

Prefactibilidad de uso de la AUV_{254} como sustituto de la DBO para evaluar lagunas de estabilización

Andrea Ayala Porras*, Jonathan Gelvis López** y Jairo A. Romero Rojas***

Las lagunas de estabilización constituyen el sistema de tratamiento de aguas residuales más sencillo y probablemente más apropiado para países donde los recursos económicos son escasos. La cuantificación de la remoción de DBO en las lagunas de estabilización es un requisito necesario para conocer los parámetros de diseño de dichos sistemas y para controlar su rendimiento. La factibilidad de uso de la AUV_{254} como parámetro sustitutivo de la DBO en la evaluación de la remoción de materia orgánica, constituye el objeto principal de este trabajo⁽¹⁾.

INTRODUCCIÓN

Dentro del propósito de proveer tratamiento secundario a las aguas residuales municipales, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (Usepa, por su sigla en inglés) ha establecido criterios para efluentes secundarios, aceptando para lagunas de estabilización concentraciones promedios mensuales de DBO y sólidos suspendidos de 45/45 mg/L o concentraciones promedio semanales de SS/DBO de 65/65 mg/L.

Algunos componentes orgánicos encontrados comúnmente en el agua y en aguas residuales como lignina, tanino, sustancias húmicas y varios componentes aromáticos, absorben fuertemente radiación ultravioleta⁽²⁾. La AUV es un parámetro sustitutivo útil para medir componentes orgánicos de aguas naturales, aguas salinas y aguas residuales. Pueden existir fuertes correlaciones entre la AUV y el contenido de carbono orgánico, el color, los precursores de trihalometanos y otros subproductos de la desinfección. La absorción UV también puede utilizarse como parámetro de control de efluentes industriales y para evaluar eficiencia en remoción orgánica. La

absorción específica de radiación ultravioleta (AEUV), o relación entre la AUV y la concentración de carbono orgánico (L/cm.mg C) se ha usado para caracterizar materia orgánica natural. La concentración de carbono orgánico disuelto, o COD, puede hacerse determinando la absorbancia de luz ultravioleta o AUV a 254 nm.

$$AEUV = \frac{AUV_{254}}{COT} \quad (1)$$

Los compuestos orgánicos del agua absorben luz UV en proporción a su concentración. Las muestras se filtran para controlar las variaciones en la absorción UV causadas por partículas (el ajuste de pH antes de filtrar es opcional). La absorción UV se mide a 253,7 nm,

La AUV es un parámetro sustitutivo útil para medir componentes orgánicos de aguas naturales, aguas salinas y aguas residuales.

aunque la selección de la longitud de onda es arbitraria; históricamente, 253,7 nm se ha usado como la longitud de onda estándar; sin embargo, un analista experimentado puede escoger una longitud de onda diferente, que minimice las interferencias de compuestos distintos del de interés y maximice la absorción de éste.

* Ingeniera civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

** Ingeniero civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

*** I.C., MEEE, profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería
jromero@escuelaing.edu.co

Las principales interferencias en la medida de la absorción UV se deben a las partículas coloidales, a sustancias orgánicas diferentes de la de interés y a compuestos inorgánicos absorbentes de luz UV, principalmente hierro ferroso, nitrato, nitrito y bromuro. Algunos oxidantes y agentes reductores, tales como el ozono, clorato, clorito, cloraminas y tiosulfato, también absorberán luz UV a 253,7 nm. Muchas aguas naturales y aguas procesadas en plantas de potabilización están libres de estas interferencias. Como la absorción UV por la materia orgánica puede variar para valores de pH por debajo de 4 o arriba de 10, se deben evitar estos valores para el ensayo.

Un barrido de absorción UV entre 200 y 400 nm puede usarse para determinar la presencia de interferencias. Los espectros típicos de absorción de materia orgánica natural son curvas sin características distintivas que aumentan la absorción con el decrecimiento de la longitud de onda. Los picos agudos o irregularidades en la absorción pueden ser indicativos de interferencias inorgánicas o de contaminantes orgánicos inesperados. Como muchos compuestos orgánicos en aguas y aguas sucias (ejemplo: ácidos carboxílicos y carbohidratos) no absorben significativamente luz UV, se debe correlacionar la AUV con el carbono orgánico disuelto o con la demanda química de oxígeno soluble. Sin embargo, dichas correlaciones varían de un agua a otra y entre aguas crudas y aguas tratadas. Además, la oxidación química (ejemplo: ozonización, cloración) de la materia orgánica puede reducir la absorción UV sin remover la materia orgánica y así puede cambiar las correlaciones. La absorción UV y las correlaciones con la absorción UV son específicas de cada sitio y pueden no ser comparables de una fuente de agua a otra.

Se consideran materia orgánica natural⁽⁹⁾ (MON) las sustancias húmicas provenientes del suelo y producidas en aguas naturales mediante procesos químicos y biológicos de descomposición de vegetación y otros materiales orgánicos. Las sustancias húmicas se definen según el método para extraerlas del agua o del suelo y se dividen en ácidos fúlvicos solubles y en ácidos húmicos menos solubles; en aguas naturales predominan los ácidos fúlvicos solubles.

La concentración de MON se expresa por el contenido de carbono orgánico total (COT), el cual se considera igual al carbono orgánico disuelto (COD), más el carbono orgánico particulado (COP). Se define como COD aquel que pasa a través de un filtro de 0,45 µm de poro y COP aquel que es retenido sobre el filtro.

La mayor parte de las aguas subterráneas de Estados Unidos tienen un COD menor de 2 mg/L, aguas oligo-

tróficas de lagos entre 2 y 10 mg C/L, aguas de ríos de montaña entre 1 y 3 mg C/L y aguas de ríos grandes entre 2 y 10 mg C/L. La concentración promedio de COT en aguas crudas de plantas de purificación, en Estados Unidos, es de 4 mg C/L⁽³⁾.

Existe una correlación directa entre el valor del COT de un agua y su potencial de formación de trihalometanos (PFTHM) dada por la siguiente ecuación:

$$\text{PFTHM} = 43,78 (\text{COT})^{1,248} \quad (2)$$

Donde:

PFTHM = potencial de formación de trihalometanos, µg/L.

COT = carbono orgánico total, mg C/L.

La MON absorbe luz ultravioleta, razón por la cual la absorbancia de luz ultravioleta a una longitud de onda de 254 nm (AUV₂₅₄) se usa como indicador sustitutivo del COT. También se utiliza como indicador la relación entre la AUV₂₅₄ y la concentración de carbono orgánico, conocida como absorbancia específica de luz ultravioleta (AEUV).

$$\text{AEUV} = \frac{\text{AUV}_{254}}{\text{COT}} \quad (3)$$

Donde:

AEUV = absorbancia específica ultravioleta, L/mg C·cm.

AUV₂₅₄ = absorbancia de luz ultravioleta a 254 nm, cm⁻¹.

COT = carbono orgánico total, mg C/L.

Aguas con una fracción ácida húmica, generalmente con COD bajo, tienden a tener valores de AEUV menores de 2 L/mg C·m, mientras que aguas con fracción ácida húmica alta tienen valores de AEUV entre 3 y 5 L/mg C·m. En la práctica, de acuerdo con la ecuación 2, aguas con contenido mínimo de COT tienen AUV₂₅₄ menores de 4 m⁻¹ o 0,04 cm⁻¹.

En términos de DBO:

$$\text{AEUV} = \frac{\text{AUV}_{254}}{\text{DBO}} \quad (4)$$

Donde:

AEUV = absorbancia específica ultravioleta, L/mg DBO cm.

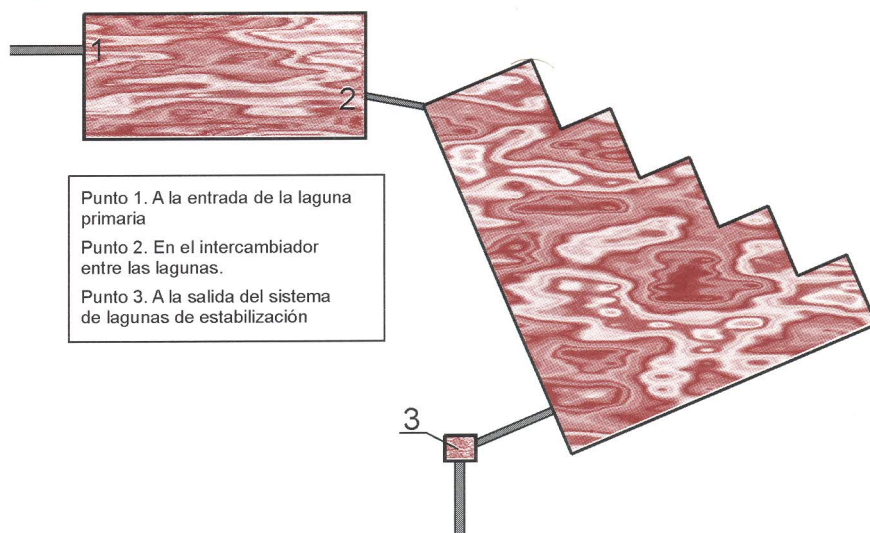
AUV₂₅₄ = absorbancia de luz ultravioleta a 254 nm, cm⁻¹.

DBO = demanda bioquímica de oxígeno, mg DBO/L.

METODOLOGÍA

El sistema de tratamiento utilizado para este estudio está compuesto por dos lagunas anaerobias en serie. La planta de tratamiento cuenta con una estructura de entrada,

compuesta por un tanque con aliviadero al cual llega una tubería de 24" de diámetro, con una pendiente del 0,98%. Por la vertiente norte se conecta además una tubería de 28" de diámetro con una pendiente del 0,1%. Mediante un sistema de derivación (*by-pass*), en tubería de 24" de diámetro, se pueden descargar las aguas directamente a la fuente receptora. Existe para aforo, a la entrada, una canaleta Parshall con un ancho de garganta de 22,9 cm y, a la salida, un vertedero triangular de 90°.



Punto 1. A la entrada de la laguna primaria
 Punto 2. En el intercambiador entre las lagunas.
 Punto 3. A la salida del sistema de lagunas de estabilización

MUESTREO

Se realiza en forma manual en los tres puntos indicados en la figura 1:

- Punto 1. A la entrada de la laguna primaria.
- Punto 2. En el intercambiador entre las lagunas.
- Punto 3. A la salida del sistema de lagunas de estabilización.

Se tomaron muestras compuestas de cuatro litros, proporcionales al caudal, a partir de seis muestras simples diarias en cada punto entre las 7:00 a.m. y 9:30 a.m., con intervalos entre ellas de 30 minutos.

AFORO

Para el caudal afluyente se usó la canaleta Parshall de la unidad de entrada y para el caudal efluente el vertedero triangular de 90° de la unidad de salida⁽⁶⁾.

RESULTADOS

Los ensayos de DBO, AUV₂₅₄, OD y temperatura se hicieron de conformidad con las normas del Standard Methods⁽²⁾.

En las tablas 1 a 9 y en las figuras 2 a 8 se incluyen los resultados de la caracterización del agua cruda y de los efluentes primario y secundario de la PTAR.

Figura 1. Esquema de las lagunas y puntos de muestreo.

Tabla 1
 Caracterización del agua residual

Fecha de muestreo	Caudales promedio		Clase	OD (mg/L)	Temperatura prom. (°C)	DBO (mg/L)	AUV ₂₅₄ (cm ⁻¹)	AEUV (L/mg DBO cm)
	Q _{afluente} (L/s)	Q _{efluente} (L/s)						
Feb. 16	64,8	24,7	Cruda	0	18	160	1,52	0,0095
			Primaria	0	17	94	1,26	0,0134
			Secundaria	0	17	43	0,98	0,0229
Feb. 23	52,4	31,3	Cruda	0	18	135	1,19	0,0088
			Primaria	0	17	114	1,32	0,0116
			Secundaria	0	17	78	1,06	0,0137
Mar. 01	60,6	35,0	Cruda	0	19	191	1,21	0,0063
			Primaria	0	18	144	1,32	0,0092
			Secundaria	0	18	56	1,01	0,0179
Mar. 08	56,4	38,9	Cruda	0	18	157	1,04	0,0066
			Primaria	0	19	118	1,10	0,0093
			Secundaria	0	18	57	0,98	0,0173
Mar. 15	64,8	31,3	Cruda	0	18	170	1,13	0,0067
			Primaria	0	19	150	1,15	0,0076
			Secundaria	0	19	49	0,90	0,0185
Mar. 29	56,4	31,3	Cruda	0	18	179	1,15	0,0064
			Primaria	0	19	113	1,11	0,0098
			Secundaria	0	19	69	0,98	0,0142
Abr. 19	60,6	35,0	Cruda	0	18	145	0,86	0,0059
			Primaria	0	17	124	0,86	0,0070
			Secundaria	0	19	64	0,76	0,0117
Abr. 26	52,4	31,4	Cruda	0	17	151	0,83	0,0055
			Primaria	0	18	88	0,85	0,0097
			Secundaria	0	18	50	0,73	0,0148
May. 03	56,4	35,0	Cruda	0	17	172	0,91	0,0053
			Primaria	0	18	84	0,86	0,0102
			Secundaria	0	18	45	0,78	0,0174
May. 10	52,4	27,9	Cruda	0	18	174	0,88	0,0051
			Primaria	0	19	108	0,89	0,0082
			Secundaria	0	18	42	0,77	0,0181

Tabla 2
Eficiencias de remoción de DBO

Fecha de muestreo 2004	Eficiencia primaria (%)	Eficiencia secundaria (%)	Eficiencia total (%)	Agua cruda	DBO	
					Efluente primario	Efluente secundario
Feb. 16	41	55	73	160	94	43
Feb. 23	16	32	43	135	114	78
Mar. 01	25	61	71	191	144	56
Mar. 08	25	52	64	157	118	57
Mar. 15	12	68	71	170	150	49
Mar. 29	37	39	61	179	113	69
Abr. 19	15	48	56	145	124	64
Abr. 26	42	43	67	151	88	50
May. 03	51	47	74	172	84	45
May. 10	38	61	76	174	108	42
Promedio	30	50	66	164	114	55
Desv. estándar	13	10	10	16	22	12
Intervalo	12-51	32-68	43-76	135-191	84-150	42-78

Tabla 3
Características de operación laguna primaria

Fecha de muestreo 2004	Q _{afluente} (m ³ /d)	DBO (mg/L)	COS (kg DBO/ha d)	COV (g DBO/m ³ d)	Tiempo de retención (días)
Feb. 16	5.602	160	1.649	37	4
Feb. 23	4.523	135	1.130	25	5
Mar. 01	5.233	191	1.973	41	5
Mar. 08	4.874	157	1.314	31	5
Mar. 15	5.602	170	1.760	39	4
Mar. 29	4.874	179	1.492	36	5
Abr. 19	5.233	145	1.502	31	5
Abr. 26	4.523	151	1.261	28	5
May. 03	4.874	172	1.781	34	5
May. 10	4.523	174	1.451	32	5
Promedio	4.986	164	1.531	33	5
Desv. estándar	416	16	261	4	0
Intervalo	4.523-5.602	191-135	1.130-1.973	25-41	4-5

Tabla 4
Características de operación laguna secundaria

Fecha de muestreo 2004	Q _{afluente} (m ³ /d)	DBO (mg/L)	COS (kg DBO/ha d)	COV (g DBO/m ³ d)	Tiempo de retención (días)
Feb. 16	5.602	94	144	7	16
Feb. 23	4.523	114	141	7	16
Mar. 01	5.233	144	220	10	15
Mar. 08	4.874	118	146	8	15
Mar. 15	5.602	150	230	12	15
Mar. 29	4.874	113	140	8	15
Abr. 19	5.233	124	190	9	16
Abr. 26	4.523	88	108	5	16
May. 03	4.874	84	129	6	16
May. 10	4.523	108	134	7	16
Promedio	4.986	114	158	8	16
Desv. estándar	416	22	40	2	1
Intervalo	4.523 - 5.602	84 - 150	108 - 230	5 - 12	15 - 16

En la tabla 1 se muestran los valores de oxígeno disuelto del agua cruda, del efluente primario y del efluente secundario. En todos los casos el OD es igual a cero, lo cual indica que tanto el afluente como el efluente primario y el efluente secundario carecen de OD y por tanto todo el sistema de tratamiento es de tipo anaerobio.

En las tablas 1 y 8, así como en la figura 2, se muestran los valores correspondientes a la temperatura del agua, en los diferentes puntos de muestreo. En todos los casos, la temperatura máxima es de 19 °C y la temperatura mínima de 17 °C. De acuerdo con el artículo 72 del Decreto 1594 de 1984, el agua residual cruda o tratada cumple con la norma exigida para vertimiento, es decir, temperaturas menores de 40 °C. Para diseño se puede suponer una temperatura mínima de 17 °C.

En la figura 3, y en las tablas 1 y 5, se muestran los valores de DBO para el agua cruda, para el efluente primario y para el efluente secundario. Con un 90% de probabilidad se puede afirmar que la DBO del agua cruda oscila entre 135 y 191 mg/L, con un valor promedio de 164 mg/L. La DBO del efluente primario, con un 90% de probabilidad, oscila entre 84 y 150 mg/L, con un valor promedio de 114 mg/L. La DBO del efluente secundario varía entre 42 y 78 mg/L, con un valor promedio de 55 mg/L. El sistema de tratamiento está constituido por dos lagunas anaerobias en serie, con remoción mayor en la laguna secundaria, donde predomina probablemente la actividad metanogénica y la consecuente evolución hacia la atmósfera del metano.

El sistema de tratamiento genera un efluente con concentraciones (figuras 3 y 4) de DBO menores que el límite establecido por la EPA de 65

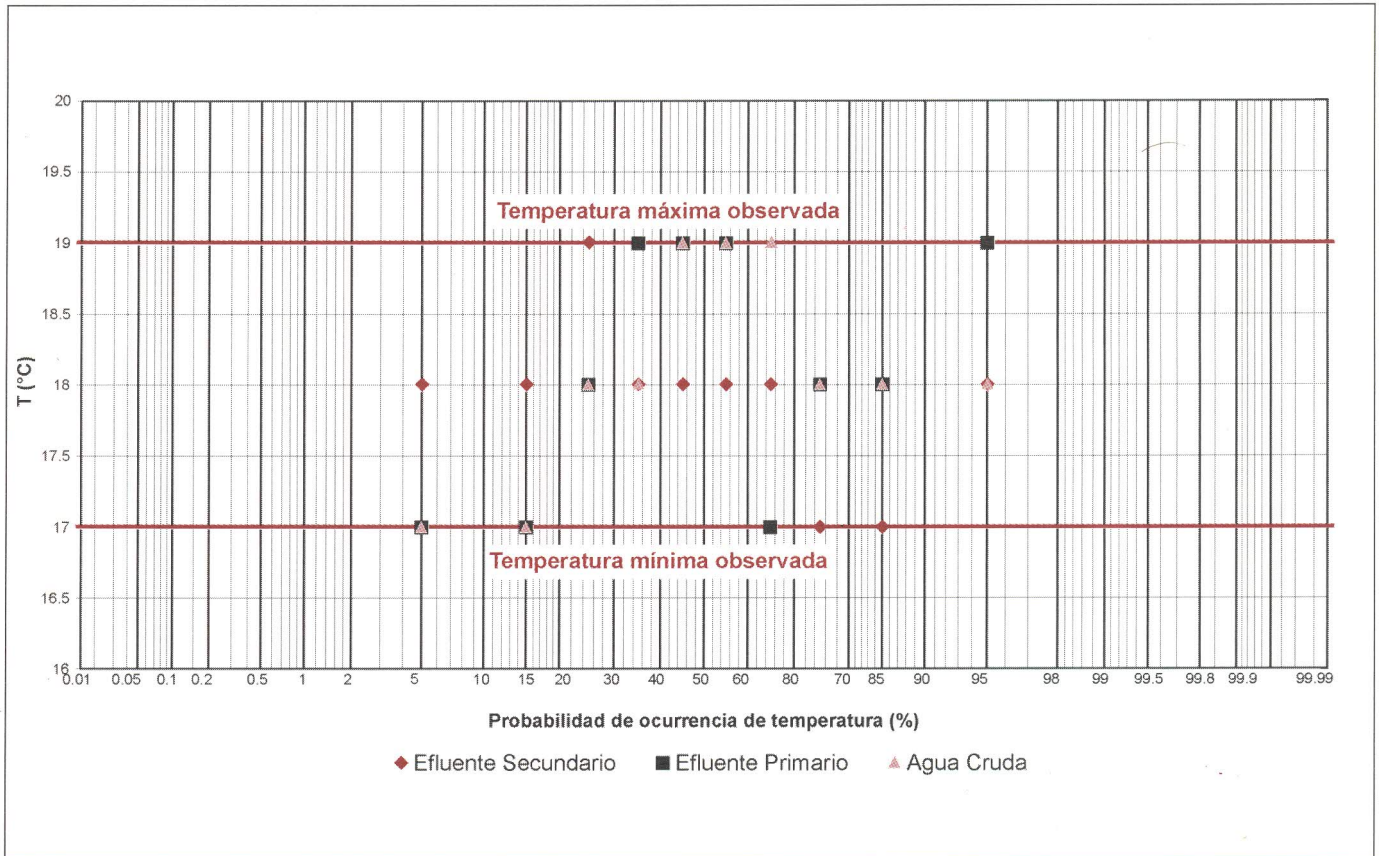


Figura 2. Temperatura sistema de tratamiento.

Tabla 5
DBO observada en el sistema de tratamiento

Fecha de muestreo 2004	DBO (mg/L)		
	Agua cruda	Efluente primario	Efluente secundario
Feb. 16	160	94	43
Feb. 23	135	114	78
Mar. 01	191	144	56
Mar. 08	157	118	57
Mar. 15	170	150	49
Mar. 29	179	113	69
Abr. 19	145	124	64
Abr. 26	151	88	50
May. 03	172	84	45
May. 10	174	108	42
Promedio	164	114	55
Desv. estándar	16	21	12
Intervalo	135 - 191	84 - 150	42 - 78

Tabla 6
AUV₂₅₄ observada en el sistema de tratamiento

Fecha de muestreo 2004	AUV ₂₅₄ (cm ⁻¹)		
	Agua cruda	Efluente primario	Efluente secundario
Feb. 16	1,52	1,26	0,98
Feb. 23	1,19	1,32	1,06
Mar. 01	1,21	1,32	1,01
Mar. 08	1,04	1,10	0,98
Mar. 15	1,13	1,15	0,90
Mar. 29	1,15	1,11	0,98
Abr. 19	0,86	0,86	0,76
Abr. 26	0,83	0,85	0,73
May. 03	0,91	0,86	0,78
May. 10	0,88	0,89	0,77
Promedio	1,07	1,07	0,90
Desv. estándar	0,22	0,19	0,13
Intervalo	0,83 - 1,52	0,85 - 1,32	0,73 - 1,06

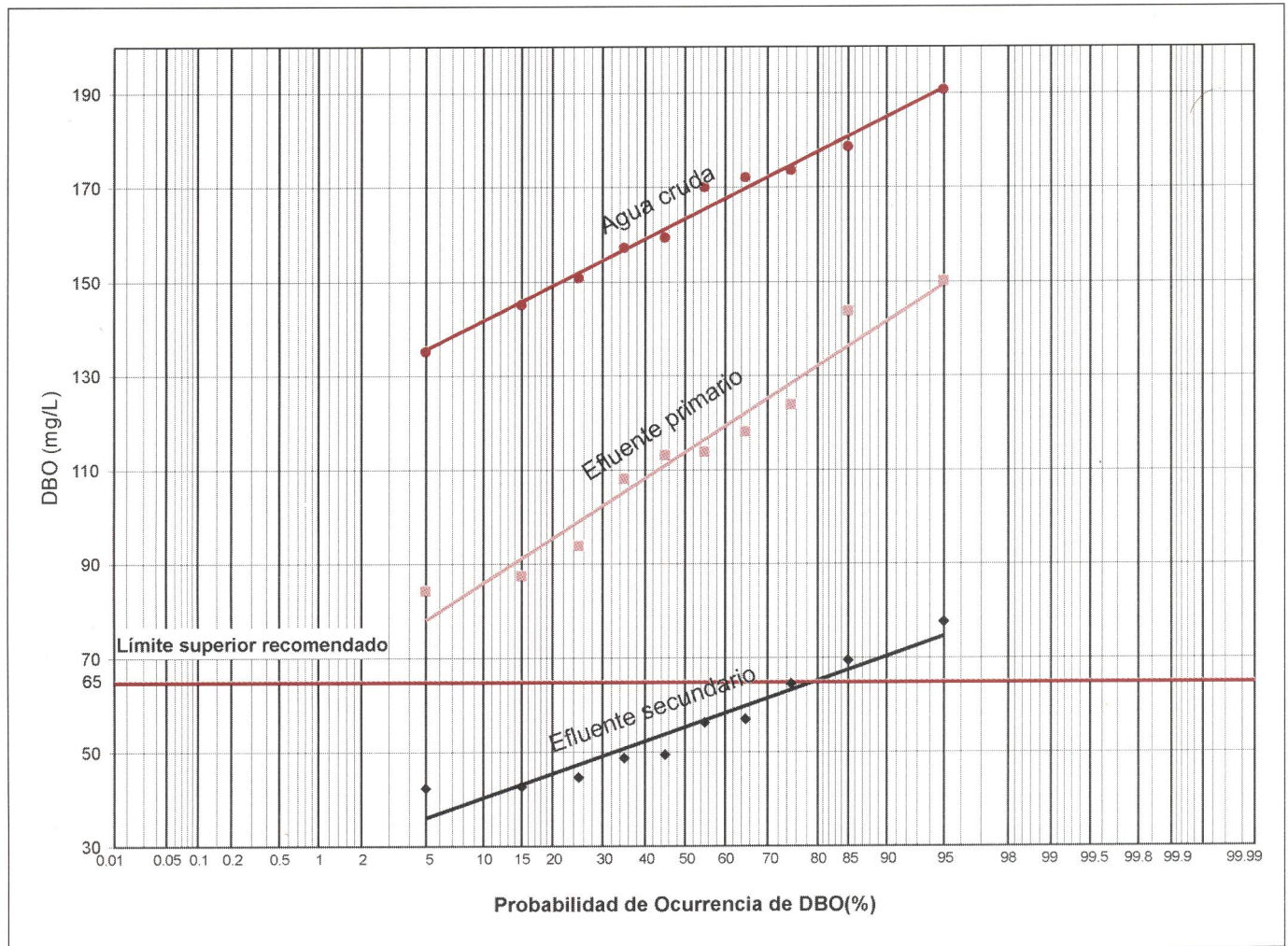


Figura 3. DBO sistema de tratamiento.

Tabla 7

AEUV observada en el sistema de tratamiento

Fecha de muestreo 2004	AEUV (L/mg DBO cm)		
	Agua Cruda	Efluente primario	Efluente secundario
Feb. 16	0,0095	0,0134	0,0229
Feb. 23	0,0088	0,0116	0,0137
Mar. 01	0,0063	0,0092	0,0179
Mar. 08	0,0066	0,0093	0,0173
Mar. 15	0,0067	0,0076	0,0185
Mar. 29	0,0064	0,0098	0,0142
Abr. 19	0,0059	0,0070	0,0117
Abr. 26	0,0055	0,0097	0,0148
May. 03	0,0053	0,0102	0,0174
May. 10	0,0051	0,0082	0,0181
Promedio	0,0066	0,0096	0,0166
Desv. estándar	0,0015	0,0019	0,0032
Intervalo	0,0051-0,0095	0,0070-0,0134	0,0117-0,0229

Tabla 8

Temperatura observada en el sistema de tratamiento

Fecha de muestreo 2004	Temperatura (°C)		
	Agua cruda	Efluente primario	Efluente secundario
Feb. 16	18	17	17
Feb. 23	18	17	17
Mar. 01	19	18	18
Mar. 08	18	19	18
Mar. 15	18	19	19
Mar. 29	18	19	19
Abr. 19	18	17	19
Abr. 26	17	18	18
May. 03	17	18	18
May. 10	18	19	18
Promedio	18	18	18
Desv. estándar	1	1	1
Intervalo	17 - 19	17 - 19	17 - 19

Tabla 9
Intervalos de DBO, AUV₂₅₄ y AEUV, en el sistema de tratamiento

Muestra	DBO (mg/L)	AUV ₂₅₄ (cm ⁻¹)	AEUV (L/mg DBO cm)
A. cruda	135 - 191	0,83 - 1,52	0,0051 - 0,0095
E. primario	84 - 150	0,85 - 1,32	0,007 - 0,0134
E. secundario	42 - 78	0,73 - 1,06	0,0117 - 0,0229
Global	42 - 191	0,73 - 1,52	0,0051 - 0,0229

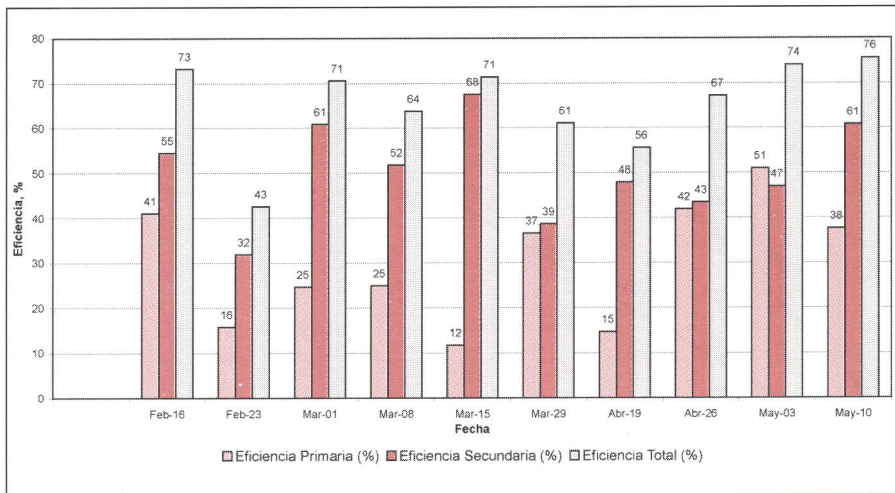


Figura 4. Eficiencia sistema de tratamiento.

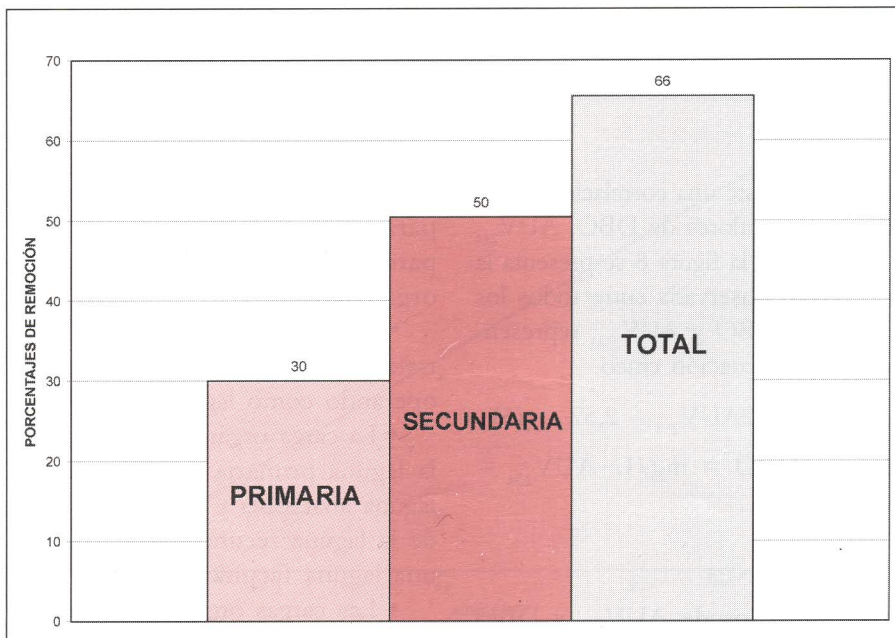


Figura 5. Eficiencias promedio del sistema de tratamiento.

mg/L, durante un 80% del tiempo. En general, se considera que para lagunas anaeróbicas⁽⁶⁾ con temperatura de 17 °C la eficiencia en remoción de DBO es del 50%; la laguna primaria evaluada sólo remueve un 30%, la secundaria un 50%, valor que coincide con el rango citado. Como se observa en las tablas 2 a 4 y en la figura 5, la laguna primaria tiene un tiempo de retención promedio de cinco días y una eficiencia promedio de remoción de DBO del 30%; de igual manera, la laguna secundaria tiene un tiempo de retención de 15 a 16 días y una eficiencia de remoción de DBO del 50% para una temperatura de 17 °C. La eficiencia global de remoción de DBO del sistema de tratamiento es del 66%.

En las tablas 3 y 4 se muestran los valores de las cargas de operación de las lagunas de estabilización. El análisis de dichas cargas permite establecer lo siguiente:

- La carga orgánica superficial de la laguna primaria, 1.531 kg DBO/ha d, es una carga orgánica superficial superior a la de diseño de una laguna facultativa, 200 kg DBO/ha d para el modelo de Mara, 300 kg DBO/ha d para el modelo de MacGarry y Pescod, confirmando el estado anaerobio observado en la laguna primaria.

- La carga orgánica superficial de la laguna secundaria, 158 kg DBO/ha d, no excede la carga de diseño de lagunas facultativas, contrariando el estado anaerobio observado en la laguna secundaria. Además, la laguna secundaria exhibe un tiempo de retención, 16 días, y una carga orgánica volumétrica, 8 g DBO/m³ d, aceptables para lagunas facultativas. Se puede presumir que la causa de esta contradicción de operación se debe a pérdida excesiva en el volumen útil de la laguna por acumulación de lodos o sedimentos, o a

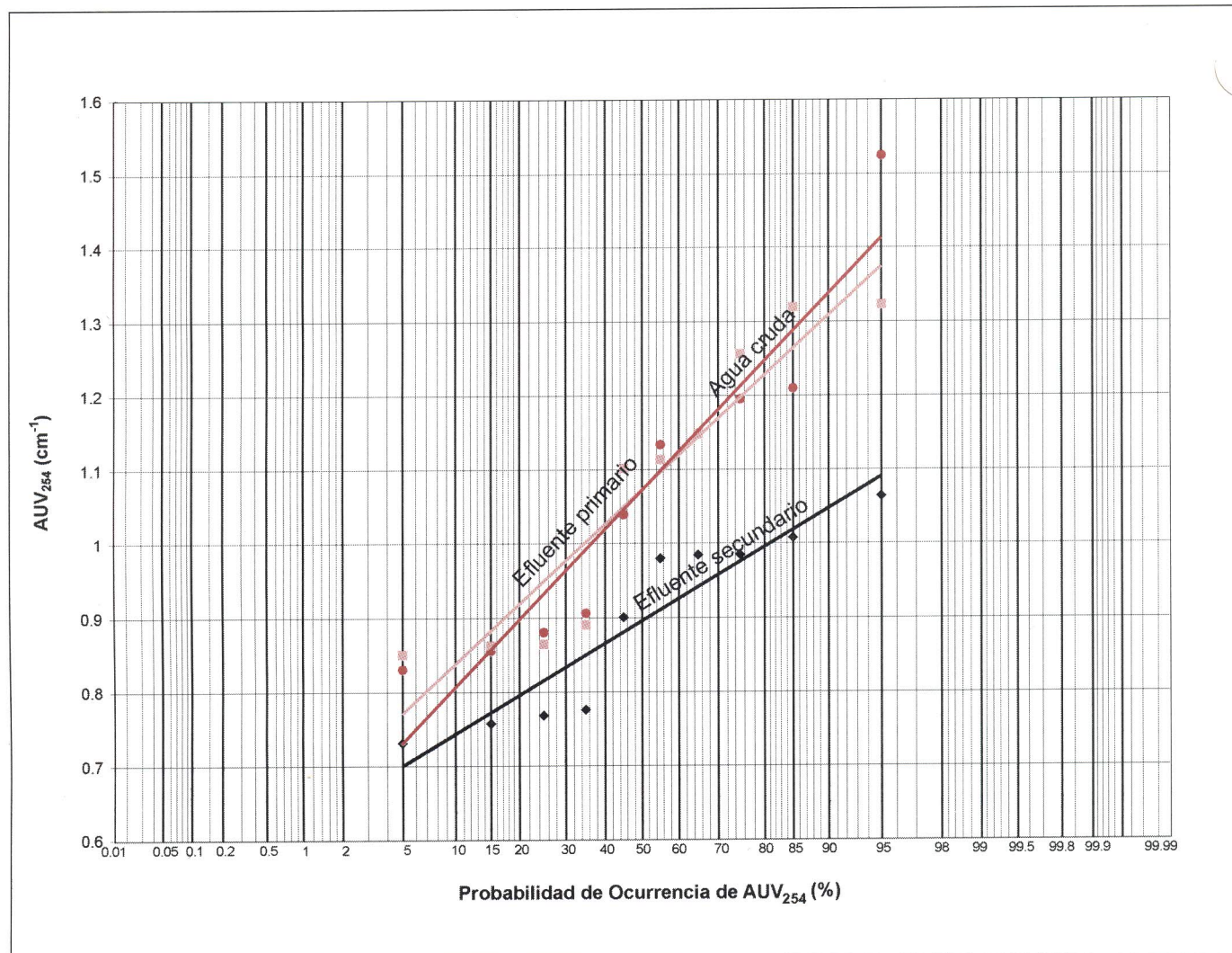


Figura 6. AUV_{254} sistema de tratamiento.

concentraciones tóxicas de sulfuros, valores superiores de 8 a 10 mg/L- $S^{(4)}$, que no permiten el desarrollo de una zona fótica ni el apropiado crecimiento de la población algal.

Todos los valores observados de AUV_{254} y $AEUV$ se presentan en las tablas y en las figuras 6 y 7. De dichas tablas y figuras se deduce que la AUV_{254} es siempre mayor de 0,73 y menor de 1,52, valores superiores en un factor de 18 a 38 veces el valor de AUV de 0,04 cm^{-1} para aguas de buena calidad, como era de esperarse. Como se observa en las figu-

ras 6 y 7, existe una correlación directa entre los valores de DBO, AUV_{254} y $AEUV$. En la figura 8 se presenta la correlación observada entre todos los valores de DBO y AUV_{254} , representada por la ecuación cinco.

$$DBO = 112AUV_{254} - 2,57 \quad (5)$$

Donde: DBO = mg/L; AUV_{254} = cm^{-1}

CONCLUSIONES

Los resultados de AUV_{254} y DBO permiten establecer tentativamente una correlación lineal entre ellos y

utilizar la AUV_{254} como posible parámetro sustitutivo de la DBO para evaluar remoción de materia orgánica.

- Las dos lagunas del sistema de tratamiento analizado se encuentran operando como lagunas anaerobias.

- La carga orgánica superficial de la laguna primaria es típica de una laguna anaerobia y la carga orgánica de la laguna secundaria es típica de una laguna facultativa.

- Las cargas orgánicas volumétricas son relativamente bajas para lagunas anaerobias.

• A pesar de que la carga orgánica superficial, la carga orgánica volumétrica y el tiempo de retención de la laguna secundaria son típicos de lagunas facultativas, la laguna se-

cundaria es anaerobia, probablemente debido a la presencia de concentraciones tóxicas de sulfuro (valores superiores de 8 a 10 mg/L-S), los cuales impiden el crecimiento de algas

y, por ende, la producción de oxígeno en la laguna.

• En la laguna primaria, la carga orgánica superficial es una carga que corresponde a una laguna anaerobia, así como el tiempo de retención.

• La eficiencia de remoción de DBO observada en la laguna primaria (30%) es inferior a la esperada de 50%, probablemente debido a una actividad predominante de fermentación ácida y no de fermentación metanogénica.

• El 80% del tiempo la DBO del efluente final es menor que 65 mg/L, valor recomendado por la Usepa para este tipo de sistema de tratamiento.

• Se recomienda continuar con este estudio para evaluar, con mayor certidumbre, si es posible encontrar una mejor correlación entre la AUV₂₅₄ y la DBO y, de esta manera, poder establecer el ensayo de AUV₂₅₄ como ensayo sustitutivo de la DBO.

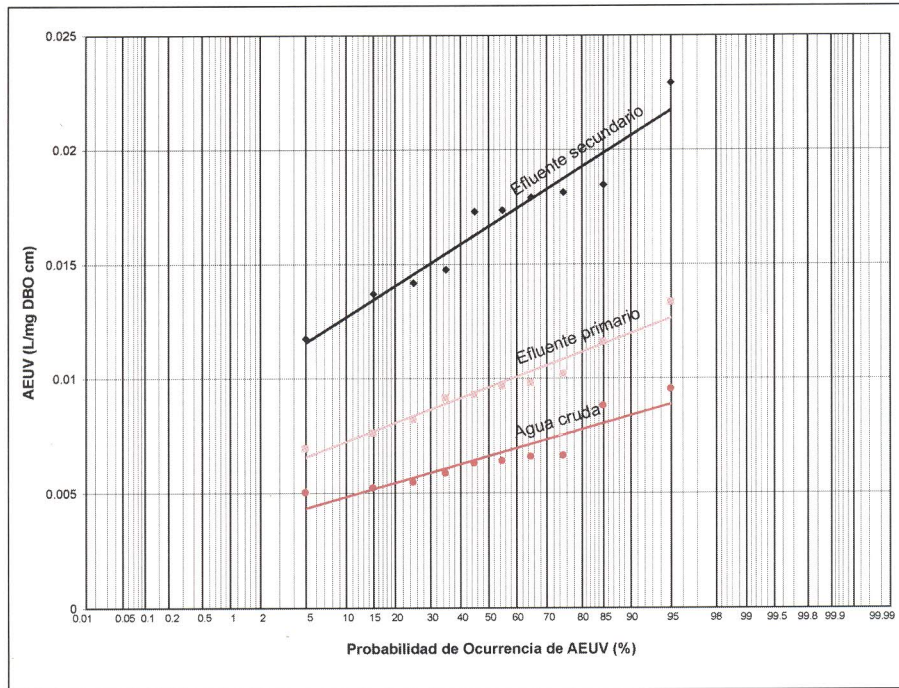


Figura 7. AEUV sistema de tratamiento.

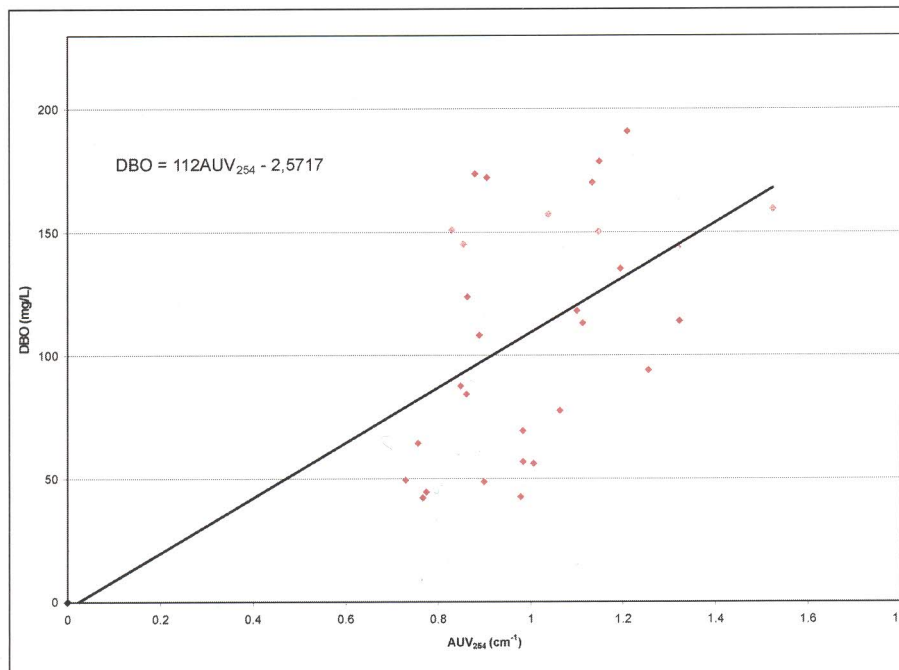


Figura 8. Correlación entre DBO y AUV₂₅₄.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Ayala P., G. A. y Gelvis L., J. A., *Remoción de materia orgánica en un sistema de tratamiento de lagunas de estabilización*, Bogotá, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, mayo de 2004.
- (2) Apha, Awwa, WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th edition, 1998.
- (3) Romero Rojas, Jairo Alberto, *Calidad del agua*, 1a. ed., Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, noviembre de 2002.
- (4) Romero Rojas, Jairo Alberto, *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*, 3a. ed., Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, febrero de 2004.
- (5) Romero Rojas, Jairo Alberto, *Acuitramiento por lagunas de estabilización*, 2a. ed., Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería (en preparación).