

Valoración de la efectividad antiincrustante de recubrimientos aplicados a embarcaciones que operan en la Bahía de Cartagena

Martha J. Meza^a
Diana M. Calixto^a
Lina M. Velosa^a
Edwin M. Acosta^a
Mónica Puyana^{a,c}
José Alfredo Morales^b
Jorge H. Panqueva^a

Resumen

En este estudio se desarrolló una metodología para evaluar el desempeño, según la eficiencia antiincrustante y anticorrosiva, de seis sistemas *antifouling* comerciales en las plantas industriales de Mamonal y Bocagrande en la Bahía de Cartagena. El desempeño general de los recubrimientos fue determinado mediante la calificación de la resistencia al *biofouling* y la integridad del *antifouling* y de la película anticorrosiva. Adicionalmente se realizó un seguimiento de los parámetros microbiológicos y fisicoquímicos del medio marino en el área de exposición, según los cuales las dos zonas de estudio presentaron condiciones favorables para el desarrollo de los organismos con elevados porcentajes de cobertura de *fouling* sobre cupones control. En la Planta de Mamonal, los sistemas mostraron una mejor eficiencia antiincrustante respecto a la de Bocagrande. De acuerdo con el tipo de recubrimiento, el autopulimentable presentó un mejor desempeño frente a recubrimientos tipo matriz soluble e insoluble.

Palabras clave: Bioincrustación, recubrimiento antiincrustante, biocida, desempeño general del recubrimiento.

Abstract

A method to evaluate the performance was developed in this study, according to the antifouling and anticorrosive efficiency, of 6 commercial antifouling systems in the plants of Mamonal and Bocagrande in the Bay of Cartagena. The general performance of the coatings was determined through the qualification of the resistance to the biofouling and the integrity of the antifouling and of the anticorrosive film. Additionally, a follow-up of the microbiologic and photochemical parameters were carried out of the marine media in the area of exposition, according to which both zones of study presented favorable conditions for the development of organisms with high percentages of fouling coating on control coupons. In the Plant of Mamonal, the systems showed a better antifouling efficiency regarding the Plant of Bocagrande. According to the type of coating, the auto-polishing presented a better performance compared to the soluble and insoluble type matrix coating.

Key words: Bioincrustation, Antifouling Coating, Biocide, General Performance of Coating, Biofouling.

Fecha de recepción: 1 de septiembre de 2006

Fecha de aceptación: 17 de mayo de 2007

^aCorporación para la Investigación de la Corrosión -CIC-. Piedecuesta (Santander), Colombia. corincor@telecom.com.co.

^bCotecmar.

^cUniversidad Jorge Tadeo Lozano. Facultad de Ciencias Naturales.

Autor correspondiente: monica.puyana@utadeo.edu.co

Los autores agradecen al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas de la Armada Nacional de Colombia -Cioh-, y al personal de Cotecmar por su colaboración en el desarrollo de las actividades de monitoreo. Al ingeniero Alfredo Morales Torres y al doctor Gabriel Barrero por la gestión realizada para el establecimiento del convenio de cooperación científica y tecnológica con la CIC.

El Sena en el marco del programa de Fortalecimiento de Centros de Desarrollo Tecnológico aportó recursos económicos para la cofinanciación de este proyecto.

Introducción

Una de las principales problemáticas que afectan la industria naval es la presencia de bioincrustaciones (*biofouling*), en la obra viva de las embarcaciones, fenómeno que produce efectos adversos bastante conocidos como un aumento en el consumo de combustible (hasta 40%) por la alta resistencia de fricción del *biofouling* adherido; un incremento en la frecuencia de entrada a dique seco, y a la vez, introducción de especies en ecosistemas donde no estaban presentes naturalmente (Yebra, Kiil y Dam-Johansen, 2004).

La formación de la bioincrustación está acompañada por una compleja interacción de fenómenos físicos, químicos y biológicos, que inicia cuando un sustrato duro es inmerso en el medio marino. El proceso comienza con la adhesión de un componente molecular (compuestos orgánicos e inorgánicos), seguido por el establecimiento de *microfouling* (algas unicelulares y bacterias), el cual coloniza la superficie y se consolida mediante la producción de un material polimérico extracelular (MPE) (Cassé, Swain, 2006). Esta colonización primaria, facilita la fijación y desarrollo de algas y larvas de invertebrados y la incorporación final del *macrofouling* (Clare, Rittschof, Gerhart, Maki, 1992; Davis, Targett, McConnell, Young, 1989; y Wahl, 1989).

Frente a este fenómeno se han desarrollado una gran variedad de esquemas de recubrimientos *antifouling* que incluyen dentro de sus matrices agentes *biocidas*. Sin embargo, regulaciones promovidas por la Organización Marítima Internacional -OMI-, han prohibido algunos como el TBT (Tributilestano), por los efectos adversos que producen al ambiente (IMO, 2003). En la actualidad, el principal tipo de recubrimiento empleado por la industria marítima son los antiincrustantes a base de cobre, efectivos contra algas y organismos incrustantes calcáreos como los barnáculos, que presentan un efecto menos tóxico que el TBT (Callow y Callow, 2002).

Con el fin de optimizar el proceso de selección de pinturas y asegurar el mejor desempeño de los esquemas de recubrimientos, se desarrolló una metodología de exposición en las condiciones que ofrece la Bahía de Cartagena en dos puntos; las plantas industriales de Mamonal y Bocagrande. El estudio incluyó la comparación de la eficiencia antiincrustante de seis productos comerciales *antifouling*, la evaluación de las bioincrustaciones

adheridas a cupones de evaluación y control, así como la caracterización fisicoquímica y microbiológica del medio marino natural donde fue realizada la exposición.

Metodología

Recubrimientos antiincrustantes evaluados

En este estudio se evaluaron seis recubrimientos antiincrustantes provenientes de compañías nacionales e internacionales, cuya principal característica fue la ausencia de Tributilestano (TBT) en su formulación. Todos los productos seleccionados presentaron compuestos de cobre como ingrediente activo principal (Cuadro 1).

Cuadro 1. Sistemas de recubrimiento *antifouling* evaluados ^{1/}

Sistema	Tipo de recubrimiento
A1	Antiincrustante vinílico tipo autopulimentable
H1	Antiincrustante tipo autopulimentable con un refuerzo de fibra inorgánica
P1	Antiincrustante vinílico de matriz insoluble
P2	Antiincrustante de matriz en un vehículo especial
G1	Antiincrustante tipo autopulimentable con <i>biocidas</i> orgánicos adicionales
S1	Antiincrustante vinílico tipo autopulimentable

^{1/} Ingrediente activo principal óxido de cobre.

Exposición estacionaria de cupones

Se fabricaron cupones de evaluación de 300 x 250 x 4,76 mm en acero naval ASTM A131 Grado A, doblados a 90° y con preparación de superficie *Sand Blasting* o *Wet Sandblasting*. Estos cupones fueron tratados con los sistemas de recubrimientos *antifouling* seleccionados, que en general incluían un imprimante, una o dos barreras intermedias y una capa de acabado como

antiincrustante. Adicionalmente, se incluyeron cupones control con las mismas características de fabricación y preparación de los cupones de evaluación exceptuando la aplicación de una capa antiincrustante.

Para la exposición de los cupones en el medio marino, Cotecmar diseñó y fabricó cuatro boyas y un conjunto de *racks* en fibra de vidrio para la exposición y sujeción de los cupones (Gráfico 1). Cada boya permitía la exposición de tres sistemas de recubrimientos.

Gráfico 1. Sistema de exposición de cupones de evaluación y control



A. Disposición y sujeción de los cupones a los racks.



B. Inmersión final de los cupones en el medio marino natural.

Fuente: *Resultados de la investigación.*

Se realizó el seguimiento a doce cupones de evaluación (seis originales y seis réplicas) y seis cupones control por sistema de recubrimiento. Dos boyas fueron ubicadas en la Zona Cinco Sur de la Planta Industrial de Mamonal y dos en la zona aledaña al helipuerto en la Planta Industrial de Bocagrande. Los sistemas de recubrimiento fueron sumergidos en mayo de 2004 y sometidos al medio marino de forma continua durante 18 meses con controles trimestrales. En cada monitoreo se retiró un cupón de evaluación, una réplica, un cupón

control y se procedió a la evaluación de superficie de los mismos y las características fisicoquímicas y microbiológicas del medio marino.

Características fisicoquímicas y microbiológicas del medio marino

Para la caracterización fisicoquímica y microbiológica del medio marino circundante a los cupones, se recolectaron muestras de agua en los dos puntos extremos de las boyas a profundidades de 0,2 y 2 metros para cada una de las plantas industriales. Se hicieron siete controles: el primero antes de la exposición de los cupones (enero de 2004), el segundo simultaneo a la inmersión (mayo de 2004) y los posteriores durante los monitoreos de los cupones.

Las muestras para análisis microbiológico fueron recolectadas en frascos de vidrio estériles vacíos con capacidad de 100 ml. El transporte de las muestras se realizó a 4 °C y su procesamiento antes de 48 horas luego de recolectadas en campo. La evaluación de la carga microbiana del medio marino consideró cuatro grupos bacterianos determinados por la técnica de Extinción por Dilución Seriada (EDS): bacterias aerobias totales (BAT), bacterias anaerobias totales (BAnT), bacterias productoras de ácido (BPA) y bacterias sulfato reductoras (BSR). La incubación de las muestras se realizó a 32°C de acuerdo con la temperatura promedio de la zona de exposición.

Los parámetros fisicoquímicos de pH, temperatura (°C) y oxígeno disuelto (OD) fueron medidos in situ. Adicionalmente se recolectaron muestras de agua en frascos de vidrio herméticos con capacidad de 500 y 1000 ml para la determinación en laboratorio de demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), alcalinidad total (AT), cloruros (Cl), sulfatos (SO₂=), hierro total (HT), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos disueltos totales (SDT) y sólidos disueltos volátiles totales (SDVT).

Caracterización

El seguimiento a la formación de *fouling* se realizó para los cupones control y fue establecido mediante la determinación del porcentaje de cobertura y la biomasa por peso seco. Posteriormente, se cuantificó la cobertura de cada una de las especies o taxa incrustante. Los organismos errantes y móviles (cangrejos, policládidos etc.), o bien organismos sésiles no clonales (anémonas), se cuantificaron

en total para el cupón. Para la identificación se guardaron muestras tipo (*vouchers*), fijadas en una solución formalina-agua de mar (dilución 1:4) y por último almacenadas en etanol (96%). Los organismos bioincrustantes fueron identificados con la ayuda de claves taxonómicas específicas para cada grupo.

Evaluación de los sistemas de recubrimiento antiincrustantes

El desempeño de los recubrimientos se estableció mediante la calificación de la resistencia al *fouling*, la integridad del *antifouling* y de la película anticorrosiva de acuerdo con la norma ASTM D 3623-78a (2004). Esta calificación fue registrada en una tabla que contenía la codificación del cupón, fecha, seguido por tres columnas con la calificación de la resistencia al *fouling* (RF), película de *anfifouling* (PAF), película anticorrosiva (PAC) y una columna final con el resultado del desempeño general del recubrimiento (DGR).

Resistencia al fouling (RF). La valoración del *fouling* en los cupones de evaluación se determinó por el porcentaje de cobertura en cada una de las caras del cupón usando una cuadrícula guía, en un área de 279,85 cm² que excluía una franja de 2,5 cm. en cada lado del cupón para evitar efectos de borde. La calificación se realizó de la siguiente forma: para los cupones libres de *fouling* exceptuando la presencia de esporas de algas y otros *biofilms* biológicos, se otorgó una calificación de 100; se disminuyó la calificación a 95 si presentaba solo un *fouling* incipiente; finalmente, si especies de *fouling* maduras estaban presentes, el valor de la calificación se obtuvo por sustracción de la sumatoria del número de individuos adheridos y el porcentaje de superficie cubierto por formas coloniales.

Condición física del recubrimiento. En este punto se evaluó la integridad de la película de *antifouling* (PAF) y la anticorrosiva (PAC). Si la película no presentaba ningún defecto físico se calificaba con un valor de 100. Para obtener la calificación de los imperfectos de cada película, se sustrajo de 100 el porcentaje de superficie afectada por defectos tales como decoloración, cuarteamiento, oxidación y ampolamiento.

Desempeño general del recubrimiento (DGR). El establecimiento del desempeño general del recubrimiento se realizó seleccionando la calificación más baja de los tres valores precedentes (RF, PAF y PAC).

Resultados y discusión

Evaluación de las características fisicoquímicas y microbiológicas del medio marino

La determinación de bacterias aerobias totales y anaerobias totales permite abarcar un grupo heterogéneo de microorganismos con diversas características fisiológicas, estableciendo la carga microbiana total aislable del medio marino (Schut, et al. 1993). Estos grupos poblacionales presentaron variaciones en el tiempo en las dos plantas industriales, alcanzando picos máximos durante el segundo y quinto monitoreo correspondientes a los meses de mayo de 2004 y marzo de 2005 respectivamente. No se evidenciaron diferencias significativas entre los títulos poblacionales de los grupos cuando se compararon los valores a las dos profundidades establecidas.

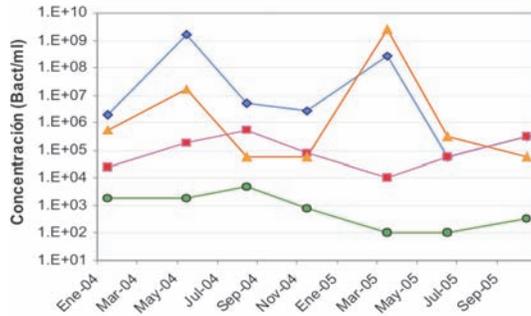
Los valores encontrados tanto de BAT como de BAnT fueron superiores a 106 Bact/mL (Gráfico 2), lo cual evidenció que las condiciones del medio marino de las plantas industriales de Mamonal y Bocagrande podrían favorecer un apropiado crecimiento de los microorganismos y, eventualmente, el desarrollo de un proceso de *fouling* sobre superficies sumergidas. Lo anterior está basado en los reportes de la literatura, donde se establece que cultivos microbianos con concentraciones de alrededor de 1g/l o de 10⁴ a 10⁶ bact/ml son indicativos de que las condiciones microambientales permiten la continua regeneración y activación metabólica de una población microbiana (Little, Ray y Pope, 2000).

Las BPA y BSR son consideradas como los agentes responsables de una gran parte de los procesos corrosivos de influencia microbiológica (Pope, 1992). Según estudios realizados en el área de la biocorrosión y en proyectos ejecutados por la Corporación para la Investigación de la Corrosión (2003), el hallazgo de este tipo de microorganismos en un nivel mayor de 1021 Bact/mL; se considera como corrosivo desde el punto de vista microbiológico.

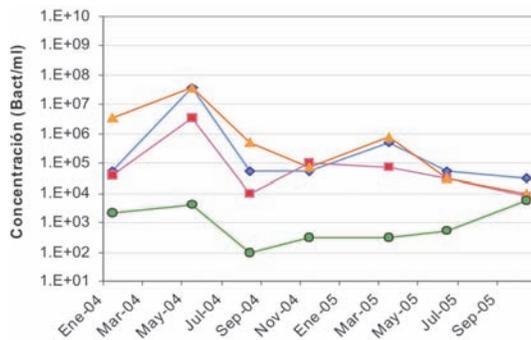
Adicionalmente, es importante considerar que los productos metabólicos de las BSR y BPA pueden ejercer un efecto nocivo sobre la estructura del recubrimiento cuando son expuestos durante periodos prolongados, produciendo en última instancia el deterioro de la estructura metálica. Sin embargo, durante la inspección realizada a los cupones de exposición evaluados no se hallaron evidencias de

picadura que estuvieran relacionadas con procesos de biocorrosión, debido a la protección que brinda el recubrimiento.

Gráfico 2. Concentración bacteriana (enero 2004 - septiembre 2005)



A. Planta Industrial de Mamonal



B. Planta Industrial de Bocagrande

—●— BAT —■— BPA —▲— BAnT —●— BSR

Fuente: Resultados de la investigación.

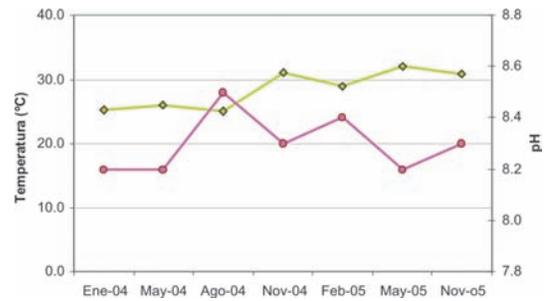
El medio marino circundante a los cupones expuestos en las plantas industriales se caracterizó por presentar una temperatura que varía entre los 25 y 32 °C. Los valores de pH fueron ligeramente alcalinos entre 8,1 y 8,7 (Gráfico 3). Los anteriores parámetros fisicoquímicos no evidenciaron variaciones significativas entre las dos profundidades fijadas. En las condiciones descritas, el desarrollo de las comunidades microbianas mesófilas está favorecido por considerarse óptimas para su crecimiento (Madigan, Martinko y Parker, 2000).

Los valores de oxígeno disuelto en las dos plantas industriales se ubicaron en un rango entre los 4 y 8 mg/l. En general, los datos recolectados superaron ligeramente los valores límites de este parámetro (4 mg/l) establecidos en la normativa para aguas costeras colombianas, indicando de esta manera, que existe una apropiada oxigenación del agua

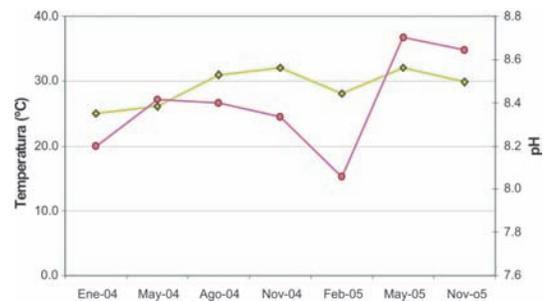
(Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 1984). Esta saturación de oxígeno, desde el punto de vista biológico, permite una adecuada proliferación de microorganismos oxigénicos lo cual se ve reflejado en el recuento de BAT.

Asimismo, se ha encontrado que las bacterias en el ambiente natural no permanecen siempre en estado planctónico sino que tienden a formar nichos que favorecen su supervivencia ante condiciones hostiles; por lo tanto, se considera que dentro de estos cúmulos bacterianos puedan desarrollarse microorganismos anoxigénicos principalmente cuando ocurre una disminución en la concentración de oxígeno, debido a los procesos metabólicos generados por las bacterias aerobias (Kae, et al., 2002). Lo anterior explica la presencia de valores proporcionales de BAnT respecto a BAT durante todos los monitoreos realizados (Gráfico 2).

Gráfico 3. Temperatura y pH del medio marino circundante a los cupones expuestos



A. Planta de Mamonal



B. Planta de Bocagrande.

—◆— T°C —■— pH

Fuente: Resultados de la investigación.

En cuanto a los procesos químicos generados por la acción del recubrimiento con el medio marino, cabe resaltar que la presencia de altas concentraciones de oxígeno disuelto encontradas en las Plantas Industriales pueden producir el desencadenamiento

de reacciones químicas del biocida, que producen la oxidación del cobre (I) disuelto y la posterior formación y sedimentación de sales de este metal en los fondos marinos (Yeber, Kiil y Dam-Johansen, 2004).

Con relación a la conductividad, esta varió dependiendo de la profundidad en la Planta de Mamonal. Se observó un aumento del 10-50% en las muestras de agua recolectadas a mayor profundidad respecto a las superficiales. Para la Planta de Bocagrande, la conductividad no dependía de la profundidad de la muestra, sino que estaba afectada por procesos de mezcla de agua dulce y salada, por posibles aportes del Canal del Dique.

La concentración de cloruros, sulfatos, sólidos disueltos totales (SDT) y alcalinidad en Mamonal, se encontraron ligeramente incrementados a mayor profundidad. En el caso de Bocagrande, estos parámetros no fluctuaron entre las profundidades estudiadas. El rango de cloruros establecido para las muestras superficiales fue de 8034 a 13773 mg/l; para las muestras a 2 metros de profundidad las concentraciones de cloruros se hallaron entre 9554 y 21997 mg/l. El ión sulfato mantuvo concentraciones entre 1105 y 2142 mg/l en la superficie y de 2042 y 2843 mg/l para las muestras tomadas en profundidad.

Los valores de hierro total en las muestras de Mamonal y Bocagrande se ubicaron entre 0,1 y 0,9 mg/l; estos valores están acordes con los rangos reportados en la literatura (Rodier, 1998).

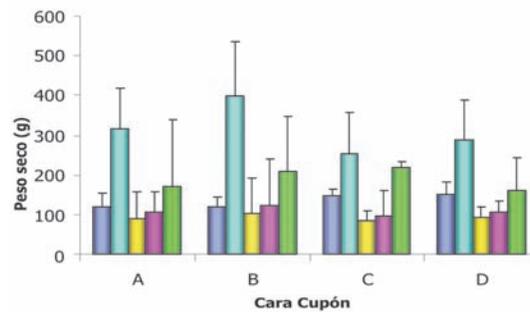
Los valores determinados para DBO5 fueron de 0,5 - 3,4 mg/l para Mamonal y de 1,4 - 4,6 mg/l para Bocagrande. Estos datos pueden indicar que el proceso de autopurificación del mar permite degradar la materia orgánica presente de forma constante y eficiente (Madigan, Martinko y Parker, 2000).

Formación de las bioincrustaciones en cupones control

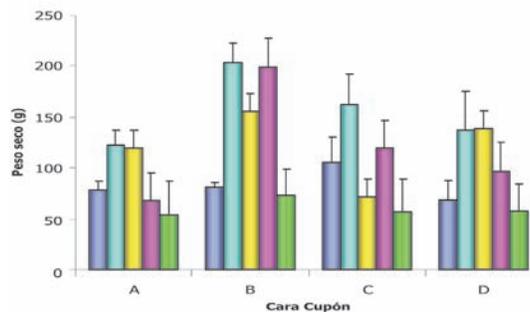
En el Gráfico 4 se muestra la biomasa total adherida a los cupones control durante los cinco controles realizados. Los cupones tienen forma de "L" con dos caras verticales (A y C) y dos caras horizontales (B y D). Para la Planta de Mamonal inicialmente la biomasa fue muy similar para todas las caras del cupón, sin embargo, los valores más altos se registraron en las caras A y B, las cuales estaban expuestas constantemente a la luz solar. Para la Planta de Bocagrande, se detectó una preferencia por la

cara horizontal B especialmente en los monitoreos 2, 3 y 4. La tendencia es similar para ambas plantas a pesar de que la oferta larval no es la misma debido a las variaciones en la velocidad del flujo del agua sobre las superficies expuestas, facilitando el asentamiento de las larvas transportadas. La cementación de las valvas calcáreas de la ostra sobre las superficies de los cupones en Mamonal, hizo que los cálculos de biomasa fueran mayores respecto a Bocagrande.

Gráfico 4. Biomasa adherida a los cupones control en cada una de las cuatro caras de los cupones (promedio más error estándar)



A. Planta de Mamonal



B. Planta de Bocagrande

■ M1 ■ M2 ■ M3 ■ M4 ■ M5

Los cupones tienen forma de "L" con dos caras verticales (A y C) y dos caras horizontales (B y D). (M=Monitoreo).

Fuente: *Resultados de la investigación.*

A partir del primer monitoreo, los cupones control presentaron una alta cobertura fijada entre 81 y 87% y la tendencia de incrustación normalmente presentó un incremento a medida que avanzaron los controles, ya que al pasar el tiempo se fueron asentando un mayor número de organismos.

En las dos plantas se observó un incremento abrupto en la biomasa sobre los cupones de control en el segundo monitoreo, probablemente como resultado de la existencia de una superficie previamente acondicionada en el primer monitoreo que permitió la fijación de muchos otros organismos. A partir del tercer monitoreo se presentó una fijación variable en las diferentes caras, por depredación o mortalidad parcial de la fauna o una menor oferta larval disponible que puede estar asociada a cambios en la salinidad.

Se determinó que los principales grupos de invertebrados responsables de la bioincrustación sobre los sustratos experimentales en la Planta de Mamonal fueron la ostra de mangle, *Crassostrea rhizophorae*, el mejilloncito *Brachidontes exustus*, los cirripedios *Balanus eburneus* y *Balanus amphitrite* y dos especies de poli quetos pertenecientes al género *Hydroides*, principalmente *Hydroides elegans*.

En la Planta de Bocagrande los principales invertebrados responsables de la bioincrustación fueron los cirripedios (*Balanus eburneus* y *Balanus amphitrite*), el mejilloncito *Brachidontes exustus* y algunos poliquetos de la familia *Serpulidae*, *Serpula* sp., *Hydroides* sp. e *Hydroides diramphus*. En la Planta de Bocagrande fue escasa la presencia de ostra de mangle, con predominio en este caso de los poliquetos tubícolas.

Evaluación del recubrimiento antiincrustante

Los cupones de evaluación retirados durante los cinco controles fueron calificados de acuerdo con la resistencia al *fouling* (RF), la integridad de la película de *antifouling* (PAF) y de la película anticorrosiva (PAC). El valor resultante para cada

sistema de recubrimiento fue el promedio del cupón de evaluación y el duplicado. Los resultados de esta calificación se describen en el Cuadro 3.

Cuadro 2. Bioincrustaciones adheridas a cupones control después de 18 meses de exposición



Fuente: Resultados de la investigación.

De acuerdo con el Cuadro 3, la resistencia al *fouling* en los cupones de evaluación fue mejor en la Planta de Mamonal respecto a la Planta de Bocagrande para todos los sistemas calificados. Para ambas

Cuadro 3. Calificación de los cupones de evaluación de los seis sistemas de recubrimiento.

Plantas de Mamonal y Bocagrande

Sistemas	Planta de Mamonal														
	RF					PAF					PAC				
	M1	M2	M3	M4	M5	M1	M2	M3	M4	M5	M1	M2	M3	M4	M5
A1	100	100	100	100	100	100	90	90	90	90	100	100	100	100	100
H1	95	95	95	95	95	100	90	90	90	90	100	100	100	90	80
P1	95	95	95	92	95	100	90	90	90	90	100	100	100	100	90
P2	78	72	86	87	n. d.	100	90	60	40	n. d.	100	90	80	40	n. d.
G1	95	95	95	92	n. d.	100	100	100	100	n. d.	100	100	100	100	n. d.
S1	94	94	95	95	95	100	90	90	90	90	100	100	100	100	90

RF: Resistencia al *fouling* PAF: Película de *antifouling* PAC: Película de antiincrustante
M: Monitoreo n. d.: No determinado debido a la película del cupón

Planta de Bocagrande															
Sistemas	RF					PAF					PAC				
	M1	M2	M3	M4	M5	M1	M2	M3	M4	M5	M1	M2	M3	M4	M5
A1	95	95	95	95	90	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
H1	67	65	44	50	34	60	40	20	20	20	100	100	100	90	90
P1	84	84	45	36	29	80	60	60	20	10	90	80	60	20	20
P2	65	58	46	45	40	90	70	60	60	60	100	100	100	100	100
G1	88	n. d.	70	53	45	100	n. d.	100	100	100	100	n. d.	100	100	100
S1	95	95	84	89	60	100	90	80	80	80	100	100	100	100	90

RF: Resistencia al *fouling* PAF: Película de *antifouling* PAC: Película de antiincrustante
M: Monitoreo n. d.: No determinado debido a la película del cupón
Fuente: *Resultados de la investigación.*

plantas y todos los sistemas ensayados el porcentaje de cobertura de organismos incrustantes fue mucho mayor en los cupones control en comparación con los cupones de evaluación. En el Cuadro 4 se relaciona el resumen de los resultados y se calcula el desempeño general del recubrimiento (DGR).

En Mamonal se determinó que el sistema con mejor eficiencia antiincrustante fue el A1, seguido por los sistemas H1, S1, G1, P1 y P2. Cabe resaltar los resultados conseguidos por el sistema A1 que obtuvo la máxima calificación para los tres parámetros evaluados, a diferencia del sistema P2, cuya función *antifouling* y anticorrosiva fue deficiente.

En Bocagrande, se corroboran los buenos resultados del sistema A1 frente a los otros sistemas, aunque su eficiencia fue superior en Mamonal. Le sucedieron los sistemas S1, G1, P2, H1 y P1. Al comparar los resultados del sistema H1 entre las dos plantas, se puede observar que mientras en Mamonal el sistema presentó un buen desempeño que le dio el

segundo lugar, en la Planta de Bocagrande mostró baja resistencia al *fouling* y deficiente trabajo de la película *antifouling*.

Conclusiones

A partir del estudio realizado en las plantas industriales de Mamonal y Bocagrande, se generaron las siguientes conclusiones:

- Para las dos plantas industriales, el medio marino circundante a los cupones tratados con los diferentes sistemas de recubrimientos *antifouling*, presenta altas concentraciones de microorganismos que pueden permitir el desarrollo de un proceso de *fouling*. De igual forma, este componente bacteriano se caracteriza por presentar considerables concentraciones de BPA y BSR, que en contacto con la superficie metálica desnuda pueden generar la formación de procesos de biocorrosión.

Cuadro 4. Desempeño general de los sistemas de recubrimiento en las plantas de Mamonal y Bocagrande

Planta Mamonal				
Sistemas	Calificación			DGR
	RF	PAF	PAC	
A1	100	100	100	100
H1	95	100	100	95
P1	94	95	95	94
P2	93	100	100	93
G1	92	95	100	92
S1	72	40	60	40

Planta Bocagrande				
Sistemas	Calificación			DGR
	RF	PAF	PAC	
A1	90	100	100	90
H1	60	80	90	60
P1	45	100	100	45
P2	40	60	100	40
G1	34	20	90	20
S1	29	10	20	10

RF: Resistencia al *fouling*
PAC: Película de antiincrustante
Fuente: *Resultados de la investigación.*

PAF: Película de *antifouling*
DGR: desempeño general del recubrimiento

- El medio marino se caracteriza por ofrecer condiciones óptimas para el desarrollo de comunidades micro y microbiológicas.
- Adicionalmente, presenta altas concentraciones de oxígeno disuelto y valores de DBO5 que indican un adecuado proceso de autopurificación del agua de mar.
- La bioincrustación presentó un alto porcentaje de cobertura desde el primer control y un crecimiento abrupto en la biomasa en el segundo como resultado de la existencia de una superficie acondicionada para la fijación de organismos. En adelante, se presentó una fijación variable debido a depredación o mortalidad parcial de la fauna o menor oferta larval disponible.
- En la Planta de Mamonal, los principales grupos de invertebrados responsables de la bioincrustación fueron *Crassostrea rhizophorae*, *achidontes exustus*, *Balanus* sp. e *Hydroides* sp., mientras que en Bocagrande se encontraron asociados *Balanus* sp., *Brachidontes exustus*, *Serpula* sp. e *Hydroides diramphus*.
- En Mamonal se determinó que el sistema con mejor eficiencia antiincrustante fue el A1, seguido por los sistemas H1, S1, G1, P1 y P2. En Bocagrande, el sistema A1 presentó igualmente el mejor desempeño y le sucedieron los sistemas S1, G1, P2, H1 y P1.
- Se observó un mejor desempeño en los recubrimientos antiincrustantes tipo autopulimentables (A1, H1, S1 y G1), en comparación con los tipo matriz insoluble(P1) y soluble (P2).
- La metodología aplicada para la evaluación y calificación de recubrimientos *antifouling*, permitió desarrollar una adecuada y precisa comparación de los esquemas de recubrimientos y por lo tanto, se considera una herramienta confiable en la selección de pinturas que puede ser implementada por parte de Cotecmar.

Referencias

- ASTM D362378a. (2004). "Antifouling Panels in Shallow Submergence". ASTM International.
- Cassé, F., Swain G. (2006) "The Development of Microfouling on Four Commercial Anti-fouling Coatings Under Static And Dynamic Immersion", International Biodeterioration & Biodegradation (57), pp. 179-185.
- Callow, M.E., Callow J.A., (2002) "Marine Biofouling: A Sticky Problem". *Biologist* 49 (1).
- Clare, A.S., Rittschof, D., Gerhart, D.J., Maki, J.S. (1992). "Molecular Approaches to Nontoxic Anti-fouling", *Invertebrate Reproduction and Development*. 22(1-3) pp. 67-76.
- Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (1984, 26 de junio) "Decreto 1594 de 1984 por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos", en *Diario Oficial* n.º 36.700, 26 de Junio de 1984, Bogotá.
- Corporación para la Investigación de la Corrosión (2003), *Programa para el manejo de la corrosión interna del sistema de transporte de gas en un gasoducto colombiano. Informe final*. Bucaramanga. CIC.
- Davis, A. R., Targett, N. M., McConnell, O. J., Young, C. M. (1989) "Epibiosis Of Marine Algae And Benthic Invertebrates: Natural Products Chemistry And Other Mechanisms Inhibiting Settlement And Overgrowth". *Bioorganic Marine Chemistry*, (3), pp. 85-114.
- International Maritime Organization (IMO), (2003) "International Convention on the Control of Harmful Anti-fouling Systems on Ships". AFS/CONF/26. 18.
- Kae, K et al. (2002). "Isolation and Identification of Biofilm-Forming Marine Bacteria on Glass Surfaces in Dae-Ho Dike, Korea", en *The Journal of Microbiology*, 40 (4) pp. 260-266.
- Little, B., Ray, R., Pope, R. (2000) "Relationship Between Corrosion and Biological Sulfur Cycle: a Review". *NACE International. Corrosion*, 56(4) pp. 433-442.

- Madigan, M., Martinko, J. and Parker, J. (2000). *Brock. Biología de los microorganismos*. Madrid. cap. 5, pp.162-176.
- Pope, D. (1992) "State-of-the-Art Report on Monitoring, Prevention, and Mitigation of Microbiologically Influenced Corrosion in the Natural Gas Industry", Report No.GRI-92/0382. Gas Researcher Institute. Texas.
- Rodier, J. (1998). *Análisis de las aguas naturales, residuales y del mar*, Barcelona, Ediciones Omega.
- Schut, F., De Vries, E., Gotitschal, J., Robertson B., Harder W., Prins, R., Button, D. (1993) "Isolation of Typical Marine Bacteria by Dilution Culture: Growth, Maintenance, and Characteristics of Isolates under Laboratory Conditions", *Applied And Environmental Microbiology*, 59, pp. 2150-2160.
- Wahl, M. (1989) "Marine Epibiosis. Fouling and Antifouling", *Marine Ecology Progress*, pp. 175-189.
- Yebrá, D., Kiil, S., Dam-Johansen, K. (2004). "Antifouling Technology: Past, Present and Future Steps Towards Efficient And Environmentally Friendly Antifouling Coatings", *Progress in Organic Coatings*, pp. 75-104.