

DETERMINACIÓN DEL T90 EN LA BAHIA DE SANTA MARTA (COL.)

T90 DETERMINATION AT SANTA MARTA BAY (COL.)

MIGUEL DE LUQUE

Universidad del Magdalena, miguel_deluque@yahoo.com

FRANCISCO GARCÍA

Universidad del Magdalena, Docente, fcofdogarcia@yahoo.com

CARLOS PALACIO

Universidad de Antioquia, Docente, cpalacio@udea.edu.co

Recibido para revisar junio 8 de 2009, aceptado agosto 27 de 2010, versión final octubre 8 de 2010

RESUMEN: Se investigó la tasa de decaimiento de *Escherichia coli* (*E. coli*) cuando las aguas residuales domésticas son descargadas al océano por medio de un sistema de emisario submarino, para ello se examinó la relación de tres (3) factores naturales (intensidad de luz, salinidad y proporción volumétrica de la mezcla de agua residual y agua marina) con la tasa de decaimiento bacteriano, empleando un diseño experimental compuesto central rotatable con diferentes combinaciones de los factores antes mencionados. Bajo cada combinación de los factores, la concentración de *E. coli* fue medida al inicio de cada experimento y cada media hora en un periodo total de dos (2) horas. Los resultados de la experimentación fueron analizados estadísticamente mediante una regresión paso a paso que permitió relacionar estos factores con la variable respuesta (la tasa de decaimiento de *E. coli*). Se desarrolló una herramienta en Matlab para encontrar la tasa de decaimiento de *E. coli* de acuerdo a los resultados de la experimentación. Esta herramienta se utilizó para predecir el tiempo de desaparición bacteriano (T90) según las condiciones de vertimiento del emisario submarino de Santa Marta. En su aplicación se encontró una tasa de decaimiento de 0.00357 min⁻¹ para el fondo, 0.01066 min⁻¹ para profundidades medias y 0.01388 min⁻¹ para la superficie del océano, igualmente se estimaron valores de T90 de 283 min, 94 min y 72 min. respectivamente.

PALABRAS CLAVE: Emisario submarino, Tasa de decaimiento *E. Coli*, T90, *E. coli*, Diseño experimental compuesto central rotativo.

ABSTRACT: In this study was founded the *Escherichia coli* (*E. coli*) die-off rate when wastewater are discharged into the ocean through submarine outfall of Santa Marta. The relationship between three natural factors (light intensity, salinity and volumetric mixing ratio of seawater and wastewater) and the die-off rate was examined. The experiments were performed based on rotatable central composite designs with different factor level combinations of three factors mentioned before. Under each factor level combinations, the quantity of *E. coli* was measured at the beginning of each experiment and every half hour later on during two (2) consecutive hours. The experiments results were statistically analyzed through a stepwise regression that allowed link these factors with the output variable (*E. coli* die-off rate). It was created a tool in matlab in order to found the *E. coli* die-off rate according to the experiments results. The tool was used to predict the bacterial die-off time (T90) for the Submarine outfall discharges in the Santa Marta Bay (Colombia). In the application the die-off rate results were 0.00357 min⁻¹ in deep, 0.01066 min⁻¹ for medium deeps and 0.01388 min⁻¹ on the surface, as well the T90 values were estimated 283 min, 94 min y 72 min respectively.

KEY WORDS: Submarine Outfall, *E. coli* die-off rate, T90, *E. coli*, Rotatable central composite design.

1. INTRODUCCIÓN

El vertimiento de las aguas residuales al océano mediante la utilización de emisarios submarinos es uno de los métodos de disposición final de desechos líquidos más utilizados por las ciudades costeras en el mundo, puesto que es un sistema muy económico y de fácil implementación [1]. Estos sistemas aprovechan la capacidad de dilución del agua marina sobre la descarga de agua residual como principal mecanismo para asegurar la disposición inocua de patógenos, nutrientes y orgánicos sintéticos. Los patógenos, medidos a través de una especie indicadora, tal como

Escherichia coli (*E. coli*), son uno de los principales parámetros para el monitoreo del funcionamiento de este tipo de infraestructuras, especialmente cuando éstas se localizan en zonas costeras utilizadas para actividades turísticas [2]. La *E. coli* es reconocida por su relación con el riesgo de causar enfermedades en el hombre, tal y como lo han demostrado numerosas investigaciones epidemiológicas [3,4,5]. En lo referente a la presencia de *E. coli* en los alrededores de las descargas de emisarios submarinos, la tasa de decaimiento bacteriano es usada como indicador cuando se quiere determinar si el vertimiento de aguas residuales puede comprometer el uso del

cuerpo receptor para el desarrollo de la vida acuática y actividades recreativas [6].

Cuando se produce el vertimiento de las aguas residuales en el océano, ocurre una rápida reducción de la concentración de microorganismos y otros contaminantes. Esta disminución es debida a la dilución por procesos de mezcla y a la autodepuración en el medio receptor [6]. En la literatura se referencian muchos modelos que proponen o describen el comportamiento de la concentración de bacterias en el medio marino [7], para una revisión de alguno de éstos puede verse Chamberlin *et al.* [8]; Matsumoto *et al.*[9]; Crane *et al.* [10] y Grimes *et al.*[11,12]. Uno de los modelos más usados es una formulación simple de primer orden propuesto en 1908 por Chick, cuya expresión matemática es conocida como la ley de Chick [7]. La tasa de decaimiento bacterial de un indicador patógeno, también conocida como tasa de mortalidad, es definida como el número de patógenos que mueren durante un periodo de tiempo dado. Ésta es generalmente determinada bajo condiciones controladas de laboratorio, mediante la contabilización del número de microorganismos que permanecen en el tiempo después que algunos mueren. Otro parámetro comúnmente usado es el denominado T_{90} , definido como el tiempo en el cual el 90 % de los patógenos iniciales mueren [2].

El principal factor que afecta la desaparición bacteriana en el mar es la radiación solar [7]. Bellair *et al.* [13] y Chamberlin *et al.* [8], demostraron que la variación diurna de la tasa de decaimiento de coliformes fecales se debe principalmente a la radiación solar; estos autores reportaron un T_{90} de 40 horas en la noche mientras que en el día el valor para el mismo parámetro se reduce a 1.9 h. Los efectos de la salinidad y la dilución sobre la tasa de decaimiento bacterial han sido estudiados por Troussellier *et al.*[14] y Malacic [15, 16], este último reportó valores entre 0.068 y 0.78 horas para el T_{90} .

En Colombia la disposición final de aguas residuales en el océano mediante la tecnología de emisarios submarinos se inició en el año 2000 con la entrada en operación del sistema instalado en la ciudad de Santa Marta. Éste corresponde a una tubería de 428 m de longitud y 1 m de diámetro, colocada a una profundidad de 56 m, que vierte en la actualidad un caudal de 950 l/s de aguas servidas producidos por los 415.270 habitantes de Santa Marta [17]. El horizonte de diseño de este sistema es el año 2050 donde se prevé disponer 2500 l/s. La experiencia en el funcionamiento del emisario de Santa Marta ha servido para que otras

ciudades costeras en Colombia estén considerando la construcción de sistemas similares para la disposición final de sus aguas residuales. El emisario que hoy funciona en Santa Marta realiza el vertimiento de aguas residuales sin ningún tipo de pretratamiento.

En este artículo se presentan los resultados de la determinación de la tasa de decaimiento bacterial de la descarga de aguas residuales en la bahía de Santa Marta mediante la utilización del emisario submarino allí instalado. La investigación determinó la relación de este parámetro con la intensidad de luz (L), la salinidad (S) y la dilución lograda por el emisario (R).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

La bahía de Santa Marta se ubica entre los 11°13'00" y 11°15'30" de latitud norte y 74°12'30" y 74°14'30" de longitud oeste en el Mar Caribe, presenta un área de 5 km² aproximadamente y una profundidad promedio de 20 m. La conformación de su línea de costa presenta litoral rocoso en los extremos sur y norte, el sustrato parental geológico de la bahía de Santa Marta consiste en rocas metamórficas de esquistos verde azulados [18]. El emisario submarino está localizado en esta bahía (Figura 1). Los difusores para la descarga del agua residual están situados en los últimos 120 m de la tubería, conformados por 31 orificios de 0,15 m de diámetro cada uno, espaciados a 4 m entre sí.

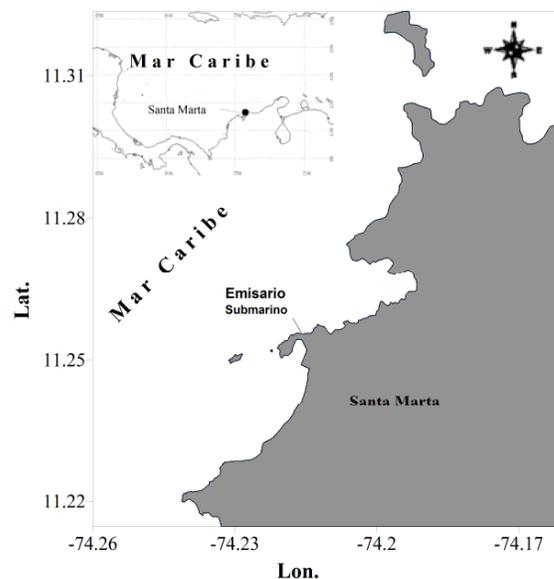


Figura 1. Localización emisario submarino en la bahía de Santa Marta

Figure 1: Submarine outfall localization at santa marta bay.

2.2 Simulación del proceso de desinfección

2.2.1 Preparación de las muestras

En este estudio se utilizó agua de mar artificial. En su preparación se usó NaCl, MgSO₄·7H₂O 10 g, NaHCO₃ y agua destilada [1], variando la proporción de éstos se prepararon aguas de diferentes salinidades (Tabla 1). El agua de mar artificial se esterilizó antes de iniciar las pruebas, empleando un autoclave (All American) a 120°C por un lapso de tiempo de 15 min. El agua residual de composición típicamente doméstica (Tabla 2) se tomó del alcantarillado de la ciudad de Santa Marta en la estación de bombeo del emisario submarino.

Tabla 1. Dosificación para preparar agua de mar artificial.
Table 1. Dosification for preparing artificial sea water

Salinidad	NaCl(g)	MgSO ₄ ·7H ₂ O (g)	NaHCO ₃ (g)
0.00	0	0.0	0.05
8.11	7	2.5	0.05
20.00	20	5.0	0.05
31.89	28	10.0	0.05
40.00	35	10.0	0.05

Tabla 2. Características del agua residual
Table 2. Waste water characteristics

Parámetro	Concentración
Amonio (mg/L)	0.23
Nitrógeno (mg/L)	13.16
Fosforo Total (mg/L)	4.72
Sólidos Totales (mg/L)	432.33
Sólidos Fijos (mg/L)	77.13
Sólidos Volátiles (mg/L)	169.13
DBO ₅ (mg/L)	192.50
DQO (mg/L)	300.00
DQO/DBO ₅	1.60
Coliformes Totales (UFC/100ml)	1.4E+08
Coliformes Fecales (UFC/100ml)	2.46E+08
T (°C)	30.23
pH (Und. pH)	7.08

2.2.2 Equipamiento experimental

Los equipos que se emplearon para los ensayos consistieron en un erlenmeyer de 1 litro, un agitador magnético y una lámpara (Fulka 168), con la cual se simuló la luz solar. Éstos se colocaron en un cuarto oscuro. La intensidad de luz se controló ajustando la

distancia entre la lámpara y la superficie de la solución dentro del frasco, en el cual se colocó el agitador magnético para mantener la solución mezclada durante las pruebas. La intensidad de luz (Lux, lumen/m²) fue medida con un luxómetro (Minipa MLM-1010). La temperatura del licor mezclado se midió en cada ensayo con un termómetro (Testo 815).

2.3 Diseño experimental

Se empleó un diseño experimental compuesto central rotatable para investigar los efectos de los factores de la experimentación. El diseño compuesto rotatable con 3 factores (m = 3) se subdividió en tres (3) partes. 1) Los 2 m puntos con un nivel alto (1) o bajo (-1) en cada coordenada constituyeron un diseño 2 m factorial. 2) Los 2 m puntos axiales, uno en cada extremo de cada factor y en el centro de todos los otros factores, fueron incluidos para formar un diseño compuesto central. 3) Algunos puntos fueron añadidos al centro para dar una precisión aproximadamente igual para los valores arrojados en un círculo de radio 1, donde para m = 3 se agregaron seis puntos centrales. Un paso preliminar en cualquier experimento de este tipo es preparar las relaciones entre los niveles codificados y las unidades del nivel original del factor. En este estudio los niveles originales de los factores controlados fueron fijados de acuerdo a la magnitud de los mismos (Tabla 3), en razón a ello los cinco (5) niveles codificados fueron -1.888, -1.154, 0, 1 y 1.734 en orden creciente. Para este diseño compuesto central con m = 3 factores, se realizaron 15 ensayos. El orden para correr los experimentos bajo las combinaciones factor nivel fue completamente aleatorio.

Tabla 3. Niveles de los factores controlados en los ensayos.

Table 3. Levels of the factors controlled in the tests

Factores	Niveles				
Intensidad de luz (lux)	0	20270	50000	79730	100000
Salinidad	0	8.11	20.00	31.89	40.00
Proporción volumétrica de agua residual y agua marina (R:1)	1:1	20:1	50:1	80:1	100:1

2.4 Procedimiento experimental

El erlenmeyer a muestrear se llenó, primero con el agua marina artificial, luego esta fue esterilizada a 120°C

durante 15 minutos. Posteriormente se le agregó agua residual, con una proporción de mezcla establecida previamente. La intensidad de luz se graduó en el valor indicado por el diseño experimental para cada test usando un luxómetro (Minipa MLM-1010). Las muestras fueron tomadas con una micropipeta (Brand), la cual fue previamente esterilizada. Las alicuotas iniciales de aguas residual fueron tomadas en el tiempo cero, justo antes de ser expuestas a la luz, las siguientes fueron tomadas con un intervalo de tiempo de 30 minutos hasta completar un periodo de dos (2) horas. El número de muestras por ensayo fue cinco (5). Para cada muestra se determinó el número de bacterias *E. coli* por el método de filtración de membrana del Standard Methods (9222B APHA 1992). Se asumió que el número de bacterias que permanecen después del tiempo de contacto t , siguen la ecuación derivada de la ley de Chick (Ecuación 1).

$$N_t = N_0 e^{-k} \quad (1)$$

Donde: t = tiempo de contacto; N_t = número de bacterias que permanecen después del tiempo de contacto; N_0 = número de bacterias en tiempo cero; k es la constante de primer orden calculado por regresión lineal.

2.5 Modelación estadística de los resultados

Se desarrolló un análisis estadístico mediante la metodología de respuesta superficial (RSM sigla en inglés de Response Surface Methodology) como una herramienta para entender la relación cuantitativa entre las múltiples variables de entrada consideradas en la investigación (intensidad de luz, salinidad y proporción volumétrica de la mezcla de agua residual y agua marina) con una variable de salida (tasa de decaimiento bacterial). Se implementó una herramienta con código fuente desarrollado en Matlab, para encontrar la tasa de decaimiento bacterial dados los resultados de la experimentación. La herramienta fue posteriormente aplicada a las condiciones del vertimiento del emisario

submarino en la bahía de Santa Marta para determinar la tasa de decaimiento bacterial conocidas las condiciones de intensidad de luz, salinidad y dilución en el punto de la descarga y la zona de mezcla.

2.6 T_{90} en las condiciones de vertimiento del emisario

Una vez determinada la relación entre los factores de la investigación (L, R y S) y la tasa de decaimiento bacterial (k) se procedió a aplicar el modelo a las condiciones de vertimiento del emisario submarino de Santa Marta. Se determinaron las condiciones de salinidad y transparencia (penetración de la luz en el agua) en la bahía de Santa Marta y dilución de las aguas residuales dispuestas mediante este sistema.

Para determinar la dilución de la descarga del emisario submarino de la ciudad de Santa Marta se utilizó el programa Plumes3.exe escrito en visual fortran [19]. Los Perfiles de salinidad en la columna fueron obtenidos mediante el registro de datos con equipo CTD (Seabird). La transparencia en la bahía se midió mediante disco Secchi. El modelo fue aplicado a tres (3) profundidades (Fondo = 56 m, Profundidad media = 25 m, y superficie o zona fótica según las mediciones con disco secchi).

3. RESULTADOS Y ANALISIS

3.1 Resultados de *E. coli* de cada ensayo

Los cambios en el tiempo (de 0 a 120 min) en la concentración de coliformes fecales (UFC/100ml) sujetos a las variaciones de diferentes condiciones de salinidad, luz y razón de mezcla de aguas residuales se muestran en la Tabla 4. En los ensayos la concentración inicial de los microorganismos varió debido a que se utilizaron muestras diferentes de aguas residuales, ya que siempre se procuró usar aguas residuales frescas, pues las mismas no se procesaron simultáneamente.

Tabla 4. Resultados de *E. coli* en cada ensayo.

Table 4. *E. coli* results in the tests

Intensidad de luz (Lux)	Salinidad	Proporción de Mezcla (R:1)	UFC/100ml				
			0	30	60	90	120
20270	20.00	50:1	4.60E+08	3.90E+08	3.50E+08	3.30E+08	3.00E+08
	8.11	20:1	2.00E+08	1.50E+08	1.30E+08	1.20E+08	1.00E+08
	8.11	80:1	3.00E+08	2.40E+08	3.30E+08	3.00E+08	2.80E+08
	31.89	20:1	9.00E+07	4.00E+07	3.00E+07	3.00E+07	2.00E+07
	31.89	80:1	1.30E+08	1.90E+08	1.60E+08	4.00E+07	4.00E+07

50000	0.00	50:1	3.80E+08	3.60E+08	3.00E+08	2.90E+08	2.30E+08
	20.00	1:1	4.10E+08	3.60E+08	2.40E+08	1.60E+08	9.00E+07
	20.00	50:1	4.10E+08	2.10E+08	6.00E+07	5.00E+07	4.00E+07
	20.00	100:1	4.20E+08	2.00E+08	1.60E+08	1.40E+08	8.00E+07
79730	40.00	50:1	6.20E+08	5.00E+07	4.00E+07	3.00E+07	2.00E+07
	8.11	20:1	3.30E+08	2.30E+08	1.50E+08	5.00E+07	2.00E+07
	8.11	80:1	1.50E+08	1.30E+08	1.20E+08	5.00E+07	5.00E+07
	31.89	20:1	2.10E+08	8.00E+07	7.00E+07	5.00E+07	2.00E+07
100000	31.89	80:1	6.10E+08	3.30E+08	3.10E+08	1.60E+08	7.00E+07
	20.00	50:1	5.20E+08	8.00E+07	4.00E+07	2.00E+07	2.00E+07

3.2 Tasa de decaimiento de *E. coli*.

La tabla 5 muestra los resultados de la tasa de decaimiento bacteriana para cada uno de los ensayos realizados durante la experimentación. Los valores más altos para k se presentaron en los Tests 10 y 12, con tasas de 0.02822 min^{-1} y 0.02756 min^{-1} respectivamente. El primero con un nivel de intensidad de luz alto (100000 lux) y los otros dos (2) factores en condiciones medias ($S=20$ y $R=50$). El segundo valor más alto para k correspondió a salinidad alta (40) y demás factores en condiciones medias ($L=50000$ y $R=50$). Los valores más pequeños de k se observaron en los ensayos donde el nivel de intensidad de luz o

el nivel de salinidad fueron bajos. En el Test No 8 el valor de k obtenido resultó negativo, una posible explicación a esto, es que los niveles de intensidad de luz ($L=20270$) y de salinidad ($S=8.11$) fueron bajos, mientras que la relación de proporción de mezcla entre el agua residual y el agua de mar ($R=80$) fue alta, por ello las bacterias en lugar de desaparecer tendieron a su multiplicación en este escenario. Los valores más pequeños de k corresponden al Test No 11 y 13, con valores de 0.00341 min^{-1} y 0.00407 min^{-1} respectivamente en los cuales los niveles de intensidad de luz (Test No 11) y salinidad (Test No 13) fueron cero (0), en ambos ensayos los otros dos (2) factores estaban en condiciones medias ($S=20$ y $R=50$ para el test 11 y $L=50000$ y $R=50$ para el test 12).

Tabla 5. Resultados T_{90} .

Table 5. T_{90} results

No Test	Intensidad de luz (lux)	Salinidad	Proporción de mezcla (R)	Tasa de decaimiento (k, min^{-1})	T_{90} (min)
1	79730	31.89	20	0.01724	58.00
2	20270	31.89	20	0.01099	90.99
3	79730	8.11	20	0.02378	42.05
4	20270	8.11	20	0.00536	186.57
5	79730	31.89	80	0.01685	59.35
6	20270	31.89	80	0.01592	62.81
7	79730	8.11	80	0.01051	95.15
8	20270	8.11	80	-0.00028	-----
9	50000	20.00	50	0.02030	49.26
10	100000	20.00	50	0.02822	35.44
11	0	20.00	50	0.00341	293.26
12	50000	40.00	50	0.02756	36.28
13	50000	0.00	50	0.00407	245.70
14	50000	20.00	1	0.01281	78.06
15	50000	20.00	100	0.01224	81.70

3.3 Respuesta del modelo superficial

Se aplicó un modelo superficial cuadrático para entender la relación cuantitativa entre los factores y la tasa de decaimiento. Las variables de entradas analizadas fueron, intensidad de luz (L) salinidad (S) y proporción de mezcla de agua residual y agua marina (R). Para el caso de análisis en la presente investigación se desarrolló un modelo con la siguiente expresión (Ecuación 2).

$$k = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^3 \beta_i x_i^2 + \sum_{1 \leq i < j \leq 3} \beta_j x_i x_j + \eta \quad (2)$$

Términos lineales

$$k = -0.00054811 - 1.82 \times 10^{-7} L + 0.00035164 S - 2.8093 \times 10^{-5} R \quad (3)$$

Términos lineales e interacciones

$$k = -0.00048641 - 4.4785 \times 10^{-7} L + 0.00037736 S - 0.000106977 R - 9.0359 \times 10^{-9} L S - 1.3212 \times 10^{-9} L R + 9.4522 \times 10^{-6} S R \quad (4)$$

Términos lineales y términos cuadráticos

$$k = -0.014289 + 4.0398 \times 10^{-7} L + 0.0009054 S + 0.0003289 R - 2.1934 \times 10^{-12} L^2 - 1.371 \times 10^{-9} S^2 - 3.5754 \times 10^{-6} R^2 \quad (5)$$

Cuadrática completa

$$k = -0.019786 + 7.0533 \times 10^{-7} L + 0.001021 S - 20.00018802 R - 9.7789 \times 10^{-9} L S + 1.0267 \times 10^{-9} L R + 1.0189 \times 10^{-5} S R - 2.5217 \times 10^{-12} L^2 - 1.5759 \times 10^{-5} S^2 - 3.9066 \times 10^{-6} R^2 \quad (6)$$

La estimación del error entre el set de datos obtenidos experimentalmente y los resultados del modelo en cada etapa, se calculó mediante el error de la raíz media cuadrática (RMS) expresado mediante la ecuación (7).

$$RMS = \left\{ \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} [\xi_m - \xi_d]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_i^n (k_{experimental} - k_{modelo})^2}{n}} \quad (7)$$

Donde ξ_m y ξ_d son los datos de los resultados del

Donde $\beta_0, (\beta_i, \beta_i, \beta_j)_{1 \leq i < j \leq 3}$ son los parámetros desconocidos y x_i son los valores ambientales estudiados, η es el error experimental.

Mediante una rutina de cálculo en Matlab se desarrolló el procesamiento de los datos para modificar las variables de entrada en el modelo y generar la respuesta superficial. Para cada paso de la regresión (lineal, interacciones, cuadrático y full) se encontraron las expresiones matemáticas que relacionan la tasa de decaimiento bacterias con los factores analizados. Las expresiones formuladas con los coeficientes obtenidos se presentan en las ecuaciones de la 3 a la 6.

modelo y de la experimentación respectivamente y N_0 el número de datos. La tabla 6 muestra la comparación de las tasas de decaimiento encontradas en las experimentaciones ($k_{experimental}$) y las tasa calculadas mediante cada una de las expresiones matemáticas de las relaciones de la intensidad de la luz, salinidad y proporción de mezcla (k_{modelo}). Se encontró que la ecuación que presenta un mejor ajuste entre los datos simulados y los resultados de la experimentación, es la ecuación 6 que presenta un ajuste cuadrático completo (términos lineales, de interacción y cuadrático) ya que mostró un error más pequeño (0.00262 min^{-1}). Tabla 6. Resultados tasas de decaimiento.

Table 6. Decay rates results.

No test	k (min ⁻¹) (Experimental)	k (min ⁻¹) Términos lineales	k (min ⁻¹) Términos lineales y de interacción	k (min ⁻¹) Términos lineales y cuadráticos	k (min ⁻¹) Cuadrática completa
1	0.01724	0.02465	0.20429	0.02405	0.01914
2	0.01099	0.01380	0.01250	0.01307	0.01196
3	0.02378	0.01628	0.02409	0.02355	0.02355

4	0.00536	0.00544	0.00339	0.00458	0.00254
5	0.01685	0.02296	0.02200	0.02233	0.02157
6	0.01592	0.01211	0.01879	0.01136	0.01805
7	0.01051	0.01460	0.01218	0.01384	0.01144
9	0.0203	0.01420	0.01370	0.02055	0.02077
10	0.02822	0.02332	0.02375	0.02430	0.02477
11	0.00341	0.00508	0.00364	0.00584	0.00415
12	0.02756	0.02123	0.02166	0.02221	0.02268
13	0.00407	0.00717	0.00573	0.00793	0.00624
14	0.01281	0.01557	0.01599	0.01337	0.01385
15	0.01224	0.01279	0.01136	0.01018	0.00849
RMS (min⁻¹)		0.00469	0.05010	0.00361	0.00262

3.4 T90 en las condiciones de vertimiento del emisario

Para el caso del funcionamiento del funcionamiento del emisario submarino de Santa Marta se encontró que la pluma de agua residual descargada en el mar alcanza la superficie en 284 segundos donde presenta una dilución de 200. Las mediciones con disco secchi determinaron que en profundidades medias y en el fondo de la bahía de Santa Marta no hay penetración de la luz solar, por tanto este parámetro no afecta la desaparición bacteriana en estos puntos de la columna de agua.

La Tabla 7 resume la aplicación del modelo de decaimiento bacterial para las condiciones de vertimiento del emisario submarino. Para la superficie del mar se asumió un valor de intensidad de luz de 80000 lux. Para el caso de la dilución de agua residual se asumió 100 que fue la máxima variación de este parámetro observada en la experimentación y considerando que en la normatividad internacional se exige un límite de dilución de 99 como estándar de cumplimiento.

Tabla 7. Resultados T_{90} y tasa de decaimiento para la bahía de Santa Marta
Table 7. T_{90} result and decay rates for Santa Marta Bay

Ubicación en la columna de agua	Salinidad	Intensidad de luz (lux)	Dilución (R:1)	K(min ⁻¹)	T_{90} (min)
Fondo	27.0	0	100	0.00353	283
Profundidad media	28.5	0	50	0.01066	94
Superficie	30.0	80000	1	0.01388	72

Para la bahía de Santa Marta y las condiciones de vertimiento del emisario submarino, se encontró que en la superficie donde la intensidad de luz es 80000 lux, el tiempo requerido para el desaparecimiento de las bacterias de *E. coli* es de 72 minutos en el día, asimismo se observó que los valores de T_{90} son más bajos a medida que aumenta la profundidad, esto debido a que a profundidades mayores no llega la radiación solar e igualmente en el fondo la pluma de agua residual no está diluida. A medida que la pluma asciende debido a la diferencia de densidades entre el agua marina y el agua residual descargada ésta se va diluyendo, por lo que la desinfección en el fondo del mar es más lenta, 283 min para la bahía de Santa Marta. De acuerdo a los resultados de la experimentación y los análisis estadísticos realizados para la determinación de la tasa de decaimiento (k) de *E. coli* se encontró que los factores naturales del

ambiente intensidad de luz y salinidad, muestran efectos significativos en la desaparición de bacterias de las aguas residuales descargadas al océano por medio de sistemas de emisario submarino.

4. CONCLUSIONES

En el presenta trabajo se determinó la tasa de decaimiento de E- coli de la disposición final de aguas residuales en la bahía de Santa Marta dada la operación del emisario submarino. Se construyó un modelo matemático que relaciona la intensidad de luz, la dilución inicial y la salinidad con la desaparición de E-coli en este ambiente costero. Los ensayos de laboratorio desarrollados en la investigación corroboraron que el factor ambiental más determinante en la tasa de decaimiento bacterial es la intensidad de la luz, lo que coincide con lo reportados por otros autores

[1,13,14,20,21]. De acuerdo a estos resultados, la luz solar provoca una rápida disminución de la capacidad de las bacterias coliformes para formar colonias. Este efecto se ve restringido por la profundidad de la lámina de agua, la presencia de materia orgánica disuelta, la clorofila y la materia particulada en el agua, que dificultan la penetración de la radiación solar, minimizando los efectos nocivos de esta sobre las bacterias coliformes. Este fenómeno ocurre con mayor frecuencia en sistemas costeros y estuarinos eutroficados y donde la radiación UV-B es más baja dada la situación geográfica, a consecuencia de ello las bacterias son expuestas a una menor intensidad de la luz visible (400-775 nm) y radiación UV-A (320-400 nm) [22,23]. La bahía de Santa Marta por estar ubicada en la región tropical presenta un fotoperiodo constante y los rayos solares inciden perpendicularmente a la lámina de agua, lo que favorece la intensidad de la radiación solar incidente y la penetración de la luz. La presencia de sólidos disueltos y suspendidos y la turbiedad causada por la descarga del Río Manzanares y la escorrentía superficial de aguas lluvias, además de las actividades portuarias que se desarrollan en la bahía y el vertimiento superficial de aguas residuales en algunos sectores como Taganga, disminuyen la capacidad de penetración de la luz, afectando la posibilidad que este factor natural contribuya al decaimiento de las concentraciones de coliformes fecales que se disponen mediante el sistema del emisario submarino.

La descarga de aguas residuales en la bahía de Santa Marta mediante el sistema de emisario submarino ocurre a 56 metros de profundidad, donde la penetración de la luz es limitada por la altura de la lámina de agua y la presencia de sólidos disueltos y suspendidos; a estas profundidades el efecto de la luz para disminuir la concentración de coliformes fecales es despreciable. Dado que las aguas residuales descargadas por el emisario submarino tienen una densidad menor que la del agua de mar, están tendiendo a ascender y flotar; si en el sitio del vertimiento no ocurren fenómenos de estratificación vertical, la pluma de agua descargada puede aflorar a la superficie en menos de 300 segundos como lo muestran los resultados obtenidos con el uso del programa plumes3. En este escenario la radiación solar ejerce su acción bactericida sobre la concentración de coliformes fecales.

En el fondo de este cuerpo de agua, donde ocurre la descarga de aguas residuales, la salinidad y la dilución

inicial, tienen una importancia más marcada que la radiación solar en lo referente al decaimiento bacterial. Varios autores. Yang *et al.*, [1], Chandran and Hatha, [21] y Whitman *et al.*, [23], han estudiado los efectos de la salinidad sobre la supervivencia de bacterias coliformes, verificando que una disminución de este parámetro en el agua está asociada con el aumento de la sobrevivencia de este tipo de bacterias. Cuando las aguas residuales son descargadas ocurre un choque osmótico por efecto de la salinidad, la presión osmótica sobre estas bacterias las induce a pérdidas drásticas de agua a través del citoplasma, lo que contribuye a su muerte [22]. Cuanta más alta es la salinidad mayor será la tasa de muerte de estos organismos [1]. En ausencia de luz, como ocurre en las profundidades de la bahía de Santa Marta, el decaimiento bacterial es debido a la salinidad y la dilución. Cuando se combinan los valores máximos de estas dos variables sin luz, el T_{90} , o tiempo en el cual las concentraciones de coliformes fecales se reducen al 10 %, puede llegar a ser hasta de 300 minutos. Si llegasen a ocurrir fenómenos de estratificación vertical en la columna de agua que impidan que la pluma aflore a la superficie, este tiempo es suficiente para que las bacterias sedimenten con la materia orgánica y particulada donde generalmente se hallan ocluidas o adheridas. La presencia de materia orgánica en las aguas residuales dispuestas en ambientes estratificados, tiene un papel importante en la remoción de bacterias en la columna de agua, las cuales pasan de esta a los sedimentos del fondo, esto igualmente puede contribuir a su sobrevivencia por que los microorganismos pueden encontrar en los sedimentos algunas condiciones favorables para su desarrollo, mejores a las de la columna de agua [24, 25].

Algunos autores [24, 25, 26] han reportado valores medios de coliformes fecales más altos en los sedimentos que en la columna de agua para ambientes costeros, hasta 2200 veces mayor. Los microorganismos pueden encontrar en los sedimentos algunas condiciones propicias para la creación de colonias y estas pueden retornar a la columna de agua por la resuspensión de los sedimentos del fondo causados por las corrientes, el viento o el tráfico naviero que se desarrolla en este lugar. Cuando se rompe la estratificación vertical, la pluma de aguas residuales descargada aflora a la superficie, donde la radiación solar tiene un efecto marcado sobre la reducción de la concentración de coliformes fecales. En este escenario se presentan tiempos de decaimiento bacterial hasta de 70 minutos.

Se estableció un modelo de respuesta superficial que relaciona las variables estudiadas (Luz, Relación de mezcla agua residual agua de mar y Salinidad) correspondiente al caso mostrado en la ecuación 6.

Se desarrolló una herramienta computacional que permite simular el valor de la tasa de decaimiento bacterial bajo diferentes condiciones de salinidad, intensidad de luz y mezcla de agua residual y marina. En la aplicación de la herramienta para las condiciones de vertimiento del emisario submarino de Santa Marta se encontró una tasa de decaimiento de 0.00357 min⁻¹ para el fondo, 0.01066 min⁻¹ para profundidades medias y 0.01388 min⁻¹ para la superficie. Se estimaron valores de T90 de 283, 94 y 72 min para estos puntos de la columna de agua.

5 AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a COLCIENCIAS y a las Universidades del Magdalena y de Antioquia, por la financiación otorgada para el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] YANG, L., CHANG, W and HUANG, M. Natural disinfection of wastewater in marine outfall fields. *Water Res.*, 34(3) 743-750. 2000
- [2] KASHEFIPOUR, S.M., LIN, B. and FALCONER, R.A. Modelling the fate of fecal indicators in a coastal basin. *Water Res.*, 40: 1413-1425. 2006.
- [3] KAY, D., BARTRAM, J., PRÜSS, A., ASHBOLT, N., WYER, M., FLEISHER, J., FEWTRELL, L., et. al. Derivation of numerical values for the world health organization guidelines for recreational waters. *Water Res.*, 38: 1296-1304. 2004.
- [4] Cabelli, V.J., A.P. Dufour, L.J. McCabe and M.A. Levin. 1982. Swimming associated gastroenteritis and water quality. *Am. J. Epidemiol.*, 115:606-16.
- [5] CABELLI, V.J., DUFOUR, A.P., McCABE, L.J.-and LEVIN, M.A. A marine recreational water quality criterion consistent with indicator concepts and risk analysis. *J. Water Pollut. Control Fed.*, 55: 1306-1314. 1983.
- [6] ACEVEDO, A., GARRIDO, C., NEBOT, E. y SALES, D. Fenómenos de dilución y autodepuración de un vertido de aguas residuales urbanas en un ecosistema litoral: el caso del estuario del Río Iro (Suroeste de España). *Cienc. Mar.*, 31(1B): 221-230. 2005.
- [7] POMMEPUY, M., HERVIO-HEATH, D., CAPRAIS, M.P., GOURMELON, M., LE SAUX, J.C. and LE GUYADER, L. Fecal contamination in coastal areas: An engineering approach. 331-359. En: *Oceans and Health: Pathogens in the Marine Environment*. Berlkin and Colwell (Ed.). New York. 381 p. 2006.
- [8] CHAMBERLIN, C.E. A decay model for Enteric Bacteria in Natural Waters. 325-348. En: Mitchell R. (Ed.). *John Wiley and Sons, New York USA*. 382 p. 1978.
- [9] MATSUMOTO, J. y OMURA, T. Some factors affecting the survival of fecal indicator bacteria in sea water. Reporte técnico, Tohoku University, Sendai, Japón. 184 p. 1980.
- [10] CRANE, S.R. and MORE, J.A. Modeling enteric bacterial die-off: A review. *Water Air Soil Pollut.*, 27: 411-439. 1986.
- [11] GRIMES, D.J., ATTWELL, R.W., BRAYTON, P-R., PALMER, L.M., ROLLINS, D.M., ROSZAK, D.B., SINGLETON, F.L., TAMPLIN, M.L. and COLWELL, R. Fate of enteric pathogenic bacteria in estuarine and marine environments. *Microbiol. Sci.*, 3: 324-329. 1986.
- [12] GRIMES, D.J. Ecology of estuarine bacteria capable of causing human disease: A review. *Estuaries*, 14: 345-360. 1991.
- [13] BELLAIR, J.T., PARR-SMITH, G.A. and Wallis, J. Significance of diurnal variations in fecal coliform die-off rates in the design of ocean outfalls. *J. Water Pollut. Control Fed.*, 49: 2022-2030. 1977.
- [14] TROUSSELLIER, M., BONNEFONT, J., COURTIES, C., DERRIEN, A., DUPRAY, E., GAUTHIER, M., GOURMELON, M., JOUX, F., LEBARON, P., MARTIN, Y. and POMMEPUY, M. Responses of enteric bacteria to environmental stresses in seawater. *Oceanol. acta*, 21(6): 965-981. 1998.
- [15] MALACIC, V. Numerical modelling of the initial spread of sewage from diffusers in the Bay of Piran (northern Adriatic). *Ecol. Model.*, 138: 173-191. 2001.
- [16] MALACIC, V. Initial spread of an effluent and the overturning length scale near an underwater source in the northern Adriatic. *J. Mar. Syst.*, 55: 47-66. 2005.

- [17] DANE. 2005. Censo general. Disponible: www.dane.gov.co/censo/. [Citado abril 10 de 2009].
- [18] BARTELS, G. Geomorphologische Höhenstufen der Sierra Nevada de Santa Marta (Kolumbien). *Giessener Geogr. Schr.*, 21: 1-56. 1970.
- [19] TATE, P.M. The rise dilution of buoyant jets a their behavior in an internal wave field. Tesis Doctoral. School of Mathematics Faculty of Science University of New South Wales. Sydney. 109 p. 2002.
- [20] CANTERAS, J., JUANES, J., PEREZ, L. and KOEV, K. Modelling the coliforms inactivation rates in the Cantabrian Sea (Bay of Biscay) from in situ and laboratory determinations of T90. *Water Sci. Technol.*, 32(2): 37-44. 1995.
- [21] CHANDRAN, A. and HATHA, M. Relative survival of *Escherichia coli* and *Salmonella typhimurium* in a tropical estuary. *Water Res.*, 39 1397-1403. 2005.
- [22]. ROZEN, Y. and BELKIN, S. Survival of enteric bacteria in seawater. *Federation of European Microbiological Societies Microbiology Reviews*, 25 513-529. 2001.
- [23] WHITMAN, L., NEVERES, B., KORINEK, G. and BYAPPANAHALLI, M. Solar and temporal effects on *Escherichia coli* concentration at a Lake Michigan Swimming Beach. *Appl. Environ. Microbiol.*, 70(7) 4276-4285. 2004.
- [24] DAVIES, C., LONG, J., DONALD, M. and ASHBOLT, N. Survival of fecal microorganisms in marine and freshwater sediments. *Appl. Environ. Microbiol.*, 61(5) 1888-1896. 1995.
- [25] EVANSON, M. and AMBROSE, R. Sources and growth dynamics of fecal indicator bacteria in a coastal wetland system and potential impacts to adjacent waters. *Water Res.*, 40 475-486. 2006.
- [26] CRABILL, C., DONALD, R., SNELLING, J., FOUST, R. and SOUTHAM, G. The impact of sediment fecal coliform reservoirs on seasonal water quality in Oak Creek, Arizona. *Water Res.*, 33 2163-2171. 1999.