



**UNIVERSIDAD DE MATANZAS
"CAMILO CIENFUEGOS"
FACULTAD DE INGENIERIAS QUÍMICA – MECÁNICA.**

MONOGRAFÍA

**USO DEL CARBÓN ACTIVADO EN EL TRATAMIENTO DE
LAS AGUAS RESIDUALES ALBAÑALES**

Autor: Josefina del Carmen González Hernández.

Noviembre, 2006

USO DEL CARBÓN ACTIVADO EN EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES ALBAÑALES

Autor: Josefina del Carmen González Hernández.

Varadero es el mayor polo turístico de Cuba y por ende el que más incide en la economía nacional, por lo tanto proteger la playa y evitar su contaminación es una de las tareas principales en la provincia de Matanzas, de ahí que revista gran importancia el chequeo y control del tratamiento que reciben los residuales en esta importante zona turística.

La planta depuradora de referencia para la realización de este estudio recibe las aguas de servicios, baños, cocina-comedor y otras áreas de los hoteles pertenecientes a la cadena española Sol Meliá con un caudal de 1000 m³/ día.

La instalación está dotada de un pre-tratamiento que incluye el desbaste y el desgrase. Como tratamiento secundario posee un sistema por lodos activados en cuyo reactor biológico ocurre la degradación de la materia orgánica hasta dióxido de carbono y agua. Parte de los lodos resultantes del proceso de sedimentación se recirculan al reactor y los otros pasan a un digestor de lodos. El agua clara obtenida en este proceso es almacenada para pasar a un tratamiento terciario con zeolita como medio filtrante. El agua es utilizada en el regadío de las áreas verdes de los hoteles.

Las referencias bibliográficas reportan la aplicación de tratamientos terciarios y secundarios con el uso de adsorbentes para el mejoramiento de la calidad de las aguas tratadas

Es por ello que sobre la base de la búsqueda bibliográfica realizada, así como el resultado de la evaluación y los trabajos realizados a escala de laboratorio, la segunda etapa del trabajo contempló como segunda tarea la evaluación a escala piloto del tratamiento secundario con el uso del adsorbente.

La experimentación a escala piloto se realizó con el reactor – sedimentador construido según escalado descendente para simular la etapa de depuración. Se determinó la velocidad de sedimentación del residual a la salida del reactor. El análisis físico-químico y microbiológico del afluente y efluente de este sistema, comprueban el buen funcionamiento del sistema que a su vez fue corroborado por los parámetros de control.

En las Tablas 1 y 2 se reportan los principales resultados del trabajo experimental a escala piloto. De la interpretación de los datos en ellos reflejados se evidencia el carácter influyente de la presencia o no del carbón activado en la eficiencia del proceso en el reactor biológico donde se degrada la materia orgánica del efluente a tratar.

Tabla 1 Comportamiento de la eficiencia en la experimentación con carbón activado a escala piloto. Fecha de muestreo 31/3/97 al 4/4/97

Experimentos	DQO _e (mg/L)	DQO (mg/L)	Eficiencia (%)	pH	SST (mg/L)	SSF (mg/L)	SSV (mg/L)
4h con 100	592,00	14,03	97,63	7,6	1164	45,10	1118,90

4h con 150	472,00	31,86	93,25	7,8	1080	40,60	1039,40
4h con 200	496,00	53,77	89,16	7,7	1052	42,60	1009,40
8h con 100	592,00	111,12	81,23	7,7	976	33,10	942,90
8h con 150	472,00	90,95	80,73	8,0	1082	36,10	1045,90
8h con 200	496,00	117,90	76,23	7,8	916	37,10	878,90
12h con 100	592,00	123,25	79,18	7,7	708	60,10	663,40
12h con 150	472,00	59,85	87,32	7,8	1058	89,60	968,40
12h con 200	496,00	48,76	90,17	7,9	870	33,10	836,90

4h sin C	315,84	41,36	86,90	7,6	1066	57,1	1008,9
8h sin C	315,84	63,92	79,76	7,7	1164	52,6	1111,4
12h sin C	315,84	49,03	84,47	7,7	1250	50,1	1199,9

Sin embargo, esa influencia tiene características distintas ya que también se presenta una correlación entre la dosis de carbón y el tiempo de contacto del carbón. Queda claro que para pequeñas cantidades de carbón es más elevada la eficiencia de remoción de contaminantes a bajos tiempos de contacto. Sin embargo se alcanzan eficiencias equivalentes cuando se aumenta tanto la cantidad de carbón como el tiempo.

Por tanto queda implícita la importancia de seleccionar adecuadamente la opción más económica. En el caso que se analiza es obvio que ofrece más ventajas seleccionar la alternativa de menor tiempo y la menor dosis porque a su vez posibilita aumentar la capacidad del sistema. No obstante, el proceso de optimización permitió comprobar que precisamente la variante de menor tiempo y menor cantidad de carbón es la óptima.

De los resultados de la experimentación utilizando la mitad del tiempo de residencia hidráulico, se evidencia la factibilidad de asimilar mayor volumen de residual que el que actualmente recibe la planta del complejo turístico “Sol Palmeras”. Por lo tanto es fundamental realizar un análisis hidrodinámico del sistema dada la importancia que tiene este resultado para la protección del medio ambiente y para la economía.

El carbón NORIT ROW 0,8 que presenta las siguientes características (Reporte U.S.Food Cehemicals Codex . 3ra Edición, 1981):

Superficie total interna por BET – 900 m² / g

Adsorción al azul de metileno – 21 g / 100g

Adsorción de Yodo – 1050 mg / g

pH (rango normal) – alcalino

Contenido de cenizas – 6 %

Dureza – 92 %

Volumen total de poros – 1,0 mL / g

Densidad – 380 g / L

lo señalan como un excelente adsorbente comprobado por las isothermas de adsorción (Langmuir Tipo I), es precisamente su porosidad (microporoso) y el área superficial las que contribuyen a mantener su alta capacidad de adsorción tanto de moléculas largas y pequeñas tales como compuestos coloreados. (Parker, 1998)

Tabla 2 Análisis parasitológico en la experimentación con carbón activado a escala piloto.

Experimentos	Afluente	Efluente
--------------	----------	----------

4h sin carbón	5 larvas muertas, abundantes ciliados	Algunos copépodos, escasos ciliados
4h con 100 mg	2 larvas vivas y 1 muerta, algunos ciliados y copépodos	1 larva viva, algunos ciliados, abundantes copépodos
4h con 150 mg	Larvas muertas, ciliados escasos	Ciliados abundantes y copépodos
4h con 200 mg	1 larva muerta, abundantes ciliados	1 larva viva, algunos ciliados, abundantes copépodos
8h sin carbón	5 larvas muertas, abundantes ciliados	Algunos copépodos, escasos ciliados.
8 h con 100 mg	2 larvas vivas y 1 muerta, algunos ciliados y copépodos	1 larva viva, algunos ciliados, abundantes copépodos
8h con 150 mg	Larvas muertas y escasos ciliados	Larvas muertas y abundantes ciliados y copépodos
8h con 200 mg	1 larva muerta y abundantes ciliados	Larvas muertas y vivas, algunos copépodos y ciliados
12 sin carbón	5 larvas muertas, abundantes ciliados	Algunos copépodos, escasos ciliados, 1 larva viva
12h con 100 mg	2 larvas vivas y 1 muerta, algunos ciliados y copépodos	1 larva viva, algunos ciliados, abundantes copépodos
12h con 150 mg	Larvas muertas y algunos ciliados y no copépodos	No larvas, algunos ciliados, abundantes copépodos
12h con 200 mg	Larvas muertas, algunos ciliados y no copépodos	No larvas, algunos ciliados, abundantes copépodos

Los resultados parasitológicos también corroboran la influencia de la presencia del carbón en la depuración de las aguas albañales.

El uso del carbón activado en el proceso de depuración biológica de las aguas albañales tiene incidencia en la eficiencia del sistema.

- Existe una estrecha correlación entre la dosis de carbón activado a aplicar y el tiempo de contacto que se establezca entre el carbón y el afluente a tratar. Se obtienen resultados equivalentes cuando se establecen bajas dosis con tiempos pequeños a cuando se establecen altos tiempos de contacto con altas dosis de carbón.
- El empleo del carbón en el reactor biológico del sistema por lodos activados posibilita aumentar la capacidad del sistema, por lo cual se requiere continuar con el estudio hidrodinámico del mismo.
- El uso del carbón activado en la etapa depurativa confiere incidencias positivas en la remoción de patógenos.

Análisis de los resultados obtenidos en la experimentación a escala industrial

El ensayo industrial con utilización de carbón activado en el reactor biológico en el tratamiento secundario se realiza con la variante de 100 mg de carbón para 4h de aireación que corresponde a la mitad del tiempo de retención hidráulico. Para ello se procedió con la determinación de la estabilidad de la planta y los resultados obtenidos en los parámetros de control (pH, IVL, eficiencia y sólidos en el reactor biológico) presentan valores similares a los estipulados por lo que la planta depuradora trabaja de forma estable (Tabla 3).

Se emplea la dosis de 100 mg de carbón para 4 horas, que atendiendo al volumen del reactor de 0,0239 m³ representa 2,39 g. Para el reactor biológico industrial, la dosis inicial será 38,5 kg considerando la recirculación y reponiendo 3,5 kg diariamente.

Durante el ensayo industrial el muestreo se realiza según lo estipulado, tomando muestras puntuales a la entrada y salida de la etapa depurativa.

Durante los 10 días de experimentación se analizó el comportamiento del residual de entrada al sistema, y se analizó la composición físico-química del efluente en el tratamiento con carbón, tal y como se refleja en la Tabla 3.

Tabla 3. Comportamiento del residual de entrada al sistema durante la prueba industrial

Muestra	DQO _e [mg/L]	pH	Conductividad [μsm/cm]	Cloro [mg/L]	Amonio [mg/L]	Fosfato [mg/L]	DBO ₅
1	680	6.2	1480	95	11.0	24.0	83
2	672	6.4	1350	95	6.3	23.7	
3	675	6.5	1470	110	7.8	25.0	
4	681	7.2	1610	100	10.4	24.1	
5	666	6.4	1352	90	11.0	27.0	
6	680	7.1	1602	100	10.2	26.3	
7	677	6.6	1500	159	6.3	24.0	
8	672	6.4	1355	90	7.6	25.0	
9	681	6.8	1515	95	7.7	23.1	
10	666	6.3	1580	90	6.3	24.0	

Como se aprecia claramente el pH tiende a aumentar en las muestras tratadas con carbón con relación a las que no lo utilizan (Tabla 3). Este aumento es más notable en la primera fase de la experimentación, pero siempre se mantiene en un intervalo aceptable para la reproducción microbiana.

Las condiciones más adecuadas para el funcionamiento de este tipo de sistema se logran para un intervalo de pH entre 6,2 y 7,5, lo que se alcanza en la experimentación.

La conductividad disminuye con relación a las muestras tratadas sin carbón y en las que se usó el adsorbente primero aumenta y después disminuye lo que da idea del mayor o menor contenido de sales disueltas en el agua.

El contenido de cloruro varía primero y disminuye después en los casos en que fue utilizado el adsorbente. Al compararlo con las muestras iniciales es notable la disminución.

En Cuba está establecido aceptar aguas con un contenido de 250mg/L de cloruro sin ocasionar problemas en el vertimiento y como se observa se cumple en todo momento con este aspecto.

Igual comportamiento presentan los contenidos de iones calcio, magnesio y el hidrogenocarbonato, lo que se confirma con las variaciones de la conductividad eléctrica en el caso de la muestra evaluada con adsorbente.

Como se conoce el nitrógeno y el fósforo son nutrientes indispensables para el desarrollo de los microorganismos y aunque los tratamientos reducen el contenido de ambos, si las concentraciones presentes sobrepasan los requerimientos nutricionales de los microorganismos, los efluentes conducen a la contaminación de la naturaleza.

Está demostrado que los microorganismos requieren por cada 20% en masa de carbono consumido una parte del nitrógeno. En la práctica existen varias alternativas para eliminar el nitrógeno en exceso o el déficit del mismo. En este caso el contenido de nitrito disminuye significativamente hasta llegar a cero coincidiendo con lo planteado en la norma para vertimiento en costas que estipula valores muy pequeños cercanos a 0.02 mg/L (Seoánez 2000)

El contenido de amonio también se redujo, los valores oscilan entre 0.12 y 1.66 mg/L (siendo lo normado para este tipo de planta de 0 a 4 mg/L) por lo que puede considerarse que el contenido de nitrógeno es adecuado.

Una buena parte del fósforo del residual se elimina durante su sedimentación primaria, la cual se estima que puede estar alrededor del 10% del contenido total. Una vez realizado el tratamiento secundario el efluente debe presentar una concentración de 0 a 1 mg/L. Como se refleja en el Anexo # 17 al utilizar el carbón se logra reducir su contenido. La mayor reducción corresponde a la mayor eficiencia. Aunque no se llega a cumplir con lo normado, la disminución de fosfato es significativa según se aprecia en las muestras tratadas sin carbón.

Se plantean muchas vías para la disminución del contenido de fósforo, como por ejemplo la adición de agentes coagulantes (sales de aluminio III, hierro III) debido a lo perjudicial que puede ser un exceso del mismo, por tal motivo la norma de vertimiento establece que su contenido en el agua no debe alterar la ecología ni producir eutroficación de los cuerpos receptores (Mettcalf & Eddy, 1998)

Tanto la DQO como la DBO₅ son los parámetros que infieren el rendimiento del proceso depurativo, de ahí que se tomen como referencia en el cálculo de la eficiencia. La metodología experimental para la determinación de la DQO es menos engorrosa que para la DBO₅ y por tal motivo fue seleccionada la primera para realizar el cálculo del porcentaje de remoción.

En todos los casos analizados la DQO disminuye a la salida del sistema con relación a la entrada. Esta disminución es más significativa en las muestras tratadas con carbón, donde se obtiene un porcentaje de remoción en el intervalo de 94% a 97.94%.

Los valores de eficiencia con carbón son más significativos ya que de forma general presentan un comportamiento ascendente en comparación a los obtenidos en las pruebas donde no se utilizó carbón, aunque en un momento determinado tiene un punto de disminución hasta mantenerse prácticamente constante pero muy por encima al mayor valor de eficiencia en el proceso sin utilizar carbón activado. Este comportamiento está asociado al poder adsorbente del carbón dada su gran área superficial, por su acción floculante y

por la posibilidad de constituir un soporte para la acción degradativa de los microorganismos, como sucede en los filtros biológicos y otros sistemas de lecho fijo.

La norma de vertimiento en costas establece que la DBO₅ en los efluentes debe ser menor de 20mg/L, con la experimentación se demuestra que el uso del carbón activado propicia esos resultados.

La Tabla 4 reporta los valores del análisis microbiológico del efluente tratado con y sin carbón.

Tabla 4 Análisis microbiológico del efluente del lodo activado en el tratamiento con y sin carbón

	Coliformes Fecales (NMPx100mL)	
Días	Entrada	Salida
1	> 24 000	11 000
2	21 000	210
3	22 200	150
4	24 000	90
5	> 24 000	30
6	24 000	210
7	24 000	420
8	24 000	270
9	> 24 000	50
10	24 000	39
11	24 000	39

En el análisis microbiológico se encontró que el NMP por 100 mL de coliformes fecales totales es mucho más reducido a la salida que a la entrada, aspecto positivo a valorar ya que estos microorganismos sobreviven durante más tiempo en medio acuático que los patógenos intestinales.

De forma general el comportamiento observado en los sólidos es el esperado, con lo que se logra una disminución considerable en las muestras del efluente en el tratamiento con carbón.

En el caso de los sólidos disueltos está establecido que no deben producir en los cuerpos receptores concentraciones superiores a 1000mg/L y en todos los casos se observa el cumplimiento de esa norma.

Como se había señalado el tratamiento terciario con zeolita en la planta actual tiene como objetivo eliminar la presencia de coliformes fecales hasta valores cercanos a lo normado y que aún así no se logra, ya que oscila en un intervalo de 15000 a 18000 a la salida del mismo, sin embargo el uso del carbón activado en polvo erradica totalmente esta dificultad, por lo que se puede prescindir de los filtros y con una cloración, el agua pueda ser vertida al cuerpo receptor.

Como uno de los propósitos es utilizar el agua tratada en el riego, esta norma establece que el contenido superior de coliformes fecales por 100mL es de 1000, según lo observado, el uso del material adsorbente logra cumplir con esta normativa.

A continuación se presenta la Tabla 5 donde se muestran los resultados del examen parasitológico realizado a las muestras durante el período experimental con el uso del carbón activado:

Tabla 5 Análisis parasitológico del afluente y el efluente en el tratamiento con carbón activado. Fecha de muestreo: 11/05/98 al 21/05/98.

<u>Número de experimentos.</u>	<u>Análisis parasitológico.</u>
1	Larvas vivas, abundantes ciliados en el afluente. Algunos copépodos, escasos ciliados en el efluente .
2	Larvas vivas, algunos ciliados y escasos copépodos .
3	Larvas muertas, algunos ciliados y escasos copépodos.
4	No larvas, algunos copépodos y ciliados.
5	Una larva viva, algunos ciliados y copépodos.
6	Una larva viva, escasos ciliados y copépodos.
7 copépodos.	No larvas, escasos ciliados y
8 copépodos.	No larvas, escasos ciliados y
9 copépodos.	No larvas, algunos ciliados y
10	Una larva viva, escasos ciliados y algunos copépodos.
11 copépodos.	No larvas, escasos ciliados y algunos

Se destaca la presencia de *Strongyloides Stercorales* en el efluente aún después del tratamiento terciario con zeolita.

Con el uso del carbón disminuyen las larvas llegando a desaparecer.

Según se observa la influencia del carbón en cuanto a la depuración del agua albañal desde el punto de vista parasitológico también es satisfactorio ya que no sólo mueren las larvas sino que la presencia de ciliados y copépodos es limitada (Lunas, 1993)

Una forma más de controlar el funcionamiento de la planta, utilizando el adsorbente, fue la determinación del factor de carga (Bx) y el índice volumétrico de lodo (IVL).

A continuación se reflejan los valores obtenidos en el cálculo de estos parámetros:

Tabla 6 Parámetros de control en la planta de tratamiento por lodos activados.

Fecha de muestreo del 11/05/98 al 21/05/98.

X_a (kg / m ³)	DQO (kg / m ³)	SS (mL / L)	Bx(kg DQO/kg SS-día)	IVL (mL/g)
4	0.68	290	0.223	725
4	0.681	285	0.26	71.25
4	0.666	295	0.256	73.75
4.11	0.68	291	0.259	70.8
4.21	0.677	295	0.25	70.07
4.32	0.672	300	0.249	69.4
4.1	0.681	296	0.257	72.19
4.03	0.666	297	0.27	73.69

El factor de carga cuantifica la relación entre el aporte de contaminante y la cantidad presente en el estanque de aireación y define el intervalo de operación del sistema, que para condiciones normales se encuentra entre 0.25 y 0.35 kg DQO / kgSST x día, es evidente que el comportamiento en los diez días de experimentación concuerda con lo previsto ya que el factor de carga se mantuvo en el intervalo antes señalado.

El índice volumétrico de lodo, que indica el volumen que ocupa un gramo de lodo, se recomienda mantener entre 70 y 150 mL/g minimizando de esta forma la presencia de lodos flotantes en el sedimentador, así como el hinchamiento de lodo producido como consecuencia de la proliferación de bacterias filamentosas. En el período de muestreo no se observaron estas dificultades y el índice se mantuvo en los valores adecuados.

El procesamiento estadístico mediante la aplicación de una dócima *t* para la media de una población comprueba la posibilidad del empleo del carbón en el tratamiento secundario. Esto conlleva a la adición de un tanque para la suspensión de carbón activado.

Fundamentos de la aplicación del carbón activado en polvo en el tratamiento de aguas residuales albañales por un sistema de Lodos Activados:

En el caso en estudio, la efectividad del carbón Norit empleado, está dada por su área superficial interna (900 m²/ g por BET), así como por la estructura

microporosa que lo caracteriza lo cual evidencia su capacidad de adsorción, y según los resultados obtenidos es posible asumir que también posibilita la retención de los microorganismos (Coliformes Fecales), que es uno de los objetivos que busca la experimentación.

Según Parker. I y Donald. H.1998, cada kilogramo de carbón activado puede adsorber entre 200 y 400 g de materia orgánica antes de requerir ser regenerado, por lo que el uso del Norit ROW 0,8 con la dosis previamente determinada ha quedado demostrado que puede ser una vía para mejorar la calidad del agua tratada, además de ser suficiente pequeñas cantidades para los 10 días de edad del lodo al considerar que su disposición final será la misma del lodo seco, comportándose en este caso como un suplemento nutritivo dentro de la función como enmienda orgánica que tendrá el lodo final.

Uso de carbón activado de producción nacional en la depuración del agua residual:

Al reflexionar sobre la factibilidad económica el uso del carbón activado en el reactor biológico para el tratamiento de aguas albañales, se revisa la situación de la producción de carbón activado en Cuba.

En Cuba existen dos plantas productoras de carbón activado, una ubicada en Baracoa, en la zona Oriental del país, cuya producción es a partir de la concha del coco y de madera y otra en la ciudad de la Habana. En el presente año esta moderna instalación, en funcionamiento hace apenas dos años, debe producir 250 toneladas de ese carbón, sobre la base de las contrataciones de 100 toneladas de concha con la Empresa del Coco de este municipio guantanamero y unas 2 000 toneladas de madera con la Empresa Forestal de Cuba (FORCUBA). Con esta última materia prima se han realizado pruebas exitosas (Gutiérrez, 1996)

Con el fin de sustituir el carbón Norit ROW 0,8 por carbón de producción nacional y hacer aún más rentable el proceso depurativo, fueron utilizados los dos tipos de carbón que actualmente se producen en la planta de Baracoa: el proveniente de cáscara de coco y el de madera de pino., cuyas características en ambos casos responden a las reportadas por la IUPAC (Internacional Union of Pure and Applied Chemists):

Materia Prima	Activación	Dureza o resist. a la abrasión	Radio medio de poro
Madera de pino	Deshidratación Química	30-50	10-2000 nm
Carbón mineral lignítico	Térmica	40-60	3,3 nm
Carbón mineral bituminoso	Térmica	70-80	1,4nm
Concha de coco	Térmica	90-99	0,8nm

Además se conoce que:

Carbón de Madera cubano: Microporoso con un índice de Yodo entre 850-900

Carbón de coco cubano: Mesoporoso con un índice de Yodo de 900.

Tabla 7 Resultados obtenidos en el tratamiento del agua residual albañal con carbón de madera cubano a escala de laboratorio:

Experimentos	DQO _e (mg/L)	DQO (mg/L)	Eficiencia (%)	pH	SST (mg/L)	SSF (mg/L)	SSV (mg/L)
4h con 100	484,00	34,78	92,80	7,87	1178	66,30	1111,70
4h con 150	480,00	69,57	85,50	8,47	1033	55,21	977,79
4h con 200	480,00	71,00	85,20	8,17	1000	45,10	954,90
8h con 100	500,00	104,35	79,13	8,05	1044	46,11	997,89
8h con 150	491,00	130,01	73,52	8,23	955	43,23	911,77
8h con 200	483,00	100,39	79,22	7,92	923	44,21	878,79
12h con 100	484,00	64,00	86,77	7,87	992	74,00	918,00
12h con 150	491,00	96,00	80,44	7,77	1002	89,97	912,03
12h con 200	483,00	94,00	80,53	8,05	902	56,00	846,00

4h sin C	320,71	46,31	85,56	7,91	1070	64,2	1005,8
8h sin C	320,71	123,00	61,64	8,20	1100	68,0	1032,4
12h sin C	320,71	127,00	60,40	8,07	1010	54,5	955,5

Como se aprecia el efecto del carbón de madera cubano en la remoción de materia orgánica presente en el residual es muy positivo, la eficiencia oscila en un intervalo desde 73,52% hasta 92,80%, correspondiendo la dosis óptima, según el gráfico de superficie de respuesta a la variante de 4 horas con 100 mg de carbón. Este comportamiento es muy similar al del NORIT ROW 0,8, su efecto está dado por sus características en cuanto a porosidad pues al ser microporoso es capaz de retener moléculas de diferentes tamaños, quedando atrapados no sólo los sólidos sino también los microorganismos presentes en el residual. Además, si en el aspecto económico muestra ventajas superiores al NORIT por ser mucho menos costoso, entonces brinda sólidas perspectivas para su posible aplicación.

Los resultados obtenidos por cromatografía líquida (Anexo # 19) muestran la efectividad del carbón activado en polvo en el proceso de depuración del agua residual

Tabla 8 Resultados obtenidos en el tratamiento del agua residual albañal con carbón de cáscara de coco cubano a escala de laboratorio:

Experimentos	DQO _e (mg/L)	DQO (mg/L)	Eficiencia (%)	pH	SST (mg/L)
4h con 100	484,00	205,37	57,57	7,93	1903
4h con 150	480,00	246,10	48,73	8,10	2010
4h con 200	480,00	254,00	47,08	8,06	1996
8h con 100	500,00	302,37	39,53	8,00	2294
8h con 150	491,00	254,00	48,27	8,20	2265
8h con 200	483,00	353,80	26,75	8,05	2144
12h con 100	484,00	173,77	64,23	8,18	2225
12h con 150	491,00	212,31	56,76	7,77	2206
12h con 200	483,00	210,34	56,45	8,00	2148

4h sin C	376,53	277,10	26,40	8,10	2231
8h sin C	376,53	310,40	23,67	7,98	2344
12h sin C	376,53	280,10	25,61	7,76	2340

Al utilizar el carbón de coco los resultados obtenidos muestran que la depuración es menos efectiva ya que la eficiencia de remoción se mantiene en valores muy bajos que no sobrepasan el 64% y en ninguna de las variantes se llega a alcanzar el valor estipulado por diseño en la planta (92%). Sus características de material mesoporoso le permite retener con facilidad moléculas de tamaño intermedio (Groso. G y Brosa. J, 1999).

Tabla 9 Análisis microbiológico y parasitológico del agua residual (Variante 4 h con 100 mg):

Tipo de análisis	Tratamiento sin carbón	Tratamiento con carbón de Madera	Tratamiento con carbón de coco
Coliformes Fecales NMP / 100 mL	4300,00	46,00	110,00
Parasitología	Presencia de copépodos, ciliados y no nemátodos de vida libre	No copépodos No ciliados No nemátodos	No copépodos No ciliados No nemátodos

La remoción microbiológica y parasitológica con ambos carbones es efectiva. Se comprueba la incidencia de la capacidad de adsorción del carbón activado en el tratamiento del residual albañal.

Implementación en la planta de tratamiento del uso del carbón activado en la etapa depurativa:

Como se había señalado es necesario adicionar un tanque para la suspensión del carbón activado. Se prevee para la preparación de la suspensión la corriente afluente al sistema.

Diseño del tanque para la suspensión del carbón activado.

Primeramente, es necesario determinar si se puede mantener la suspensión en el tanque agitado para lo cual se sigue el criterio expuesto por Rosabal, 1998; donde se plantea que la velocidad de sedimentación libre debe ser inferior a 3m/min y la fracción en volumen de sólidos menor que un 30%.

$$K = D_{pc} [g * DEN_1 (DEN_c - DEN_1) / \mu l^3]^{1/3}$$

Donde: $D_{pc} = 4.5 \times 10^{-4} m$
 $g = 9.81 m/s^2$

$$\text{DENc} = 1590 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_1 = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\text{DEN}_1 = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$K = 4.5 \times 10^{-4} [9.81 \cdot 1000 (1590 - 1000) / (10^{-3})^2]^{1/3}$$

$$K = 7.325$$

Si $3.33 < K < 43.6$ se aplica la ecuación de μ_t para el intervalo intermedio:

$$\mu_t = 0.153 \cdot g^{0.71} \cdot D_{pc}^{1.14} (\text{DENc} - \text{DEN}_1)^{0.71} / (\text{DEN}_1^{0.29} \cdot \mu_1^{0.43})$$

$$\mu_t = 1.73 \text{ m} / \text{min}$$

Como $\mu_t < 3 \text{ m/min}$; entonces la fracción volumen del sólido se calcula de la siguiente forma (Mc Cabe, 1989):

$$F_v = x \cdot \text{DEN}_1 / \text{DENc} - (\text{DENc} - \text{DEN}_1) \cdot x$$

Donde: x : Fracción másica de sólido en la suspensión.

$$m(\text{total}) = m(\text{agua}) + m(\text{carbón})$$

$$m(\text{total}) = 30000 + 38.5 = 30038.5 \text{ Kg}$$

$$x = m(\text{carbón}) / m(\text{total})$$

$$x = 38.5 / 30038.5 \quad x = 1.28 \times 10^{-3}$$

$$F_v = 0.00128 \cdot 1000 / 1590 - (1590 - 1000) \cdot 0.00128$$

$$F_v = 8.05 \times 10^{-4} \cdot 100 = 0.0805 \%$$

Por lo que se comprueba que sí es posible mantener la suspensión en el tanque agitado.

Cálculo de las dimensiones del tanque.

$$V_1 = V_a + V_c$$

$$V_c = m(\text{carbón}) / \text{DENc}$$

$$V_c = 38.5 / 1590 \quad V_c = 0.0242 \text{ m}^3$$

$$V_1 = 30 + 0.0242 = 30.0242 \text{ m}^3$$

Por lo tanto para un sobrediseño que represente un 85 %, $V_1 = 0.85 \cdot V_t$

$$V_t = V_1 / 0.85 \quad V_t = 35.322 \text{ m}^3$$

Asumiendo $H_1 = D$

$$V_t = \pi \cdot D^2 \cdot D / 4 = \pi \cdot D^3 / 4$$

$$D = 3.56 \text{ m}$$

$$H_1 = 3.56 \text{ m}$$

Selección del agitador

Agitador: De paletas con tabiques verticales, se necesita determinar la potencia para lograr una intensidad de agitación dada:

$$Kn = f(\text{Rem}, \text{Fr})$$

Se selecciona de paleta porque:

- El grado de agitación es pequeño, no puede ser creado un alto grado de agitación ya que se pierde carbón.
- Se usan en sistemas discontinuos de viscosidad menor a los 3000 cP.
- Velocidad circunsferencial recomendada entre (1.5 - 5) m / seg para viscosidades menores de 500 cP y de (1.5 - 3.2) m / seg para viscosidades hasta 3000 cP.

- Velocidades iguales o menores de 150 r / min.

Se seleccionan tabiques verticales para impedir la formación de vórtices por lo tanto la acción de la fuerza de gravedad es despreciable y puede no tenerse en cuenta la influencia del criterio de Froude; por lo tanto:

$$K_n = f(R_{em})$$

$$R_{em} = n * D^2 * DEN_s / \mu_s$$

Según la tabla 21 (Rosabal, 1998) estos agitadores se caracterizan por:

$$d / D = 0.66$$

$$Z = 2$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$b / d = 0.1$$

$$d / D = 0.66$$

$$d = 0.66 * 3.56$$

$$d = 2.3496 \text{ m}$$

$$n = 5 / \pi * d$$

$$n = 5 / \pi * 2.3496$$

$$n = 0.67 \text{ r/seg} = 40.62 \text{ r/min}$$

Este valor está en el rango adecuado.

Cálculo de DEN_s y μ_s

Según la ecuación 9.9 (Rosabal, 1998)

$$\mu_s = \mu_l (1 + 2.5 * \varphi) \quad \text{si} \quad \varphi \leq 0.1$$

$$\varphi = F_v = 8.05 \times 10^{-4}$$

$$\mu_s = [1 + (7.752 \times 10^{-4}) 2.5] \times 10^{-3}$$

$$\mu_s = 1.002 \times 10^{-3}$$

Según la ecuación 5.6 (Rosabal, 1998)

$$1/DEN_s = x / DEN_c + (1 - x) / DEN_l$$

$$1/DEN_s = 1.232 \times 10^{-3} / 1590 + (1 - 1.232 \times 10^{-3}) / 1000$$

$$DEN_s = 1000.4 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$R_{em} = 0.67 * (3.56)^2 * 1000.4 / 1.002 \times 10^{-3}$$

$$R_{em} = 8.47 \times 10^6$$

Con R_{em} y la curva 2 se obtiene $K_n = 0.6$ en la figura 9.7 (Rosabal, 1998).

Cálculo del consumo de potencia según la ecuación 9.5 . (Rosabal, 1998).

$$K_n = P / DEN_s * n^3 * d^5$$

Se obtiene:

$$P = K_n * DEN_s * n^3 * d^5$$

$$P = 0.6 * 1000.4 * (0.67)^3 * (2.34)^5$$

$$P = 12924.92 \text{ W}; \quad P = 12.924 \text{ Kw}$$

$$P / V_t = 12.924 / 35.32$$

$$P / V_t = 0.36 \text{ Kw} / \text{m}^3$$

Selección del material.

Se selecciona el material de acero CT - 3 para la protección de la corrosión.

Se toman planchas de este acero con espesor de 5 mm, ancho de 1500 mm y

largo de 4500 mm cuyo precio es de \$ 53.05.

Dimensiones de la plancha:

- Altura = 1.5 m
- Longitud = 6 m
- Perímetro = $P' = \pi * H_t$
 $P' = \pi * 3.56$
 $P' = 11.18 \text{ m}$

Cálculo del número de planchas para el tanque.

- Número de planchas por altura = $H_{\text{tanque}} / A_{\text{plancha}}$
 $= 3.56 / 1.5 = 2.37$
- Número de planchas circunferenciales = P' / L_{plancha}
 $= 11.18 / 6 = 1.86$

Por lo tanto, el número total de planchas para la construcción del tanque es de 5 planchas de acero CT - 3.

$$\begin{aligned}\text{Costo del equipo} &= \text{número de planchas} * \text{costo de las planchas} \\ &= 5 * 53.05 \\ &= 265.25 \$\end{aligned}$$

Selección de los accesorios necesarios para el funcionamiento del nuevo equipo.

Se selecciona una pieza en T ya que es necesario enlazar más de dos ramas de tuberías en un mismo punto. En el mercado se les encuentra en una serie completa de diferentes tamaños.

En el control de los procesos industriales la válvula juega un papel muy importante en el budo de regulación, estas pueden ser de varios tipos según sea el diseño del cuerpo y el movimiento del obturador. En éste se selecciona una válvula de obturador cilíndrico excéntrico, que asienta contra un cuerpo cilíndrico.

El cierre hermético se consigue con un revestimiento de goma o teflón en la cara del cuerpo donde asienta el obturador. La válvula es de bajo costo y tiene una capacidad relativamente alta. Es adecuada para fluidos corrosivos, líquidos viscosos y que contengan sólidos en suspensión. (Gasim, 1995).

Cálculo de la inversión para el montaje del tanque con agitación mecánica.

$$\text{Costo de inversión} = C_{\text{equipo}} + C_{\text{instalación y montaje}}$$

El costo de instalación y montaje es un porcentaje del costo del equipo, los mismos fueron tomados de Gutiérrez, 1996.

En este caso se toma un 30% del costo del equipo.

$$C_{\text{instalación y montaje}} = 0.3 * 265.25 = 79.575 \$$$

$$C_{\text{inversión}} = 265.25 + 79.575 = 344.825 \$$$

Fundamentación económica de la propuesta de tratamiento de aguas residuales con uso de carbón activado.

Costo de inversión para la nueva propuesta de tratamiento.

En la determinación del costo de inversión para la propuesta de tratamiento la metodología empleada fue la propuesta por Branan, 2000 teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el análisis microbiológico con el uso de carbón activado, donde se evidenció que no es necesario tratamiento terciario con zeolita, por lo tanto se prescinde de los filtros y se adiciona el tanque para la suspensión del carbón activado.

Metodología de cálculo.

1. Costo del equipamiento tecnológico del proceso. (CETP).

Bomba de alimentación sumergible (3)	(\$700) ____	\$2100.
Tamiz (1)	(\$1100) ____	\$1100.
Tanque de suspensión (1)	(\$265.25) ____	\$265.25.
Reactor (1)	(\$4000) ____	\$4000.
. Difusores [NORTON] (252)	(\$13.00) ____	\$3276.
. Soplador (3)	(\$700) ____	\$2100.
. Motor 22Kw (3)	(\$550) ____	\$1650.
Sedimentador (1)	(\$3300) ____	\$3300.
. Bombas AIR - LIFT de (10m ³ /h) (3)	(\$850) ____	\$2550.
Tanque de lodo (1)	(\$2600) ____	\$2600.
. Difusores [NORTON] (56)	(\$13.00) ____	\$728.
. Bombas sumergibles [OMEGA] (2)	(\$600) ____	\$1200.
. Bombas de Dosificación y Riego (2)	(\$450) ____	\$900.
Tanque Cisterna. (1)	(\$3500) ____	\$3500.
Pozo de Alimentación (1)	(\$6000) ____	\$6000.

$$\text{CETP} = \$ 35269.25$$

2. Costo de Instalación y Montaje (CIM).

Sopladores (10 % de su Costo de Adquisición).

$$(550 + 700) * 3 * 0.1 = \$375$$

Difusores (252 + 56) = \$800

Tamiz (25% de su Costo de Adquisición)

$$(1100 * 0.25) = \$275$$

Tanques (30% de su Costo de Adquisición)

$$(265.25 * 0.3) = \$79.575$$

Bombas (De 10 a 50% de su Costo de Adquisición)

 . Alimentación (30% de su Costo de Adquisición).

$$(700 * 3 * 0.3) = \$630.$$

 . AIR-LIFT (50% de su costo de Adquisición).

$$(850 * 3 * 0.5) = \$ 1275.$$

 . OMEGA (15% de su Costo de Adquisición).

$$(600 * 2 * 0.15) = \$ 180.$$

 . Dosificación y Riego (30% de su Costo de Adquisición).

$$(450 * 2 * 0.3) = \$270$$

$$\text{CIM} = \$3884.575$$

3. Costo de instrumentación del proceso tecnológico (CIPT).

Costo de Adquisición (CAI) (15% de CETP).

$$(35269.25 * 0.15) = \$5290.3875$$

Costo de Instalación y Montaje (50% del CAI).

$$(5290.3875 * 0.5) = \$2645.19375$$

$$\text{CIPT} = \$7935.$$

4. Costo de Adquisición y montaje de tuberías (CAMT).

 . Materiales (35% de CETP) = $35269.25 * 0.35$

$$= \$12344.2375$$

$$\begin{aligned} \text{Mano de Obra (26 \% de CETP)} &= 35269.25 * 0.26 \\ &= \$ 9170.005 \end{aligned}$$

$$\text{CAMT} = \$21514.2425$$

5. Costo de Instalaciones Eléctricas (CIE).

$$\begin{aligned} \text{CIE (10 \% de CETP)} &= 35269.25 * 0.10 \\ &= \$3526.925 \end{aligned}$$

6. Costo total de Obras Civiles y Edificaciones Civiles (CTOC y CEC).

$$\begin{aligned} \text{CTOC y CEC (9\% de CETP)} &= 35269.25 * 0.09 \\ &= \$3174.2325 \end{aligned}$$

7. Costo del Proyecto (CP).

$$\text{. 3 Ingenieros } (\$287 * 3) = \$861$$

$$\text{. 1 Dibujante } (\$171 * 1) = \$171$$

$$\text{. Materiales } (\$147) = \$147$$

$$\text{. Gastos Generales } (\$25) = \$25$$

$$\text{. Ganancia económica y Organización del proyecto } (\$150) = \$150.$$

$$\text{CP} = \$1354.$$

8. Costos de Inversión (CI).

$$\text{CI} = \text{CETP} + \text{CIEM} + \text{CIPT} + \text{CAMT} + \text{CIE} + \text{CTOC} + \text{CEC} + \text{CP}.$$

$$\text{CI} =$$

$$35269.25 + 3884.575 + 7935.5813 + 21514.2425 + 3526.925 + 3174.2326 + 1354$$

$$\text{CI} = \$ 76658.806.$$

Existen otros métodos más rápidos para la evaluación de los costos de inversión de plantas industriales, entre ellos el Método de Lang es el más aceptado en nuestro caso y plantea el cálculo a partir del costo de equipamiento principal:

$$\text{CI} = 4.50 * E \quad \text{donde } E = \text{CETPr}$$

$$\begin{aligned} \text{CETPr} = & C_{\text{tanque para la suspensión}} + C_{\text{reactor}} + C_{\text{difusores-}} \\ & \text{reactor} + C_{\text{sopladores-reactor}} + C_{\text{sedimentador}} + C_{\text{tanque de lodo}} + \\ & C_{\text{difusores-tanque de lodo}}. \end{aligned}$$

$$\text{CETPr} = \$17919.25$$

$$\text{CI} = 4.5 * 17919.25$$

$$\text{CI} = \$80636.625$$

Como puede apreciarse la variación del costo de inversión no es significativa, corroborándose la confiabilidad del resultado.

Evaluación del proyecto de inversión.

Existen diferentes métodos de evaluación de inversiones, como por ejemplo:

1. Criterio de la tasa de rentabilidad contable.
2. Criterio del plazo de recuperación de la inversión.
3. Criterio del valor actual neto.
4. Criterio de tasa interna de rentabilidad.

En este caso se emplea el criterio del valor actual neto y el criterio de la tasa interna de rentabilidad para seleccionar la variante más eficiente.

Variantes analizadas:

- Variante I: Tratamiento del agua residual por lodos activados sin adsorbente.

- Variante II: Tratamiento del agua residual por lodos activados con utilización de adsorbente.

Los datos conocidos para cada variante son los siguientes:

Variante I:

Costos Fijos: - Personal = 12384.00
 - Energía Eléctrica = 73147.00
 - Mantenimiento = 5000.00
 - Varios = 957.90

Costos Fijos = 91488.9 \$/año

Se conoce que tratar 1000 m^3 /día, cuesta 1.36 \$/día; por lo tanto:

N (m^3 /día)	1000	992	990	987
CV (\$ / año)	496.4	492.75	491.29	489.83

Variante II

Costos fijos: - Personal.
 - Energía eléctrica.
 - Mantenimiento.

Costo de la energía eléctrica = Consumo de Kw * Precio del Kw

Costo de la energía eléctrica = 168600 Kw / año * 0.09 \$ / Kw
 = 15174 \$ / año

Costo de mantenimiento = $C_{\text{conservación y mantenimiento equipos electromecánicos}} + C_{\text{conservación y mantenimiento de obras}} + C_{\text{otros}}$.

Costo de mantenimiento = 800.24 + 220 + 29.76
 = 1050 \$ / año

Costo de personal = 7188 \$ / año.

Costos fijos = 15174 + 1050 + 7188
 = 23412 \$ / año.

N (m^3 /día)	2000	1992	1984
CV (\$ / año)	496.4	494.4	492.4

El valor actual neto es el mejor indicador de rentabilidad de un proyecto sobre las bases anteriores;

Sí $\text{VAN} > 0$ el proyecto es rentable.

Sí $\text{VAN} = 0$ no hay rentabilidad en el proyecto, es decir, no hay ganancia.

Cálculo del valor actual neto.

Se considera un 10% de interés.

VARIANTE I.

T

$$\text{VAN} = \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+i)^t}$$

$$\begin{aligned}
 \text{VAN} = & -13579.6 + 239455.87 / (1+0.10)^1 + 240461.81 / (1+0.10)^2 + 241131.95 / \\
 & (1+0.10)^3 + 243814.7 / (1+0.10)^4 + 243814.7 / (1+0.10)^5 + 243814.7 / \\
 & (1+0.10)^6 + \\
 & 243814.7 / (1+0.10)^7 + 243814.7 / (1+0.10)^8 + 243814.7 / \\
 & (1+0.10)^9 + 243814.7 / \\
 & (1+0.10)^{10} \\
 \text{VAN} = & 1375807.
 \end{aligned}$$

VARIANTE II.

$$\begin{aligned}
 \text{VAN} = & -76658.806 + 656806 / \\
 & (1+0.10)^1 + 659548.8 / (1+0.10)^2 + 662292 / (1+0.10)^3 + \\
 & 662292 / (1+0.10)^4 + 662292 / (1+0.10)^5 + 662292 / (1+0.10)^6 + 662292 / \\
 & (1+0.10)^7 + \\
 & 662292 / (1+0.10)^8 + 662292 / (1+0.10)^9 + 662292 / (1+0.10)^{10}
 \end{aligned}$$

$$\text{VAN} = 3985584.394$$

Por lo tanto es aceptada la segunda variante ya que el valor actual neto (VAN) es significativamente mayor.

Además se tuvo en cuenta el criterio que avala la tasa interna de rentabilidad (TIR), que se define con el valor i (interés) que anula al VAN. Esto quiere decir que se busca

en un rango de valores de interés donde el VAN se hace cero, por lo tanto hasta ese valor de interés puede aceptarlo la inversión, un valor superior hace negativo el valor actual neto.

Cálculo de la tasa interna de rentabilidad o retorno (TIR).

Se determina por la siguiente expresión:

$$\text{TIR} = i + \text{VAN}(+) * (i - i_1) / \text{VAN}(+) - \text{VAN}(-)$$

Para el cálculo de la tasa interna de rentabilidad o retorno es necesario determinar el valor de i_1 , este no es más que el interés para el cual se hace negativo, el mismo se determinó por métodos matemáticos obteniéndose en ambos casos valores del TIR muy superiores a los normados (12 – 15 %), lo cual significa que las dos variantes son económicamente factibles.