



LOS LIBERTADORES  
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

## EVALUACIÓN DE LA INCIDENCIA DE VARIABLES ANALÍTICAS EN LA DETERMINACIÓN DE LA BIODEGRADABILIDAD DE TENSOACTIVOS ANIÓNICOS Y NO IÓNICOS

Katerine Julieth Borja Martínez, [kjborjam@libertadores.edu.co](mailto:kjborjam@libertadores.edu.co)

### RESUMEN

La correcta determinación del porcentaje de biodegradabilidad de un tensoactivo es vital en el marco de disminuir los niveles de contaminación, para lo cual es necesario contar con métodos de ensayo reproducibles y veraces que den garantía de calidad de resultados y con base en ellos se fundamenten planes de acción eficaces. Colombia reglamentó los porcentajes mínimos de biodegradabilidad que deben tener los tensoactivos que se comercialicen en el país, seleccionando como métodos de ensayo los publicados por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD), sin embargo, al ser métodos no normalizados no cuentan con un protocolo unificado para la ejecución del ensayo, dejando abiertas algunas variables. En este trabajo se evaluaron los porcentajes de biodegradabilidad obtenidos para el Tritón X-100 y Lauril Sulfato de Sodio (LAS), empleando como método el OECD 301-D. Se plantearon como factores, la concentración de producto evaluada a cuatro niveles, el volumen de medio mineral evaluado a dos niveles y el operador evaluado a dos niveles. Se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en los porcentajes de biodegradabilidad obtenidos con las concentraciones evaluadas para ambos tensoactivos, por el contrario, no se encontraron diferencias significativas en los porcentajes de biodegradabilidad obtenidos con los dos operadores o los dos volúmenes

utilizados. Los mayores porcentajes de biodegradabilidad se obtuvieron al adicionar una concentración de producto de 2.0mg/L, para ambos tensoactivos.

*Palabras clave:* biodegradabilidad, tensoactivos, OECD, concentración.

### ***ABSTRACT***

The correct determination of the percentage of biodegradability of a surfactant is vital in the framework of reducing contamination levels, for which it is necessary to have reproducible and reliable test methods that guarantee the quality of the results and, based on them, provide the basis for effective action plans. Colombia regulated the minimum percentages of biodegradability that surfactants marketed in the country must have, selecting as test methods those published by the Organization for Economic Cooperation and Development (OECD); however, as they are not standardized methods, they do not have a unified protocol for the execution of the test, leaving some variables open. In this work, the biodegradability percentages obtained for Triton X-100 and Sodium Lauryl Sulfate (LAS) were evaluated, using the OECD 301-D method. The product concentration evaluated at four levels, the volume of mineral medium evaluated at two levels and the operator evaluated at two levels were considered as factors. Significant differences ( $p < 0.05$ ) were found in the biodegradability percentages obtained with the concentrations evaluated for both surfactants; on the contrary, no significant differences were found in the biodegradability percentages obtained with the two operators or the two volumes used. The highest biodegradability percentages were obtained with the addition of a product concentration of 2.0 mg/L for both surfactants.

*Keywords:* biodegradability, surfactants, OECD, concentration.

## INTRODUCCIÓN

La actualidad de los procesos industriales y el consumismo está generando una sobre producción de sustancias que permitan acelerar los procesos y facilitar la vida tal como la conocemos, dentro de estas sustancias se encuentran los tensoactivos que son sustancias que disminuyen la tensión superficial del medio con el que estén interactuando. Para que una sustancia se considere un tensoactivo debe tener en su estructura un grupo no polar o hidrófobo y un grupo polar o hidrófilo.

Los tensoactivos se dividen en dos grandes grupos: iónicos (dentro de los que se cuentan los tensoactivos aniónicos, catiónicos y anfóteros) y los no iónicos. Debido a su relación efectividad – precio, los tensoactivos aniónicos son los más producidos y usados a nivel industrial. Su aplicación va desde productos cosméticos hasta productos para aseo a nivel industrial.

El consumo excesivo de productos de aseo está generando la disposición de altas concentraciones de distintos tipos de tensoactivos en las fuentes hídricas, afectando la calidad del recurso hídrico y el normal desarrollo de los ecosistemas. Los tensoactivos son compuestos orgánicos capaces de alterar significativamente la tensión superficial o interfacial de un sistema; interfieren en el intercambio de gas en los cuerpos de agua y alteran el sistema hormonal de organismos acuáticos (Ivanković y Hrenović 2010, Lee y Saylor 2010). También, los tensoactivos causan problemas de espuma en aguas superficiales, lagos, ríos y plantas depuradoras de aguas residuales (Romero, 1996). De igual forma, Lechuga (2005) señala que los detergentes “pueden aumentar los niveles de cloro y de compuestos organoclorados; algunos posiblemente de carácter tóxico y carcinógeno” (p. 49). Por estas razones, actualmente algunos países, entre los que figura

Colombia, exigen un nivel mínimo de biodegradación para permitir la comercialización de estos productos.

La biodegradabilidad es la capacidad que tienen los microorganismos de convertir una estructura orgánica compleja (con un alto poder contaminante) en estructuras más sencillas. Cuando todo este proceso es completado, las sustancias orgánicas son transformadas generalmente en agua, metano y dióxido de carbono.

La biodegradabilidad es un parámetro determinante en el comportamiento ambiental de las sustancias químicas y una propiedad deseable de los productos que se liberan en grandes cantidades al medio natural, tales como detergentes, pesticidas, materiales de embalaje, etc. (Vázquez y Beltrán, 2004).

La Resolución 0689 del 2016 del Ministerio de Salud y Protección Social y del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible dicta los límites para los porcentajes de biodegradabilidad de agentes tensoactivos y productos de aseo que se comercializan en Colombia, definen las metodologías analíticas validas por las entidades de control para la ejecución de este ensayo, los métodos analíticos seleccionados fueron publicados por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD, 1992) y obliga a las empresas que fabrican y distribuyen productos de aseo a garantizar un porcentaje mínimo de biodegradación. Ante la exigencia legal, la industria se vio obligada a buscar laboratorios que pudieran suplir la necesidad de garantizar el porcentaje de biodegradabilidad de sus productos. Sin embargo, en Colombia los laboratorios no tenían metodologías implementadas para este tipo de pruebas. En el año 2016, fecha en que se expidió la Resolución, no había en el país ningún laboratorio acreditado ante el Organismo

Nacional de Acreditación (ONAC) para la ejecución de este tipo de ensayo, causando detención en los procesos de importación, nacionalización y venta de productos de aseo.

Uno de los problemas que enfrentaron los laboratorios en el proceso de implementación de las metodologías exigidas en el país fue la falta de un protocolo unificado para la ejecución de los ensayos, esto debido a que los métodos OECD (1992) no son normalizados y por lo tanto no dictan directrices técnicas y estadísticas a cumplir por los laboratorios. La falta de un protocolo unificado genera que los laboratorios no puedan obtener resultados reproducibles y por lo tanto no se pueda garantizar la validez del resultado entregado.

Dentro de las variables analíticas que pueden afectar el resultado obtenido y que no están claramente definidas por el método se encuentran la concentración de producto a adicionar y el volumen final de solución basal usado en el proceso.

## **REFERENTES TEÓRICOS**

Los productos biodegradables son aquellos obtenidos con materiales totalmente naturales o sintéticos, no contaminantes, que pueden ser destruidos por los microorganismos. El sol, la lluvia, el viento y la humedad, entre otros factores, descomponen los productos de forma natural (Díaz et al., 2020).

La OECD (1992) publicó una serie de pruebas que pueden determinar la biodegradabilidad en materias primas y producto terminado (cosméticos, farmacéutica, aseo, etc.). La prueba 301D de la OECD puede determinar una gran variedad de compuestos, debido a que se basan en el seguimiento de parámetros que analizan el Carbono Orgánico Disuelto (COD), o bien de parámetros indirectos correlacionados con la mineralización de la molécula, como

la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) o la producción de CO<sub>2</sub> (Martínez y Mendoza, 2021).

Una de las dificultades principales para ejecutar el ensayo de forma reproducible se encuentra en las diferentes formulaciones de los productos, en las cuales están contenidas sustancias que tienen poder bactericida alterando la capacidad de interacción entre el producto y el inóculo.

La normalización de las pruebas de biodegradabilidad enfrenta un problema que es inherente a cualquier intento de simulación ambiental *in vitro*. Cuando se pretende integrar en el laboratorio el mayor número de variables, buscando reflejar la complejidad real de los fenómenos naturales, disminuye también la posibilidad de construir métodos reproducibles y por lo tanto susceptibles de normalización (Vázquez y Beltrán, 2004).

Para evaluar el efecto de los tratamientos en la determinación del porcentaje de biodegradabilidad, se deben realizar pruebas estadísticas que permitan obtener conclusiones. Las pruebas de comparaciones múltiples entre las medias de los tratamientos son de gran interés en la investigación aplicada (Conagin et al., 2008).

Dentro de las pruebas más comunes para la comprobación de resultados experimentales está la prueba F, utilizada para comprobar la existencia de diferencias significativas entre contrastes ortogonales de los tratamientos, pruebas Tukey, Duncan, Dunnett y prueba LSD (Albuquerque de Sousa et al., 2012).

## **METODOLOGÍA**

Los ensayos fueron ejecutados en el laboratorio MK Inversiones Limitada, siguiendo los lineamientos del método OECD 301D de 1992. Como medición base para el cálculo del porcentaje de Biodegradabilidad se usó la demanda química de oxígeno (DQO).

Debido a la amplia variedad de tensoactivos en el mercado colombiano, la selección de los tensoactivos usados en este ensayo se realizó con base en su efectividad y porcentaje de biodegradación teórico. Los tensoactivos seleccionados fueron el Lauril Sulfato de Sodio catalogado como tensoactivo aniónico y el Tritón X-100 catalogado como tensoactivo no iónico.

### **Fase 1. Preparación del medio mineral.**

Para el ensayo se usó agua ASTM tipo I, la cual para la prueba fue aireada durante un periodo de dos horas y luego dejada en reposo por un periodo de veinte horas. Para enriquecer el agua se prepararon cuatro soluciones, la solución “a” compuesta de potasio dihidrógeno ortofosfato ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), dipotasio hidrogeno ortofosfato ( $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ), disodio hidrogeno ortofosfato dihidratado ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y cloruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), la solución “b” compuesta por cloruro de calcio dihidratado ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), la solución “c” compuesta de sulfato de magnesio heptahidratado ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) y la solución “d” compuesta de cloruro de hierro (III) hexahidratado ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). Por cada litro de agua fue adicionado un mililitro de cada una de las soluciones, estos compuestos confirieron al medio sales minerales, oligoelementos y factores de crecimiento, con lo que se buscó

garantizar la supervivencia de los microorganismos. Se verificó el pH final de esta solución, obteniendo un resultado de 7.41 (dentro de los criterios del método). Para finalizar el proceso de preparación del medio mineral, se adiciono inhibidor de nitrificación para evitar que este efecto interfiriera en el ensayo.

## **Fase 2. Inoculación.**

Se utilizaron winkler de 125mL y 300mL, preparando botellas para analizar contenidos de oxígeno disuelto en el día 0 y día 28 con 10 réplicas por concentración, el ensayo fue ejecutado por dos operadores simultáneamente. Los winkler fueron llenados con medio mineral en aproximadamente un 75% de su volumen nominal. Posteriormente, se adicionaron volúmenes de los tensoactivos objetos de estudio que proporcionaron concentraciones de 0.5mg/L, 2.0mg/L, 5.0mg/L y 10.0mg/L en cada uno de los recipientes. Cada uno de los winkler fue inoculado con 1mL de inóculo (el inóculo usado fue Polyseed activado en 500 mL de medio mineral con agitación constante), inmediatamente se completó el volumen del winkler con medio mineral y se taparon verificando que no existieran burbujas en el interior de este. La mitad de los recipientes fue llevado a una incubadora donde fueron almacenados en oscuridad durante un periodo de 28 días a 20°C.

## **Fase 3. Cuantificación del contenido de oxígeno (DBO – DQO).**

El oxígeno fue fijado adicionando a cada winkler 1mL de sulfato manganoso, 1mL de solución de álcali yoduro y 1 mL de ácido sulfúrico del 96%. La concentración de oxígeno disuelto fue determinada por valoración de las muestras con tiosulfato de sodio 0.025N,

usando almidón como indicador. Este procedimiento se siguió para las mediciones en el día 0 y día 28, con el delta de oxígeno se calculó la demanda bioquímica de oxígeno correspondiente al día 28.

La demanda química de oxígeno fue determinada por reflujado cerrado y colorimetría. Para ejecutar el ensayo se hizo reaccionar en un tubo un volumen de 1 mL de la solución de los tensoactivos objetos de estudio con un oxidante fuerte como el dicromato de potasio, utilizando una solución de ácido sulfúrico y plata como catalizador. Los tubos fueron llevados a un termorreactor a 150°C por un periodo de 2 horas, posteriormente se cuantificó la demanda química de oxígeno por espectrofotometría UV-Vis.

Para el cálculo del porcentaje de biodegradabilidad se calculó la relación entre la DBO y la DQO.

#### **Fase 4. Aseguramiento de la validez de los resultados.**

Para garantizar la validez de los resultados se evaluó el delta de oxígeno entre el blanco inicial y final, usando como criterio de aceptación que no fuera mayor a 1.5 mg O<sub>2</sub>/L. Así mismo, se evaluó el residual de oxígeno disuelto en los winkler, revisando que este no fuera menor a 0.5 mg O<sub>2</sub>/L. Por otra parte, se llevaron a cabo actividades de aseguramiento metrológico, certificando la trazabilidad de los análisis por medio de calibraciones realizadas a los equipos por parte de laboratorios acreditados bajo la norma NTC-ISO/IEC 17025:2017.

Los resultados fueron analizados usando el software estadístico R.

## RESULTADOS

El análisis inicial de los resultados se realiza estudiando los porcentajes promedio de biodegradabilidad obtenidos para ambos tensoactivos usando las cuatro concentraciones de interés. Para el análisis fueron tenidos en cuenta los 320 datos obtenidos en la investigación, correspondientes 160 de estos a cada tensoactivo analizado.

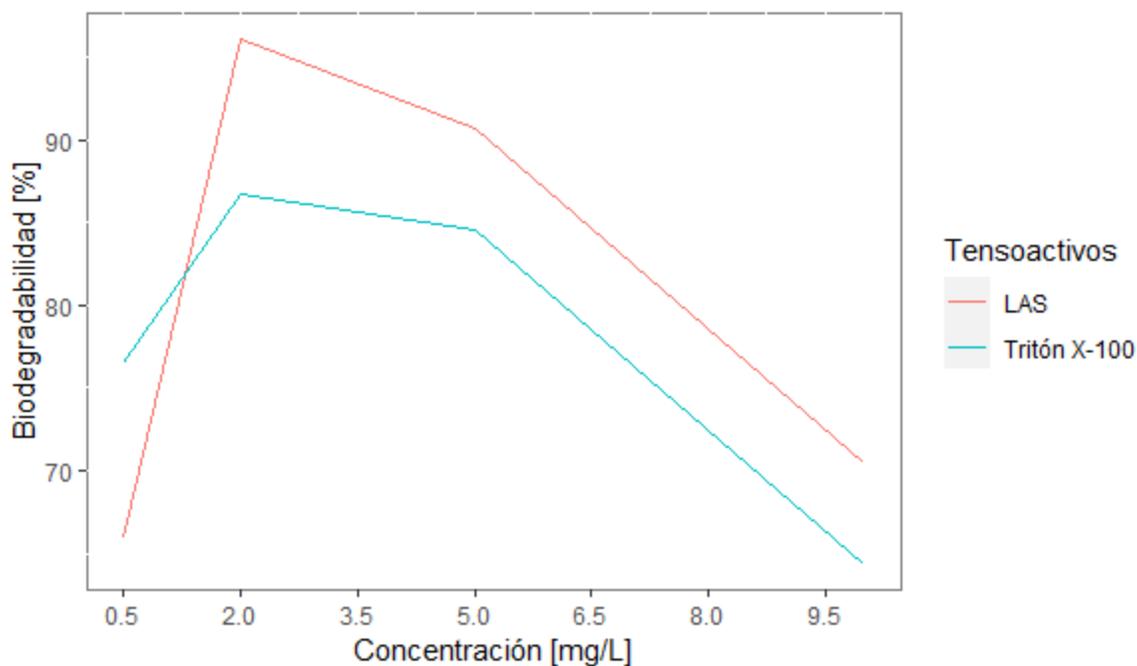
*Tabla 1. Promedio % biodegradabilidad según la concentración*

	<b>0.5 mg/L</b>	<b>2.0 mg/L</b>	<b>5.0 mg/L</b>	<b>10.0 mg/L</b>
<b>Tritón X-100</b>	76.52%	86.69%	84.54%	64.33%
<b>LAS</b>	65.96%	96.08%	90.72%	70.46%

*Fuente elaboración propia*

Al observar los datos de la tabla 1 se evidencia que para el Tritón X-100 y el LAS, el máximo porcentaje de biodegradabilidad se encuentra utilizando una concentración final de producto en el winkler de 2.0 mg/L, obteniendo 86.69% y 96.08% de biodegradabilidad respectivamente.

Gráfico 1. Relación entre concentración y % biodegradabilidad

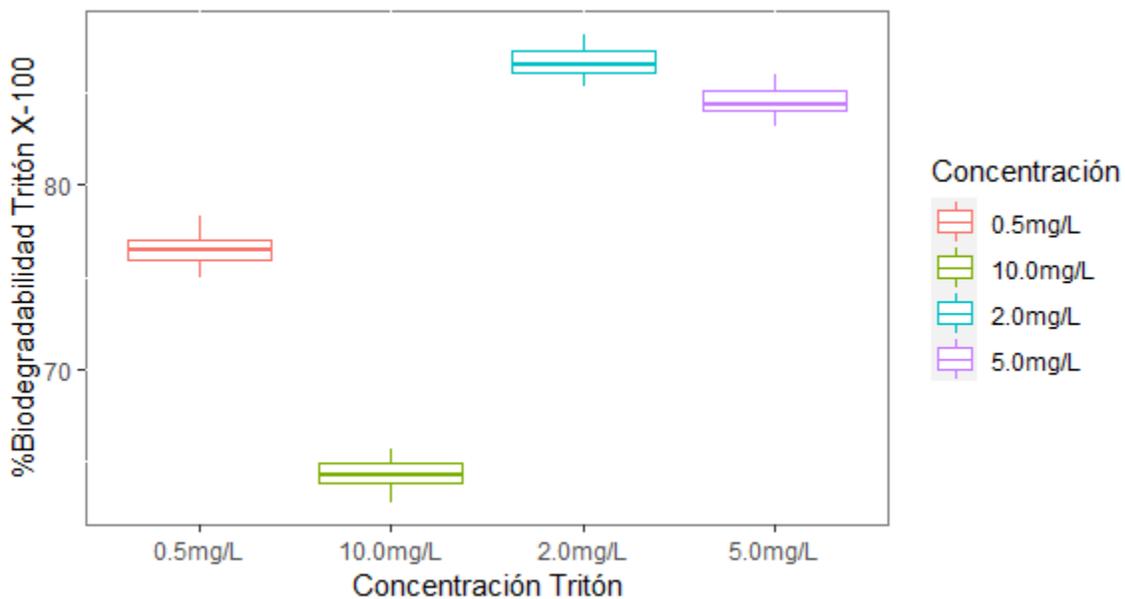


Fuente elaboración propia

En el gráfico 1 se muestra que cuando se siembran concentraciones mayores a 2.0 mg/L, ambos tensoactivos presentan una caída en el porcentaje de biodegradabilidad. Esto puede ser causado por un efecto de inhibición causado por un exceso de producto en el medio, causando que los microorganismos no tengan la capacidad de fraccionar las estructuras químicas de los productos analizados.

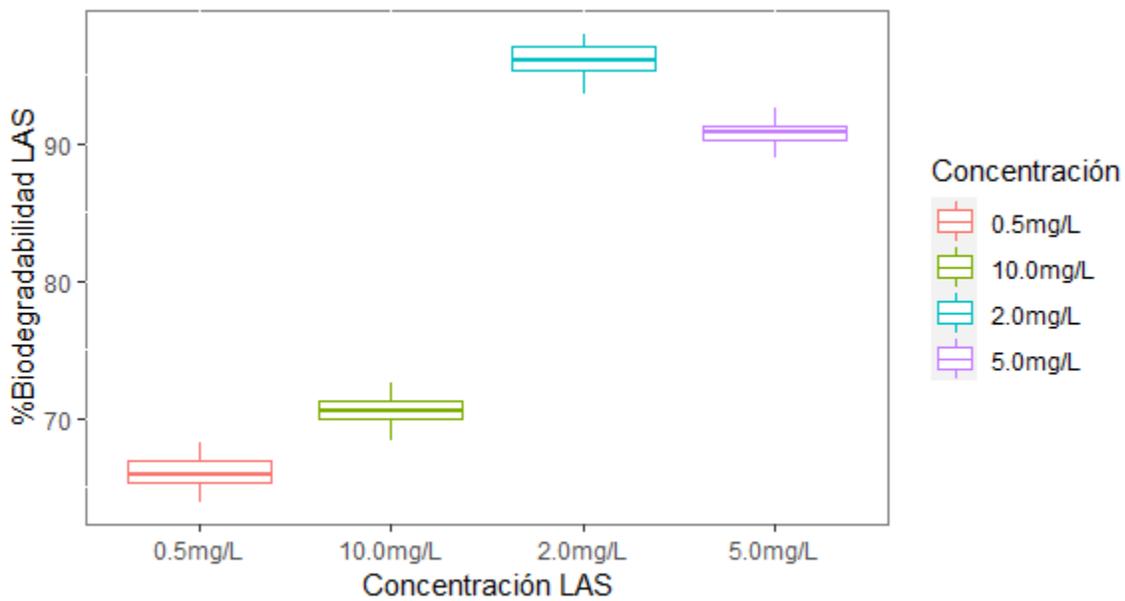
Por otra parte, el LAS presenta mayores porcentajes de biodegradabilidad en concentraciones mayores a 2.0 mg/L, comparado con los porcentajes determinados para el Tritón X-100. Esto coincide con la información contenida en los certificados de análisis del LAS, donde se le clasifica con fácilmente biodegradable (biodegradabilidad mayor al 60% en un periodo de 28 días).

Gráfico 2. *Boxplot biodegradabilidad Tritón X-100*



Fuente elaboración propia

Gráfico 3. *Boxplot biodegradabilidad LAS*



*Fuente elaboración propia*

Al revisar el comportamiento de los datos en las gráficas 2 y 3 encontramos que los datos se encuentran agrupados, el ancho de la caja muestra que la variación entre los datos es baja, sin evidencia inicial de datos atípicos que indiquen alteraciones a los resultados obtenidos. Así mismo, se observan diferencias en las medianas de los datos obtenidos, mostrando los mayores valores para las concentraciones de 2.0 mg/L y 5.0 mg/L.

*Tabla 2. ANOVA comparación de los 16 tratamientos (Tritón X-100)*

	<b>Df</b>	<b>Sum Sq</b>	<b>Mean Sq</b>	<b>F Value</b>	<b>Pr (&gt;F)</b>
<b>Tratamientos</b>	15	12302.7	820.18	1321.4	$<2.2 \times 10^{-16}$
<b>Residuals</b>	144	89.4	0.62		

*Fuente elaboración propia*

*Tabla 3. ANOVA comparación de los 16 tratamientos (LAS)*

	<b>Df</b>	<b>Sum Sq</b>	<b>Mean Sq</b>	<b>F Value</b>	<b>Pr (&gt;F)</b>
<b>Tratamientos</b>	15	26372.8	1758.19	1925.3	$<2.2 \times 10^{-16}$
<b>Residuals</b>	144	131.5	0.91		

*Fuente elaboración propia*

En total se analizaron 16 tratamientos, producto de 3 factores de los cuales la concentración se evaluó en 4 niveles, el operador y el volumen se evaluaron en 2 niveles. Al realizar los ANOVA se encuentra que para ambos tensoactivos sí existen diferencias significativas entre los tratamientos.

Para el LAS y el Tritón X-100 se obtuvo un modelo lineal de la forma  $Y = X\beta + \epsilon$ , que permitió explicar la variabilidad de los datos en más de un 99%.

Tabla 4. Modelo lineal Tritón X-100

Estimación de los parámetros				Supuestos			
Intercepto	O1-V1-C2	O1-V1-C3	O1-V1-C4	R-Cuadrado	1	2	3
	10.34***	8.29***	-12.23***				
	O1-V2-C2	O1-V2-C3	O1-V2-C4				
	9.90***	8.34***	-12.21***				
76.49***	O2-V1-C2	O2-V1-C3	O2-V1-C4	0.9936	p-valor 0.227	p-valor 0.552	p-valor 0.692
	10.20***	7.83***	-12.18***				
	O2-V2-C2	O2-V2-C3	O2-V2-C4				
	10.34***	7.74***	-12.04***				

1: Normalidad (Shapiro-Wilk), 2: Homogeneidad de varianza (Breusch-Pagan), 3: Autocorrelación (Durbin-Watson).

O1: Operador 1, O2: Operador 2, V1: 125mL, V2: 300mL, C1: 0.5mg/L, C2: 2.0mg/L, C3: 5.0mg/L, C4: 10.0mg/L.

Fuente elaboración propia

Para estudiar la variabilidad de los porcentajes de biodegradabilidad del Tritón X-100 en función de los factores “operador”, “volumen” y “concentración” se evaluaron dos modelos, en el primero se tuvieron en cuenta los 16 tratamientos y se encontró que los tratamientos donde se tenía en cuenta la concentración 1 no eran significativos. Para el segundo modelo se descartaron los tratamientos no significativos y se tuvo un mejor resultado de AIC. El AIC para el modelo donde se incluyeron todos los tratamientos fue de 394.90 y para el modelo donde se excluyeron los tratamientos no significativos el AIC fue de 318.21. Así mismo, se puede observar en la tabla 4 que el modelo seleccionado explica

más del 99% de la variabilidad de los datos. Así mismo, con un alfa de 0.05, no se rechazan las hipótesis de normalidad, homogeneidad de varianza e independencia de los errores.

Por otra parte, se puede observar que cuando la evaluación del porcentaje de biodegradabilidad para el Tritón X-100 se realiza usando tratamientos que incluyan la concentración de 2.0 mg/L, el porcentaje de biodegradabilidad aumenta en aproximadamente el 10%. Por el contrario, cuando en los tratamientos se incluye una concentración de producto del 10.0 mg/L el porcentaje de biodegradabilidad decrece en aproximadamente 12%.

Tabla 5. Modelo lineal LAS

Estimación de los parámetros				Supuestos			
Intercepto	O1-V1-C2	O1-V1-C3	O1-V1-C4	R-Cuadrado	1	2	3
	29.54***	25.19***	4.37***				
	O1-V2-C2	O1-V2-C3	O1-V2-C4				
	30.83***	25.26***	5.00***				
65.74***	O2-V1-C2	O2-V1-C3	O2-V1-C4	0.9938	p-valor 0.522	p-valor 0.07	p-valor 0.137
	30.53***	25.01***	4.91***				
	O2-V2-C2	O2-V2-C3	O2-V2-C4				
	30.45***	24.46***	4.60***				

1: Normalidad (Shapiro-Wilk), 2: Homogeneidad de varianza (Breusch-Pagan), 3: Autocorrelación (Durbin-Watson).

O1: Operador 1, O2: Operador 2, V1: 125 mL, V2: 300 mL, C1: 0.5 mg/L, C2: 2.0 mg/L, C3: 5.0 mg/L, C4: 10.0 mg/L.

*Fuente elaboración propia*

Para seleccionar el modelo que mejor explicara la variabilidad de los porcentajes de biodegradabilidad del LAS en función de los tratamientos, se evaluaron los mismos modelos que para el Tritón X-100. El AIC obtenido para el modelo que incluía los 16

tratamientos fue de 456.67 y para el modelo seleccionado donde se evaluaron solo los tratamientos que fueron significativos, el AIC fue de 368.31. De igual forma, podemos observar en la tabla 5 que el modelo explica un 99.38% de la variabilidad de los datos.

Según lo mostrado en la tabla 5, el mayor aumento en el porcentaje de biodegradabilidad del LAS se obtiene cuando en los tratamientos se incluye una concentración de producto de 2.0 mg/L con un aumento de aproximadamente 30%.

En las tablas 4 y 5 se puede evidenciar de forma inicial que no hay una diferencia marcada cuando se usa la misma concentración, pero se cambian los volúmenes o los operadores.

*Tabla 6. Comparaciones por pares usando pruebas t para operador y volumen*

<b>Tritón X-100</b>				<b>LAS</b>			
Operador		Volumen		Operador		Volumen	
O1	1	V1	0.93	O1	1	V1	0.91
O2	1	V2	0.93	O2	1	V2	0.91

O1: Operador 1, O2:Operador2, V1:125mL, V2:300mL

*Fuente elaboración propia*

*Tabla 7. Comparaciones por pares usando pruebas t para concentración*

<b>Tritón X-100</b>				<b>LAS</b>			
	0.5	10.0	2.0		0.5	10.0	2.0
10.0	<2x10 <sup>-16</sup>	-	-	10.0	<2x10 <sup>-16</sup>	-	-
2.0	<2x10 <sup>-16</sup>	<2x10 <sup>-16</sup>	-	2.0	<2x10 <sup>-16</sup>	<2x10 <sup>-16</sup>	-
5.0	<2x10 <sup>-16</sup>	<2x10 <sup>-16</sup>	<2x10 <sup>-16</sup>	5.0	<2x10 <sup>-16</sup>	<2x10 <sup>-16</sup>	<2x10 <sup>-16</sup>

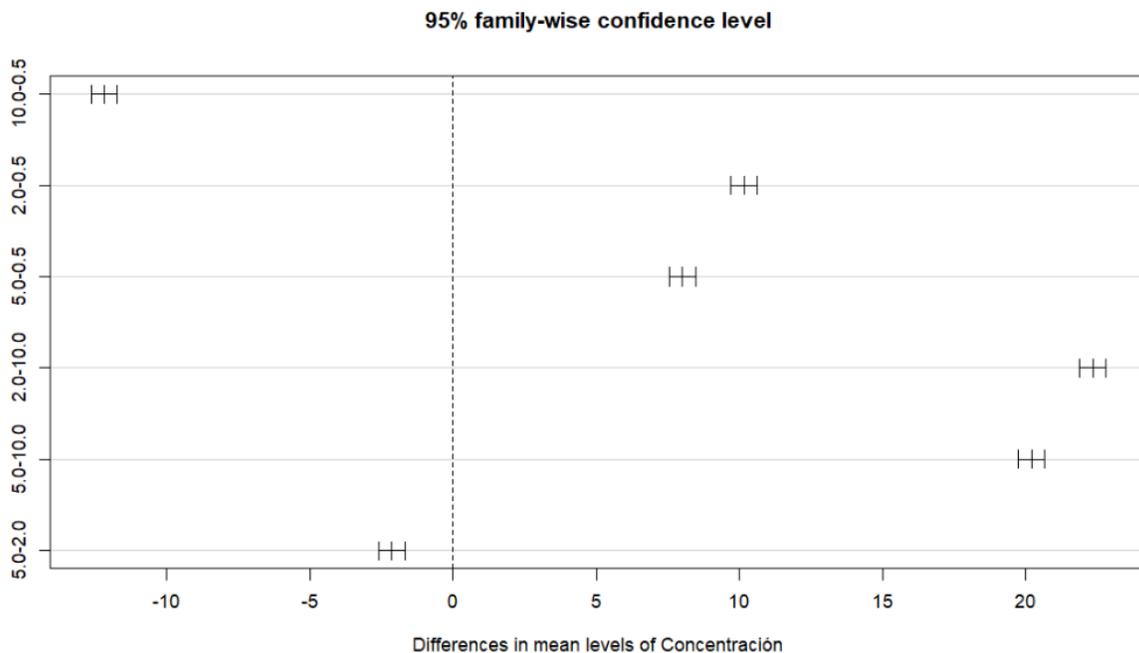
Concentraciones expresadas en mg/L.

*Fuente elaboración propia*

Para evaluar las diferencias entre los niveles de los factores, se realizó una prueba de pareada con ajuste Bonferroni. Los resultados registrados en la tabla 6 muestran que no existen diferencias al realizar la medición de biodegradabilidad con 125mL o 300mL de medio mineral, así mismo, no existe diferencia al realizar la medición con cualquiera de los dos operadores autorizados para la ejecución del ensayo.

Por otra parte, en la tabla 7 se observa que si existen diferencias al realizar el ensayo con 0.5mg/L, 2.0 mg/L, 5.0mg/L y 10.0mg/L. Esto indica que el resultado final si se ve afectado por la cantidad de producto sobre la cual los microorganismos tienen que ejercer actividad.

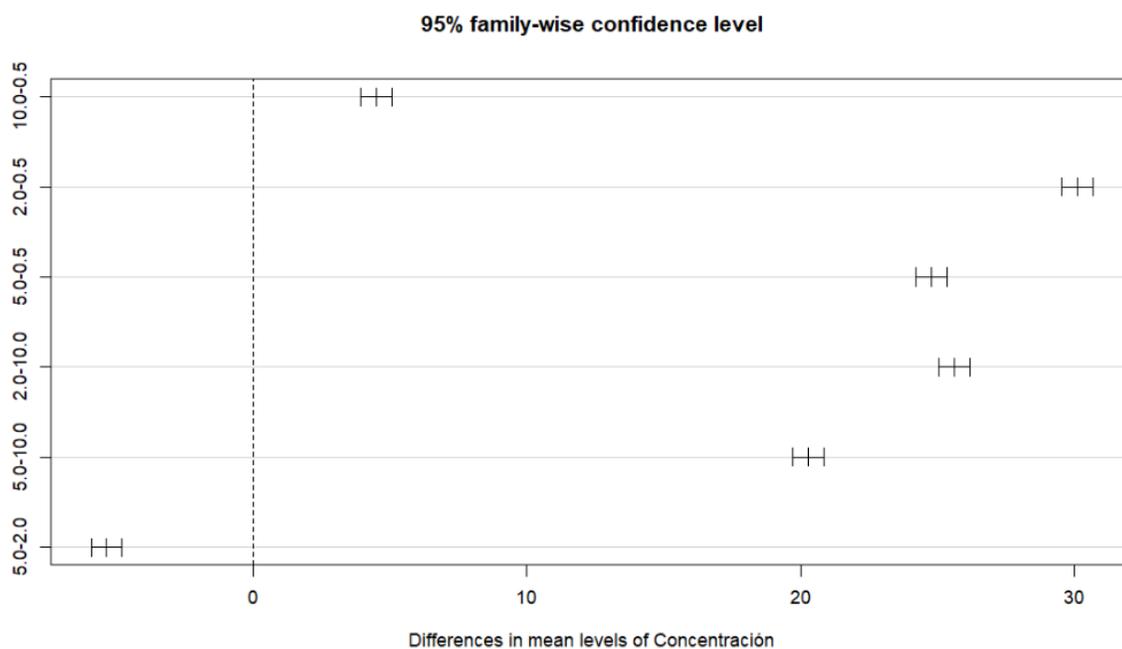
*Gráfico 4. Prueba de Tukey para concentración – Tritón X-100*



*Fuente elaboración propia*

En el gráfico 4 se observa que con un nivel de confianza del 95%, si existen diferencias entre todas las concentraciones de Tritón X-100 evaluadas, se observa que la menor diferencia se presenta entre las concentraciones 5.0mg/L y 2.0mg/L. Este resultado confirma los resultados obtenidos en la prueba de comparación pareada.

Gráfico 5. Prueba de Tukey para concentración – LAS



Fuente elaboración propia

Los resultados mostrados en la gráfica 5 muestran que con un nivel de confianza del 95%, si existen diferencias entre todas las concentraciones de LAS evaluadas. Las menores diferencias se dan entre las concentraciones 2.0mg/L y 5.0mg/L, así como en 10.0mg/L y 0.5mg/L.

## **DISCUSIONES**

Dentro de la información contenida en el método OECD se establece que es posible usar concentraciones de 2.0mg/L a 5.0mg/L en la ejecución del ensayo de biodegradabilidad y que para productos altamente biodegradables es posible usar concentraciones de 10.0mg/L. En esta investigación se usó un tensoactivo como el LAS que está catalogado como fácilmente biodegradable, sin embargo, los resultados indican que cuando se siembran concentraciones como las establecidas por OECD sí existen diferencias.

Los hallazgos plantean que los laboratorios no pueden obtener resultados reproducibles, si no se establece antes una concentración que permita alcanzar el máximo de biodegradabilidad del producto de interés que se esté evaluando, esta situación tendría que ser considerada por laboratorios que quieran implementar la oferta de un ensayo de aptitud para este procedimiento.

## **CONCLUSIONES**

1. Con un nivel de significancia del 5%, sí existen diferencias significativas entre los porcentajes de biodegradabilidad obtenidos usando las diferentes concentraciones propuestas en el método OECD 301D, debido a que la misma concentración de microorganismos no puede ejercer actividad de forma similar en dos concentraciones distintas de producto.
2. Con un nivel de significancia del 5%, se puede concluir que el uso de volúmenes diferentes no afecta la determinación del porcentaje de biodegradabilidad de un producto, debido a que las concentraciones del producto se mantienen inalteradas en los dos volúmenes.

3. La variabilidad de los datos puede ser explicada en más de un 90% por un modelo gaussiano.
4. La concentración de 2.0 mg/L permite obtener los mayores porcentajes de biodegradabilidad tanto en el tensoactivo aniónico con un valor promedio de 96.08% como en el tensoactivo no iónico con un valor promedio de 86.69%.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albuquerque de Sousa, Clayton, & Andrade Lira Junior, Mario, & Caraciolo Ferreira, Rinaldo Luiz (2012). Avaliação de testes estatísticos de comparações múltiplas de médias. Revista Ceres, 59(3),350-354. ISSN: 0034-737X.

[https://www.redalyc.org/biblioteca.libertadores.edu.co/articulo.oa?id=305226841008](https://www.redalyc.org/biblioteca/libertadores.edu.co/articulo.oa?id=305226841008)

Conagin A, Barbin D y Demétrio CGB (2008) Modifications for the Tukey test procedure and evaluation of the power and efficiency of multiple comparison procedures. Scientia Agricola, 65:428-432.

<https://www.scielo.br/j/sa/a/sXBMFpQvzz5p3Nyq5Dvfvdy/?lang=en>

Díaz Díaz M.A, Rivas Trasancos L, Martínez González J, Teuteló Núñez R y Salazar Alemán D. (2020). Aplicación del método zahn-wellens para determinar biodegradabilidad de un producto antiderrames. Revista Cubana de Química Vol. 32, págs. 262-272.

[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2224-54212020000200262](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212020000200262)

Ivanković T. y Hrenović J. (2010). Surfactants in the environment. Arh. Hig. Rada Toksikol. 61 (1), 95-110.

<https://sciendo.com/article/10.2478/10004-1254-61-2010-1943>

Lechuga M.M. (2005). Biodegradación y toxicidad de tensioactivos comerciales. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad de Granada. Granada, España, pág 49.

[https://www.researchgate.net/publication/46589477\\_Biodegradacion\\_y\\_toxicidad\\_de\\_tensi\\_oactivos\\_comerciales](https://www.researchgate.net/publication/46589477_Biodegradacion_y_toxicidad_de_tensi_oactivos_comerciales)

Lee R.J. y Saylor J.R. (2010). The effect of a surfactant monolayer on oxygen transfer across an air/water interface during mixed convection. *Int. J. Heat Mass Transfer* 53 (17-18), 3405-3413.

<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.711.1453&rep=rep1&type=pdf>

Martínez Espinosa F.A y Mendoza Arriaza F.C. (2021). Estimación de Biodegradabilidad del Efluente de las aguas residuales del CIRA/UNAN-Managua según ISO 10707 y OECD 301D. *Revista científica de FAREM-Estelí Núm 37, ISSN:2305-5790.*

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7875254>

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico. (1992). *OECD Guideline For Testing Of Chemicals*. OECD. Págs 1:62.

<https://www.oecd.org/chemicalsafety/risk-assessment/1948209.pdf>

Resolución 0689 de 2016 [Ministerio de Salud y Protección Social y del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por la cual se adopta el reglamento técnico que establece los límites máximos de fósforo y la biodegradabilidad de los tensoactivos presentes en detergentes y jabones, y se dictan otras disposiciones. 3 de mayo de 2016.

<https://www.minambiente.gov.co/normativa/>

Romero J.A. (1996). *Acuiquímica*. Presencia. Santafé de Bogotá. 56 pp.

Vázquez-Rodríguez G.A. y Beltrán-Hernández R.I. (2004) Pruebas normalizadas para la evaluación de la biodegradabilidad de sustancias químicas. Una revisión. *Interciencia* 29(10): 568-572.

<https://www.researchgate.net/publication/236149478> Pruebas normalizadas para la evaluacion de la biodegradabilidad de sustancias quimicas Una revision