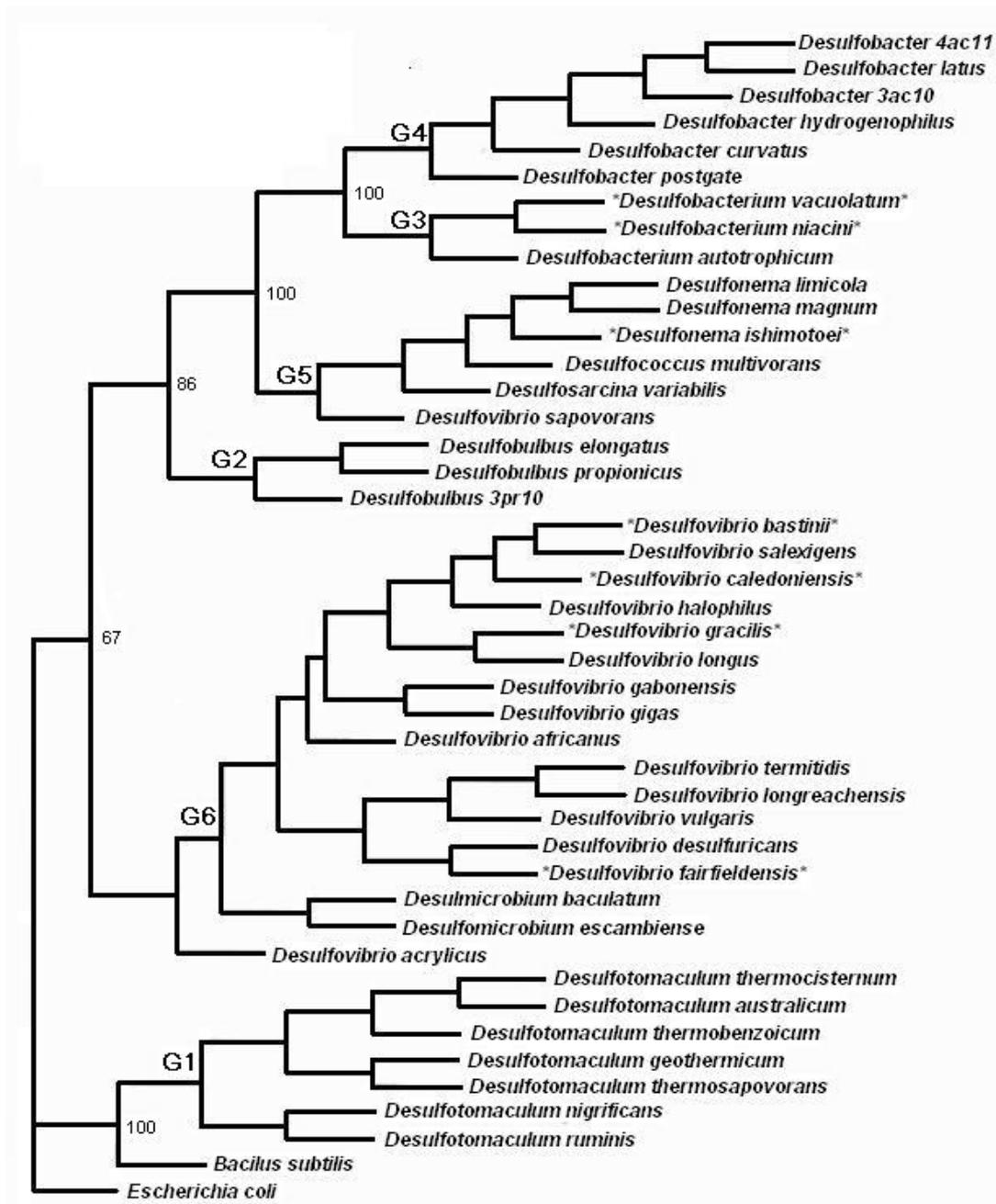


Ilustración 1: Árbol filogenético de DNAr 16S, muestra los linajes de los seis subgrupos de bacterias sulfato-reductoras.³

³ Fuente: SANCHEZ, Samanta R., Distribución de Bacterias Sulfato reductoras y metilmercurio en sedimentos de lagunas de inundación del río Beni, Amazonía Boliviana. [en línea] Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia. [Consultada: mayo 2014]. Disponible en: <http://bibliotecadigital.umsa.bo:8080/rddu/bitstream/123456789/408/1/TM578.pdf>

1. Desulfovibrionaceae:

En general, sus miembros son células alargadas, más o menos curvadas y con algún nivel de movilidad.

Las *Desulfovibrio* toleran el oxígeno durante su crecimiento en algunos casos, son el grupo más antiguo y diverso, tienen forma de bastón, no forman esporas y son móviles. Pueden ser encontradas en diversos ambientes: salinos, hasta sedimentos de agua dulce. Pueden usar como sustrato medios que contengan H₂, CO₂, acetato, lactato, etanol, piruvato, malato, lactato y fumarato.[9]

Las *desulfomicrobium* han sido aisladas en la cavidad oral e intestinos de animales y humanos. Son cortas y alguna con forma elipsoidal, oxidan de forma incompleta componentes inorgánicos con formación de acetato como producto final. Adicionalmente, usan sustratos como lactato, piruvato, etanol, formiato e hidrógeno como donantes de electrones.[10]

El género *desulfohalobium* son moderadamente halófilos (viven en medios con gran cantidad de sales) [11]

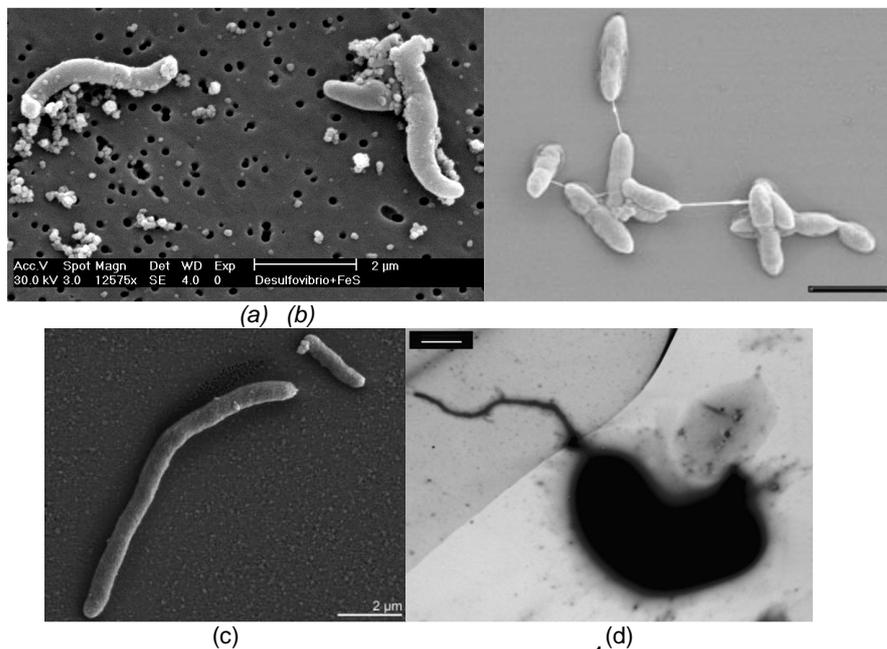


Ilustración 2: Desulfovibrionaceae: (a) *Desulfovibrio desulfuricans*⁴ (b) *Desulfomicrobium baculatum* X⁵ (c) Scanning electron micrograph⁶ of cells of *D. retbaense* strain HR100T (d) *Desulfonatronum thiodismutans* MLF1T⁷

⁴Fuente: BENNING, Liane G., WILKIN, Rick T., KONHAUSER, Kurt O., Iron Monosulphide Stability: Experiments with Sulphate Reducing Bacteria [en línea] *Geochemistry of the Earth's Surface* [Consultada: mayo de 2014]. Disponible en: http://homepages.see.leeds.ac.uk/~earlqb/Publications/GES_5.htm

2. Desulfobacteriaceae:

Las características morfológicas y filogénicas de los miembros de este grupo son variadas.

Las especies del genero desulfobulbus pueden ser móviles o nomóviles, con forma ovalada, cuyo principal sustrato es el propionato, aunque puede usar el lactato, etanol o H₂ como sustrato. Pueden crecer en diferentes medios: agua dulce, semisalina y salina. Forman filamentos multicelulares que pueden transmitir electrones a distancias de hasta 1 cm como parte de los procesos de ingestión y respiración del filamento. [12]

Las bacterias desulfobacter son principalmente ovaladas y se caracterizan por usar el acetato de forma completa y más efectiva que otras bacterias mesofílicas. Se han encontrado en ambientes salinos y se consideran como anaerobias estrictas. Las desulfobacterium son en forma de bastoncillos, con alta capacidad de degradación de compuestos orgánicos (descomposición de hidrocarburos), se desarrollan en ambientes con alta concentración de cloruro de sodio, es anaerobia estricta. Las bacterias desulfococcus y desulfosarcina varían en formas de bastoncillos a ovaladas, las desulfococcus tienen una reducción de sulfato lenta y pueden tolerar el oxígeno.

Dentro de las bacterias Desulfobacteriaceae, se encuentran muchas de las especies que realizan metilación de mercurio, actividad de gran importancia ecológica.

⁵ Fuente: JGI, Joint Genome Institute. Desulfomicrobiumbaculatum X, DSM 4028[en línea] Office of Science[Consultada: mayo de 2014]. Disponible en: <http://genome.jgi-psf.org/desba/desba.home.html>

⁶Fuente: SIGS, Standards in Genomic Sciences. Scanning electron micrograph of cells of *D. retbaense* strain HR₁₀₀^T [en línea][Consultada: mayo de 2014]. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3035252/figure/f2/>

⁷ Fuente: IJSEM, International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. Desulfonatronumthiodismutans sp. Nov.[en línea][Consultada: mayo de 2014]. Disponible en: <http://ijsb.sgmjournals.org/content/53/5/1327/F1.expansion>

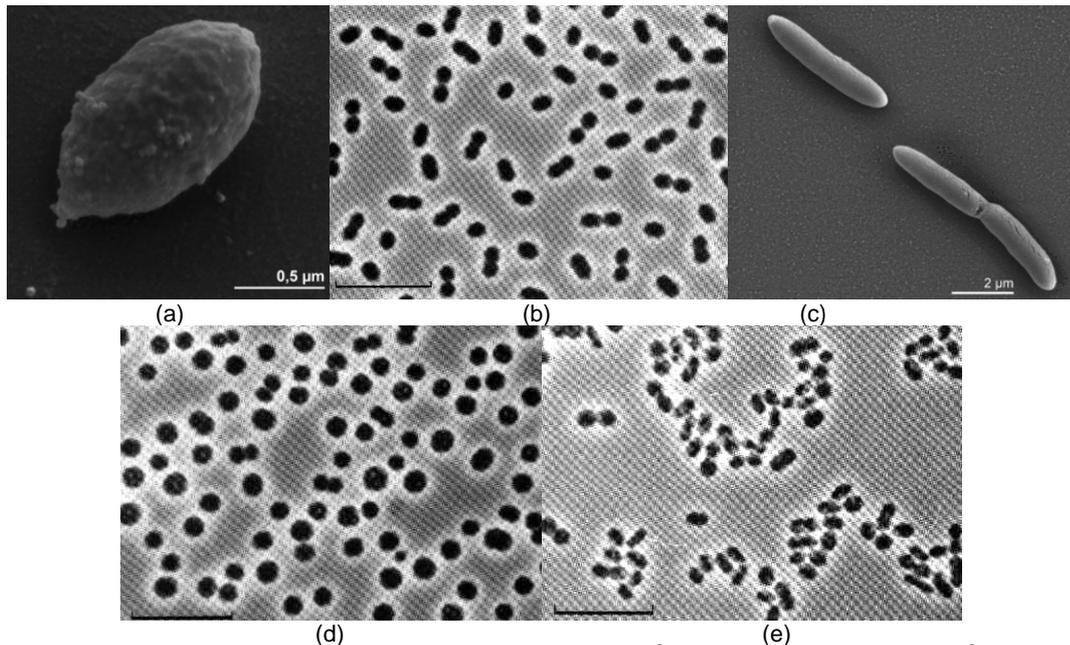


Ilustración 3: (a) *Desulfobulbus propionicus* DSM 2032⁸ (b) *Desulfobacter postgatei*⁹
 (c) *Desulfobacterium autotrophicum* HRM2¹⁰ (d) *Desulfococcus multivorans*¹¹ (e) *Desulfosarcina variabilis*¹²

BACTERIAS SULFATO-REDUCTORAS Y METALES.

El proceso de obtención de un metal libre requiere el uso de gran cantidad de energía, de la que son dotados los minerales una vez son recuperados. El objetivo de la corrosión es llevar a los metales a su estado combinado, que es como se encuentran normalmente en la naturaleza: óxidos, hidróxidos, sulfuros, entre otros; que son formas termodinámicamente más estables y por lo tanto de más baja energía.

La corrosión es un proceso electroquímico de cesión de electrones, en el cual hay oxidación del metal y reducción del factor químico. Este proceso puede ser influenciado por microorganismos presentándose un proceso conocido como bio-

⁸ Fuente: BACMAP, Genome Atlas. *Desulfobulbus propionicus* DSM 2032 [en línea] [Consultada: mayo de 2014]. Disponible en: <http://bacmap.wishartlab.com/organisms/1265>

⁹ Fuente: Widdel & Pfennig (1984) in *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*, vol. 1, N.R. Krieg & J.G. Holt eds., Williams & Wilkins pubs., p. 675.

¹⁰ Fuente: BACMAP, Genome Atlas. *Desulfobacterium autotrophicum* HRM2 [en línea] [Consultada: mayo de 2014]. Disponible en: <http://bacmap.wishartlab.com/organisms/842>

¹¹ Fuente: Widdel & Pfennig (1984) in *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*, vol. 1, N.R. Krieg & J.G. Holt eds., Williams & Wilkins pubs., p. 674.

¹² Ídem

corrosión. Dentro de las bacterias asociadas con procesos corrosivos se encuentran las sulfato-reductoras, sulfuro oxidantes, de hierro oxidantes/reductoras, manganeso oxidantes; estas bacterias coexisten en los biofilms, provocando daños mayores que en casos donde hay especies únicas de cada bacteria. La corrosión afecta principalmente los materiales metálicos, de uso frecuente en diversas industrias.

Materiales de uso industrial.

Tomando en cuenta la composición, se puede realizar una clasificación general de los materiales como se muestra en la Tabla 2. La variedad de materiales usados en ingeniería y aplicaciones industriales es alta, adicionalmente, la ciencia de los materiales avanza constantemente, en búsqueda de mejores características de los diferentes materiales con el fin de que se ajusten a las necesidades de las nuevas aplicaciones: desarrollo de materiales ultralivianos, superconductores, altamente resistentes, etc.

Tomando en cuenta la afectación causada sobre los materiales metálicos por parte de las bacterias sulfato-reductoras, se realiza una revisión específica del caso de los Aceros.

Tabla 2: Clasificación materiales industriales¹³

| | | | | | | |
|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--|-------------|--|
| Materiales Industriales | Inorgánicos | Metálicos | Ferrosos | Aceros | | |
| | | | No Ferrosos | Fundiciones | | |
| | | | | Metales: Al, Cu, Zn | | |
| | | Aleaciones | | Latones: Cu-Zn | | |
| | | | Bronces (Cu-Sn) | | | |
| | | Cerámicos | Tradicionales o convencionales | Ladrillos, tejas, alfarería, refractarios, vidrio, cemento, etc. | | |
| | Funcionales | | | | | |
| | Avanzados o de Alta Tecnología | | Estructurales o Tenaces | Oxidicas | No Oxidicas | |
| | Orgánicos | Plásticos | | | | |
| | | Madera | | | | |
| | | Caucho | | | | |
| | | Fibras | | | | |
| | Compuestos | Compuestos de matriz cerámica | | | | |
| Compuestos de matriz metálica | | | | | | |
| Compuesto de matriz polimérica | | | | | | |

¹³ Fuente:BLANCO, F. Materiales cerámicos[en línea] p. 2.[Consultada: mayo de 2014]. Disponible en: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion1.CERAMICAS.Generalidades.pdf>

Aceros

El acero es una aleación de hierro-carbono. Los aceros pueden clasificarse en dos de acuerdo a la inserción de otros aleantes:

1. Aceros al carbono: contienen únicamente concentraciones residuales de impurezas de otros elementos. Se clasifican de acuerdo a su contenido de carbono:
 - Aceros de bajo carbono: Contienen carbono en el rango desde 0 hasta 0,25%
 - Aceros de medio carbono: contenido de carbono de 0,25% hasta 0,55%
 - Aceros de alto carbono: contenido de carbono superior al 0,55%. [13]
2. Aceros aleados: contienen elementos que se añaden de forma intencional y en concentraciones determinadas. Los aceros inoxidable hacen parte de esta categoría: contienen cromo (en una concentración mínima del 10,5% conforme a la definición de la Norma EN 10088) y otros elementos como níquel, manganeso, silicio, molibdeno y titanio. Son diferentes los efectos que producen los diferentes elementos en las aleaciones de acero:
 - Cromo: Incrementa la resistencia, dureza y resistencia al desgaste. Mejora la resistencia a la corrosión. Facilita tratamientos térmicos como la templabilidad.
 - Manganeso: Mejora dureza y resistencia. Mejora la templabilidad.
 - Molibdeno: Mejora la tenacidad, dureza en caliente y resistencia a la termo fluencia. Forma carburos para la resistencia al desgaste.
 - Níquel: Mejora resistencia y tenacidad. En altas concentraciones mejora la resistencia a la corrosión.
 - Vanadio: Inhibe el crecimiento de los granos (estructura molecular) durante los tratamientos térmicos (procesos a altas temperaturas) lo que mejora la resistencia y tenacidad del acero.

La designación de los aceros más usada es la AISI-SAE, conformada por 4 dígitos:

- El primer dígito indica el elemento predominante de aleación:
 - 1 : Carbón
 - 2 : Níquel
 - 3 : Níquel Cromo

- 4 : Molibdeno
- 5 : Cromo
- 6 : Cromo Vanadio
- 8 : Triple aleación
- 9 : Silicio Magnesio
- El segundo dígito indica el porcentaje aproximado de en peso del elemento de aleación.
- El tercero y cuarto digito indican el contenido promedio de carbono en centésimas

Por ejemplo, un acero 2540 indica que tiene una aleación de níquel y que está es del 5%, y el contenido promedio de carbono es del 0,40%. [14]

Experimentación y Resultados.

Se presentan a continuación experimentos de investigación y ensayo de procesos de corrosión influenciados por bacterias sulfato-reductoras, con el fin de realizar conclusiones acerca del comportamiento de especies de estos microorganismos en diferentes materiales.

- Título: *Estudio Experimental de Corrosión en Metales de Uso Industrial por Desulfovibrio Desulfuricans*. [15]

Autor: *Carolina Beatriz Santander Morales*

Fecha y Lugar: *Enero 2008, Santiago de Chile – Chile*.

El objetivo del estudio experimental en mención es cuantificar la corrosión mediada por bacterias *Desulfuvibrio desulfuricans* en 6 tipos de acero de uso industrial a partir de la superficie de material cubierta.

El experimento fue llevado a cabo en un reactor anaerobio con un medio de cultivo (medio ATCC 1627 enriquecido con extracto de levadura) en el que se introdujeron 3 muestras de cada uno de los aceros una vez la concentración bacteriana fue de aproximadamente 10^8 células/mL (las muestras fueron pulidas a metal blanco con una solución de óxido de cromo y limpiadas con alcohol al 98%). El reactor tenía control de temperatura y medición de pH. Se intentó

simular condiciones de corrosión convencionales, acelerando el proceso corrosivo al otorgar características óptimas de nutrientes, pH y temperatura, y al agregar al medio de cultivo hidrógeno gaseoso como catalizador o acelerador de la corrosión.

Se retiró una muestra a los 5, 10 y 15 días, respectivamente. Se realizaron procedimientos de deshidratación (por sumergimiento de las muestras en concentraciones crecientes de acetona en agua destilada), secado de punto crítico y sombreado con oro/paladio. Se obtuvieron las imágenes sujeto de procesamiento a través de Microscopia electrónica de barrido (fotografías con aumento de 10000 veces el tamaño real). Estas imágenes fueron procesadas a través del software Gimp en el que se seleccionaron las áreas del metal cubiertas por bacterias, exportando una imagen bicolor que se procesó con un programa médico (Pixerea – usado para cálculo de tumores) que entregó el porcentaje del área seleccionada sobre el total del área por conteo de píxeles de determinada coloración (el software fue probado con imágenes de control cuyas áreas de interés eran conocidas). Finalmente se procesaron estos datos.

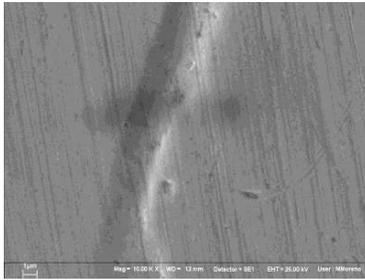
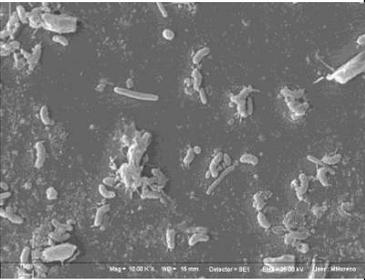
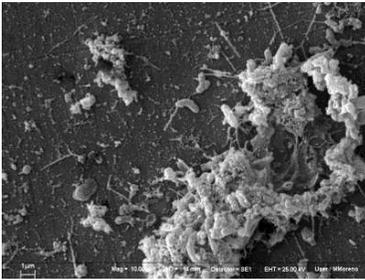
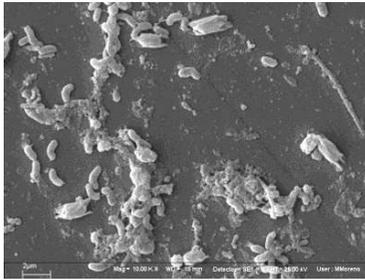
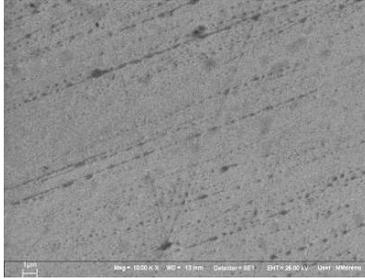
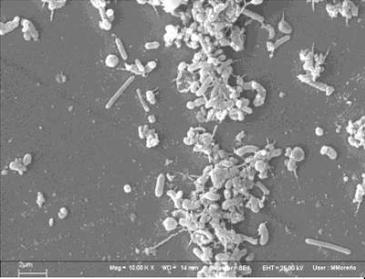
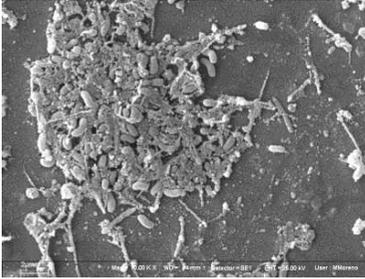
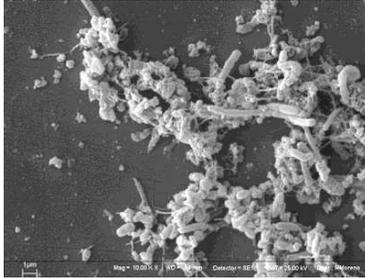
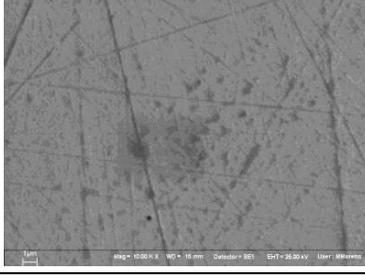
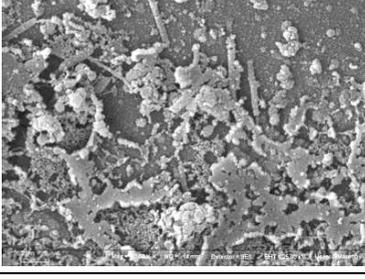
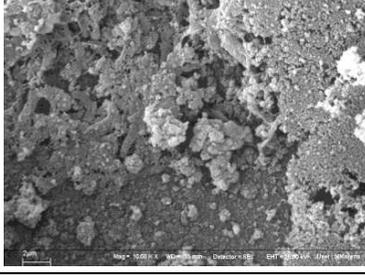
Se realizó la medición del sulfato en el interior del reactor por espectrofotometría, usando cloruro de Bario (se produce sulfato de bario el cual es insoluble en medio acuoso, y la turbiedad de la muestra es proporcional a la cantidad de sulfato presente) y el conteo de bacterias se realizó usando microscopio óptico convencional.

Tabla 3: Características Aceros experimentados¹⁴

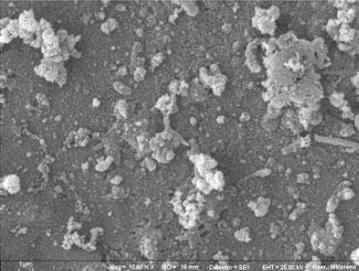
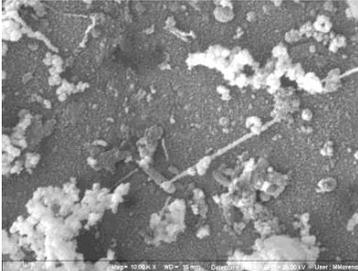
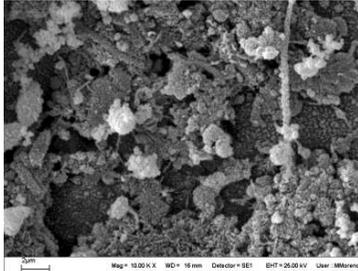
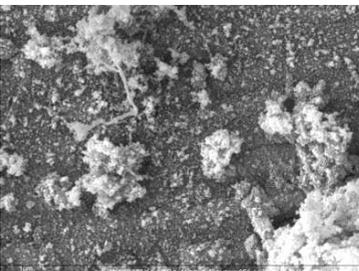
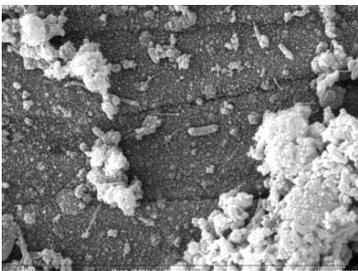
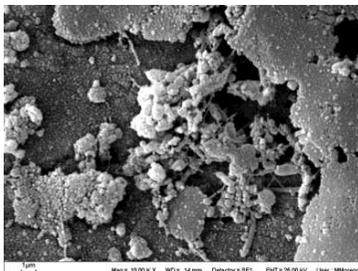
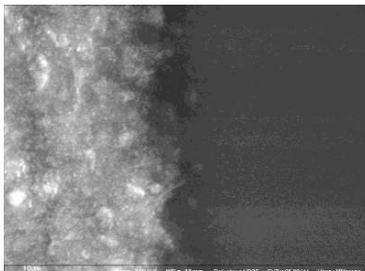
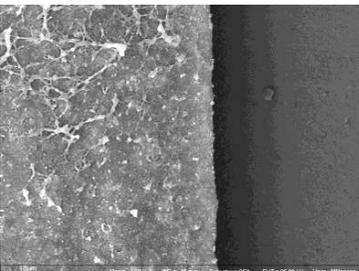
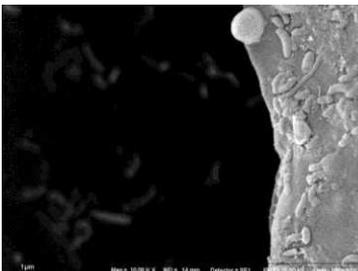
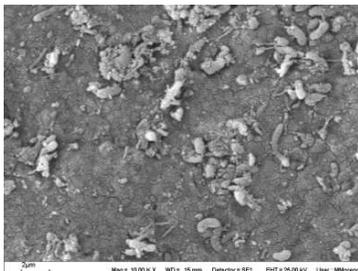
| Metal | Característica | %C | %Cr | %Ni | %Mo | %Si | %Mn | %S | %P |
|--------------|--------------------------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| AISI 316L | Inoxidable | 0,03máx | 17,5 | 12,5 | 2,2 | 1 | 2 máx | --- | --- |
| AISI 420 | Inoxidable | 0,3-0,4 | 12-14 | --- | --- | 1 | 1 | 0,03 | 0,04 |
| AISI 1020 | Al carbón | 0,18 máx | --- | --- | --- | --- | 0,3-0,6 | 0,05 | 0,04 |
| AISI A36 | Estructural | 0,27 | --- | --- | --- | --- | 0,6-0,9 | 0,05 | 0,04 |
| SAE 4340 | Cromo-Níquel bonificado | 0,38-0,43 | 0,7-0,9 | 1,65-2 | 0,2-0,3 | 0,15-0,35 | 0,6-0,8 | 0,04 | 0,035 |
| AISI 316L | Inoxidable con pintura anticorrosiva | 0,03máx | 17,5 | 12,5 | 2,2 | 1 | 2 máx | --- | --- |

¹⁴SANTANDER, Carolina B., Estudio Experimental de Corrosión en Metales de uso industrial por Desulfobrio desulfuricans. p.14

Tabla 4: Proceso corrosivo de metales experimentados¹⁵

| Metal | Condiciones Iniciales | Cinco (5) días | Diez (10) días | Quince (15) días. |
|-----------|---|--|---|---|
| AISI 316L |  |  |  |  |
| AISI 420 |  |  |  |  |
| AISI 1020 |  |  |  |  |

¹⁵SANTANDER, Carolina B., Estudio Experimental de Corrosión en Metales de uso industrial por Desulfovibrio desulfuricans. p.24-39

| | | | | |
|------------------------------------|---|---|--|--|
| <p>AISI A36</p> |  <p>1µm Mag=10.0K X WD=17 nm Detector=SEI EHT=25.00 kV User: MMoreno</p> |  <p>1µm Mag=10.0K X WD=15 nm Detector=SEI EHT=25.00 kV User: MMoreno</p> |  <p>1µm Mag=10.0K X WD=15 nm Detector=SEI EHT=25.00 kV User: MMoreno</p> |  <p>1µm Mag=10.0K X WD=15 nm Detector=SEI EHT=25.00 kV User: MMoreno</p> |
| <p>SAE 4340</p> |  <p>1µm Mag=10.0K X WD=22 nm Detector=SEI EHT=25.00 kV User: MMoreno</p> |  <p>1µm Mag=10.0K X WD=15 nm Detector=SEI EHT=25.00 kV User: MMoreno</p> |  <p>1µm Mag=10.0K X WD=15 nm Detector=SEI EHT=25.00 kV User: MMoreno</p> |  <p>1µm Mag=10.0K X WD=15 nm Detector=SEI EHT=25.00 kV User: MMoreno</p> |
| <p>AISI 316L (con pintura)</p> |  <p>1µm Mag=10.0K X WD=13 nm Detector=VPSE EHT=25.00 kV User: MMoreno</p> |  <p>1µm Mag=10.0K X WD=15 nm Detector=SEI EHT=25.00 kV User: MMoreno</p> |  <p>1µm Mag=10.0K X WD=15 nm Detector=SEI EHT=25.00 kV User: MMoreno</p> |  <p>1µm Mag=10.0K X WD=15 nm Detector=SEI EHT=25.00 kV User: MMoreno</p> |

La Tabla 4 corresponde al seguimiento fotográfico de las muestras de los diferentes materiales usados en el experimento.

Como información general de las imágenes obtenidas, se observa que se produce un poblamiento creciente (excepto en la muestra de Acero 316 L, en la cual a los 15 días se presentó disminución, sin explicación); se inicia la formación bacteriana con mayor frecuencia en los puntos donde se presenta algún tipo de surcos o ralladuras en la muestra, formándose agregaciones compactas compuestas por bacterias, exopolímeros y productos de la corrosión; en las superficies donde se presenta menor rugosidad el recubrimiento bacteriano-corrosivo se demora más en adherirse. Se evidencia mayor afectación en el acero 1020: mayor espesor en las agregaciones formadas, y un aislamiento prácticamente total del material con el ambiente que lo rodea, pero los aceros inoxidable y el acero inoxidable con recubrimiento de pintura anticorrosiva también se ven afectados por las bacterias.

Se presenta a continuación la información de los porcentajes del área de cada muestra que fueron cubiertos por las bacterias (área total de cada muestra: 10000 mm²):

Tabla 5: Porcentaje de área cubierta.¹⁶

| | AISI 316L | AISI 420 | AISI 1020 | AISI A36 | SAE 4340 |
|----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|
| 0 días | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 días | 36,8% | 23,1% | 37,2% | 3,8% | 22,1% |
| 10 días | 23,7% | 28,5% | 41,6% | 16,3% | 34,5% |
| 15 días | 17,1% | 32,8% | 56,0% | 56,2% | 48,9% |

En el experimento, se establece la variación del área con relación al tiempo de exposición: Cinética de adherencia de las bacterias, a través de la siguiente ecuación:

$$\frac{dA}{dt} = kA' = k(A_T - A)$$

Donde k corresponde a la velocidad inicial de poblamiento de superficie.

¹⁶SANTANDER, Carolina B., Estudio Experimental de Corrosión en Metales de uso industrial por Desulfobibriodesulfuricans. p.41-49

Como un modelo matemático más representativo del proceso proponen un sistema de ecuaciones diferenciales:

$$\frac{dA}{dt} = k_1(A_T - A)^n X^m$$
$$\frac{dX}{dt} = k_2 X$$

El sistema de ecuaciones diferenciales relaciona la variación del área cubierta por las bacterias y el crecimiento poblacional bacteriano.

Es importante resaltar de los datos de este experimento que la corrosión afecto también a los aceros inoxidable, aunque se evidencia una mayor dificultad en la adherencia de las bacterias y la formación de agregaciones en este tipo de materiales.

- Título: *Study of sulphate-reducing bacteria corrosion in the Weld joint for API X-70 steel.* [16]

Autor: *J. E. Flores, C. Patiño-Carachure, I. Alfonso, J. A. Rodríguez, G. Rosas.*

Fecha y Lugar: *Enero 2012, Ciudad del Carmen, Campeche, México.*

Este estudio evaluó el comportamiento de la corrosión inducida por bacterias sulfato-reductoras en muestras de acero soldado API X-70 tomadas de tuberías de PEMEX (las muestras fueron pulidas con papel de grano 600, limpiadas con acetona, y esterilizadas en un autoclave a 150°C por 20 min, según Norma ASTM G1-18193, se revisan dos áreas: Material Base (BM) y la zona afectada térmicamente (HAZ). Las bacterias fueron tomadas de una muestra de petróleo crudo, y corresponden a *Desulfotomaculum* genus. Postgate es el medio de crecimiento usado en este estudio. Es importante tomar en cuenta, que las características micro-estructurales del material varían en las dos zonas estudiadas: BM tiene granos poligonales ferríticos con perlita inter-granular y el área HAZ está caracterizada por formaciones de tipo aguja o angulares ferrificas. Las bacterias involucradas en este estudio son termófilas, la temperatura de

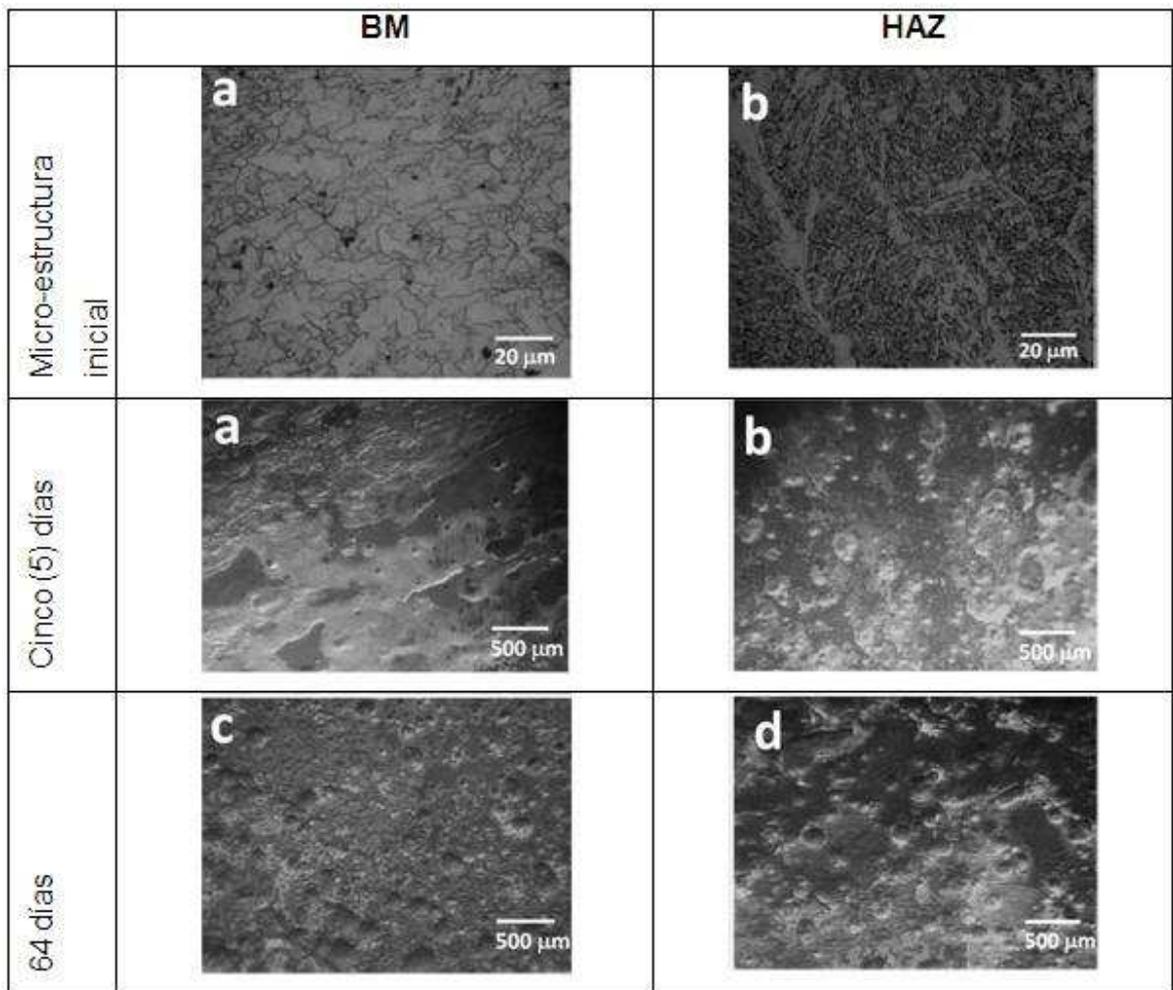
realización del estudio es de 60°C, el período de tiempo muestreado fue de 5 a 64 días.

Tabla 6: Composición Química (en % de peso) del acero API X-70¹⁷

| Fe | C | Mn | Si | P | S | Al | Nb | Cu | Cr | Ni | V | Ti | Ca | B |
|---------|-------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-------|--------|--------|
| Balance | 0,031 | 1,48 | 0,13 | 0,012 | 0,002 | 0,033 | 0,10 | 0,29 | 0,27 | 0,16 | 0,004 | 0,012 | 0,0011 | 0,0003 |

A continuación se muestran los resultados del proceso en imágenes:

Tabla 7: Proceso corrosivo en acero API X-70¹⁸



¹⁷ FLORES, J.E., PATIÑO, Carachure C., ALFONSO I., RODRIGUEZ, J.A., ROSAS, G. Study of sulphate-reducing bacteria corrosion in the Weld joint for API X-70 steel. Revista de Metalurgia [en línea] Septiembre-Octubre 2012 [Consultada: mayo de 2014]. Disponible en: <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/viewFile/1246/1257> ISSN: 0034-8570

¹⁸ Ídem

Resultados:

- Observaron una relación inversa entre el incremento de H₂S y el decremento del pH (pH más ácido) durante los primeros 20 días. Esto podría deberse al proceso de activación que tiene lugar durante los primeros días en la superficie del material.
 - El potencial de corrosión, creció durante los primeros días después de los cuales tuvo tendencia a estabilizarse, podría considerarse que esto es consecuencia de la producción de biofilm y productos de corrosión sobre la superficie de la muestra.
 - Las muestras Tipo HAZ (zona térmicamente afectadas por el proceso de soldadura), se evidenció mayor densidad y profundidad en las picaduras producto del proceso corrosivo, comparadas con las zonas BM (material base). Esta variación podría deberse a las diferencias en la micro-estructura que presentan las dos muestras: HAZ estructura con formaciones de tipo aguja o angulares ferríticas, con alta densidad de dislocaciones finas, mientras que la zona BM cuenta con granos poligonales ferríticos con perlita intergranular.
-
- Título: *Análisis de dos casos de corrosión: Acero Inoxidable en una industria generadora de energía y planchas calcográficas de cobre.* [17]
Autor: María Criado, Eduardo Otero, Santiago Fajardo, Pedro Pablo Gómez, José María Bastidas.
Fecha y Lugar: 2013, Barcelona, España.
Estudio de un caso de corrosión presentado de forma prematura (a 8 meses de su puesta en funcionamiento) de una tubería en sistema de refrigeración con agua de mar. La tubería es de acero inoxidable AISI 316L, con soldaduras transversales de material aportante AISI 308L y soldadura longitudinal AISI 316L. Se considera como factor importante del estudio el contenido de ferrita δ en los diferentes materiales presentes, ya que porcentajes entre 8 y 9% de este tipo de componente favorece los procesos corrosivos de los materiales.

Las muestras evaluadas fueron pulidas de forma sucesiva con papel con tamaño de grano 120, 240 y 600.

Se midió en contenido de ferrita δ en las diferentes muestras obteniendo porcentajes dentro de rangos adecuados: entre 0,4% y 4,6%, en el material base y la soldadura longitudinal respectivamente.

Tabla 8: Composición de materiales de la tubería¹⁹

| | %C | %Si | %S | %Mn | %Cr | %Ni | %Mo | %P |
|--|------|------|------|------|-------|-------|------|------|
| AISI 316L (Base) | 0,03 | 0,44 | 0,02 | 1,23 | 16,63 | 10,50 | 2,20 | 0,03 |
| AISI 308L (Soldadura Transversal) | 0,03 | 0,47 | 0,01 | 1,51 | 19,02 | 10,82 | 0,56 | 0,02 |
| AISI 316L (Soldadura Longitudinal) | 0,03 | 0,47 | 0,01 | 1,22 | 17,32 | 11,43 | 2,20 | 0,02 |

La composición química de las muestras en diferentes puntos se muestra a continuación:

Tabla 9: Composición química de las muestras analizadas²⁰

| | Fe | Cr | Ni | Mo | Ca | Na | Si | O | Cl | F |
|------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|
| Base | 69 | 18 | 11 | 2 | - | - | - | - | - | - |
| Mancha Marrón | 13 | 6 | 3 | - | 10 | 9 | - | 55 | 4 | - |
| Mancha Negra | 5 | - | - | - | 10 | 12 | 9 | 53 | 5 | 6 |
| Filamento | 23 | 16 | - | - | - | - | - | 58 | 3 | - |

Tanto el material base, como los cordones de soldadura no presentaban defectos estructurales. La desaparición del Níquel en los productos residuales y filamentos de las muestras evidencia que el ataque es selectivo. Además se evidencia una acumulación de Silicio en las zonas con manchas negras.

¹⁹ CRIADO M., OTERO E., FAJARDO S., GOMEZ PP., BASTIDAS JM. *Análisis de dos casos de corrosión: Acero inoxidable en una industria generadora de energía y planchas calcográficas de cobre*

²⁰ Ídem

Conclusiones.

- Se presenta una gran variedad de microorganismos dentro de la clasificación de bacterias sulfato-reductoras, lo que las convierte en bacterias que se pueden encontrar en muchos ambientes, y por esta razón sus efectos pueden ser observados en diferentes industrias, sectores y ubicaciones geográficas: terrestres y acuáticas.
- La importancia de su estudio y comportamiento, radica en la influencia que tienen en procesos corrosivos en la mayoría de materiales utilizados a nivel industrial, adicionalmente, su intervención en el deterioro de la calidad de productos como el petróleo y su consecuente pérdida económica son otro factor de considerable atención.
- En esta revisión, no se tuvo en cuenta el uso que se ha dado últimamente a las bacterias sulfato-reductoras en campos como el tratamiento de aguas residuales y procesamiento de metales pesados asociado, sin embargo, es un campo de investigación muy relevante para estos microorganismos y se encuentra muy vigente.
- Como producto de su metabolismo, las bacterias sulfato-reductoras, generan H₂S, el cual es corrosivo (el H₂S producido químicamente no es tan agresivo como el producido por las bacterias).
- Los aceros de bajo contenido de carbono son mas propensos a la corrosión producida por este tipo de bacterias, sin embargo los aceros inoxidable, también se ven afectados por este tipo de procesos corrosivos.
- La velocidad del proceso corrosivo en los diferentes materiales puede variar considerando las condiciones del pH del ambiente y la temperatura. En general, se evidencia un incremento en el potencial corrosivo de los materiales durante los períodos iniciales y este potencial tiende a estabilizarse con el tiempo, considerándose que esto se debe a la formación de biofilm y de agregaciones de productos de corrosión y las bacterias en el material.

- Un factor determinante en los procesos corrosivos es la organización microestructural de los aceros. La formación estructural esta dada por el tipo de acero que se tiene (diagramas Hierro-Carbono), y se puede ver afectada por solicitudes térmicas (tratamientos térmicos de los materiales y soldaduras, por ejemplo). Ha sido de relevancia, el estudio de la corrosión en los cordones de soldadura de diferentes aceros, identificándose formas de ataque corrosivo como *Weld decay* y *Knife-line*.
- En el caso de las soldaduras, se ha evidenciado la “desaparición” del Níquel cuando son atacadas por procesos corrosivos.
- Los mecanismos de control usados en las diferentes industrias para contrarrestar el efecto de las bacterias sulfato-reductoras son los biocidas, aplicados conforme al los protocolos de medición de poblaciones implementados.
- Dada la gran variedad de especies identificadas como bacterias sulfato-reductoras, y los diversos factores sobre ellas intervienen, es aún mucho el trabajo por hacer, en la parte biológica-química con relación al conocimiento de su potencial y funcionamiento y en el área de la ingeniería, en cuanto a la caracterización de materiales que no sean propensos a los daños por corrosión microbiológicamente inducida.

Referencias Bibliográficas

- [1]. HERRERA, Liz K., GLUCIDE, Carlos A., PEREYRA, Andrea M., VIDELA, Héctor A. Biocorrosión y bioensuciamiento en acero al carbono sumergido en agua de puerto poluida del Mar Caribe: prevención y protección mediante cubiertas anti-bioensuciamiento. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad de Zulia [en línea]. Noviembre de 2007 [Consultada mayo de 2014] Disponible en: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0254-07702007000400031&script=sci_arttext ISSN 0254-0770
- [2]. CORENGIA, Mariana., DIAZ, Verónica., MENES, Javier., OHANIAN, Mauricio., PIANZZOLA, María P. Influencia microbiológica sobre la corrosión: ensayos sobre materiales de interés tecnológico realizados en la Bahía de Montevideo. [en línea] Montevideo: UDELAR. [Consultada: mayo de 2014]. Disponible en: <http://aiquruquay.org/congreso/download/TL42.pdf>
- [3]. JAVAHERDASHTI, R., Microbiologically Influenced Corrosion an Engineering Insight. Springer, 2008, p. 29-66
- [4]. OCAMPO, Eloísa. Clase VIII. Microorganismos en sistemas de enfriamiento. [en línea] Medellín: UDEA [Consultada: mayo 2014]. Disponible en: http://docencia.udea.edu.co/bacteriologia/MicrobiologiaAmbiental/microbiologia_8.pdf
- [5]. CAMPOS, Humberto R., CAMPOS, Claudio H., Corrosión bacteriana en metales. IDESIA: Revista de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Tarapacá [en línea]. 2004 [Consultada mayo de 2014] Disponible en: <http://www.idesia.cl/numeros-antteriores.html?view=va&aid=48&vid=14> Volumen 22, N°1, 2004.
- [6]. ODOM, J.M., The Sulfate-Reducing Bacteria: Contemporary Perspectives. 3ª ed. New York: Springer-Verlag, 1993. P. 190-193. ISBN:0-387-97865-8
- [7]. BEECH, Iwona, BERGEL, Alain, MOLLICA, Alfonso, FLEMMING, Hans C., SCOTTO, Vittora, SAND, Wolfgang. Microbially influenced corrosion of industrial materials. [en línea] Brite-Euram III. P. 4.[Consultada: mayo de 2014]. Disponible en: http://www.efcweb.org/efcweb_media/MICbook.pdf
- [8]. JUNIER, Pilar., JUNIER, Thomas., PODELL, Sheila., SIMS, Davis R., DETTER, John C., LYKIDIS, Athanasios., HAN, Cliff S., WIGGINTON, Nicholas S., GAASTERLAND, Terry., BERNIER-LATMANI, Rizlan. The genome of the Gram-positive metal- and sulfate-reducing bacterium *Desulfotomaculum reducens* strain MI-1. Society for applied microbiology. 2010.
- [9]. MEADOWS, Michael., Desulfovibrio – Soil Microbiology [en línea] Biol/Ces 4684 [Consultada: mayo de 2014]. Disponible en: http://filebox.vt.edu/users/chagedor/biol_4684/Microbes/desulfo.html
- [10]. KUSHKEVYCH, Ivan V., Growth of the Desulfomicrobium sp. strains, their sulfate- and lactate usage, production of sulfide and acetate by the strains isolated from the human large intestine. HOAJ: Herbert Open Access Journals. [en línea]. 2014 [Consultada mayo de 2014] Disponible en: <http://www.hoajonline.com/journals/pdf/2052-6180-2-1.pdf> ISSN 2052-6180
- [11]. SARYANARAYANA, T., JOHRI, Bhavdish N., PRAKASH, Anil. Microorganisms in Environmental Management. 2ª ed. New York: Springer, 2012. P. 8. ISBN: 98-94-007-2228-6

- [12]. SCIENCE 2.0. Desulfobulbus: Filamentous Bacteria are living power cables. [en línea] Nature 2012 [Consultada: mayo de 2014] Disponible en: http://www.science20.com/news_articles/desulfobulbus_filamentous_bacteria_are_living_power_cables-95620
- [13]. ROBLEDO, Ramiro. Análisis metalográfico y termoquímico de aceros y fundiciones. 1997. P.11. [en línea] Universidad Autónoma de Nuevo León – México [consultada: mayo de 2014] Disponible en: http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020119025/1020119025_02.pdf
- [14]. ESCOBAR, Jairo. Introducción metales. 2012. P. 12-20. [en línea] Universidad de los Andes – Colombia [Consultada: mayo de 2014] Disponible en: https://ingenieria.uniandes.edu.co/wiki/pregrado/IMEC2411-01/lib/exe/fetch.php?media=recursos:presentacion_clasificacion_designacion_especificacion.pdf
- [15]. SANTANDER, Carolina B., Estudio Experimental de Corrosión en Metales de uso industrial por Desulfobulbus desulfuricans. [en línea] Universidad de Chile. [Consultada: mayo de 2014]. Disponible en: www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2008/santander_cm/.../santander_cm.pdf
- [16]. FLORES, J.E., PATIÑO, Carachure C., ALFONSO I., RODRIGUEZ, J.A., ROSAS, G. Study of sulphate-reducing bacteria corrosion in the Weld joint for API X-70 steel. Revista de Metalurgia [en línea] Septiembre-Octubre 2012 [Consultada: mayo de 2014]. Disponible en: <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/viewFile/1246/1257> ISSN: 0034-8570
- [17]. CRIADO M., OTERO E., FAJARDO S., GOMEZ PP., BASTIDAS JM. *Análisis de dos casos de corrosión: Acero inoxidable en una industria generadora de energía y planchas calcográficas de cobre*. En Valdez Salas B, & Schorr Wiener M (Eds.). *Corrosión y preservación de la infraestructura industrial*. Barcelona, Espana: OmniaScience; 2013. pp. 131-155.