



**BENTOS**  
**SERVICIOS Y EQUIPOS MARINOS LTDA.**

---

## **INFORME TÉCNICO**

# METODOLOGÍAS UTILIZADAS EN ESTUDIOS DE DISPERSIÓN: ELECCIÓN DEL MEJOR TRAZADOR QUÍMICO

Para: USO INTERNO

<b>Código</b>	<b>Revisión</b>	<b>Fecha</b>	<b>Nº Páginas</b>
<b>IT-DISP-0407</b>	<b>2</b>	<b>19/04/2007</b>	<b>21</b>

## ÍNDICE

<b>1.0</b>	<b>RESUMEN .....</b>	<b>3</b>
<b>2.0</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>4</b>
<b>3.0</b>	<b>MÉTODO ANALÍTICO .....</b>	<b>5</b>
<b>4.0</b>	<b>TRAZADORES QUÍMICOS .....</b>	<b>6</b>
<b>4.1</b>	<b>EFFECTO DEL PH .....</b>	<b>7</b>
<b>4.2</b>	<b>OTROS PARÁMETROS .....</b>	<b>7</b>
<b>4.3</b>	<b>TOXICIDAD .....</b>	<b>9</b>
<b>4.4</b>	<b>APLICABILIDAD Y VENTAJAS .....</b>	<b>14</b>
<b>5.0</b>	<b>MODELOS MATEMÁTICOS DE DISPERSIÓN .....</b>	<b>14</b>
<b>6.0</b>	<b>SÍNTESIS .....</b>	<b>15</b>
<b>7.0</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>17</b>

## 1.0 RESUMEN

El análisis de dispersión en el agua es uno de los requerimientos establecidos en los estudios para el uso de las aguas continentales y marinas con cualquier tipo de intervención humana. En este sentido, las Normas de Emisión para la Regulación de Contaminantes asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales establecen una *“Guía Metodológica sobre procedimientos y consideraciones ambientales básicas para la descarga de aguas residuales mediante emisarios submarinos”* y las Normas de Emisión para la Regulación de Contaminantes asociados a las Descargas de Residuos Líquidos, de Puertos y Terminales Marítimos u Otros establecen una *“Guía Metodológica de Revisión Técnica Sectorial de Estudios de Impacto Ambiental en el Medio Ambiente Acuático de Jurisdicción Nacional”*.

Estas guías metodológicas sólo indican aspectos generales del estudio de dispersión, dejando a las instituciones que solicitan este estudio la elección tanto del método como del trazador químico, lo que genera errores e inexactitudes de los datos obtenidos.

En esta revisión bibliográfica, se logra establecer que los trazadores químicos tienen ciertas limitaciones de acuerdo a su composición y estructura química, lo que determina finalmente su interacción en el ambiente, por lo que la decisión de qué trazador químico utilizar debe tomarse analizando el tipo de agua en el que será realizado el estudio. Los trazadores más utilizados son los siguientes:

La **Fluoresceína/Uranina**, de acuerdo a las condiciones de pH, adsorción por solutos y toxicidad, debe ser empleada exclusivamente en aguas continentales, principalmente porque su fluorescencia se ve afectada a un pH superior a 7 (marino), mientras que su muy baja toxicidad permite que esta sea utilizada en estudios de aguas de alta calidad.

La **Rodamina WT** es un trazador de amplio rango, tanto en pH como salinidad, pudiendo ser utilizado en aguas continentales, marinas y aguas cloradas (potable y residuales tratadas), además posee una baja adsorción por los sólidos suspendidos por lo que puede ser utilizada en cuerpos de agua con un alto contenido de éstos. Otra característica importante de la **Rodamina WT** es su baja toxicidad para los organismos a concentraciones mayores de 10 ppm, por lo que organizaciones reguladoras como la USEPA<sup>1</sup> y la Comunidad Europea (a través de la AESA<sup>2</sup>) han establecido que este trazador no es tóxico para el ambiente.

La utilización de **Rodamina B** ha sido cuestionada desde 1980 y prohibido su uso en Estados Unidos desde 1988 para el estudio de aguas, debido a que es tóxica para el ambiente (organismos) a concentraciones mayores a 10 ppm. Esta toxicidad se asume es, principalmente, por la formación de di-ntirosamina (compuesto cancerígeno) en presencia de nitrito, lo que **NO** ocurre con la **Rodamina WT**, ya que tienen estructuras químicas diferentes en la cantidad y posición de los grupos funcionales. De acuerdo a lo señalado por la USEPA en 1998 y la Comunidad Europea en el 2004 (a través de la AESA), la **Rodamina B** es un compuesto tóxico y está prohibida su utilización tanto en estudios de dispersión en cuerpos de agua como en alimentos (como aditivo).

<sup>1</sup> USEPA: United States Environmental Protection Agency

<sup>2</sup> AESA: Agencia Europea de Seguridad Alimentaria

Basados en estos resultados, podemos señalar que para estudios de dispersión en aguas continentales, marinas, residuales tratadas y con alto contenido de sólidos suspendidos, la **Rodamina WT** es el trazador químico recomendado y adecuado tanto por su baja toxicidad y poca interacción con la comunidad biológica presente en el área de estudio, como por sus características químicas que lo hacen muy eficiente para la estimación del coeficiente de dispersión en agua.

## 2.0 INTRODUCCIÓN

La Guía Metodológica sobre procedimientos y consideraciones ambientales básicas para la descarga de aguas residuales mediante emisarios submarinos, de acuerdo a lo indicado por DIRECTEMAR en la Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales", indica que:

*Para los estudios de dilución se debe usar rodamina o tinturas similares (**Fluoresceína**, etc.). A través del seguimiento de la geometría de manchas, se debe estimar el grado de dilución natural en, al menos, 2 días, cubriendo las fases de marea de Llenante y Vaciente.*

*Se podrán emplear métodos de isótopos radioactivos (de mayor costo), siguiéndolos con radiómetro estándar. También se aceptará, evaluar el grado de dilución natural usando un conjunto de derivadores lagrangianos, lanzados en racimo y evaluando la separación final entre ellos.*

*Todos estos métodos son válidos y su aplicación dependerá de las condiciones de visibilidad y la posibilidad de seguimiento.*

*Estos estudios deberán responder a:*

- *¿Cuál es el grado de dilución (débil, moderada, intensa) entre sitios alternativos de descarga?*
- *¿Cómo se compara la dilución natural de distintas (2 ó 3) distancias de costa?*
- *¿Hacia dónde se espera que vaya la pluma de dispersión en el sitio de descarga?*
- *¿Cuál será el tamaño del área de sacrificio o área de impacto primario?*
- *¿Cuál es la velocidad de crecimiento de las manchas (Podrá entregarse en porcentaje por tiempo o coeficiente de dilución).*
- *Comentar si la dilución es buena, moderada o baja y cual es la consecuencia ambiental para el emisario.*

Además, la Guía Metodológica de Revisión Técnica Sectorial de Estudios de Impacto Ambiental en el Medio Ambiente Acuático de Jurisdicción Nacional para Proyectos que contemplan Descargas de Residuos Líquidos, de Puertos y Terminales Marítimos u Otros (DIRECTEMAR, 2002) indica que:

*Deberán considerarse estudios de dispersión mediante el uso de colorantes (ej. Rodamina o fluoresceína) en el área del proyecto de manera de analizar en base a ellos, los factores de dilución del cuerpo de agua receptor donde serán emplazadas las instalaciones.*

*La representación gráfica de estos resultados deberá estar referida a la topografía de la línea de costa (carta náutica) y el punto específico de descarga, con sus correspondientes coordenadas geográficas.*

*Estos experimentos deberán realizarse como mínimo en 2 (dos) oportunidades, considerando para cada una de ellas un ciclo de marea llenante y vaciante.*

*Con lo anterior, deberán analizarse cartas de trayectoria, grado de dispersión, efectos del viento y de las mareas sobre la dispersión de los derivadores y/o trazadores y tasas de cambio.*

La amplia gama de técnicas permitidas en estas Guías, permite el uso indistinto de métodos analíticos (fluorómetro, espectrofluorómetro, espectrofotómetro) y de trazadores químicos (**Fluoresceína, Rodamina B y Rodamina WT**, entre otros), además de diversos métodos de posicionamiento geográfico (GSI, 1996; INPESCA, 1988, 1996) que finalmente influyen en el valor del coeficiente de dispersión, donde podemos observar una variación de hasta  $0,5 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  (Carrasco, 2000).

En Chile, durante años, y hasta la actualidad, los estudios de dispersión principalmente se realizan con el trazador **Rodamina B**, tomando muestras discretas para posteriormente medirlas en el laboratorio con un espectrofluorómetro, por lo que la reconstitución del área de la mancha del trazador se establece con una serie de estaciones de muestreo alrededor de la fuente emisora en estudio (muestreo discreto; Burgos, 1988). Sin embargo, el desarrollo de fluorómetros aptos para terreno y dotados de un sistema de muestreo de flujo continuo, en conjunto con un sistema de posicionamiento geográfico con mayor exactitud y sensibilidad (DGPS), permite realizar un seguimiento del trazador a través del tiempo, pudiendo determinar con mayor precisión el desplazamiento y área de la mancha del trazador. Actualmente, este método es preferido para realizar los estudios de dispersión, ya que minimiza el error analítico permitiendo una mejor estimación del coeficiente de dispersión de un cuerpo de agua (CH2MHILL, 1997; Trouw, 1998, 1999; Araucaria Consultores Ltda., 1999; Complejo Portuario Mejillones, 1998; Alumysa, 1997; Trillium, 1995, 1996; Puente Chacao, 2000). Sin embargo, pese a que su uso es un estándar internacional, en Chile un bajo porcentaje del total de estudios se realiza con estas técnicas (Ver punto 4.3).

Otro aspecto que influye en el valor del coeficiente de dispersión, es el modelo matemático utilizado en el estudio. En Chile se utiliza mayormente el método de Castagnino (1976) para estos estudios (Burgos, 1988), aunque no deben ser descartados otros métodos de cálculo (Dyke, 1996). Carrasco (2000), compara el Método de Castagnino (1976; basado en la Ley de Fick de difusión molecular y la Ley de conservación de masa) y el modelo de Okubo (1971; basado en el carácter turbulento de la dispersión). Esto será discutido más adelante.

### **3.0 MÉTODO ANALÍTICO**

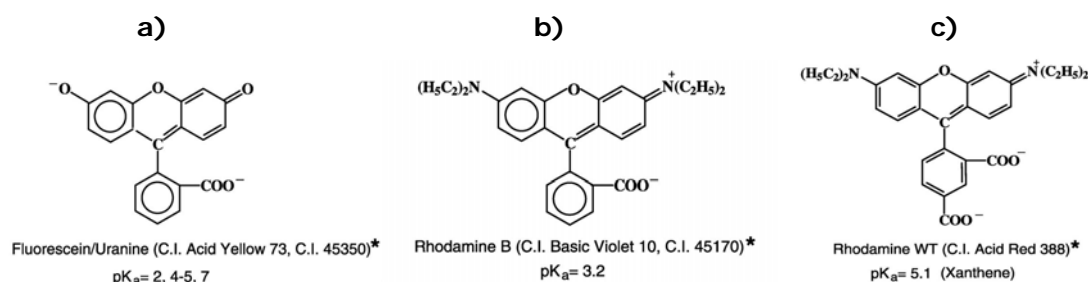
La elección del instrumento de medición va a depender del tipo de muestreo realizado. El espectrofotómetro y el espectrofluorómetro son instrumentos que requieren de muestras discretas, es decir, la toma de un volumen determinado de muestra cada cierta distancia o

tiempo, las que posteriormente son analizadas. Por su parte, el fluorómetro permite la toma de muestra en un flujo continuo obteniendo un valor de concentración (o valor equivalente en Volts) directamente a un procesador, de acuerdo al tiempo especificado por el operador.

Una comparación entre ambos métodos de medición, realizada por Carrasco (2000), concluye que la sensibilidad del espectrofotómetro **NO** es adecuada para determinar el área de la mancha del trazador y sus variaciones en el tiempo, ya que no puede registrar concentraciones menores a 50 ppb (Carrasco, 2000), por lo que no es posible hacer la reconstitución del área de la manchas. Por su parte, el fluorómetro tiene un rango de sensibilidad mayor (de 0 a 1000 ppb), lo que sumado a la medición "in situ" (cada 1 s) permite un seguimiento de la mancha del trazador y, por ende, la reconstitución del área de la misma.

#### 4.0 TRAZADORES QUÍMICOS

Los colorantes fluorescentes son uno de los grupos de trazadores químicos más utilizados para estudios de dispersión desde 1877 (**Fluoresceína**) y, aunque tienen algunos inconvenientes, se aproximan bastante a la realidad, siendo un método sencillo, de bajo costo y baja toxicidad. En general, los trazadores que tienen como estructura química base la xantina han sido utilizados principalmente para estudios en agua (Silva, 2004), entre estos destacan la **Fluoresceína/Uranina** identificada como ácido amarillo 73 (Figura 4.0-1a; Knop, 1878; Smart & Smith, 1976; Adams *et al.*, 1989; Sabatini & Austin, 1991; Fields *et al.*, 1995; Kasnavia *et al.*, 1999; Behrens *et al.*, 2001), la **Rodamina B** conocida como violeta básica 10 (Figura 4.0-1b; Feuerstein & Sellick, 1963; Scott *et al.*, 1969; Smart & Laidlaw, 1977; Abidi, 1982; Smart, 1984; Viriot & Andre, 1989) y la **Rodamina WT** identificada como ácido rojo 338 (Figura 4.0-1c; Scott *et al.*, 1969; Parker, 1973; Smart & Smith, 1976; Davis *et al.*, 1980; Abidi, 1982; Smart, 1984; Wilson *et al.*, 1986; Zellweger *et al.*, 1988; Viriot & Andre, 1989; Sabatini & Austin, 1991; Rose & Adams, 1994; Field *et al.*, 1995; Kasnavia *et al.*, 1999; Behrens *et al.*, 2001; Vasudevan *et al.*, 2001; Sutton *et al.*, 2001).



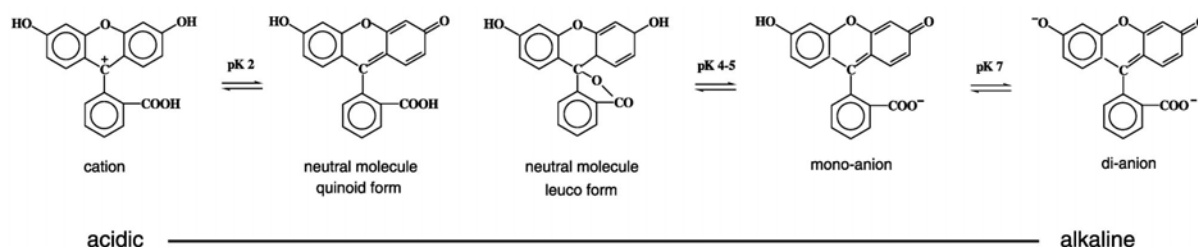
**Figura 4.0-1** Estructura química de los trazadores; a) **Fluoresceína**, b) **Rodamina B** y c) **Rodamina WT**. Los valores de pK<sub>a</sub> (constante de disociación) fueron obtenidos para **Fluoresceína** de Lindqvist (1960), **Rodamina B** de Perrin (1965) y **Rodamina WT** de Shiau *et al.* (1993; Extraído de Flury & Wai, 2003).

La decisión de qué trazador químico utilizar va a depender de las características intrínsecas de éste y de su interacción con el medio acuático, donde factores como el pH, temperatura,

salinidad, sólidos suspendidos (turbidez), etc., determinan cuál trazador debe ser utilizado. Otro factor importante a considerar es la solubilidad y toxicidad del trazador.

#### 4.1 EFECTO DEL PH

La variación de la fluorescencia de los trazadores en función del pH está directamente relacionada a la constante de disociación (pKa, Figura 4.0-1) y a los cambios estructurales de las moléculas (Williams & Bridges, 1964; Smart & Laidlaw, 1977). De acuerdo a esto, basados en los pKa, la **Fluoresceína/Uranina** es fuertemente afectada por el pH pasando de catión, en un ambiente ácido, a di-anión, en un medio básico (Figura 4.1-1), mientras que la **Rodamina B** y la **Rodamina WT** tienen un rango más amplio y conservativo, con pH 5-10, donde su fluorescencia no es afectada (Feunstein & Sellick, 1963; Buchanan, 1964; Replegle *et al.*, 1976).



**Figura 4.1-1** Cambios de la **Fluoresceína** (adaptada desde Lindqvist, 1960) de acuerdo a los cambios en el pH. La forma estructural de "Leuco" ocurre en solventes orgánicos y no iónicos (Extraído de Flury & Wai, 2003).

De acuerdo a esto, la **Rodamina B** y la **Rodamina WT** reúnen las condiciones requeridas para estudios de dispersión en las aguas continentales y marinas, mientras que la **Fluoresceína/Uranina** sólo es recomendada en aguas continentales, incluso por su muy baja toxicidad puede ser utilizada en estudios de aguas de alta calidad (Fensterstein & Sellick, 1963).

Debido a que las características químicas de la **Fluoresceína/Uranina** la señalan, por un lado, como sustancia no tóxica para el medio ambiente y, por otro lado, la restringen sólo para el estudio de dispersión en agua dulce, en adelante serán analizadas las características de la **Rodamina B** y **Rodamina WT**.

#### 4.2 OTROS PARÁMETROS

Algunos estudios han determinado que el efecto de la salinidad es mucho menor que el del pH (André & Molinari, 1976; Smart & Laidlaw, 1977; Flury & Wai, 2003). Sin embargo, las componentes aniónicas como ioduro ( $I^-$ ), bromuro ( $Br^-$ ) y cloruro ( $Cl^-$ ), encontradas en aguas subsuperficiales y el océano, pueden variar la fluorescencia obtenida por el trazador (Majumdar, 1961; Williams & Bridges, 1964). Potencialmente, el cloro, en su forma elemental, puede afectar la fluorescencia de la **Rodamina B** y **Rodamina WT** debido a su estructura química; afortunadamente este compuesto en solución es rápidamente

dismutado a cloro residual, que no tiene efecto sobre las Rodaminas como fue observado por Deaner (1973), donde no hay una disminución de la fluorescencia al utilizarlo en agua potable y aguas de residuos líquidos tratadas, que contienen en exceso el cloro residual.

La temperatura afecta la fluorescencia, principalmente en terreno (Karstens & Kobs, 1980), lo que es considerado por los fabricantes e incorporado en los programas empleados para obtener el valor entregado por el fluorómetro (Turner, 2001). Aunque básicamente, se puede corregir este efecto con la simple ecuación dada por Wilson (1968):

$$Fr = Fs * Ln[n * (Ts - Tr)]$$

Donde,

$Fr$  es el cálculo de la fluorescencia leída a la temperatura de referencia ( $Tr$ )

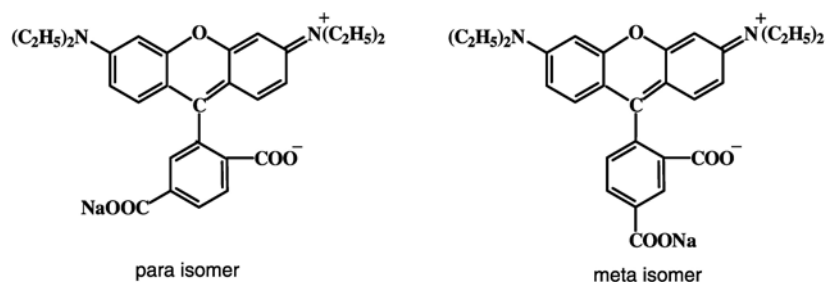
$Fs$  es la fluorescencia observada a la temperatura de la muestra ( $Ts$ )

$N$  es el coeficiente de temperatura para el trazador usado. Para **Rodamina B** es 0,026 y para **Rodamina WT** es 0,027 (Fenerstein & Selleck, 1963; Replotle *et al.*, 1976)

$Ts$  es la temperatura de la muestra al tiempo de ser leída  $Fs$

$Tr$  es la temperatura de referencia

El material suspendido en el agua puede adsorber al trazador y por ende provocar una disminución en la fluorescencia (Kansavia *et al.*, 1999; Sabatini, 2000; Vasudevan *et al.*, 2001). Esto va a depender de cada trazador, ya que el número y tipo de posición relativa de los grupos funcionales afecta las propiedades de adsorción de estos (Flury & Wai, 2003). Así, mientras que la **Rodamina B** es significativamente afectada por los sólidos suspendidos, en la **Rodamina WT** este efecto no es significativo, pudiendo incluso ser utilizado en presencia de altas concentraciones de materia orgánica (Suijlen & Buyse, 1994; Ellis & Revitt, 2003). Esta diferencia puede deberse a la presencia de para y meta isómeros (Figura 4.2-1) mezclados en la **Rodamina WT** comercial, donde el para isómero tiene un comportamiento más conservativo que el meta isómero (Shiau *et al.*, 1993; Vasudevan *et al.*, 2001).



**Figura 4.2-1** Isómeros de la **Rodamina WT** (Shiau *et al.*, 1993; Sutton *et al.*, 2001; Extraído de Flury & Wai, 2003).

La solubilidad de los trazadores es uno de los parámetros importantes para los estudios de dispersión, ya que a mayor solubilidad en el agua es más sencillo su rastreo y toma de muestra. En este sentido, la **Rodamina WT** es la que tiene la mayor solubilidad en el agua



con un 20% y un peso específico de 1,19<sup>3</sup>, mientras que la **Rodamina B** es soluble sólo en un 2% (Fenerstein & Sellick, 1963) y para alcanzar un peso específico similar al de **Rodamina WT** debe ser preparada en una solución de ácido acético al 42%.

Algunos estudios han demostrado que la fluorescencia de la **Rodamina B** varía de acuerdo al alcohol y al porcentaje de solución utilizado para su preparación (Kubin & Fletcher, 1982; Snare *et al.*, 1982; Casey & Quitevis, 1988), señalando que el máximo de fluorescencia de **Rodamina B** se alcanza con una solución de etanol al 94% (Snare *et al.*, 1982). López Arbeloa *et al.* (1989) señalan que en mediciones de campo la fluorescencia de **Rodamina B** es de 0,70<sup>4</sup> aunque no señalan el peso específico alcanzado en esta solución con etanol.

Un alto peso específico, como en el caso de la **Rodamina WT**, permite que el trazador no quede en la superficie del agua, formando un estrato subsuperficial (unos 50 cm de profundidad), lo que posibilita que la estimación de la dispersión de un compuesto en el agua esté libre de la intervención directa de factores como el viento. Además, facilita la toma de muestra con una bomba en flujo continuo.

Considerando sólo las características de ambas rodaminas y su interacción con el medio, podemos establecer, preliminarmente, que el mejor trazador para realizar estudios de dispersión en agua tanto marina como continental es la **Rodamina WT**, aunque para estudios de aguas de alta calidad tiene ciertas restricciones (Fisher & Smith, 1983).

### 4.3 TOXICIDAD

Las **Rodaminas B** y **WT** no son compuestos similares, ya que tienen diferencias importantes en su estructura química (Figuras 4.0-1b y c; Williams & Bridges, 1964; Smart & Laidlaw, 1977), lo que afecta su interacción con el medio (Flury & Wai, 2003). Algunos estudios han establecido que ambas rodaminas pueden reaccionar con el nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) formando el compuesto cancerígeno di-etilnitrosamina (Abidi, 1982; Abidi *et al.*, 1986; Steinheimer & Johnson, 1986), sin embargo, los resultados de pruebas practicadas con **Rodamina WT** muestran que esta **NO** representa un peligro para el ambiente (Abidi *et al.*, 1986; Flury & Wai, 2003).

De acuerdo a estos estudios, la **Rodamina B** forma un compuesto cancerígeno (Abidi, 1982; Abidi *et al.*, 1986; Steinheimer & Johnson, 1986). Además, los estudios en huevos de ostras del Pacífico y peces (salmones y truchas) señalan que la **Rodamina B** tiene efectos sobre estos organismos a concentraciones mayores de 10 ppm (Wilson, 1968; Parker, 1973; Smart, 1984). Es por esto que el Dr. Perler, encargado de "Science and Technology Branch, Criteria and Standards Division", señala a la **Rodamina B** como un compuesto peligroso para los organismos, prohibiendo su uso en estudios de dispersión en agua (EPA, 1988). Esta condición de compuesto cancerígeno de la **Rodamina B** se mantiene una década más tarde (USEPA, 1998) y actualmente la comunidad europea, a través de la Agencia Europea de Seguridad Alimentaria (AESAs), la ha incorporado en la lista del primer grupo de compuestos químicos prohibidos para su uso (AESAs, 2004).

Por otro lado, estudios realizados con **Rodamina WT** muestran que los huevos y larvas de las ostras del Pacífico tienen un desarrollo normal al ser expuestos a una concentración de

<sup>3</sup> Peso específico: densidad del compuesto dividido por la densidad del agua.

<sup>4</sup> Fluorescencia: razón entre el número de fotones emitidos y el número de fotones absorbido.

10 ppm de **Rodamina WT** entre 4 y 6 horas (Parker, 1973). Wilson (1968) señala que en salmones y truchas expuestas a la misma concentración (10 ppm) de **Rodamina WT** durante 17,5 horas y, adicionalmente, a una concentración de 375 ppm, no tienen signos de estrés y están libres de trazador luego de un mes en aguas sin el trazador. Actualmente, instituciones como la USEPA (1998) señalan que no existen antecedentes que muestren a la **Rodamina WT** como un compuesto peligroso para el medio ambiente (Silva, 2004).

Finalmente, de acuerdo a lo indicado por la USEPA (1998) y la Comunidad Europea, y basados especialmente en los estudios que determinan la baja toxicidad de la **Rodamina WT** para los organismos (Wilson, 1968; Parker, 1973; Smart, 1984, Turner, 2001) podemos señalar que este trazador es el adecuado para realizar estudios de dispersión en agua sin perjuicio de los organismos que allí se encuentren.

En Chile, la mayoría de los estudios de dispersión utilizan **Rodamina B** como trazador (Burgos, 1988; Tabla 4.3-1). Sin embargo, debido a las amplias ventajas de la **Rodamina WT** sobre la **Rodamina B**, y a pesar de existir una amplia gama de técnicas señaladas en las Guías metodológicas Armada, en algunos estudios de Línea Base (de connotación internacional) se han hecho análisis de dispersión utilizando **Rodamina WT** como trazador (Tabla 4.3-2).

**Tabla 4.3-1.** Resumen de algunos estudios ambientales en los que se ha usado **Rodamina B** como trazador químico.

<b>TRAZADOR QUÍMICO: RODAMINA B</b>		
<b>Año</b>	<b>Nombre del Proyecto*</b>	<b>Lugar</b>
2007	Modificación del Proyecto Estación de Transferencia San José Cía. Pesquera Camanchaca S.A.	Calbuco
2006	Instalación emisario submarino para la disposición final de RILES. Piedra Azul, Décima Región. Palco Chile Ltda.	Puerto Montt
2006	Tratamientos de aguas servidas y reubicación de emisarios submarinos para la descarga de efluentes de la Empresa de Conservas y Congelados Cía. Ltda. fuera de la Zona de Protección Litoral (Tabla N° 5 del D.S. 90/01) en el Estero Huito, Punta Yahuecha, Calbuco.	Calbuco
2006	Sistema de tratamiento y descarga de efluentes mediante emisario submarino. Cía. de Comercio y Desarrollo Pesquero Magallanes Ltda., CIPEDES Ltda.	Puerto Williams
2006	Sistema alternativo de manejo de efluentes mediante emisario submarino - Productos Marinos Puerto Williams Ltda.	Puerto Williams
2006	Instalación de emisario submarino para la disposición final de RILES en la Bahía de Calbuco, Comuna Calbuco, Décima Región - Planta Pesquera Rachid Osman Chelech	Calbuco
2006	Descarga de residuos industriales y aguas servidas fuera de la Zona de Protección Litoral con cumplimiento de la Tabla N° 5 D.S. 90/2000, en el Canal Señoret, XII Región - Pesquera Edén Ltda.	Punta Arenas
2006	Emisario Submarino Bahía Tongoy - Pesquera San José S.A.	Tongoy
2006	Emisario Submarino Pesquera San José - Pesquera San José S.A.	IV Región
2006	Sistema de tratamiento y disposición final de aguas residuales generadas por Pesquera y Conserva Cabo de Hornos Ltda.	Cabo de Hornos
2006	Nuevas plantas de tratamiento y tendido de emisarios de Residuos Industriales Líquidos, Bahía San Vicente, Talcahuano, VIII Región - Cía. Siderúrgica Huachipato S.A.	Talcahuano
2006	Modificación sistemas de descarga de Residuos Industriales Líquidos - Cía. Pesquera Camanchaca S.A.	Atacama
2006	Mejoramiento de Sistema de descarga de Residuos Industriales Líquidos - Cía. Pesquera Camanchaca S.A.	III Región
2006	Sistema de disposición final de RILES - Compañía Pesquera Camanchaca S.A.	IV Región
2006	Construcción de emisario submarino para la descarga de RILES desde la Planta Refinadora de Aceites - Procesos y Servicios S.A.	VIII Región
2006	Ampliación de planta de proceso, regularización de planta de tratamiento de RILES y planta de tratamiento de aguas servidas, e instalación de emisario submarino para la descarga de efluentes fuera de la Zona de Protección Litoral de la Empresa Patagonia Salmon Farming S.A., en Bahía Ilque.	X Región
2006	Emisario submarino para la disposición de RILES fuera de la zona de protección litoral de Planta Proceso de Productos del mar, camino a Caicaen, Calbuco - Pesquera Pacific Farmer Ltda.	Calbuco
2006	Regularización de sistema de pretratamiento e instalación de emisario submarino para la disposición de RILES fuera de la Zona de Protección Litoral en Canal Dalcahue.- Sociedad Conservas Dalcahue S.A.	Chiloé

<b>TRAZADOR QUÍMICO: RODAMINA B</b>		
<b>Año</b>	<b>Nombre del Proyecto*</b>	<b>Lugar</b>
2006	Reconstitución de planta procesadora de lana, instalación de sistema de tratamiento de RILES, regularización de sistema de tratamiento de aguas servidas y modificación de emisario submarino para la disposición de efluentes fuera de la Zona de Protección Litoral, cumpliendo con la Tabla N° 5 del D.S. 90/00 - Standard Wool Chile	Magallanes
2006	Regularización de pretratamiento de RILES y aguas servidas, instalación de emisario submarino para la descarga de efluentes fuera de la Zona de Protección Litoral, y regularización de terreno concesionado de la Empresa Pesca Chile S.A., en Bahía Catalina - Pretratamiento RILES y Emisario Submarino Pesca Chile S.A.	Punta Arenas
2006	Sistema de manejo de efluentes con emisario submarino - Construcciones y Carpintería Naval, CONCAR S.A.	Punta Arenas
2005	Sistema de disposición final de Residuos Industriales Líquidos - Pesquera Bahía Coronel S.A.	Coronel
2005	Centro de matanza y emisario submarino en Canal Dalcahue - Cultivos Marinos Chiloé Ltda.	Chiloé
2005	Emisario submarino de Lebu, Emisario Lebu – Empresa Servicios Sanitarios del Bio-Bio S.A., ESSBIO S.A.	Lebu
2005	Emisario Submarino San Pedro- ESSBIO S.A.	San Pedro de la Paz
2005	Modificación manejo aguas de filtración Planta Coloso - Minera Escondida Ltda.	Mejillones
2005	Emisario submarino para disposición de RILES Pesquera Grimar S.A: Coronel - Pesquera Grimar S.A.	Coronel
2005	Modificación del proyecto planta de tratamiento de RILES de EWOS Chile S.A., calificado ambientalmente por la Resolución de Calificación Ambiental N° 256/2001- EWOS Chile S.A.	VII Región
2005	Construcción de planta de proceso de recursos hidrobiológicos, Instalación de sistemas de tratamiento de RILES y aguas servidas e Instalación de emisario submarino para la disposición de efluentes fuera de la Zona de Protección Litoral cumpliendo (Tabla N° 5 del D.S. 90/01) en el Canal Tenglo- Pesquera Trans Antartic Ltda.	X Región
2005	Construcción de un sistema de pretratamiento e instalación de emisario submarino para la disposición de RILES de la empresa Pesca y Cultivos Don Jorge S.A. en Llicaldad, Castro.	Castro
2005	Instalación de emisario submarino para la disposición de RILES fuera de la Zona de Protección Litoral, de la empresa Sociedad Pesquera Silgar Ltda., Ancud - Sociedad Pesquera Silgar Ltda.	Ancud
2005	Regulación de tratamiento de RILES, Aguas servidas e instalación de emisarios submarinos para la descarga de efluentes fuera de la Zona de Protección Litoral (Tabla N° 5 del D.S. 90/01) en el Canal Hornopirén. – Productos del Mar Ventisqueros S.A.	X Región
2005	Regulación de planta de tratamiento de RILES e instalación de emisarios submarinos para la disposición de RILES fuera de la Zona de Protección Litoral, Ancud – Sociedad Productos Pesqueros S.A.	Ancud
2005	Modificación y regulación del sistema de tratamiento y desinfección de RILES, y redimensionamiento del emisario submarino para la descarga de efluentes fuera de la Zona de Protección Litoral.- Empresa Pesca Chile S.A.	XI Región

<b>TRAZADOR QUÍMICO: RODAMINA B</b>		
<b>Año</b>	<b>Nombre del Proyecto*</b>	<b>Lugar</b>
2004	Sistema de tratamiento y disposición final de Residuos Industriales Líquidos de Frigorífico Simunovic S.A. en el ecosistema costero del sector Río Seco, Punta Arenas.	Punta Arenas
2004	Emisario Submarino Coronel. – E. Servicios Sanitarios del Bio-Bio S.A.	Coronel
2004	Extensión emisario submarino de ENAP Refinerías Aconcagua en Concón-ENAP Refinerías S.A.	Concón
2004	Declaración de Impacto Ambiental emisario submarino de Planta de Procesos Pesquera Yadrán en Quellón.	Quellón
2004	Regulación de sistema de tratamiento, ampliación y reubicación de emisario submarino para la disposición de efluentes industriales y aguas servidas tratadas, fuera de la Zona de Protección Litoral, provenientes de la Planta de Proceso Robinson Crusoe y Cía. Ltda., Puerto Montt – Aquasur Fisheries Soc. Pesquera Ltda.	Puerto Montt
2003	Extensión Emisario Submarino El Tabo - ESVAL S.A.	El Tabo
2003	Planta de tratamiento de aguas servidas y emisario submarino de Quintero - ESVAL S.A. (EIA)	Quintero
2003	Instalación de sistema de tratamiento y emisario submarino para las disposiciones de RILES - Salmones Antártica S.A.	X Región
2003	Instalación sistema de tratamiento y emisario submarino para la disposición de Efluentes Industriales, Pesquera Aguas Claras S.A., Calbuco – Pesquera Aguas Claras S.A.	Calbuco
2003	Sistema de pretratamiento e instalación de emisario submarino para la disposición de RILES para la Planta Procesadora de Salmones Pacific Star S.A., Quellón- Chiloé - Salmones Pacific Star S.A.	Quellón
2002	Emisario submarino de Planta Procesadora de Moluscos en Conserva - Sociedad Pesquera Tubul Ltda.	VIII Región
2002	Instalación de sistema de tratamiento y emisario submarino para la disposición de Efluentes Industriales Pesquera Antarfood S.A.	X Región
2002	Instalación sistema de tratamiento y emisario submarino par la disposición de Efluentes Industriales Pesquera Unichile S.A.	X Región
2001	Emisario submarino y cañería de aducción de aguas - Cultivos Marinos Chiloé Ltda	X Región
1999	Emisario Submarino- Cía. Pesquera Camanchaca S.A.	I Región
1999	Extensión Emisario Higuera – ESVAL S.A.	V Región
1999	Emisario Lo Miranda- Doñihue- Servicios Sanitarios de EL libertador S.A., ESSEL S.A.	Doñihue
1998	Construcción prolongación emisario submarino Mejillones- Empresa de Servicios Sanitarios de Antofagasta, ESSAN S.A.	Antofagasta
1998	Emisario Submarino de Taltal- Empresa de Servicios Sanitarios de Antofagasta, ESSAN S.A.	Taltal
1998	Emisario Submarino de Tocopilla- Empresa de Servicios Sanitarios de Antofagasta, ESSAN S.A.	Tocopilla
1998	Construcción de Emisario Submarino Alcantarillado Huasco- Empresa de Servicios Sanitarios de Atacama, ESSANT S.A.	Huasco
1995	Emisario Submarino Bahía San Vicente- Empresa de Servicios Sanitarios del Bio-Bio S.A.	VIII Región
1994 <sup>§</sup>	Estudio de Impacto Ambiental, Puerto Arturo - Forestal Trillium	XII Región
1993 <sup>§</sup>	Estudio de Impacto Ambiental, Puerto Caldera, III Región -Cía. Minera Candelaria	III Región

\* Información obtenida del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (www.e-siae.cl); & Laboratorio de Oceanografía Química, Universidad de Concepción; § BENTOS Ltda.

**Tabla 4.3-2.** Resumen de algunos estudios ambientales en los que se ha usado **Rodamina WT** como trazador químico.

<b>TRAZADOR QUÍMICO: RODAMINA WT</b>		
<b>Año</b>	<b>Nombre del Proyecto*</b>	<b>Lugar</b>
2000 <sup>§</sup>	Estudio de Ingeniería, Puente Chacao. MOP I cuatro – Cowi. Canal de Chacao, X Región	Canal de Chacao
1999 <sup>§</sup>	Estudio de Impacto Ambiental Planta Desaladora Antofagasta, II Región. US Filter Corp.	Antofagasta
1999 <sup>&amp;</sup>	Estudio Impacto Ambiental, I parte - Trouw Chile Ltda. Pargua, X Región	Canal de Chacao
1998 <sup>&amp;</sup>	Estudio Impacto Ambiental, II parte - Trouw Chile Ltda. Pargua, X Región	Canal de Chacao
1997 <sup>§</sup>	Estudio de Impacto Ambiental Complejo Portuario Mejillones S.A., II Región	Mejillones
1997 <sup>§</sup>	Estudio de Impacto Ambiental, Puerto Chacabuco y Río Cuervo – Alumysa, XI Región	Puerto Chacabuco
1996 <sup>§</sup>	Estudio de Impacto Ambiental Bahía Porvenir y Bahía Chilota - Forestal Trillium, XII Región	Tierra del Fuego
1995 <sup>§</sup>	Estudio de Impacto Ambiental, Bahía Gente Grande - Forestal Trillium, XII Región	Tierra del Fuego
1994 <sup>§</sup>	Estudio de Impacto Ambiental Central Termoeléctrica Caldera, III Región	Caldera

\* Información obtenida del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental ([www.e-siae.cl](http://www.e-siae.cl)); & Laboratorio de Oceanografía Química, Universidad de Concepción; § BENTOS Ltda.

#### **4.4 APLICABILIDAD Y VENTAJAS**

Muchos autores utilizan y recomiendan la **Rodamina WT** para estudios en aguas marinas, superficiales continentales, emisarios submarinos, aguas subterráneas, etc. (Kilpatrick, 1970; Watson, 1981; Trudgill, 1987; Dire & Wilkinson, 1987; Elliott *et al.*, 1990; Peeters *et al.*, 1996; Upstill-Goddard *et al.*, 2001; Richardson *et al.*, 2004; Silva, 2004; Mines *et al.*, 2007). La razón que explica esto, es que este trazador tiene una baja adsorción en los sólidos suspendidos, gran estabilidad en un rango amplio de pH y salinidad, es estable por al menos 24 horas a la exposición luminosa y tiene baja toxicidad, lo que permite realizar estudios ambientalmente seguros.

Por otro lado, podemos destacar que la técnica metodológica, utilizando **Rodamina WT** como trazador, es altamente sensible ya que permite la medición "in situ" del trazador a tiempo real y con bajos límites de detección (Ellis & Rivett, 2003; Silva, 2004, Mines *et al.*, 2007), logrando obtener una serie de datos adecuados para la estimación del coeficiente de dispersión, con el modelo matemático adecuado, en el cuerpo de agua estudiado.

#### **5.0 MODELOS MATEMÁTICOS DE DISPERSIÓN**

El modelo de dispersión más utilizado en Chile es el de Castagnino (1976). Este se basa en la ecuación de difusión de Fick y la ley de conservación de masa, obteniendo una ecuación de dispersión de un soluto en el mar (pudiendo éste ser un contaminante desde una fuente fija,

como un emisario submarino). A través de las isolíneas de concentración, que se asumen elípticas, y el cálculo de las áreas de estas isolíneas a través del tiempo, se obtienen los coeficientes de dispersión para el eje x e y (Anexo 1).

Otro modelo propuesto para este tipo de estudios es el método de Okubo (1971), basado en el carácter turbulento de la dispersión, a través del cálculo de la varianza de la mancha del trazador (Carrasco, 2000). Esencialmente, este método busca los diagramas de difusión teóricos que son obtenidos al graficar las varianzas entre el radio equivalente a un círculo de las diferentes isolíneas, tomando en cuenta la longitud de la mancha y el tiempo empleado (Anexo 1).

El método de Okubo (1971) considera que en ambientes marinos hay difusión turbulenta (de carácter macroscópico), mientras que el modelo de Castagnino (1976) asume un carácter microscópico al basarse en la difusión molecular (Fickniana; Carrasco, 2000). De acuerdo a esto y considerando que el fenómeno de dispersión ocurre por la acción conjunta de la advección y la difusión turbulenta, ambos definidos por la escala e intensidad de los eddies involucrados, es recomendable utilizar el modelo de Okubo para el cálculo del coeficiente de dispersión tomando al menos 4 valores de coeficientes para que este sea significativo (Carrasco, 2000).

## **6.0 SÍNTESIS**

La siguiente tabla es un resumen de las características y condiciones de uso para los trazadores químicos fluorescentes. En ella se puede ver el tipo de estudio (cuerpo de agua) en el que se utilizan, la reglamentación internacional, la reglamentación chilena, su grado de toxicidad, su sensibilidad respecto a los sólidos suspendidos, la solubilidad (peso específico) y por último el análisis, aplicabilidad, ventajas y desventajas de cada trazador.

**Tabla 6.0-1.** Resumen de las características y condiciones de uso para los trazadores químicos fluorescentes.

CONDICIÓN DE USO	FLUORESCEINA/URANINA <sup>(1)</sup>	RODAMINA WT <sup>(2)</sup>	RODAMINA B <sup>(3)</sup>
<b>Tipo de Estudio (cuerpo de agua)</b>	Sólo continentales, incluso aguas de alta calidad.	Aguas continentales, marinas, emisarios submarinos, aguas subterráneas, Potable, etc.	<b>NO</b> recomendado su uso en aguas.
<b>Reglamentación Internacional</b>	Uso permitido. Es uno de los trazadores químicos más utilizados para estudios de dispersión desde 1877.	Uso permitido por la USEPA y la AESA. Se estableció que este trazador no es tóxico para el ambiente.	<b>Prohibido</b> su uso desde 1988 hasta hoy por la USEPA en USA y por la AESA en la Comunidad Europea.
<b>Reglamentación en Chile</b>	Permitido su uso en todo tipo de aguas continentales, incluso aguas de alta calidad.	Permitido su uso en todo tipo de aguas, con algunas restricciones de concentraciones en aguas de alta calidad.	Permitido su uso en todo tipo de aguas, con algunas restricciones de concentraciones en aguas de alta calidad.
<b>Toxicidad</b>	No tóxico.	Baja toxicidad.	<b>Tóxico</b> , formación de compuesto <b>cancerígeno</b> en presencia de Nitrito.
<b>Sólidos suspendidos</b>	Altamente sensible, efecto importante sobre la fluorescencia.	Poco sensible, no hay efecto significativo en la fluorescencia.	Significativamente afectada por los Sólidos Suspendidos, disminución en la fluorescencia.
<b>Solubilidad (peso específico)</b>	Fluoresceína es Soluble en agua hasta 600 g/L	Soluble en agua en un 20%, con un alto peso específico.	Soluble en Etanol desde un 42%, peso específico muy bajo.
<b>Análisis / Modelación</b>	Estimación cualitativa y cuantitativa dudosa.	Estimación cualitativa y cuantitativa. Permite reconstitución del área de la mancha del trazador.	Solo estimación cualitativa. <b>NO</b> permite reconstitución del área de la mancha del trazador.
<b>Aplicabilidad, ventajas y desventajas</b>	<p><b>a)</b> Bajo rango de tolerancia al pH, salinidad y sólidos suspendidos.</p> <p><b>b)</b> Alto grado de foto-degradación.</p> <p><b>c)</b> No tóxico para el ambiente y organismos.</p> <p><b>d)</b> Estimación cualitativa y cuantitativa dudosa.</p>	<p><b>a)</b> Alto rango de tolerancia al pH (de 5- 10), salinidad (35 psu) y sólidos suspendidos.</p> <p><b>b)</b> Estable al menos por 24h a la exposición luminosa.</p> <p><b>c)</b> Baja Toxicidad para el ambiente y organismos.</p> <p><b>d)</b> Estimación cualitativa y cuantitativa</p>	<p><b>a)</b> Rangos similares a la <b>Rodamina WT</b> (salinidad y pH).</p> <p><b>b)</b> Afectada por los sólidos suspendidos</p> <p><b>c)</b> <b>Tóxico</b> para el ambiente y organismos. Prohibido su uso por la USEPA en USA y por la AESA en la Comunidad Europea.</p> <p><b>d)</b> Estimación cualitativa</p>

- (1) Knop, (1878), Feunstein & Sellick (1963), Buchanan (1964), Replogle *et al.* (1976), Smart & Smith (1976), Adams *et al.* (1989), Sabatini & Austin (1991), Fields *et al.* (1995), Kasnavia *et al.* (1999), Behrens *et al.* (2001)
- (2) Scott *et al.* (1969), Parker (1973), Smart & Smith (1976), Davis *et al.* (1980), Abidi (1982), Smart (1984), Wilson *et al.* (1986), Zellweger *et al.* (1988), Viriot & Andre´ (1989), Sabatini & Austin (1991), Rose & Adams (1994), Suijlen & Buyse (1994), Field *et al.* (1995), Peeters *et al.* (1996), Kasnavia *et al.* (1999), Behrens *et al.* (2001), Sutton *et al.* (2001), Turner (2001), Upstill-Goddard *et al.* (2001), Vasudevan *et al.* (2001), Ellis & Revitt (2003), Richardson *et al.* (2004); Silva (2004), Mines *et al.* (2007)
- (3) Feuerstein & Sellick (1963), Scott *et al.* (1969), Smart & Laidlaw, (1977), EPA (1980), Abidi (1982), Kubin & Fletcher (1982), Snare *et al.* (1982), Fisher & Smith (1983), Smart (1984), Abidi *et al.* (1986), Steinheimer & Johnson (1986), EPA (1988), Casey & Quitevis (1988), Viriot & Andre, (1989), USEPA (1998), Turner (2001), AESA (2004).



## 7.0 REFERENCIAS

- Abidi, S. 1982.** Detection of diethylnitrosamine in nitrate-rich water following treatment with rhodamine flow tracers. *Water Research* 16: 199.
- Abidi, S., V. Dawson & R. Huber. 1986.** Potential for nitrosamine formation in seven fishery chemicals. *The Progressive Fish-Culturist* 48: 301.
- Adams, M., W. Benoit, C. Doughty, G. Bodvarsson & J. Moore. 1989.** The Dixie Valler, Nevada tracer test. *Trasns. Geotherm. Resour. Counc* 13: 215- 220.
- AESA. 2004.** Agencia Europea de Seguridad Alimentaria: Lista de Colorantes ilegales. ([http://www.quimica.urv.es/serveis/documents/butlletins\\_aeqt/102.html](http://www.quimica.urv.es/serveis/documents/butlletins_aeqt/102.html) ).
- Ande J. & J. Molinari. 1976.** Mises au point sur les différents facteurs physico-chimiques influants sur la mesure de concentration de traceurs fluorescents et leurs conséquences pratiques en hydrologie. *J. Hydrol.* 30 : 257- 285.
- Araucaria Consultores Ltda. 1999.** Estudio de Impacto Ambiental Marino. Planta Desaladora de Antofagasta / USFILTER CORP. – SK. Antofagasta (II Región). Caracterización Oceanográfica. Rodamina WT (Ejecutado por BENTOS).
- Behrens, H., U. Beims, H. Dieter, G. Dietze, T. Eikmann, T. Grummt, H. Hanisch, H. Henseling, W. Käß, H. Kerndorff, C. Leibundgut, U. Müller-Wegener, I. Rönnefahrt, B. Scharenberg, R. Schleyer, W. Schloz, & F. Tilkes. 2001.** Toxicological and ecotoxicological assessment of water tracers. *Hydrogeol.* J. 9: 321- 325.
- Buchanan, T. 1964.** Time of Travel of Soluble Contaminants in Streams. *J. San. Eng. Div., ASCE:90: SA3, 1-12.*
- Burgos, M. 1988.** Estudio de la Dispersión de Contaminantes en al Zona Costera. Tesis para optar al título de Oceanógrafo, Universidad de Católica de Valparaíso. 57pp.
- Carrasco, R. 2000.** Cálculo de la capacidad de dispersión superficial con Rodamina WT en Bahía Coliumo: Análisis de metodologías. Tesis para optar al título de Biólogo Marino con mención en Oceanografía y calidad ambiental, Universidad de Concepción. 47pp.
- Casey, K. & E. Quitevis. 1982.** Effect of solvent polarity on non-radiative processes in xanthene dyes: Rhodamine B in normal alcohols. *J. Phys. Chem.,* 92: 6590-6594.
- Castagnino, W. 1976.** Polución de agua, modelos matemáticos. Organización Panamericana de la Salud. Lima, Perú. 234pp.
- CH2MHILL. 1997.** Sección H: Línea Base Marina, Complejo Hidroeléctrico Central Río Cuervo (X Región). Rodamina WT. Capítulo VI Línea Base. 68pp. (Ejecutado por BENTOS).
- Complejo Portuario Mejillones. 1998.** Complejo Portuario Mejillones (II Región). Estudio de Impacto Ambiental. Caracterización Oceanográfica. Rodamina WT (Ejecutado por BENTOS).
- Davis, S., G. Thompson, H. Bentley & G. Stiles. 1980.** Ground- water tracers: A short review. *Ground Water* 18: 14- 23.
- Deaner, D. 1973.** Effect of Chlorine on Fluorescent Dyes. *J. of Water Poll. Control Fed.,* 45(3): 507-514.

- 
- Dire, D. & J. Wilkinson. 1987.** Acute exposure to Rhodamine B. J. Toxicol. and Clinic. Toxicol. 25(7): 603-607.
- DIRECTEMAR.** Guía Metodológica sobre procedimientos y consideraciones ambientales básicas para la descarga de aguas residuales mediante emisarios submarinos. Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante. Armada de Chile, 16 pp.
- DIRECTEMAR. 2002.** Guía Metodológica de Revisión Técnica Sectorial de Estudios de Impacto Ambiental en el Medio Ambiente Acuático de Jurisdicción Nacional para Proyectos que contemplan Descargas de Residuos Líquidos, de Puertos y Terminales Marítimos u Otros. Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante. Armada de Chile, 23 pp.
- Dyke, P. 1996.** Modelling marine processes. Prentice Hall. pp 77-87.
- Ellis, B & R. Revitt. 2003.** Deliverable 2.3: Standard protocols for assessing the effects of real sewer sediments and flow conditions on tracers. Assessing Infiltration and Exfiltration on the Performance of Urban Sewer Systems (<http://www.insa-lyon.fr/apuss>)
- Elliott, G., R. Mason & I. Edwards. 1990.** Studies on the pharmacokinetics and mutagenic potential of Rhodamine B. Clinic. Toxicol. 28(1): 45-59.
- EPA. 1980.** Cotruvo, J. A. Rhodamine WT and B, Memo to P. J. Traina. Dated April 10, 1980.
- EPA. 1988.** Perler, A. H., Chemistry and toxicity of Rhodamine dyes, Letter to Ms. Janice Warnquist, Office of Water Chemical Safety Manager Crompton and Knowles Corporation. Dated August 2, 1988.
- Feunstein D. & R. Sellick. 1963.** Fluorescent Tracers for Dispersion Measurements. J. San. Eng. Div., ASCE-89: SA4, 1-21.
- Fields, M., R. Wilhelm, J. Quinlan & T. Aley. 1995.** An assessment of the potential adverse properties of fluorescent traces dyes used for groundwater tracing. Environm, Monit. Assess. 38:75- 96.
- Fisher, H. & R. Smith. 1983.** Observation of transport to surface waters from a plunging inflow to Lake Mead, Limnol. Oceanogr. 28 (2): 258-272.
- Flury, M. & N. Wai. 2003.** Dyes as tracer for vadose zone hydrology. Rev. of Geophys. 41: 2,1- 2, 37.
- GSI, Ingenieros Consultores Ltda. 1996.** Informe de evaluación de impacto ambiental para Bahía Lota. Junio 1996. Informe presentado a la Dirección General de Territorio Marítimo y Marina Mercante, Valparaíso, Chile.
- INPESCA. 1996.** Informe de evaluación de impacto ambiental preparado para terminal marítimo Compañía Siderúrgica Huachipato S.A. Bahía San Vicente, VIII Región. Junio 1996. Informe presentado a la Dirección General de Territorio Marítimo y Marina Mercante, Valparaíso, Chile.
- INPESCA. 1998.** Informe de evaluación de impacto ambiental preparado para Pesquera HARIPESCA Ltda. en Bahía Lota, VIII región, Chile, Julio 1998. Informe presentado a la Dirección General de Territorio Marítimo y Marina Mercante, Valparaíso, Chile.

- Kasnavia, T., D. Vu & D. Sabatini. 1999.** Fluorescent dye and media properties affecting sorption and tracer selection. *Ground Water* 37: 376- 381.
- Karstens, T. & K. Kobs. 1980.** Rhodamine B and Rhodamine 101 as reference substances for fluorescence quantum yield measurements. *J. Phys. Chem.* 84: 1871-1872.
- Kilpatrick, F. 1970.** "Dosage Requirements for Slug Injections of Rhodamine B and WT Dyes". Geological Survey Research, U. S. Geological Survey Prof. Paper, 700-B: B250-253.
- Knop, A. 1878.** Über die hydrographischen Beziehungen Zwischen der Donau und der Aachquelle im badischen Oberlabde (Schluss). *Neues Jahrb. Mineral. Geol. Palaeontol.* 350- 363.
- Kubin, R. & A. Fletcher. 1982.** Fluorescence quantum yields of some rhodamine dyes. *J. Luminesc.* 27: 455-462.
- Lindqvist, L. 1960.** A flash photolysis study of Fluorescein. *Ark. Kemi.* 16: 79- 138.
- López Arbeloa, F., P. Ruiz Ojeda, & I. López Arbeloa. 1989.** Fluorescence self-quenching of the molecular forms of Rhodamine B in aqueous and ethanolic solutions. *J. Luminesc.* 44: 105-112.
- Majumdar, D. 1961.** Quenching of fluorescence of dyes by neutral salts. *Z. Phys. Chem.* 217: 200- 206.
- Mines C., A. Ghadouani & J. Seow. 2007.** Application of new fluorometric technology for the detection of point source pollution in urban drainage systems. *Geophysical Research Abstract* 9: 01836 . SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2007-A-01836.
- Okubo, A. 1971.** Oceanic diffusion diagrams. *Deep-Sea Res.* 18: 789- 802.
- Parker, G. 1973.** Tests of Rhodamine WT Dye for Toxicity to Oysters and Fish. *J. Res. of U.S. Geol. Survey* 1:4, 449.
- Peeters, F., A. Wüest, G. Piepke & M. Imboden. 1996.** Horizontal mixing in lakes. *J. Geophys. Res.* 101 (C8): 18,361-18,375.
- Perrin, D. 1965.** Dissociation Constants of Organic Bases in Aqueous Solution. Butterworths, London.
- Replogle, J., L. Myers & K. Brust. 1976.** Flow Measurements with Fluorescent Tracers. *J. Hydraulics Div., ASCE:HY5*, 1-14 (Sep).
- Richardson, S., C. Wilson & K. Rusch. 2004.** Use of rhodamine water tracer in the marshland upwelling system. *Ground Water* 42(5): 678-688.
- Rose, P. & M. Adams. 1994.** The application of Rhodamine WT as a geothermal tracer. *Trans. Geotherm. Resour. Counc.* 18: 237- 240.
- Sabatini, D. 2000.** Sorption and intraparticle diffusion of fluorescent dyes with consolidated aquifer media. *Ground Water* 38: 651- 656.
- Sabatini, D. & T. Austin. 1991.** Characteristics of Rhodamine WT and Fluorescein as adsorbing ground-water tracers. *Ground Water* 29: 341- 349.
- Scott, C., V. Norman & F. Fields. 1969.** Reduction of fluorescence of two tracer dyes by contact with a fine sediments. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.* 650-B: 164- 168.

- 
- Shiau, B., D. Sabatini & J. Harwell. 1993.** Influence of Rhodamine WT properties on sorption and transport in subsurface media. *Ground Water* 31: 913- 920.
- SILVAN. 2004.** Silvan experiment proposal (SILVAN 0461). March 1-7.
- SK Ecología. 1997.** Estudio de Impacto Ambiental Puerto Chacabuco y Río Cuervo (XI Región). Estudios Oceanográficos. Rodamina WT. Tomo I y II (Ejecutado por BENTOS).
- Smart, P. 1984.** A review of the toxicity of twelve fluorescent dyes used for water tracing. *NSS Bulletin* 46: 21-33.
- Smart, P. & I.M.S. Laidlaw. 1977.** An evaluation of some fluorescent dyes for water tracing. *Water Resour. Res.* 13: 15-33.
- Smart, P. & D. Smith. 1976.** Water tracing in tropical regions, the use of fluoremetric techniques in Jamaica. *J. Hydrol.* 30: 179- 195.
- Snare, M., F. Treloar, K. Ghigginio & P. Thistlethwaite. 1982.** The photophysics of Rhodamine B. *J. Photochem.* 18: 335-346.
- Steinheimer, T. & S. Johnson. 1986.** The investigation of the possible formation of diethylnitrosamine resulting from the use of Rhodamine WT dye as a tracer in river waters. *U.S. Geol. Surv. Water Supply Pap.* 2290: 37- 49.
- Suijlen, J. & J. Buyse. 1994.** Potentials of photolytic Rhodamine WT as a large-scale water tracer assessed in a long-term experiment in the Loosdrecht lakes. *Limnol. Oceanogr.*, 39: 1411-1423.
- Sutton, D., Z. Kabala, A. Francisco & D. Vasudevan. 2001.** Limitations and potential of commercially available Rhodamine WT as a groundwater tracer. *Water Resour. Res.* 37: 1641- 1656.
- Trouw. 1998.** Informe Proyecto TROUW CHILE LTDA. Caracterización oceanográfica de Bahía Pargua, X Región. Rodamina WT (Ejecutado por BENTOS).
- Trouw. 1999.** Informe Proyecto TROUW CHILE LTDA. Caracterización oceanográfica de Bahía Pargua, X Región. Rodamina WT (Ejecutado por BENTOS).
- Trudgill, S. 1987.** Soil water dye tracing with special reference to the use of Rhodamine WT, Lissamine FF and aminp G Acid. *Hydrol. Processes* 1: 149- 170.
- Turner Designs. 2001.** [www.turnerdesigns.com](http://www.turnerdesigns.com) accessed December 28.
- Upstill-Goddard, R., J. Suijlen, G. Malin & P. Nightingale. 2001.** The use of photolytic Rhodamines WT and sulpho G as conservative tracers of dispersion in surface waters. *Limnol. Oceanogr.* 46: 927-394.
- USEPA. 1998.** Announcement of the Drinking Water Contaminant Candidate List. *Federal Register*, Vol 63 (40), March 2.
- Vasudevan, D., R. Fimmen & A. Fransisco. 2001.** Tracer-grade Rhodamine WT: Structure of constituent isomers and their sorption behavior. *Environmental of Science and Technology* 35: 4089-4096.
- Viriot, M. & J. Andre´. 1989.** Fluorescent dyes: A search for new tracer for hydrology. *Analisis* 17: 97- 111.

- Watson. 1981.** Quantification of luminescence intensity in terms of Rhodamine WT Standart. US. Geological Survey, Flagstaff, Ariz. Lune and Planetary Institute. 19-22 pp
- Williams, R. & J. Bridges. 1964.** Fluorescente in solution. J. Clin. Psthl. 17: 371- 394.
- Wilson, J. 1968.** Fluorometric Procedures for Dye Tracing. Techniques for Water Resources Investigations of the U.S. Geological Survey, Book 3, Applications of Hydraulics, Chapter A12: VIII, U.S. Gov't Printing Office, Wash. D.C.
- Wilson, J., L. Leach, M. Henson & J. Jones. 1986.** In situ biorestitution as a ground water remediation technique. Ground Water Monit. Rev. 6: 56- 64.
- Zellweger, G., K. Bencala, D. McKnight, R. Hirsch & B. Kimball. 1988.** Practical aspects of tracer experiments in acidic, metal enriched streams, in U.S.Geological Survey Toxic Substances Hydrology, Program- Surface- Water Contamination: Proceedings of the Technical Meeting, Denver, Colorado. (Ed) G.E. Mallard., (Edt) U.S. Geol. Surv., Reston, Vol 87, 764pp. 125- 130pp.



**INFORME TÉCNICO**  
METODOLOGÍAS UTILIZADAS EN ESTUDIOS DE  
DISPERSIÓN: ELECCIÓN DEL MEJOR TRAZADOR  
QUÍMICO

Código IT-DISP-0407  
Revisión 2  
Fecha 19-04-2007  
Páginas Página 22 de 23

---

## **ANEXO 1**

## MODELOS MATEMÁTICOS DE DISPERSIÓN

### A) MODELO CASTAGNINO (1976)

Las curvas de concentración dan:

$$\frac{a}{b} = \sqrt{\frac{E_x}{E_y}} \quad (1)$$

donde,  $a$  y  $b$  son ejes mayor y menor de una elipse;  $E_x$  y  $E_y$  son la difusividad de los ejes  $x$  (paralelo al transporte) e  $y$  (perpendicular al transporte)

El área  $A$  de cada elipse, cuyo borde es una línea de igual concentración es:

$$A = 2\pi * t \left( (E_x * E_y) * \ln \left( \frac{C_o}{C_t} \right)^2 \right) \quad (2)$$

donde,  $C_o$  es la concentración inicial y  $C_t$  es la concentración del trazador en un tiempo definido.

Al combinar las ecuaciones 1 y 2 tenemos:

$$E_x = \frac{a}{b} * \left( \frac{A}{2\pi * t \left( (E_x * E_y) * \ln \left( \frac{C_o}{C_t} \right)^2 \right)} \right) \quad \text{y} \quad E_y = \frac{b}{a} * \left( \frac{A}{2\pi * t \left( (E_x * E_y) * \ln \left( \frac{C_o}{C_t} \right)^2 \right)} \right)$$

(3)

(4)

donde,  $E_x$  y  $E_y$  son coeficientes de dispersión para una isolinéa  $C_t$ ;  $A$  es el área de la mancha.

### B.- MÉTODO OKUBO (1971)

Los diagramas de difusión se obtienen al graficar las varianzas de las áreas de radio equivalente a un círculo dadas por diferentes isolinéas de concentración de acuerdo a:

$$\sigma^2 = \frac{(rc - rc')^2}{(n - 1)} \quad (1)$$

donde,  $rc$  es el radio equivalente de un círculo y  $rc'$  es el radio equivalente promedio;  $n$  es el número de valores de  $rc$  dado por cada isolinéa dentro de la mancha en un tiempo dado.

El resultado de la línea recta, en el gráfico, expresado como potencia, por ejemplo, es:

$$\sigma^2 = 0,0108t^{2,34} \quad (2)$$

donde,  $\sigma^2$  es la varianza de un área equivalente a un círculo de diferentes isolinéas en una misma mancha a un tiempo " $t$ " determinado por el momento de la observación del área.

La difusividad aparente ( $Ka$ ) es determinada al dividir la varianza de un área equivalente ( $m^2$ ) de la ecuación 2 por el tiempo (s) en que se midió la mancha.