

OPTIMIZACIÓN DE LA SEDIMENTACIÓN DEL SUBPRODUCTO
“MANCHA” EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN AGRIO
DE YUCA

(IMPLEMENTACIÓN DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA)

César Augusto Chaux Ballesteros
Uriel Ernesto Vergara Martínez

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL, GIIA
POPAYÁN

Diciembre de 2005

OPTIMIZACIÓN DE LA SEDIMENTACIÓN DEL SUBPRODUCTO
“MANCHA” EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN
AGRIO DE YUCA

(IMPLEMENTACIÓN DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA)

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de Ingeniera Ambiental

César Augusto Chaux Ballesteros

Uriel Ernesto Vergara Matínez

Director

CARLOS CÉSAR CABEZAS CÓRDOBA

Ingeniero Químico, M. Sc.

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL, GIIA

POPAYÁN

Diciembre de 2005

RESUMEN

Este trabajo se desarrolló en el marco del convenio CRC-Universidad del Cauca, en el cual se propone brindar soluciones al problema de contaminación por parte de la agroindustria de almidón agrio de yuca del departamento del Cauca.

Este documento se desarrolla desde la perspectiva de la producción más limpia, por ello se da a conocer el proceso de extracción de almidón agrio de Yuca, el balance de masa y la caracterización fisicoquímica de los efluentes, estableciendo eficiencia de producción. Además con esta información se plantean alternativas de producción más limpia que disminuyan el impacto negativo en el ambiente y la salud humana.

Dado a que el objetivo principal de este trabajo es optimizar la sedimentación del subproducto mancha, se realizó el respectivo estudio de sedimentación por el método de columna o de tubo encontrándose el fenómeno de adherencia entre las partículas, según esto se prevé un comportamiento atípico en la sedimentación respecto a los modelos utilizados para el diseño de sedimentadores de partículas discretas o floculentas. Aún así, se diseñaron sedimentadores de flujo horizontal, modelo HAZEN Y CAMP, y de placas paralelas o alta tasa, partiendo que para un tiempo de retención hidráulica de 400 minutos se logran las máximas eficiencias de remoción y la fracción remanente tiende a ser constante. Con este tiempo de retención, se obtuvo la velocidad de sedimentación como parámetro principal para el diseño de los sedimentadores. Se encontró que el modelo de HAZEN y CAMP requiere una relación de área 4:1 respecto al modelo de placas paralelas, y para el modelo de alta tasa no se garantiza el factor condicionante del número de Reynolds recomendado, debido a las bajas velocidades experimentales de sedimentación de ésta partícula.

Al optimizar la retención de este subproducto, se hace necesario vislumbrar las alternativas para su comercialización; se sabe que la mancha es utilizada artesanalmente para alimentación animal y estudios anteriores demuestran que es factible utilizarla como fuente energética para la alimentación de cerdos, pollos de engorde, gallina y patos Pekín. Se realizó el estudio alimenticio encontrando que es posible utilizarlo por las altas concentraciones de carbohidratos que la hacen una buena fuente energética y su aceptable concentración proteica por lo tanto se facilitaría su comercialización.

DEDICATORIA

A mis padres Humberto y Noemí
A mis hermanos Clovis, Lina y Alejo
A Rocio,
A mis madres adoptivas Francly y Tulia
Y a todas las personas que me apoyaron
en el camino del conocimiento
Con todo el cariño y entrega

CÉSAR AUGUSTO CHAUX

A las personas hacen que cada segundo
de mi vida sea eterno:
Mis padres Uriel y Yolanda
Mis hermanos, en especial a Juancho
Y mis amigos y familiares.

URIEL VERGARA

A la gente activa y positiva del
departamento de Ingeniería Ambiental y
Sanitaria, en especial al Ingeniero
Carlos Cesar Cabezas.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nota de ceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del Jurado

Popayán, Diciembre 13 de 2005

TABLA DE CONTENIDO

	Página
RESUMEN	iii
DEDICATORIA	iv
NOTA DE ACEPTACIÓN.....	v
TABLA DE CONTENIDO.....	vi
LISTA DE TABLAS	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xi
Capítulo	
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS	1
1.1.1 objetivo general.....	1
1.1.2 Objetivos específicos	1
1.2 JUSTIFICACIÓN	1
1.3 BOSQUEJO DE LA TESIS	2
2 DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO.....	3
2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.....	3
2.1.1 Materia prima y generalidades.....	3
2.1.2 Lavado de raíces	4
2.1.3 Rallado	5
2.1.4 Colado.....	5
2.1.5 Sedimentación de almidón.....	7
2.1.6 Sedimentador de “mancha”	8
2.2 CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO.....	9
2.3 DISCUSIÓN DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS EFLUENTES	20
2.3.1 Efluente cascarilla.....	20
2.3.2 Efluente del sedimentador de Almidón.....	22
2.3.3 Efluente del sedimentador de “mancha”	24

2.4	BALANCE DE MASA	29
2.4.1	Balance de masa en el sistema 1	29
2.4.2	Balance de masa en el sistema 2	30
2.4.3	Balance de masa en el sistema 3	31
2.4.4	Balance de masa en el sistema 4	31
2.4.5	Análisis del balance de masa	31
2.4.6	Opciones de Producción más Limpia (PML)	34
2.4.7	Evaluación de las opciones de producción más limpia.....	35
2.5	CONCLUSIONES	38
3	ESTUDIO DE SEDIMENTACIÓN DE LA MANCHA.....	39
3.1	INTRODUCCIÓN	39
3.2	MÉTODO DE SEDIMENTACIÓN EN COLUMNA.....	39
3.3	DATOS OBTENIDOS EN LA COLUMNA DE SEDIMENTACIÓN	40
3.4	ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS EN LA COLUMNA DE SEDIMENTACIÓN	44
3.5	EL PH EN LA PRUEBA DE SEDIMENTACIÓN.....	52
3.6	CONCLUSIONES.....	52
4	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE SEDIMENTADOR	54
4.1	INTRODUCCIÓN	54
4.2	CONCEPTOS GENERALES [21]	54
4.3	SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS DISCRETAS.....	54
4.4	SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS FLOCULENTAS	55
4.5	SEDIMENTACIÓN POR CAÍDA LIBRE E INTERFERIDA	55
4.6	SEDIMENTADOR CONVENCIONAL: MODELO HAZEN Y CAMP.....	55
4.7	PARÁMETROS DE DISEÑO	56
4.7.1	Ecuaciones básicas de diseño.....	57
4.7.2	Estructura de entrada	59
4.7.3	Estructura de salida.....	60
4.8	SEDIMENTADOR DE ALTA RATA O PLACAS PARALELAS.....	60
4.8.1	Parámetros de diseño	60
4.8.2	Ecuación básica de cálculo	62
4.8.3	Factores condicionantes.....	65
4.8.4	Esquema sedimentador de placas paralelas	67
4.9	DISCUSIÓN.....	68

4.10	CONCLUSIONES.....	68
5	FACTIBILIDAD DE USO DE LOS SUBPRODUCTOS.....	69
5.1	INTRODUCCIÓN	69
5.2	FACTIBILIDAD DE USO	69
5.3	CONCLUSIONES	70
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	71
6.1	CONCLUSIONES	71
6.2	RECOMENDACIONES	71
	APÉNDICES	74
A.	DATOS PRUEBAS DE SEDIMENTACIÓN	75
B.	DATOS DE SEDIMENTACIÓN CON MODIFICACIÓN DE PH	93
C.	DATOS DE TURBIEDAD Y CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS (ST)	110
D.	NEUTRALIZACIÓN DE EFLUENTES DE RALLANDERÍA.....	111
E.	RECOMENDACIONES PARA EL MUESTREO Y PRESERVACIÓN DE MUESTRAS	113
F.	METODOLOGÍA UTILIZADA EN LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS.....	114
G.	ANÁLISIS ALIMENTICIO DEL SUBPRODUCTO MANCHA	116
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117

LISTA DE TABLAS

	página
Tabla 1. Lugares de muestreo y pruebas realizadas.....	10
Tabla 2. Datos obtenidos para el Caudal.	11
Tabla 3. Datos obtenido para el Potencial de Hidrógeno, pH.....	12
Tabla 4. Datos obtenidos para la Temperatura, °C.....	13
Tabla 5. Datos obtenidos para la Conductividad.....	14
Tabla 6. Datos obtenidos para la Demanda Bioquímica de Oxígeno.	15
Tabla 7. Datos obtenidos para la Demanda Química de Oxígeno.	16
Tabla 8. Datos obtenidos para los Sólidos Totales.	17
Tabla 9. Datos obtenidos para los Sólidos Suspendidos.....	18
Tabla 10. Datos obtenidos para Cianuros.	19
Tabla 11. Evaluación de opciones de producción más limpia en la rallandería Santa Bárbara.....	37
Tabla 12. Datos obtenidos en la columna de sedimentación durante la prueba 1 en los puntos 1 y 2.....	41
Tabla 13 Datos obtenidos en la columna de sedimentación durante la prueba 1 en los puntos 3 y 4	42
Tabla 14. Datos obtenidos en la columna de sedimentación durante la prueba 1 en los puntos 5 y 6.....	43
Tabla 15. Velocidad de sedimentación obtenida en los ensayos de sedimentación.	56
Tabla 16. Parámetros y resultados diseño sedimentador flujo horizontal	58
Tabla 17 Dimensiones del sedimentador de placas para los valores de velocidad de sedimentación seleccionados	66

Tabla 18. Resultados del uso de mezclas “mancha”/afrecho en el crecimiento del Pato Pekín.	70
Tabla 19. Datos obtenidos en la columna de sedimentación durante la prueba 2 en los puntos 1 y 2.....	75
Tabla 20. Datos obtenidos en la columna de sedimentación durante la prueba 2 en los puntos 3 y 4.....	76
Tabla 21. Datos obtenidos en la columna de sedimentación durante la prueba 2 en los puntos 5 y 6.....	77
Tabla 22. Datos obtenidos en la columna de sedimentación durante la prueba 3 en los puntos 1 y 2.....	84
Tabla 23. Datos obtenidos en la columna de sedimentación durante la prueba 3 en los puntos 3 y 4.....	85
Tabla 24. Datos obtenidos en la columna de sedimentación durante la prueba 3 en los puntos 5 y 6.....	86
Tabla 25. Datos obtenidos en la columna de sedimentación durante la prueba a pH 3,73 en los puntos 1 y 2.....	93
Tabla 26. Datos obtenidos en la columna de sedimentación durante la prueba a pH 3,73 en los puntos 3 y 4.....	94
Tabla 27. Datos obtenidos en la columna de sedimentación durante la prueba a pH 3,73 en los puntos 5 y 6.....	95
Tabla 28. Datos obtenidos en la columna de sedimentación durante la prueba a pH 4,8 en los puntos 1 y 2.....	101
Tabla 29. Datos obtenidos en la columna de sedimentación durante la prueba a pH 4,8 en los puntos 3 y 4.....	102
Tabla 30. Datos obtenidos en la columna de sedimentación durante la prueba a pH 4,8 en los puntos 5 y 6.....	103
Tabla 31. Turbiedad Vs Sólidos Totales.....	110
Tabla 32. Datos de titulación de efluente de rallandería (40 ml) con agua saturada de cal hidratada (CaOH) ₂ , pH = 12.52.....	111
Tabla 33. Recomendaciones para el muestreo y preservación de muestras. Tomado de Toma y Preservación de Muestras del IDEAM [19].....	113

LISTA DE FIGURAS

	página
Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de extracción de almidón agrio de yuca.....	3
Figura 2. Lavadora/peladora y zona de almacenamiento de raíces.	4
Figura 3. Vista general de las coladoras y rallador.....	6
Figura 4. Tanque de almacenamiento de Afrecho.	7
Figura 5. Canales de sedimentación, raspado de la mancha.	8
Figura 6. Sedimentador de mancha.....	9
Figura 7. Formación de biopelícula en el sedimentador de mancha.....	25
Figura 8. Diagrama de flujo indicando los balances de materia efectuados para la evaluación de la planta.....	28
Figura 9. Diagrama de flujo indicando los balances de materia efectuados para la evaluación de la planta.....	33
Figura 10. Esquema de la columna de sedimentación.	40
Figura 11. Relación entre la turbiedad y la velocidad nominal de sedimentación en la prueba 1.....	46
Figura 12 Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación en la prueba 1.....	47
Figura 13. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación la prueba 1 para tiempos de retención entre 28 y 30 min.	48
Figura 14. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación la prueba 1 para tiempos de retención entre 228 y 540 min.	48
Figura 15. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación la prueba 1 para tiempos de retención entre 625 y 1470 min	49
Figura 16. Relación entre la turbiedad y el tiempo de retención en cada punto de muestreo en la prueba 1.....	49

Figura 17. Relación entre la concentración de sólidos y el tiempo de retención en cada punto de muestreo en la prueba 1.	50
Figura 18. Dispersión de los datos de Concentración de sólidos y turbiedad a través del tiempo en la prueba 1.....	50
Figura 19. Porcentaje de remoción de sólidos a través del tiempo en la prueba 1.	51
Figura 20. Comportamiento del pH con el tiempo medido en el punto 2 durante la prueba 1.	51
Figura 21. Diagrama de Velocidades.....	56
Figura 22 Esquema general del sedimentador de flujo horizontal. A. Sección Longitudinal. B. Vista en planta.....	59
Figura 23. Sección transversal de un sedimentador de placas paralelas con flujo en contracorriente	62
Figura 24 Esquema general sedimentador de placas paralelas.....	67
Figura 25. Relación entre la turbiedad y la velocidad nominal de sedimentación en la Prueba 2.	78
Figura 26. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación en la Prueba 2.....	79
Figura 27. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación la Prueba 2 para tiempos de retención entre 32 y 152 min.....	80
Figura 28. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación la Prueba 2 para tiempos de retención entre 185 y 340 min.....	80
Figura 29. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación la Prueba 2 para tiempos de retención entre 362 y 1052 min.....	81
Figura 30. Relación entre la turbiedad y el tiempo de retención en cada punto de muestreo en la Prueba 2.....	81
Figura 31. Relación entre la concentración de sólidos y el tiempo de retención en cada punto de muestreo en la Prueba 2.	82
Figura 32. Dispersión de los datos de Concentración de sólidos y turbiedad a través del tiempo en la Prueba 2.....	82
Figura 33. Porcentaje de remoción de sólidos a través del tiempo en la prueba 2.	83

Figura 34. Relación entre la turbiedad y la velocidad nominal de sedimentación en la Prueba 3.	87
Figura 35. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación en la Prueba 3.....	88
Figura 36. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación la Prueba 3 para tiempos de retención entre 13 y 163 min.....	89
Figura 37. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación la Prueba 3 para tiempos de retención entre 193 y 343 min.....	89
Figura 38. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación la Prueba 3 para tiempos de retención entre 403 y 809 min.....	90
Figura 39. Relación entre la turbiedad y el tiempo de retención en cada punto de muestreo en la Prueba 3.....	90
Figura 40. Relación entre la concentración de sólidos y el tiempo de retención en cada punto de muestreo en la Prueba 3.	91
Figura 41. Dispersión de los datos de Concentración de sólidos y turbiedad a través del tiempo en la Prueba 3.....	91
Figura 42. Porcentaje de remoción de sólidos a través del tiempo en la prueba 3.	92
Figura 43. Relación entre la turbiedad y la velocidad nominal de sedimentación en la Prueba a pH 3,73.....	96
Figura 44. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación en la Prueba a pH 3,73.....	97
Figura 45. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación la Prueba a pH 3,73 para tiempos de retención entre 15 y 85 min.	98
Figura 46. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación la Prueba a pH 3,73 para tiempos de retención entre 100 y 280 min. ..	98
Figura 47. Relación entre la turbiedad y el tiempo de retención en cada punto de muestreo en la Prueba a pH 3,73.	99
Figura 48. Relación entre la concentración de sólidos y el tiempo de retención en cada punto de muestreo en la Prueba a pH 3,73.	99
Figura 49. Dispersión de los datos de Concentración de sólidos y turbiedad a través del tiempo en la Prueba a pH 3,73.....	100

Figura 50. Porcentaje de remoción de sólidos a través del tiempo en la prueba a pH 3,73.	100
Figura 51. Relación entre la turbiedad y la velocidad nominal de sedimentación en la Prueba a pH 4,8.....	104
Figura 52. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación en la Prueba a pH 4,8.....	105
Figura 53. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación la Prueba a pH 4,8 para tiempos de retención entre 10 y 100 min.	106
Figura 54. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación la Prueba a pH 4,8 para tiempos de retención entre 110 y 195 min. ..	106
Figura 55. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación la Prueba a pH 4,8 para tiempos de retención entre 403 y 809 min. ..	107
Figura 56. Relación entre la turbiedad y el tiempo de retención en cada punto de muestreo en la Prueba a pH 4,8.	107
Figura 57. Relación entre la concentración de sólidos y el tiempo de retención en cada punto de muestreo en la Prueba a pH 4,8.	108
Figura 58. Dispersión de los datos de Concentración de sólidos y turbiedad a través del tiempo en la Prueba a pH 4,8.....	108
Figura 59. Porcentaje de remoción de sólidos a través del tiempo en la prueba a pH 4,8..	109
Figura 60. Turbiedad vs. Sólidos Totales	110
Figura 61. Corrección del pH en el efluente de mancha con una solución saturada de Hidróxido de Calcio.....	112

1 INTRODUCCIÓN

La agroindustria de extracción de almidón agrio de yuca es un renglón importante en la economía del norte del Departamento del Cauca, ya que la producción abastece cerca del 80% de la producción nacional.

La extracción de almidón agrio de yuca genera altas cargas contaminantes, subproductos y residuos sólidos, que pueden disminuir al hacer un estudio integral del proceso desde el punto de vista de Producción Más Limpia, incrementando eficiencia en la producción y así mismo disminuyendo las descargas y la generación de residuos., valorizando los subproductos para darle mayor sostenibilidad al proceso.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GENERAL

- Optimizar la sedimentación del subproducto mancha en el proceso de extracción almidón agrio de Yuca.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar cuales son los valores de los parámetros que permiten sedimentación de la mayor cantidad de mancha en el proceso de extracción de almidón agrio de yuca.
- Determinar las características alimenticias de la mancha útiles en el desarrollo de un alimento para animales.
- Establecer las condiciones necesaria para la degradación de la mancha en un proceso anaeróbico.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El Instituto Geográfico Agustín Codazzi, en su estudio Cauca: Características geográficas de 1993 señala que el departamento del Cauca producía el 80% del consumo de almidón agrio de Yuca en el país.

El CIAT [2] encontró que en el departamento del Cauca se encuentran 210 rallanderías, las cuales están ubicadas en los municipios de Santander de Quilichao y Patía. Estas arrojan sus desechos y aguas residuales a la fuente de agua cercanas generando un alto grado de contaminación por materia orgánica y cianuros.

La mayoría de las rallanderías no poseen la infraestructura necesaria para detener un subproducto conocido como mancha, el cual es vertido con el efluente elevando drásticamente la carga contaminante. Algunas de estas plantas poseen sedimentadores para este subproducto, pero estos no trabajan con la eficiencia adecuada; como puede observarse en las rallanderías Santa Bárbara y Piedras Negras ubicadas en el corregimiento de Mondomo de municipio de Santander de Quilichao, las cuales poseen filtros anaerobios para el tratamiento de los efluentes, estos filtros se colmatan por la acumulación de mancha, la cual aleja su funcionamiento de la eficiencia con la que fueron diseñados.

La mancha es utilizada artesanalmente para la alimentación animal, por lo cual es posible pensar en encontrar un mercado para este subproducto y estimula así al gremio rallandero a implementar sistemas para su recuperación.

Estas razones hacen necesaria la búsqueda de alternativas de producción más limpia susceptibles a implementarse, para disminuir los impactos ambientales, mejorar los productos y favorecer económicamente tanto a productores como a consumidores.

1.3 BOSQUEJO DE LA TESIS

En el segundo capítulo se da a conocer el proceso de extracción de almidón agrio de yuca, caracterizando los efluentes con los respectivos parámetros fisicoquímicos, para luego con la información tomada en campo levantar los flujos de materia mediante el balance de masa. Con toda esta información fue posible determinar desde el proceso, opciones de producción más limpia que disminuyan los impactos sobre el ambiente y la salud humana.

En el tercer capítulo se presentan los datos y resultados del estudio de sedimentación de la mancha por el método de columna, además se hace el análisis del tiempo de retención hidráulica y la velocidad de sedimentación crítica para el diseño del sedimentador.

En el cuarto capítulo, partiendo de los parámetros en el estudio de la sedimentación de la mancha, se hacen dos diseños de sedimentadores comparándolos entre sí desde el punto de vista del área superficial requerida para su construcción y la factibilidad de implementación.

En el quinto capítulo se analizan estudios anteriores sobre la utilización de la mancha como insumo para la alimentación animal, además, se comparan con el estudio alimenticio realizado en este trabajo vislumbrando así alternativas para su comercialización.

En el sexto y último capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones de este documento.

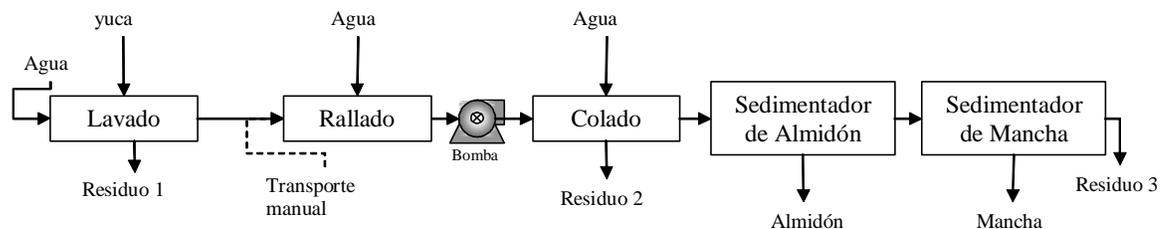
2 DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO

En este capítulo se describe cada una de las etapas del proceso de extracción de almidón agrío de yuca y la caracterización fisicoquímica de los efluentes, mediante parámetros tales como: Sólidos Suspendedos, Sólidos Totales, DBO₅ total y soluble, DQO total y soluble, pH, temperatura y conductividad. También se presenta el balance de materia del proceso y se establecen algunas opciones de producción más limpia susceptibles de ser implementadas en el proceso de extracción.

2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

El trabajo de desarrolló en la rallandería Santa Bárbara, ubicada en el corregimiento de Mondomo del Municipio de Santander de Quilichao (Cauca), la cual tiene capacidad para trabajar jornadas de 24 horas continuas dependiendo de la disponibilidad de materia prima. En la Figura 1 se presenta el diagrama de flujo del proceso de extracción del almidón agrío de yuca.

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de extracción de almidón agrío de yuca.



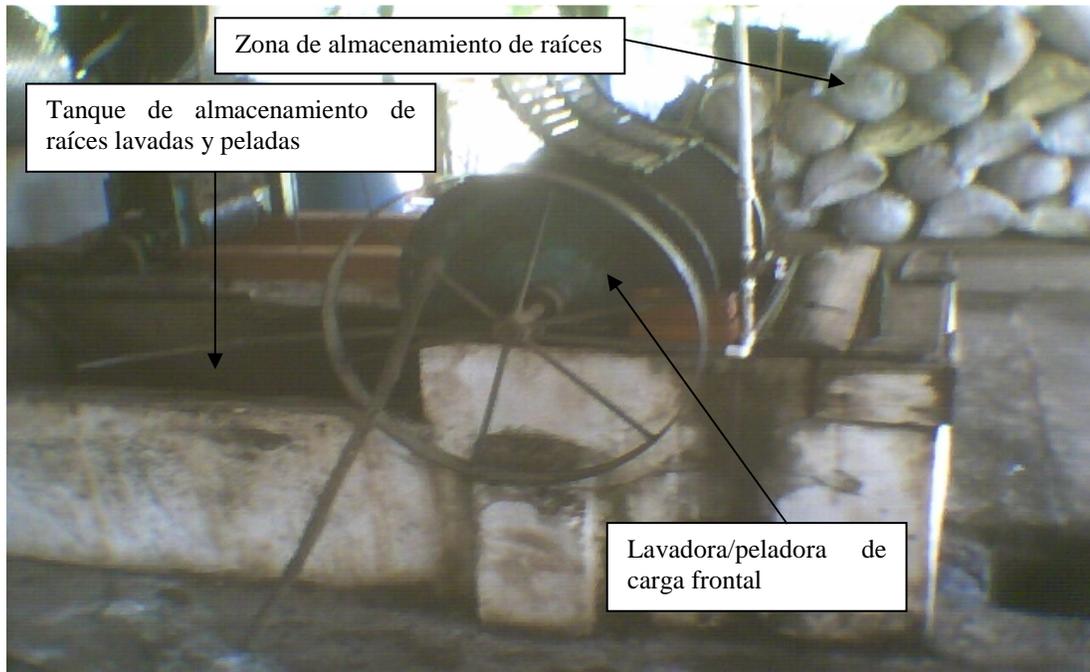
Fuente propia

2.1.1 MATERIA PRIMA Y GENERALIDADES.

La yuca procesada se trae desde regiones cercanas a la ciudad de Armenia (Quindío), donde es seleccionada por los productores en dos tipos: de consumo (expedios, plaza de mercado, supermercados, etc.) cuyas características físicas son: tamaño, grosor, color de pulpa, etc. y las que no cumplen con estas características, siendo estas últimas las destinadas para la producción de almidón agrío de yuca. La mayoría de yuca procesada es de tipo ICA (considerada de tipo “dulce” y por consiguiente de baja concentración de cianuros [1]) y con un máximo de cosechado y almacenado de dos días. Cuando la yuca llega a la rallandería se almacena en pilares de bultos aproximadamente de 63 Kg, cerca de las maquinas de lavado, como se puede observar en la Figura 2, garantizando eficiencia en el desplazamiento y maniobrabilidad del operario.

En esta rallandería los procesos de lavado-pelado, rallado y colado son mecanizados, por lo tanto, requiere de energía eléctrica para su funcionamiento. El sistema es accionado mediante un motor de 12 HP de potencia, este activa, simultáneamente, las tres maquinas mediante un sistema de bandas de transmisión conectadas a un mismo eje. También cuenta con una bomba de 3 HP de potencia que se activa cuando se requiere trasladar la yuca rallada del tanque de almacenamiento hacia las coladoras.

Figura 2. Lavadora/peladora y zona de almacenamiento de raíces.



Fuente propia

2.1.2 LAVADO DE RAÍCES

Como se puede apreciar en la Figura 2, el tipo de máquina utilizada es una lavadora/peladora de cuerpo cilíndrico y eje central, de carga frontal. El cilindro, ubicado en un extremo de un tanque que permite almacenar las raíces lavadas y peladas, tiene un eje central cuyos extremos están soportados por rodamientos, en uno de sus extremos el cilindro se conecta mediante una banda al motor en el momento del lavado por un tiempo promedio de 15 minutos. Una vez terminado el lavado la banda se retira manualmente. La capacidad de carga de esta máquina es de aproximadamente 230 Kg.

Las paredes del cilindro son de lámina galvanizada y tienen agujeros ovalados o rectangulares, por estos sale el agua con impureza y cascarilla. La compuerta de carga y descarga va a lo largo del cilindro. Por encima del cilindro, y paralelo a éste,

un tubo proveniente de la línea principal de flujo deja caer agua a presión sobre las raíces. Cuando no hay lavado, el agua sigue fluyendo al tanque de almacenamiento de raíces lavadas a través de una manguera conectada a la línea principal que suministra el agua para el lavado. Esta se tapona manualmente durante el proceso de lavado para incrementar la presión del agua. El agua en el tanque de almacenamiento es utilizada al final del lavado para remover los sólidos depositados en el fondo.

La lavadora/peladora se carga manualmente por el operario generando residuos de fibras sintéticas que atan los sacos de yuca. Una vez las yucas lavadas y peladas, se depositan en el mencionado tanque de almacenamiento, donde cerca al piso se ubican rejillas para impedir el paso de raíces en el efluente cuyo contenido está conformado por cascarilla, suelo e impurezas. El efluente se descarga, sin tratamiento preliminar por rejillas o sedimentador, en un cuerpo de agua cercano a la planta por medio de tubería aprovechando la pendiente del terreno.

2.1.3 RALLADO

En este proceso se busca extraer el almidón de la raíz y liberar los gránulos de almidón los cuales están dispersos en la matriz agua, la calidad y eficiencia de este proceso determina la cantidad de almidón final extraído.

El rallador esta conformado por un tambor metálico recubierto por una lámina de hierro galvanizado, perforado con un instrumento punzante que deja un borde sobresaliente, creando así una superficie áspera y cortante. Lo atraviesa un eje central y uno de sus extremos se conecta mediante una banda al motor principal.

Las raíces lavadas y peladas se conducen manualmente con ayuda de una pala, del tanque de almacenamiento de las raíces lavadas a la tolva del rallador que se aprecia en la Figura 3, posteriormente el operario introduce las raíces en el rallador retirando del proceso las que tenga algún grado de descomposición y algunos residuos de la planta de yuca que queda después del lavado. Estos residuos se disponen en recipientes para luego aprovecharlos como alimento para cerdos.

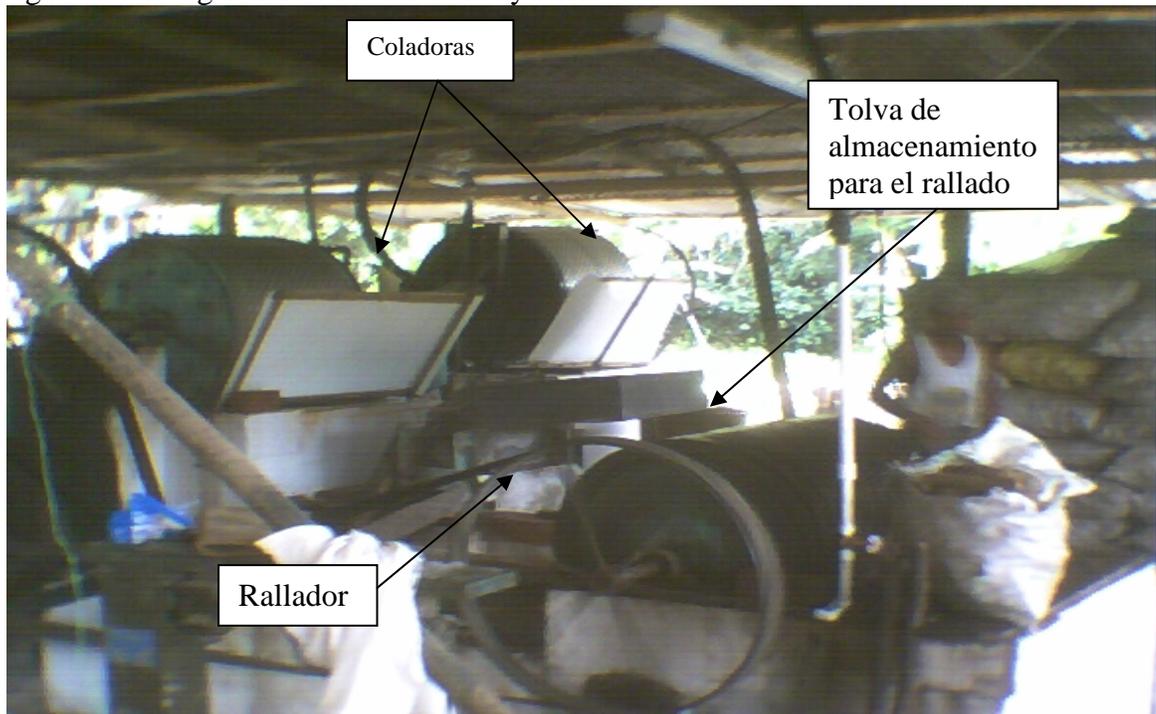
El contacto de la raíz con la superficie produce una masa, gruesa o fina dependiendo de la distancia entre el tambor y el borde de madera ubicado frente al tambor, que se almacena en un tanque ubicado debajo del rallador. Durante esta operación se agrega un poco de agua para limpiar la superficie del tambor y, además, darle mayor facilidad de transferencia por bombeo de la masa producida hacia el colado.

2.1.4 COLADO

La masa de yuca rallada es introducida por bombeo en dos coladoras independientes con ejes que se apoyan en un sistema de rodamientos impulsado por el motor principal, el agua se agrega por una tubería proveniente de la línea principal de flujo.

Las coladoras son tambores provistos por una serie de aspas que se encargan de mezclar la masa de la yuca con el agua. En ellos se produce una lechada de almidón tamizada mediante una maya de tela o nylon, cuya trama es de 80 mesh, instalada en la superficie de los tambores. En promedio, cada cuatro horas el tamiz se retira y reemplaza por uno limpio.

Figura 3. Vista general de las coladoras y rallador



Fuente propia

Como se observa en la Figura 4, el afrecho resultante en este proceso se deposita, por medio de tubería aprovechando la topografía del terreno, en un tanque para luego ser transportado manualmente a una trinchera de guadua. El lixiviado producido en este proceso se conduce al cuerpo de agua sin previo tratamiento físico, químico o microbiológico.

La lechada de almidón fluye hacia un tamiz plano ligeramente inclinado con movimiento de vaivén reteniendo fibras finas denominadas por Alarcón [3] como afrechillo y posteriormente se conduce por gravedad hacia los canales de sedimentación.

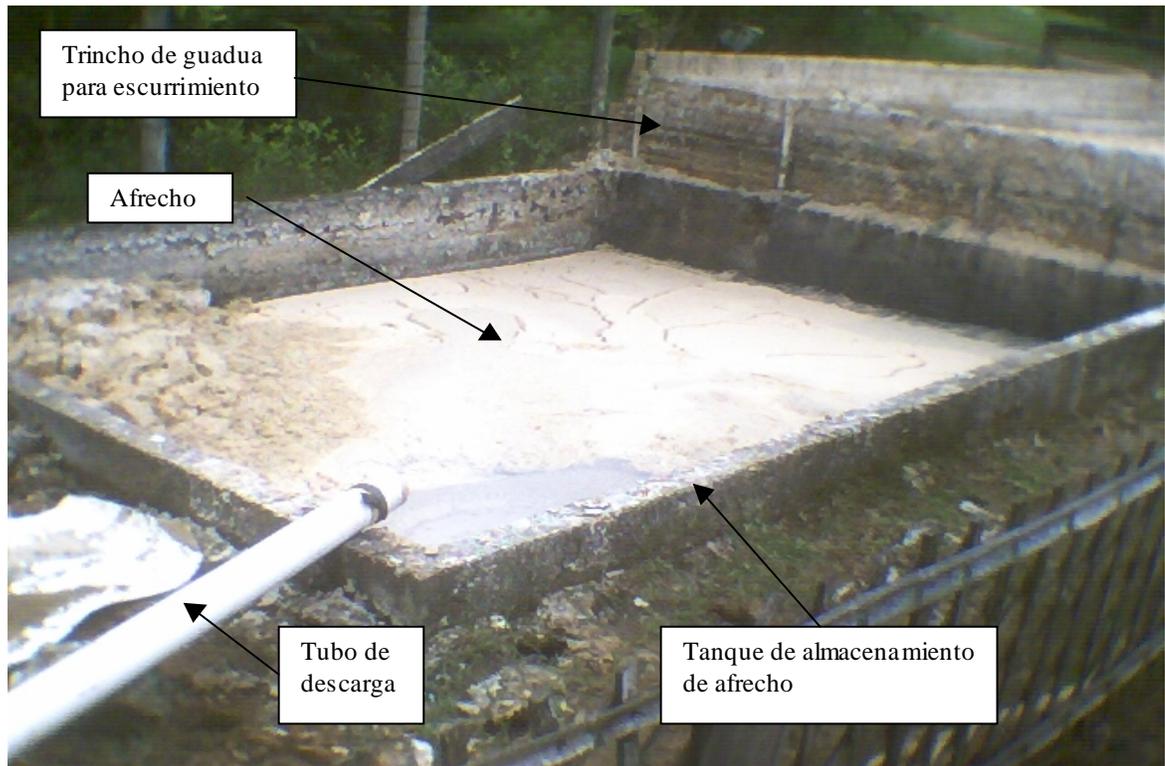


Figura 4. Tanque de almacenamiento de Afrecho.
Fuente propia

2.1.5 SEDIMENTACIÓN DE ALMIDÓN

Una vez la lechada ha sido tamizada, entra a los canales de sedimentación como se puede observar en la Figura 5, recubiertos con baldosa con el fin de aproximarse a un flujo laminar. A medida que sedimenta el almidón de mayor densidad, forma una pendiente ligeramente inclinada que permite el flujo de la lechada restante [3]

Cuando termina la sedimentación se pueden observar tres capas en los canales de sedimentación, una capa inferior constituida por el almidón natural o nativo, una capa intermedia formada por la “mancha” y finalmente un sobre nadante o agua residual. [1]. La mancha y sobre nadante últimos son retirados con un utensilio recubierto con caucho como se ilustra en la Figura 5.

Figura 5. Canales de sedimentación, raspado de la mancha.



Fuente propia

Las dimensiones de cada uno de los 13 canales de la rallandería son: 11.25 m de largo, un promedio de 43 cm. de ancho y una profundidad promedio de 32 cm. Lográndose un recorrido de 146 m. Al final de los canales se colocan tablillas que permiten cambiar el tiempo de retención, a medida que aumenta el nivel de almidón sedimentado se incrementa la altura de las tablillas.

En los tanques de fermentación se asegura una capa de agua sobre nadante (3 o 4 cm por encima del almidón) e inoculando con agua sobre nadante en los canales de sedimentación o de el flujo en el sedimentador de “mancha”. El almidón se convierte, después de 20 o 30 días en almidón agrio o fermentado, que se usa en la panificación [1].

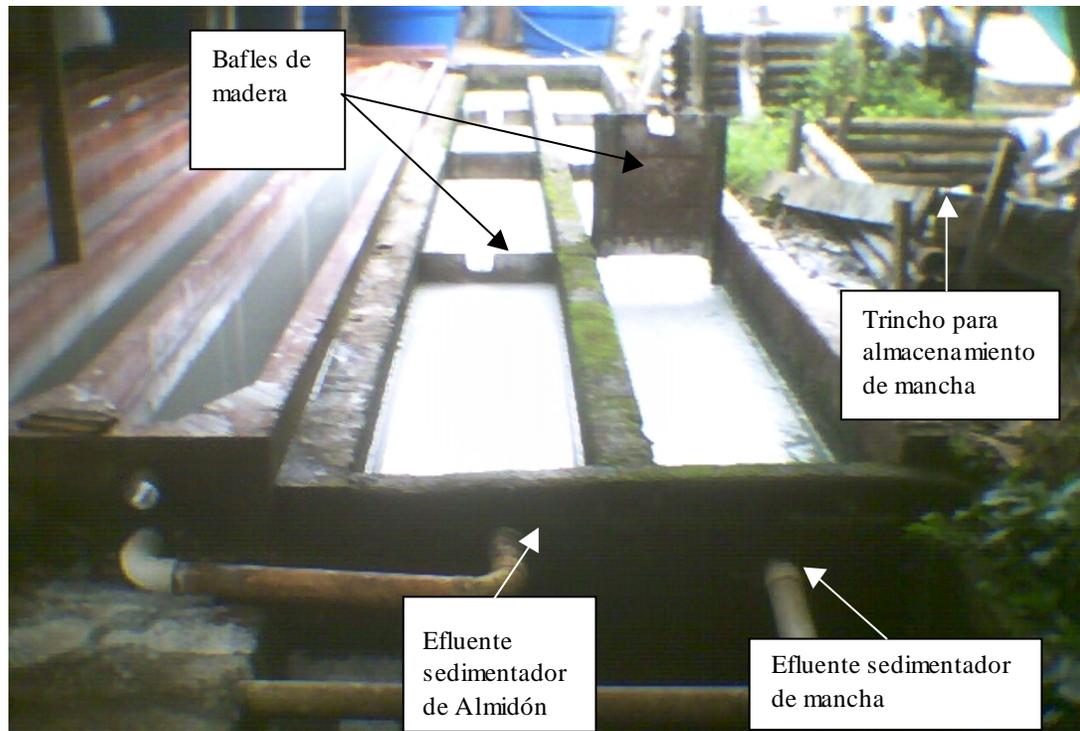
2.1.6 SEDIMENTADOR DE “MANCHA”

El sobrenadante tiene gran cantidad de “mancha” que aun no ha sedimentado debido a su baja densidad. Esta agua se conduce por medio de tubería, aprovechando la topografía del terreno, al sedimentador de “mancha” que se puede apreciar en la . Este consiste en dos canales de 11.25 m de largo, 0,8 m de ancho y una altura aproximada de 0.8 m, la cual no es constante debido al efecto erosivo típico de estos

efluentes. El efluente de este sedimentador, en esta planta, es tratado con un filtro anaeróbico de flujo ascendente descendente

Alarcón [1], sostiene que la “mancha” contiene almidón de baja densidad y poca calidad, y su nivel de proteína es alto, se emplea en la alimentación de porcinos y la elaboración de adhesivos.

Figura 6. Sedimentador de mancha



Fuente propia

2.2 CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO

La toma de muestras utilizadas en la determinación de parámetros fisicoquímicos, tales como pH, temperatura, DBO₅ total, DBO₅ soluble, DQO total, DQO soluble, cianuros, sólidos totales y sólidos suspendidos, se efectuó una vez los canales de sedimentación se encontraban operando con flujo continuo.

Se decidió efectuar las pruebas de DBO₅ soluble y DQO soluble retirando los sólidos por medio mecánico, tal como se detalla en el Apéndice F, para comparar la variación de concentración respecto a las totales y así poder predecir la disminución de cargas orgánicas si se retiraran los sólidos de las descargas de la planta.

La Tabla 1 muestra los lugares donde se tomaron las muestras para estos parámetros. En el efluente de la etapa de lavado se tomaron muestras simples a tiempos de 1, 5, 10 y 15 minutos, durante un mismo batch. Para los efluentes del sedimentador de almidón y el de mancha las muestras se obtuvieron a través de cuatro muestreos simples, cada hora durante el periodo de producción.

Las muestras se transportaron debidamente refrigeradas en una nevera, de acuerdo con lo establecido en las recomendaciones de toma y preservación de muestras presentadas en el Apéndice E.

Los resultados obtenidos para pH, temperatura, conductividad, DBO₅, DQO, sólidos totales y sólidos suspendidos, se presentan desde la Tabla 3 hasta la Tabla 9 respectivamente.

El caudal se determinó a través de una medición volumétrica manual de acuerdo con el procedimiento descrito en el Apéndice F, tanto en el efluente de lavado como en el efluente del sedimentador de almidón. Es necesario aclarar que las muestras en el efluente de lavado se tomaron sin cascarilla. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 1. Lugares de muestreo y pruebas realizadas.

Lugares de muestreo	Pruebas
Efluente de la etapa de lavado	Sólidos suspendidos, sólidos totales, DBO ₅ total y soluble, DQO total y soluble, pH, temperatura, conductividad
Agua utilizada para el colado	pH Temperatura Conductividad
Lechada entrante al sedimentador de almidón	pH Temperatura Conductividad
Efluente del sedimentador de almidón	Sólidos suspendidos, sólidos totales, DBO ₅ total y soluble, DQO total y soluble, pH, temperatura, conductividad, cianuros
Efluente del sedimentador de mancha	Sólidos suspendidos, sólidos totales, DBO ₅ total y soluble, DQO total y soluble, pH, temperatura, conductividad

Tabla 2. Datos obtenidos para el Caudal.

Caracterización número	Intervalo de muestreo (Cada 30 min)	Efluente de lavado mL/s	Efluente sedimentador de almidón mL/s	Yuca procesada (Kg)
1 Abril 19 de 2005	1	112.6	803.4	1480,5
	2	721.3	1065.7	
	3	663.7	1151.5	
	4	637.8	1011.9	
	5	502.2	1284.7	
	6	571.5	827.2	
	7	-	1163.1	
	8	-	1067.2	
	9	-	1014.5	
	10	-	876.6	
2 Abril 25 de 2005	1	516.7	470.5	2205,0
	2	772	878.5	
	3	604.8	1023.3	
	4	571.5	1023.9	
	5	627.9	936.2	
	6	511.6	967.1	
3 Mayo 3 de 2005	1	446.7	1257.8	2520,0
	2	424.2	1165	
	3	396.9	1212.4	
	4	434.5	580.8	
	5	497.7	1185	
	6	615.5	1079.8	
	7	490.4	1180.2	
4 Mayo 12 de 2005	1	462.5	-	504
	2	525	-	
Promedio		528,9	1009,8	-
Desviación Estándar		137,5	203.4	-
Máximo		772,0	1284,7	-
Mínimo		112,6	470,5	-
Intervalo de Confianza (95%)		±659.4	±814.2	-

-Datos no disponibles

Tabla 3. Datos obtenido para el Potencial de Hidrógeno, pH

Caracterización número	Intervalo de muestreo	Efluente de lavado	Agua para colado	Afluente sedimentador de almidón	Efluente sedimentador de almidón	Efluente sedimentador de mancha
1	0	6,52	6,58	6,49	6,07	5,53
	1	6,58	6,38	6,32	6,04	5,46
	2	6,50	6,61	6,50	6,10	5,40
	3	6,54	6,50	6,45	6,12	5,49
2	0	6,70	6,78	6,71	6,26	4,22
	1	6,73	6,75	6,62	6,55	4,46
	2	6,49	6,64	6,49	6,26	4,92
	3	-	-	-	6,21	5,15
3	0	6,25	6,74	6,41	6,41	5,59
	1	6,28	6,42	-	6,16	5,34
	2	6,38	6,11	6,15	6,06	5,44
	3	6,52	-	5,24	5,76	5,23
4	0	6,52	6,97	6,41	5,90	4,26
	1	6,85			6,29	4,30
	2	6,96	6,40	6,36	6,30	4,45
	3	7,06	-	-	-	-
Promedio		6,59	6,57	6,35	6,17	5,02
Desviación Estándar		0,23	0,23	0,38	0,20	0,53
Máximo		7,06	6,97	6,71	6,55	5,59
Mínimo		6,25	6,11	5,24	5,76	4,22
Intervalo de Confianza		±0.81	±0.86	±1.47	±0.79	±1.37

-Datos no disponibles

Tabla 4. Datos obtenidos para la Temperatura, °C

Caracterización número	Intervalo de muestreo	Efluente de lavado, °C	Agua para colado, °C	Afluente sedimentador de almidón, °C	Efluente sedimentador de almidón, °C	Efluente sedimentador de mancha, °C
1	0	20,0	21,0	21,0	24,0	24,0
	1	22,0	21,0	22,0	24,0	24,5
	2	24,0	22,0	22,5	24,0	24,0
	3	24,0	22,0	22,0	24,0	23,5
2	0	21,5	20,5	21,0	22,0	21,0
	1	21,8	22,0	22,0	22,5	22,0
	2	22,0	22,0	22,2	22,5	22,5
	3	-	-	-	22,5	22,5
3	0	21,0	21,2	21,8	21,5	21,5
	1	22,1	23,4	-	22,2	22,0
	2	22,2	23,3	22,8	22,9	22,4
	3	22,6	-	22,7	22,6	23,2
4	0	21,7	21,7	21,5	21,9	22,2
	1	21,7	-	-	21,6	22,0
	2	21,6	21,3	21,0	21,3	21,3
	3	21,3	-	-	-	-
Promedio		22,0	21,8	21,9	22,6	22,6
Desviación Estándar		1,0	0,9	0,6	1,0	1,1
Máximo		24,0	23,4	22,8	24,0	24,5
Mínimo		20,0	20,5	21,0	21,3	21,0
Intervalo de Confianza		±4.0	±2.9	±1.8	±2.7	±3.5

-Datos no disponibles

Tabla 5. Datos obtenidos para la Conductividad

Caracterización número	Intervalo de muestreo	Efluente de lavado, μS	Agua para colado, μS	Afluente sedimentador de almidón, μS	Efluente sedimentador de almidón, μS	Efluente sedimentador de mancha, μS
1	0	-	-	-	-	-
	1	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-
2	0	513	56,3	408000	790	473
	1	372	67,3	380000	1075	603
	2	227	68	144000	1008	830
	3	-	-	-	565	913
3	0	237	300	8080	897	934
	1	210	61	-	864	938
	2	231	41,6	185000	945	885
	3	233	-	120300	1800	58200
4	0	167	68	100100	400	1025
	1	279	-	-	433	884
	2	240	54,7	102400	630	876
	3	234	-	-	-	-
Promedio		277,6	89,6	138235,0	855,2	836,1
Desviación Estándar		94,6	85,5	122498,3	387,2	168,0
Máximo		513,0	300,0	408000,0	1800,0	1025,0
Mínimo		210,0	41,6	8080,0	400,0	473,0
Intervalo de Confianza		$\pm 303,0$	$\pm 258,4$	$\pm 399920,0$	$\pm 1400,0$	$\pm 552,0$

-Datos no disponibles

Tabla 6. Datos obtenidos para la Demanda Bioquímica de Oxígeno.

Caracterización número	Intervalo de muestreo	Efluente de lavado DBO ₅ Total, mg/L	Efluente de lavado DBO _{Soluble} , mg/L	Efluente de sedimentador de almidón DBO _{Total} , mg/L	Efluente de sedimentador de almidón DBO _{Soluble} , mg/L	Efluente de sedimentador de mancha DBO _{Total} , mg/L	Efluente de sedimentador de mancha DBO _{Soluble} , mg/L
1	0	-	-	-	1706,4	-	-
	1	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	1365,12	1990,8	-
	3	-	-	-	-	-	-
2	0	-	-	-	1437,8	-	-
	1	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	1042,8	821,6	-	-
	3	-	-	-	-	-	-
3	0	-	-	-	-	-	-
	1	-	-	-	-	-	-
	2	1848,6	1042,8	1682,7	1279,8	1327,2	1232,4
	3	-	-	-	-	-	-
4	0	1303,5	-	1896	1161,3	1682,7	1303,5
	1	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-
Promedio		1576,1	-	1540,5	1295,3	1666,9	1267,9
Desviación Estándar		385,4	-	444,0	295,6	332,1	50,3
Máximo		-	-	1896,0	1706,4	1990,8	1303,5
Mínimo		-	-	1042,8	821,6	1327,2	1232,4
Intervalo de Confianza		-	-	±853,2	±884,8	±663,6	±71,1

-Datos no disponibles

Tabla 7. Datos obtenidos para la Demanda Química de Oxígeno.

Caracterización número	Intervalo de muestreo	Efluente de lavado DQO Total, mg/L	Efluente de lavado DQO _{Soluble} , mg/L	Efluente de sedimentador de almidón DQO _{Total} , mg/L	Efluente de sedimentador de almidón DQO _{Soluble} , mg/L	Efluente de sedimentador de mancha DQO _{Total} , mg/L	Efluente de sedimentador de mancha DQO _{Soluble} , mg/L
1	0	3462,7	1143,8	3059,0	2757,0	4118,0	3211,0
	1		236,4	2908,0	2454,0	2261,0	2051,0
	2	9613,0	1597,0	1799,0	1644,0	3211,0	2160,0
	3	10218,0	4218,8	3563,0	3110,0	3160,0	2051,0
2	0	5781,6	1295,0	5025,4	2756,9	1844,1	1345,4
	1	5277,5	387,6	5579,9	3462,7	2257,5	2202,4
	2	6235,3	34,7	4874,2	3009,0	4118,0	1227,2
	3	6285,7	690,1	2857,7	1849,5	4067,6	2454,5
3	0	9671	589,2	4252,0	2891,0	4353,0	4050,0
	1	4151	992,5	3975,0	2790,0	4504,0	3471,0
	2	3849	942,1	4126,0	3143,0	4025,0	2790,0
	3	2485,5	1093,4	3370,0	2412,0	4075,0	2840,0
4	0	4680,4	740,49	1857,0	1479,0	3445,0	2891,0
	1	3597	1497	2311,0	1530,0	3143,0	2664,0
	2	2740	1345	2412,0	2009,0	3143,0	1933,0
	3	2260,7	1496,7	-	-	-	-
Promedio		5353,9	1357,0	3464,6	2486,5	3448,4	2489,4
Desviación Estándar		2642,1	918,6	1161,1	639,6	830,9	761,2
Máximo		10218,0	4218,8	5579,9	3462,7	4504,0	4050,0
Mínimo		2260,7	589,2	1799,0	1479,0	1844,1	1227,2
Intervalo de Confianza		±7957,3	±3629,6	±3780,9	±1983,7	±2659,9	±2822,8

-Datos no disponibles

Tabla 8. Datos obtenidos para los Sólidos Totales.

Caracterización número	Intervalo de muestreo	Efluente de lavado ST, mg/L	Efluente de sedimentador de almidón ST, mg/L	Efluente de sedimentador de mancha ST, mg/L
1	0	2878	2588	2759
	1	2705	2574	1936
	2	11921	1837	2872
	3	11755	3327	2348
2	0	6044	3643	1428
	1	11024	4325	1979
	2	9054	4122	3232
	3	4026	2312	3500
3	0	31044	3975	3843
	1	9972	4113	3627
	2	5772	4017	3528
	3	3032	2940	2998
4	0	21456	-	2499
	1	5344	1682	2891
	2	2370	1964	2236
	3	2152	-	-
Promedio		8784,3	3101,4	2778,4
Desviación Estándar		7841,6	944,86	704,2
Máximo		31044,0	4325,0	3843,0
Mínimo		2152,0	1682,0	1428,0
Intervalo de Confianza		±28892,0	±2643,0	±2415,0

-Datos no disponibles

Tabla 9. Datos obtenidos para los Sólidos Suspendidos.

Caracterización número	Intervalo de muestreo	Efluente de lavado SS, mg/L	Efluente de sedimentador de almidón SS, mg/L	Efluente de sedimentador de mancha SS, mg/L
1	0	3550	1228	98
	1	12175	1860	464
	2	20415	1608	898
	3	6050	822	448
2	0	3424	1442	1392
	1	2798	1310	1406
	2	13002	1150	1524
	3	9790	1372	1282
3	0	12516	1550	1738
	1	5466	1754	1522
	2	2970	1452	1370
	3	1450	1256	1500
4	0	22930	1046	1222
	1	6366	806	756
	2	3790	744	742
	3	3340	-	-
Promedio		8126,4	1293,3	1279,3
Desviación Estándar		6486,7	338,1	319,96
Máximo		22930,0	1860,0	1738,0
Mínimo		1450,0	744,0	742,0
Intervalo de Confianza		±2148,0	±1116,0	±996,0

-Datos no disponibles

Tabla 10. Datos obtenidos para Cianuros[†].

Muestreo	Intervalo de muestreo	Efluente de lavado CN ⁻ , mg/L	Efluente de sedimentador de almidón CN ⁻ , mg/L
1 Septiembre 12 de 2005	0	-	0,23
	1	1,02	0,20
	2	1,74	-
	3	-	-
Promedio		1,38	0,215
Desviación		0,51	0,02
Rango		±0,72	±0,03

-Datos no disponibles

[†] La determinación de cianuro se efectuó en un muestreo independiente.

2.3 DISCUSIÓN DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS EFLUENTES

A continuación se presenta el análisis de los resultados de la caracterización fisicoquímica de los efluentes, partiendo de las concentraciones obtenidas para luego ser comparados con lo reportado en la literatura y así tener una visión de la planta en estudio frente al común de las rallanderías.

Al hacer el respectivo análisis estadístico, se puede observar variabilidad en los datos de algunos parámetros como se puede apreciar de la Tabla 2 hasta la Tabla 10. Se decidió no descartar datos debido a que las concentraciones en los efluentes no son regulares por la naturaleza del proceso de extracción, es decir, las concentraciones disminuyen a través del tiempo, pues en el efluente del sedimentador de almidón, las concentraciones dependen del criterio de dilución de la lechada por parte del operario y en el efluente de lavado/pelado de la raíz las concentraciones disminuyen a medida que se retira suelo y cascarilla. Por lo tanto el descarte de datos no se ajustaría a la realidad física de la planta.

2.3.1 EFLUENTE CASCARILLA

En el lavado/pelado de raíces, se utiliza un caudal de 0,5289 L/s para dos batch de 15 minutos en promedio en una hora, el agua, el resto del tiempo sigue fluyendo a través de una manguera conectada a la línea principal de lavado. El flujo aproximado de agua utilizada en una hora de producción es de 1905 Kg/h. Según la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC) el caudal promedio para una rallandería en el efluente de lavado oscila entre 0,31 L/s [14] y 0,22 L/s [13], presentando valores máximos y mínimos que pueden estar entre 0,39 y 0,03 L/s respectivamente. Comparando los datos obtenidos y la información bibliográfica se encuentra que el consumo de agua en la etapa de lavado/pelado de esta rallandería supera en 1.7 veces el promedio de las rallanderías. Se debe tener en cuenta, que en los estudios citados no se aclara el intervalo de tiempo en el cual transcurre el batch de lavado/pelado, que también es importante para determinar las cargas reales que se generan en esta operación.

El caudal requerido en este proceso equivale, para un nivel de complejidad medio, a la dotación mínima requerida por una población de 381 habitantes en un día, según el Reglamento de Saneamiento Básico RAS, la dotación neta residencial para un nivel de complejidad medio es de 120 /hab*día [24].

El pH promedio del efluente de este proceso es de 6.59, con un valor mínimo de 6.25 y un máximo de 7.06. Se observa un incremento del pH, a medida que la tierra y cascarilla se remueven, hasta aproximarse al del agua utilizada en este proceso. Se considera que este cambio está dado por la remoción de los ácidos húmicos presentes en el suelo adherido a las raíces. Estudios anteriores [9], muestran valores de pH que oscilan entre 6.0 y 6.5, los valores de pH dependen de factores como el tipo de suelo donde se cultiva la yuca, el tipo de yuca, el pH del agua utilizada en el proceso, el cual varía en el rango de 6.0 a 7.0, como

se puede observar en la Tabla 3. La conductividad del agua utilizada en este proceso es de $59.56\mu\text{s}$ y se incrementa, por los iones presentes en la tierra y la cascarilla, hasta un valor promedio de $236.38\mu\text{s}$. El valor reportado para este parámetro es de $350\mu\text{S}$ [13].

El aporte de sólidos totales tiene una concentración promedio de 8784.3 mg/L que disminuyen con el tiempo de lavado como se aprecia en la Tabla 8, teniendo al inicio una concentración máxima de 31044 mg/L y mínima de 2152 mg/L al final en un periodo de 15 minutos de lavado. Este comportamiento se debe a la remoción gradual de suelo y cascarilla en un batch lavado. La carga de sólidos totales en una hora de producción es de $8,365\text{ Kg}$.

Los sólidos suspendidos totales tienen tendencia similar a los sólidos totales, en cuanto a la disminución de concentración a través del tiempo de lavado por remoción gradual de suelo y cascarilla en el lavado, con una concentración promedio de 8126.4 mg/L , un máximo de 22930 mg/L y un mínimo de 1450 mg/L como lo presenta la Tabla 9. La carga promedio de sólidos suspendidos totales es de $7,74\text{ Kg/h}$. Los datos reportados en [13] muestran un valor de 3260 mg/L de SST para este efluente, el cual es inferior en 2.5 veces lo obtenido en este estudio.

La DQO total tiene tendencia similar a los sólidos, en cuanto a la disminución de la concentración a través del tiempo, así se aprecia en Tabla 7. Aportada en su gran mayoría por el suelo adherido a las raíces de lavado, con un promedio de 5353.1 mg/L , una máxima de $10218,0\text{ mg/L}$ y una mínima de $2260,7\text{ mg/L}$, cuya carga es de $5,1\text{ Kg/h}$. En cuanto a la DQO soluble, con un promedio de $1357,0\text{ mg/L}$, se observa un aumento de concentración en el tiempo de lavado, situación inversa a la DQO total, puesto que al final del lavado se puede observar fricción del parénquima cortical y esto hace que se liberen pequeños residuos orgánicos aumentando la materia orgánica soluble. Por lo tanto se puede decir que la materia orgánica soluble es aportada en su mayoría en el momento final del lavado de la cascarilla. La relación DQO soluble/DQO total es de $0,2535$ lo que indica que si se retira el material insoluble por método mecánico es posible eliminar cerca del 74.6% de carga contaminante por DQO. El valor de DQO total encontrado en [13] para este proceso es de 3830 mg/L .

La Tabla 6 presenta la DBO_5 . No se obtuvo un número representativo de resultados debido a que las diluciones mínimas para aguas residuales industriales recomendadas por el estándar métodos [1], no alcanzaban a cumplir con los requerimientos de oxígeno para que las bacterias degraden las altas concentraciones de materia orgánica o no se cumplió con las condiciones de oxígeno residual establecidas en el método. El promedio de los datos obtenidos es de 1576.1 mg/L , éste es un valor cercano al valor reportado por Vigneswaran [32] el cual es de 1700 mg/L en épocas húmedas.

Las concentraciones de cianuros como CN^- mostradas en la Tabla 10, establecen un promedio para el efluente de lavado de $1,38\text{ mg/L}$ y para el efluente del sedimentador de almidón de $0,215\text{ mg/L}$, lo cual es consistente con el hecho que la cascarilla de la raíz contiene la mayor concentración de glucósido cianogénico que la contenida en la corteza

interior. Estos resultados concuerdan con lo encontrados por Alarcón [1] y Molina [25].

Comparando la carga orgánica por DBO₅ del efluente de cascarilla con un agua residual doméstica, se obtiene que este efluente es equivalente a la carga orgánica generada por una población de 720 habitantes cuya contribución per cápita de materia orgánica que recomienda el reglamento RAS[24] es de 50 $\frac{g}{hab * dia}$ tal como se demuestra a continuación:

Teniendo en cuenta que el lavado no es continuo y que de una hora de proceso esta operación realmente trabaja 30 minutos, la carga orgánica de este efluente es de

$$CO_E = 1576,1 \frac{mg}{L} \times \frac{1g}{1000mg} \times 0,5289 \frac{L}{S} \times 86400 \frac{S}{dia} \times 0,5 = 36011,5 \frac{g}{dia} \text{ como DBO}_5,$$

Que al dividir sobre la contribución per cápita, se obtiene una aproximación al número de habitantes,

$$N^{\circ} \text{ hab} = \frac{36011,5 \frac{g}{dia}}{50 \frac{g}{hab * dia}} = 720 \text{ hab}$$

2.3.2 EFLUENTE DEL SEDIMENTADOR DE ALMIDÓN

El caudal del efluente del sedimentador de almidón es de 1,0098 L/s, lo que genera un flujo de agua residual de 3635,28 L/h. Para este efluente se reportan valores de 0,76 [13], 0,93 [14] y 1,4 [29] L/s; el caudal promedio de los valores anteriores es de 1,02 L/s, el cual es cercano al caudal obtenido en este estudio, pero como se puede observar, de acuerdo a lo reportado, la variabilidad en el caudal requerido para este proceso es amplio. La variación del caudal puede ser causada por el estado del tiempo cuando se realizaron los muestreos, por el estado de limpieza del tanque de almacenamiento en la quebrada abastecedora, por la operación de las válvulas de control, por no asegurar el trabajo simultáneo de las dos coladoras, por un corto tiempo de muestreo, entre otros.

El agua utilizada en el proceso de colado, procedente de la fuente de abastecimiento, presenta un pH promedio de 6,57, observando una leve acidificación cuando el flujo pasa de la coladora al sedimentador de almidón, pasando a un pH promedio de 6,35. Al terminar el recorrido en el sedimentador, como se puede observar en la Tabla 3, el pH promedio es de 6,17. Según la CRC [13] el pH tiene un máximo de 6,5 y un mínimo de 6,3; la diferencia en los resultados se debe al tipo de yuca, ya que en el estudio citado no se menciona el tipo de yuca y el tiempo de almacenamiento desde su cosecha.

Como se puede observar en la Tabla 5, la sedimentación del almidón hace que la conductividad disminuya a través del canal desde 180985 μs , debido a la alta concentración de minerales presentes en las raíces [10], los cuales sedimentan por arrastre hasta una

conductividad promedio de 855,18 μ s. Los datos encontrados en estudios anteriores son de 530 μ S [13], los cuales se encuentran en el rango obtenido para este efluente.

El aporte de sólidos totales tiene una concentración promedio de 3101,4 mg/L, con una máxima de 4325 mg/L y una mínima de 1682 mg/L tal como se aprecia en la Tabla 8. La variación de concentración obedece al criterio de dilución de la lechada por parte del operario en el momento de aplicar el agua a la masa de yuca en la coladora, y además, al trabajo simultáneo de éste en otras operaciones. La carga de sólidos totales en una hora de producción es de 11,27 Kg. Según [25], este efluente tiene una concentración de sólidos totales de 3454 mg/L, el cual se encuentra en el rango de máximos y mínimos obtenidos en este estudio.

Los sólidos suspendidos totales tienen una concentración promedio de 1293,3 mg/L, con una máxima de 1860 mg/L y un mínimo de 744 mg/L como se observa en la Tabla 9. La variación de concentración también depende de las condiciones expuestas para los sólidos totales de este efluente. La carga promedio de sólidos suspendidos totales es de 4,7 Kg/h. En Colombia se reportan concentraciones para sólidos suspendidos totales de 468 [13] y 468,6 [25] mg/L, mientras en Tailandia se reportan valores entre 730 y 990 [5]. Como se observa, los valores reportados son inferiores a lo hallado en este trabajo por las condiciones particulares de funcionamiento de la planta y el tipo de yuca en el momento de muestreo en estos estudios. Para una industria de almidón en Tailandia se reportan concentraciones superiores a 4000 mg/L [4], estos valores sobrepasan considerablemente los reportados en Colombia para éste y los otros parámetros fisicoquímicos, por lo tanto los estudios realizados en la industria de Tailandia no se tendrán en cuenta para las discusiones siguientes.

La relación SST/ST es de 41.70%, esto indica una concentración de sólidos suspendidos atribuibles a la presencia de mancha recuperable en este efluente, pues se considera que los sólidos suspendidos se encuentran divididos en sedimentables y no sedimentables [23].

La DBO₅ total tiene una concentración promedio de 1540,5 mg/L y una concentración de 1295,3 mg/L para la DBO₅ soluble, se obtiene así una relación DBO₅ soluble/DBO₅ total de 0,84, indicando que al retirar la parte insoluble por método mecánico es posible remover cerca del 16% de la carga orgánica biodegradable. Las cargas orgánicas total y soluble son de 5,6 y 4,71 Kg/h respectivamente. Para este efluente la concentración de la DBO₅ total reportada es de 1290 mg/L [13], como puede observarse en la Tabla 6, éste valor se encuentra en el rango de las concentraciones encontradas en las caracterizaciones de este estudio

La DQO total tiene una concentración máxima de 5579,9 mg/L, una mínima de 1799,0 mg/L y en promedio de 3464,6 mg/L cuya carga orgánica es de 12,59 Kg/h. En cuanto a la DQO soluble, la concentración promedio es de 2486,5 mg/L, una máxima de 3462,7, una mínima de 1479,0 y una carga orgánica en promedio de 9,03 Kg/h. La relación DQO total/DQO soluble es de 0,72, donde se puede observar que al retirar la parte insoluble por medio mecánico es posible remover cerca del 28% de la carga orgánica. El valor de DQO total reportado en [13] es de 3105 mg/L, como puede observarse en la Tabla 6, éste valor se

encuentra en el rango de las concentraciones encontradas en las caracterizaciones de este estudio

Se tiene una relación DQO/DBO5 de 2,25:1 y un factor de biodegradabilidad de 0,68[‡] que lo clasifica este efluente en condición de biotratabilidad media [26], por lo tanto con los tratamiento biológicos como lagunas de estabilización, filtros anaeróbicos, lodos activados, filtros percoladores, Biodigestores, entre otros, se esperaría una eficiencia media.

La concentración de cianuros como se observa en la Tabla 10, muestra un promedio de 0,215 mg/L. Se reportan valores de 1,2mg/L [29], 2,8 mg/L [25] y entre 1,2 y 4,0 mg/L [30], estas concentraciones reportadas son mayores a las de este estudio, debido a que la concentración de Cianuro depende de la variedad de Yuca utilizada en el proceso [1], pues las yucas “amargas” presentan mayores concentraciones que las “dulces” [25].

2.3.3 EFLUENTE DEL SEDIMENTADOR DE “MANCHA”

El caudal del efluente del sedimentador de mancha, por continuidad, es igual al del efluente del sedimentador de almidón, es decir 1,0098 L/s, el cual equivale para un nivel de complejidad medio a la dotación mínima requerida por una población de 727 habitantes en un día ya que según el Reglamento de Saneamiento Básico, la dotación neta residencial para un nivel de complejidad medio es de 120 /hab*día [24].

El pH promedio de este efluente es de 5,02, con un pH máximo de 5,59 y mínimo de 4,22, se observa una disminución del pH aproximada de una unidad respecto al efluente del sedimentador de almidón, atribuible a las altas concentraciones de ácido láctico producto del proceso natural de acidificación que sufre este tipo de efluentes [7] en [9]. Los valores reportados de pH para esta rallandería oscila entre 4,7 [29] y 5,5 [13]. Con los datos obtenidos en este estudio y los reportados, se aprecia la tendencia ácida de estos efluentes, que hace indispensable la corrección de pH para posibles tratamientos biológicos [8], [9] y [29]. En el Anexo D, se observan datos de las titulaciones v/v de muestra, acidificada naturalmente hasta un pH de 3,88, con una solución saturada de cal hidratada. En la Figura 61 se observa que hay mayor consumo de la solución al inicio de la titulación por las altas concentraciones de ácidos grasos volátiles, al igual que la mínima o nula presencia de alcalinidad bicarbonática [30]

La conductividad de este efluente en promedio es de 850.5 μ s, se reportan datos de 500 y 800 μ s [13], la causa de estas diferencias está dada por el tipo de yuca utilizado durante el muestreo o por la aplicación de agua a la masa de yuca durante el colado. Este valor se mantiene constante respecto al efluente del sedimentador de almidón, pues no hay arrastre significativo de minerales y sales por la sedimentación de partículas, esto se puede explicar al observar la baja remoción, en esta operación, de sólidos totales y suspendidos esto a

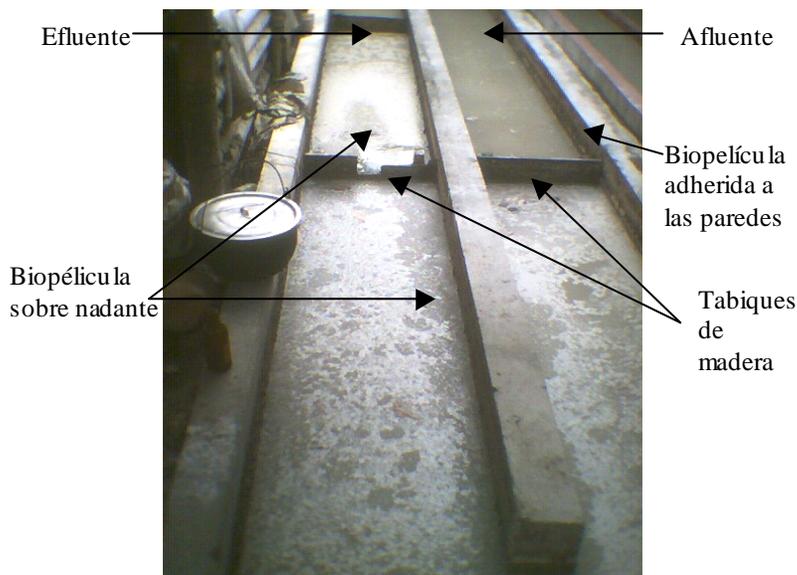
[‡]El factor de biodegradabilidad es obtenido por la expresión $f_b = \frac{DBO_5}{0,65 \times DQO}$ [26]

continuación será discutido.

En la Tabla 8 se puede apreciar que en este efluente la concentración de sólidos totales tienen una concentración promedio de 2778,4 mg/L, con una máxima de 3843,0 mg/L y una mínima de 1428 mg/L. La carga promedio de sólidos totales es de 10,10 K/h. Comparando la concentración de sólidos totales de la entrada y salida de este sedimentador, se tiene una eficiencia de remoción del 10,41%, la cual es baja frente a las máximas obtenidas a la prueba de sedimentación de la mancha como se puede observar en el capítulo 3. Se reportan concentraciones de 3030 mg/L [29] que se encuentra en el rango de los datos obtenidos en éste estudio.

Los sólidos suspendidos totales tienen una concentración promedio de 1279,3 mg/L, con máxima de 1738,0 mg/L, una mínima de 742,0 mg/L como se puede observar en la Tabla 8 y cuya carga promedio de sólidos suspendidos es de 4,65 Kg/h. El decreto 1594/1984 establece una remoción superior al 80% para éste parámetro, la remoción de este sistema alcanza el 1,08%, el cual es insignificante comparado con la normatividad vigente. Se observa una relación de SST/ST de 46,04%, esta se ha incrementado al compararla con la del efluente de sedimentador de almidón, debido al fenómeno de adherencia presentado por los sólidos como se discute en la sección 3.4, además en la Figura 7 se aprecia la formación de biopelículas sobre nadantes en el sedimentador de mancha las cuales crecen en función del periodo de limpieza, aportando sólidos suspendidos totales al sistema. Al comparar en la literatura, para esta rallandería, se reportan concentraciones de 1083 mg/L [13] y 1518 mg/L [29] y para una rallandería típica, concentraciones de 468 mg/L [13], 1329 mg/L [14] y 1190 mg/L. [29], las cuales están dentro del rango obtenido en este estudio.

Figura 7. Formación de biopelícula en el sedimentador de mancha.



Fuente propia

En la Tabla 6 se presentan los valores de las concentraciones de DBO₅ obtenidas en este estudio. La DBO₅ total tiene una concentración promedio de 1666,9 mg/L y, la DBO₅ soluble 1267,9 mg/L, una carga orgánica total de 5,6 Kg/h y soluble de 4,71 Kg/h. Con las concentraciones se tiene una relación materia orgánica biodegradable soluble/materia orgánica biodegradable total de 0,76, lo que indica que al retirar la parte insoluble susceptible a separación mecánica, es posible remover cerca del 24% de la carga orgánica de DBO₅ total. Comparando con literatura, para esta rallandería, se reportan valores de DBO₅ de 1470 mg/L [13] y en una planta típica concentraciones de 1320 mg/L [13], 1414mg/L [14], 3300 mg/L [29] y entre 3000 y 4700 mg/L [30]. Se observa que en la mayoría de datos no hay grandes variaciones respecto a los obtenidos en este estudio, pero en los dos últimos trabajos citados superan el rango de los resultados, lo cual se debe al tipo de yuca y factores tales como operación de la rallandería expuestas anteriormente, formación de biopelícula, operación y mantenimiento del sedimentador de mancha

Al comparar las concentraciones de DBO₅ del afluente y efluente del sedimentador de mancha, indican un incremento del 7,6 % de la DBO₅ total y una disminución del 2,1% de la DBO₅ soluble, corroborando el aporte de sólidos por la formación de la biopelículas en este sedimentador, las cuales aportan materia orgánica biodegradable.

La DQO total tiene una concentración promedio de 3348,4 mg/L, una máxima de 4504,0mg/L y una mínima de 1844,1mg/L, como se puede apreciar en la Tabla 7. En cuanto a la DQO soluble se tiene una concentración promedio de 2489,4 mg/L, una máxima de 4050,0 mg/L, y una mínima de 1227,2 mg/L. La carga de DQO total y soluble son de 12,17 y 9,05 Kg/h respectivamente. Se obtiene una relación DQO total/DQO soluble de 0,743 de la cual se puede observar que al retirar la parte insoluble por un método mecánico es posible remover cerca del 25,7 % de la carga de DQO total. Comparando con la literatura, para la rallandería Santa Bárbara, se reportan concentraciones de DQO total de 3468 mg/L [13] y 5266 mg/L [29], para efluentes típicos, se reporta una concentración de 2822 mg/L [13], 3947 mg/L [29] y entre 3190 y 5150 mg/L [30]. Como se puede apreciar las concentraciones reportadas se aproximan en el rango obtenido en este estudio.

Con las concentraciones de este estudio, para este efluente se obtiene una relación DQO/DBO₅ de 2:1 y un factor de biodegradabilidad de 0,77 que lo clasifica en condición de biotratabilidad buena [26], por lo tanto se esperaría de los tipos de tratamiento biológicos buena eficiencia de remoción de materia orgánica biodegradable. El factor de biodegradabilidad del efluente se ha incrementado después de recorrer el sedimentador de mancha debido a la formación de biopelícula, el tiempo prolongado de limpieza del sedimentador de mancha, insectos, residuos de plantas etc., lo cual da un incremento de la DBO₅ total más que la DQO total.

Comparando la carga orgánica por DBO₅ de este efluente, con un agua residual doméstica, se obtiene que este efluente es equivalente a la carga orgánica generada por una población de 2908 habitantes cuya contribución per cápita de materia orgánica que recomienda el

reglamento RAS[24] es de $50 \frac{g}{hab * día}$ tal como se demuestra a continuación:

la carga orgánica de este efluente es de

$$CO_E = 1666,9 \frac{mg}{L} \times \frac{1g}{1000mg} \times 1,0098 \frac{L}{S} \times 86400 \frac{S}{día} = 145431,6 \frac{g}{día} \text{ como DBO}_5,$$

Que al dividir sobre la contribución per cápita, se obtiene una aproximación al número de habitantes,

$$N^{\circ} \text{ hab} = \frac{145431,6 \frac{g}{día}}{50 \frac{g}{hab * día}} = 2908 \text{ hab}$$

La concentración final de DQO total de esta rallandería se obtendría, teniendo en cuenta los efluentes del lavado y del sedimentador de mancha, a partir de la siguiente ecuación [17]:

$$C_F = \frac{C'_L \times Q_L + C_A \times Q_A}{Q_F} \quad \text{Ecuación 1}$$

donde, C_F = Concentración final

$C'_L = 0,5 \times C_L$ = Concentración del efluente del lavado en el tiempo de trabajo real de lavado, es decir, en una hora de trabajo en la planta se emplean 30 minutos para el lavado

C_A = Concentración del efluente del sedimentador de mancha

Q_F = Caudal final

Q_L = Caudal operación de lavado

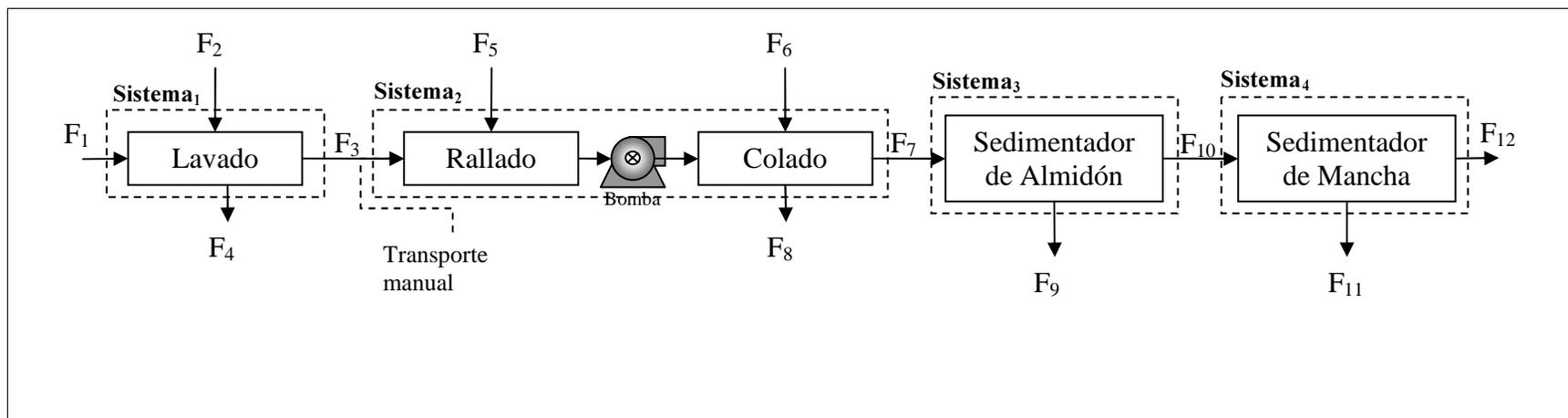
Q_A = Caudal sedimentador de mancha

$$C_F (DQO_{total}) = \frac{0,5 \times 5353,1 \frac{mg}{L} \times 0,5289 \frac{L}{s} + 3448,4 \frac{mg}{L} \times 1,0098 \frac{L}{s}}{0,5289 \frac{L}{s} + 1,0098 \frac{L}{s}} = 3183,1 \frac{mg}{L}$$

$$C_F (DQO_{souble}) = 1866,9 \frac{mg}{L}$$

Es decir que al retirar la parte insoluble por método mecánico, es posible remover cerca del 41,35% de la DQO total.

Figura 8. Diagrama de flujo indicando los balances de materia efectuados para la evaluación de la planta.



Componentes del flujo	Flujo											
	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈	F ₉	F ₁₀	F ₁₁	F ₁₂
Agua	■			■	■	■	■			■		■
Yuca (Raíces)		■	■									
Cascarilla				■								
Sólidos Totales				■			■			■		■
Afrecho								■				
Almidón									■			
Mancha											■	

Fuente propia.

2.4 BALANCE DE MASA

Para la realización del balance de masa se consideró como base de cálculo los 106,5 bultos de yuca utilizados durante los muestreos, asumiendo que estos hubiesen sido procesados en una jornada de producción continua y que en promedio cada bulto contiene 63 kg de yuca sin lavar. La Figura 8 presenta el diagrama de flujo del proceso de extracción del almidón agrio de yuca, indica además los sistemas sobre los cuales se efectuó balance de masa y define la nomenclatura correspondiente a cada flujo.

2.4.1 BALANCE DE MASA EN EL SISTEMA 1

El sistema 1 corresponde a la unidad de lavado, en esta unidad ingresan las raíces de yuca sucia y con su respectiva cascarilla (F_2). También lo hace el agua a través del flujo F_1 , el agua sale en F_4 llevado consigo la cascarilla y la tierra que estaba adherida a las raíces de yuca (esta representa los sólidos totales del efluente de lavado). Las raíces de yuca lavadas se representan por el flujo F_3 .

La cantidad de yuca sin lavar que ingresa al proceso se calcula a partir del número de bultos procesados y el tiempo total invertido en la operación de lavado/pelado durante las caracterizaciones:

$$F_2 = \frac{106,5 \text{ bultos} \times 63 \frac{\text{kg}}{\text{bulto}}}{665 \text{ min} \times \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}}} = 605,37 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Tomado el caudal promedio para el efluente de lavado de las cuatro caracterizaciones efectuadas, se calcula el flujo másico de agua en F_4 , que es igual al de F_1 :

$$F_1 = 528,9 \frac{\text{ml}}{\text{s}} \times 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} \times 1,000 \frac{\text{g}}{\text{ml}} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} = 1905,9 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Como los sólidos totales en el efluente de lavado se midieron libres de cascarilla, con el promedio de estos, el caudal y el tiempo real invertido en el proceso de lavado el cual es de 2 batch en 1 hora, se obtiene la cantidad de sólidos sin cascarilla en F_4 :

$$F_{4,\text{sólidos}} = 528,9 \frac{\text{ml}}{\text{s}} \times 1800 \frac{\text{s}}{\text{h}} \times 8783,31 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \times \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} = 8,365 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

En el laboratorio se pudo establecer que el peso de la cascarilla corresponde en promedio al 3,1% en peso de la yuca. Así que la cascarilla que ingresa con la yuca y que sale en F_4 es:

$$F_{4,cascarilla} = 605,37 \frac{kg}{h} \times \frac{0,031kg}{1kg} = 18,77 \frac{kg}{h}$$

Los sólidos y la cascarilla F_4 han ingresado al sistema con la yuca sin lavar por consiguiente, la yuca lavada y pelada que se representa el flujo F_3 es:

$$F_3 = 605,37 \frac{kg}{h} - 16,73 \frac{kg}{h} - 18,77 \frac{kg}{h} = 569,87 \frac{kg}{h}$$

2.4.2 BALANCE DE MASA EN EL SISTEMA 2

Este sistema comprende las unidades de rallado y colado, en el sistema 2 ingresan las raíces de yuca lavada y peladas (F_3). También lo hace el agua, tanto a la unidad de rallado (F_5) como a las de colado (F_6). El flujo F_7 lleva una lechada que contiene agua, almidón y mancha. El afrecho es retirado en el flujo F_8 .

Si se considerando que la cantidad de agua en los canales de sedimentación es estable entonces y se aplica el criterio de continuidad en el flujo:

$$F_{7, Agua} = F_{10, Agua} = F_{12, Agua} = 1009,84 \frac{ml}{s} \times 3600 \frac{s}{h} \times 1,000 \frac{g}{ml} \times \frac{1kg}{1000g} = 3708,13 \frac{kg}{h}$$

Como el agua suministrada en la unidad de rallado F_5 no se puede medir de forma directa pero durante la operación se observar que en cantidad es mucho menor que la suministrada en el colado F_6 , en términos prácticos ambos flujos pueden tratarse como una sola corriente de flujo. Se considera que el agua que sale con el afrecho es una cantidad mínima comparada con F_7 y F_6 . Además se determinó que la yuca lavada y pelada como en F_3 contiene un 58,32% de agua. Con estas consideraciones el agua que ingresa al sistema es:

$$F_6 + F_5 = 3708,13 \frac{kg}{h} - 569,87 \frac{kg}{h} \times 0,5832 \frac{kg}{kg} = 3375,78 \frac{kg}{h}$$

Experimentalmente se determinó el contenido porcentual de afrecho para la yuca lavada y pelada es 9,01% por lo tanto:

$$F_8 = 0,0901 \frac{kg}{kg} \times F_3 = 0,0901 \times 569,87 \frac{kg}{h} = 51,32 \frac{kg}{h}$$

Como solo el 41,68% de F_3 corresponde a sólidos, el balance de material sólido para el sistema es el siguiente:

$$F_{,sólidos} = 569,87 \frac{kg}{h} \times 0,4168 \frac{kg}{kg} - 51,32 \frac{kg}{h} = 186,2 \frac{kg}{h}$$

2.4.3 BALANCE DE MASA EN EL SISTEMA 3

Este corresponde al balance sobre el sedimentador de almidón y comprende el flujo F_7 , el almidón sólido que se precipita es representado en el diagrama por F_9 y el flujo F_{10} es el efluente del sedimentador de almidón.

Utilizando el valor promedio para los sólidos totales en el efluente del sedimentador de almidón, se calcula el contenido de sólidos de F_{10} como sigue:

$$F_{10, \text{sólidos}} = 1009,84 \frac{ml}{s} \times \frac{3600s}{1h} \times 3101,4 \frac{mg}{l} \times \frac{1l}{1000ml} \times \frac{1g}{1000mg} \times \frac{1kg}{1000g} = 11,27 \frac{kg}{h}$$

El contenido de sólidos en F_9 se encuentra a partir de los sólidos en F_7 como se indica a continuación:

$$F_9 = 186,2 \frac{kg}{h} - 11,27 \frac{kg}{h} = 174,93 \frac{kg}{h}$$

2.4.4 BALANCE DE MASA EN EL SISTEMA 4

Este sistema es el sedimentador de mancha que es alimentado con el efluente del sedimentador de almidón F_{10} . La porción de la mancha que se precipita está representada en el diagrama por F_{11} y el efluente del sedimentador de mancha es el flujo F_{12} .

Con el valor promedio para los sólidos totales en el efluente del sedimentador de mancha, se calcula el contenido de sólidos de F_{10} como sigue:

$$F_{12, \text{sólidos}} = 1009,84 \frac{ml}{s} \times \frac{3600s}{1h} \times 2778,4 \frac{mg}{l} \times \frac{1l}{1000ml} \times \frac{1g}{1000mg} \times \frac{1kg}{1000g} = 10,10 \frac{kg}{h}$$

Por lo tanto la cantidad de mancha sedimentada es:

$$F_{11} = 11,27 \frac{kg}{h} - 10,10 \frac{kg}{h} = 1,17 \frac{kg}{h}$$

La Figura 9 incluye un cuadro resumen con todos los flujos obtenidos en el balance de masa para el proceso de obtención de almidón agrio de yuca en la rallandería Santa Bárbara.

2.4.5 ANÁLISIS DEL BALANCE DE MASA

Los resultados obtenidos en el balance de masa permiten establecer los rendimientos y las eficiencias operacionales de las diferentes etapas del proceso, lo cual constituye un insumo fundamental para la implementación de medidas de Producción Más Limpia.

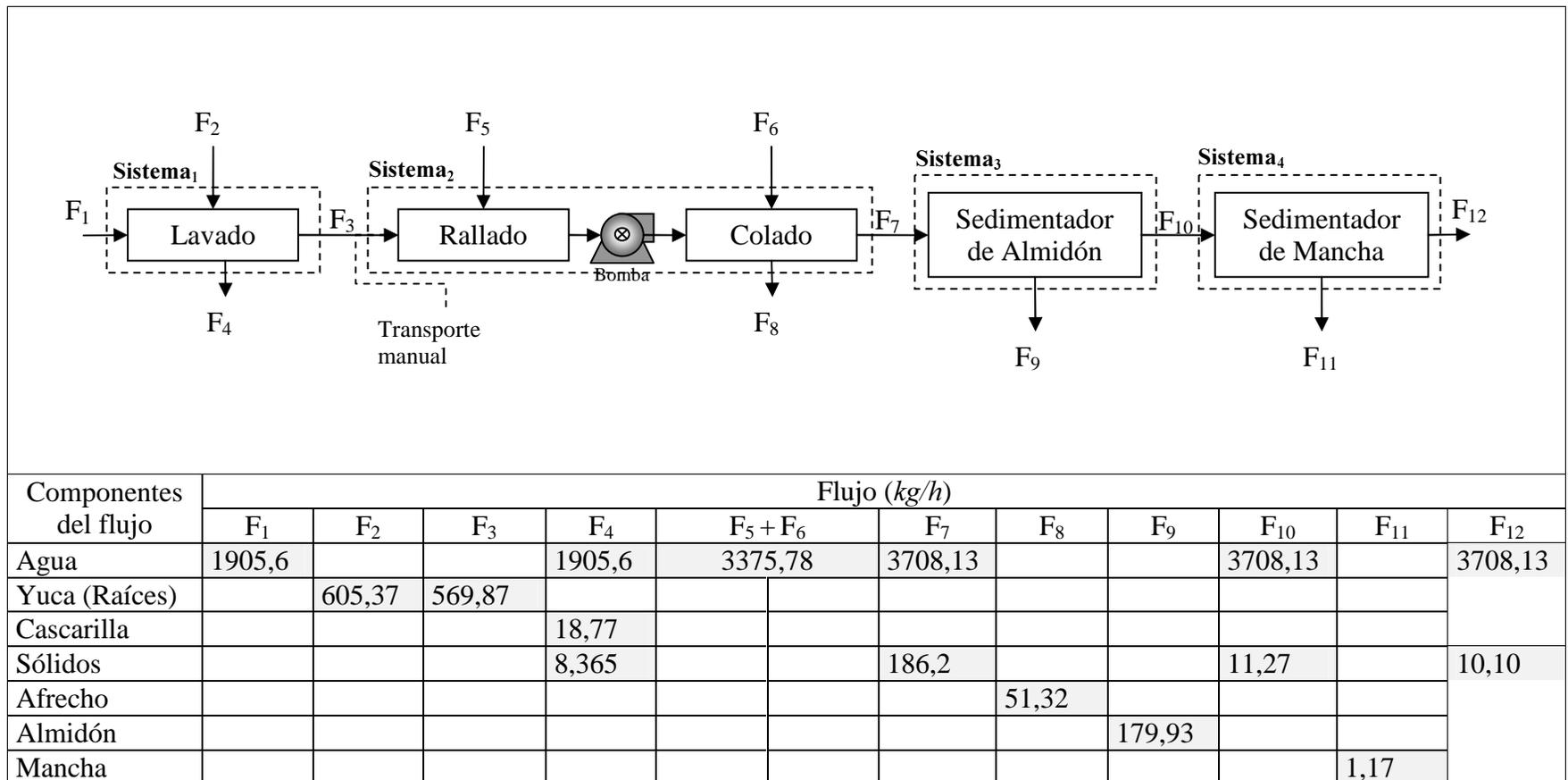
En términos generales por cada kilogramo de yuca que ingresa al proceso se obtienen 0,2972 kg de almidón, por tanto el rendimiento del proceso 29,7%, 9,01 % de afrecho y 0,19 % de mancha retenida. Además se consumen 8,72 kg de agua, se generan 0,162 kg de residuos sólidos, distribuidos en 0,0448 kg en la etapa de lavado, 0,0848 kg en el colado, 0,0019 kg se acumulan en el sedimentador de mancha y 0,0167 kg salen con el efluente del sedimentador de mancha. Adicionalmente se producen 9,27 kg de residuos líquidos distribuidos en 3,15 kg en la etapa de lavado y 6,12 kg en el efluente del sedimentador de mancha.

El efluente de lavado representa cerca del 34% de las descargas líquidas y por cada kilogramo de yuca que ingresa al proceso recibe 0,0138 kg de sólidos, 0,0085 kg de DQO total, en la cual el 25,35% es DQO soluble, esto significa que el 74,65% de la DQO presente en este flujo puede eliminarse con solo efectuar una buena remoción de sólidos. El contenido promedio de cianuro (CN⁻) es de 1,38 mg/l, esto significa que por cada kilogramo de yuca el efluente recibe 2,170 mg de cianuro (CN⁻).

El efluente del sedimentador de almidón, por cada kilogramo de yuca alimentada al proceso contiene 0,0212 kg de DQO total y 0,00944 kg de DBO total, donde el 71,77% de la DQO y el 84,08% de la DBO son solubles. De acuerdo con esto una buena remoción de sólidos eliminaría el 28,23% de la DQO y el 15,92% de la DBO. En este efluente solo el 44.46% de la carga contaminante puede ser considerada biodegradable.

El efluente del sedimentador de mancha corresponde al 66% de las descargas líquidas en donde por cada kilogramo de yuca procesada van 0,0211 kg de DQO total y 0,0102 kg de DBO total, siendo el 72,19% DQO soluble y el 76,06% DBO soluble. Esto implica que efectuando una buena remoción de sólidos se elimina el 27,81% de la DQO y el 23,94% de la DBO. Es importante anotar que solo el 48,34% de las cargas contaminantes corresponde a material biodegradable.

Figura 9. Diagrama de flujo indicando los balances de materia efectuados para la evaluación de la planta.



Fuente propia

2.4.6 OPCIONES DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA (PML)

El Programa Ambiental de las Naciones Unidas (PNUMA), define la Producción más Limpia como la aplicación continua a los procesos, productos, y servicios, de una estrategia integrada y preventiva, con el fin de incrementar la eficiencia en todos los campos, y reducir los riesgos sobre los seres humanos y el medio ambiente [28]. Por lo tanto en los procesos de producción la PML incluye la conservación de la materia prima y la energía, la eliminación de materias primas tóxicas, y la reducción en cantidad de las emisiones y desperdicios antes de su salida del proceso [18].

Teniendo en cuenta el análisis del balance de materia, los parámetros fisicoquímicos, las condiciones físicas de la planta y la organización del personal, se identifican las siguientes opciones para la implementación de PML.

2.4.6.1 Rejillas o tamiz como tratamiento preliminar para la retención de cascarilla Con la función de retirar el material más grueso del efluente del lavado, que en un 52,87% de los sólidos es cascarilla, se recomienda la construcción de rejillas o un tamiz como tratamiento preliminar. Las dimensiones de la rejilla o tamiz se deben adaptar a las condiciones particulares de la planta tales como caudal de lavado, diámetro aparente de la cascarilla, método de lavado (manual o mecánico), espacio disponible, etc. La cascarilla recuperada puede ser utilizada como sustrato para la producción de compost.

2.4.6.2 Desarenador para el efluente del lavado. El desarenador tendría la función reducir cargas contaminantes, removiendo los sólidos que pasaron a través de la rejilla o tamiz, estos son el 47,12% de los sólidos del efluente y a su vez se podría tener una remoción máxima del 74,65% de la carga contaminante por DQO.

2.4.6.3 Sistema de retención de mancha. Con este sistema se buscaría retener cerca del 41,4% de los ST, correspondientes a los SST susceptibles a sedimentación y una consecuente remoción de DQO cerca del 28,23%.

2.4.6.4 Instalación de válvulas de control y adecuación de consumo racional de agua. La instalación de las válvulas de control busca un consumo racional de agua, minimizando costos por el uso de este insumo y a su vez, el caudal de los efluentes a ser tratados. Recirculación del agua efluente de lavado. Se recomienda este sistema de recirculación siempre y cuando el efluente tenga un tratamiento microbiológico de remoción de Cianuro por medio de *Aspergillus spp* [25] u otro método que evite acumulación de CN⁻ de tal forma que el efluente garantice concentraciones de cianuro total expresado como

CN⁻ inferiores a 0,05 CL₅₀⁹⁶ § para la destinación del recurso para preservación de flora y fauna y de 1,0 mg/L para interés sanitario reglamentado en el decreto 1594 de 1984

2.4.6.5 Manejo integral de residuos sólidos. Aparte de los sólidos de los efluentes, también se generan residuos sólidos durante el proceso, tales como residuos de raíz, fibras sintéticas, entre otros, los cuales no se disponen adecuadamente. Es por ello que se debe plantear un sistema de gestión de residuos sólidos, que permita clasificarlos y disponerlos adecuadamente.

2.4.6.6 Uso más eficiente de la energía eléctrica. A pesar de que todo el sistema mecánico de la planta es impulsado por un solo motor, hay momentos en que algunos procesos mecánicos no trabajan simultáneamente perdiendo eficiencia de la capacidad del motor. Por ello se recomienda que para la construcción de una nueva rallandería se utilicen motores apropiados para cada uno de los procesos mecánicos, aunque la inversión inicial puede ser más alta por los costos individuales de los motores, esta se recuperará a largo plazo por el ahorro de consumo de energía.

2.4.6.7 Higiene y salud ocupacional. Se busca disminuir los riesgos que pueden llegar a una pérdida de salud en los operarios hasta una pérdida que compromete el aspecto económico. Se identificaron riesgos de tipo mecánico, físicos, químicos, eléctricos, biológicos y ergonómicos, los cuales deben ser evaluados en un estudio más detallado.

La implementación de las anteriores estrategias producen los siguientes beneficios, entre otros [18]:

- Optimización del proceso y ahorro de costos mediante la reducción y el uso eficiente de materias primas en insumos en general.
- Mejoramiento de la eficiencia operativa de la planta.
- Mejoramiento de la calidad de los productos y consistencia porque la operación de la planta es controlada y por ende más predecible.
- La recuperación de algunos materiales de los subproductos.
- Reducción de residuos y, por ende, reducción de costos asociados a su correcta disposición.
- Menores primas de seguros.
- Mejoramiento de la imagen de la empresa ante clientes, proveedores, socios, comunidad, entidades financieras, etc.

2.4.7 EVALUACIÓN DE LAS OPCIONES DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA

Las opciones de producción más limpia se evalúan comparándolas entre si, calificándolas

§ Se denomina CL₅₀⁹⁶ a la concentración de una sustancia, elemento o compuesto, solos o en combinación, que produce la muerte al cincuenta por ciento (50%) de los organismos sometidos a bioensayos en un período de noventa y seis (96) horas. Decreto 1594 de 1984 [20]

en una escala de uno a cinco para establecer los niveles de prioridad de acuerdo con los siguientes criterios y su respectiva escala:

- Beneficio ambiental (1= ahorros bajos en materiales y/o baja reducción de residuos/emisiones; 3= alto potencial de ahorro en materiales y/o reducción de grandes cantidades de residuos/emisiones).
- Beneficio económico (1= bajo potencial de ahorro; 3 = alto potencial de ahorro)
- Complejidad de tecnología (1= no hay cambios; 3 = cambios en el proceso/equipo)
- Facilidad de implementación (1= No hay cambios; 3= Cambio en el flujo del proceso)
- Inversión neta (1= No hay costo; 3= Alto costo)

En la Tabla 11 se presenta la evaluación sin ponderaciones de las opciones de producción más limpia identificadas en la rallandería Santa Bárbara con los anteriores criterios [18]. Con el orden de prioridades establecido en la Tabla 11, se puede concluir que las opciones de producción más limpia más importantes de realizar, son las que necesitan un análisis técnico mas detallado, es decir, un estudio de factibilidad y deben llevarse a cabo de un mediano a largo plazo, mientras las ultimas opciones, menos prioritarias son mas fáciles de implementar y deben llevarse a cabo inmediatamente a través de un programa de buenas practicas. Las opciones en el orden de prioridad son:

1. Sedimentador de retención de mancha
2. Sistema de bombeo recirculación del agua efluente de lavado
3. Sedimentador primario para el efluente del lavado
4. Uso más eficiente de la energía eléctrica
5. Manejo integral de residuos sólidos (residuos de raíz y fibras sintéticas)
6. Rejillas como tratamiento preliminar para la retención de cascarilla
7. Instalación de válvulas de control y adecuación de consumo racional de agua
8. Higiene y salud ocupacional

Tabla 11. Evaluación de opciones de producción más limpia en la rallandería Santa Bárbara.

Opciones	Beneficio Ambiental	Beneficio Económico	Complejidad de la tecnología	Facilidad de implementación	Inversión neta	Total	Prioridad
	Aspecto ambiental	Aspecto Financiero	Aspecto tecnológico	Aspecto tecnológico	Aspecto financiero		
A	4	2	1	1	2	10	6
B	4	2	3	3	3	15	3
C	5	4	4	4	4	21	1
D	3	3	1	1	1	9	7
E	3	4	4	2	3	16	2
F	4	2	1	2	2	11	5
G	2	3	1	2	4	12	4
H	3	2	1	1	1	8	8

- A. Rejillas como tratamiento preliminar para la retención de cascarilla
- B. Sedimentador primario para el efluente del lavado
- C. Sedimentador de retención de mancha
- D. Instalación de válvulas de control y adecuación de consumo racional de agua
- E. Sistema de bombeo recirculación del agua efluente de lavado
- F. Manejo integral de residuos sólidos (residuos de raíz y fibras sintéticas)
- G. Uso más eficiente de la energía eléctrica
- H. Higiene y salud ocupacional

2.5 CONCLUSIONES

El caudal del efluente del sedimentador de mancha equivale a la dotación requerida por una población aproximada de 727 habitantes con un nivel de complejidad medio y una carga orgánica de DBO₅ generada por una población de 2908 habitantes mientras que el efluente del proceso de lavado/pelado equivale a la dotación de una población de 381 habitantes y una carga orgánica de 720 habitantes.

Debido al proceso de fermentación que tiene este tipo de efluente, para el buen funcionamiento de un tratamiento biológico es necesario hacer el estudio detallado del comportamiento del pH como tensor de los microorganismos involucrados en los tratamientos biológicos.

Se estableció que el efluente a partir del sedimentador de mancha actualmente instalado tiene una condición de biotratabilidad buena, por lo tanto se esperaría por parte de un tratamiento biológico para este efluente, una buena remoción de materia orgánica, siempre y cuando se cumpla con las características, parámetros de operación y mantenimiento.

Al implementar las opciones de producción más limpia recomendadas para el tratamiento del efluente de cascarilla y de almidón, el efluente total de la rallandería podría llegar a una máxima remoción de carga orgánica por DQO total del 41,35 %.

El rendimiento por cada kilogramo de raíz de yuca que entra al sistema es del 29,7% en producción de almidón, 9,1 % en afrecho, 0,19 % en mancha retenida, 3,1 % como residuo de cascarilla y el excedente es efluente líquido y mancha no retenida.

El efluente del sedimentador de mancha representa el 66% de las descargas líquidas de esta rallandería y el efluente de proceso de lavado/pelado corresponde al 34 %

Se encontró la mayor concentración de cianuro en el efluente del proceso de lavado/pelado respecto al efluente del sedimentador de almidón, lo cual concuerda con la literatura dado que la mayor concentración de cianuro se encuentra en la cascarilla de la raíz y la menor concentración en el parénquima interior

La retención de Sólidos Totales en el sedimentador de mancha es del 10,41 %, y de Sólidos Suspendidos Totales es del 1,08 %, este último es muy inferior a la remoción del 80% exigida en el decreto 1594 de 1984.

La opción de producción más limpia de mayor importancia frente a las demás, es el sistema de recuperación de mancha, pero para su implementación a largo o mediano plazo se requiere de un estudio técnico de factibilidad. Las opciones, de menor prioridad son las que se deben llevar a cabo inmediatamente por su facilidad de implementación, poco nivel tecnológico y bajos costos.

3 ESTUDIO DE SEDIMENTACIÓN DE LA MANCHA

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se pretende establecer el comportamiento del subproducto “mancha” durante el proceso de sedimentación, para lo cual se efectuó la prueba de sedimentación en columna o de tubo largo, para esto se construyó la columna y se realizaron tres ensayos de acuerdo con el procedimiento que a continuación se describe.

3.2 MÉTODO DE SEDIMENTACIÓN EN COLUMNA

En esta prueba se utiliza, como se observa en la Figura 10, una columna (tubo) de PVC de 2 m de longitud y 152,4 mm (6 pulgadas) de diámetro, adaptada con seis llaves de muestreo colocadas cada 300 mm. La columna se llena con una muestra representativa homogenizada del efluente de mancha generado en la rallandería Santa Bárbara y se le deja en reposo. A intervalos periódicos de tiempo, se extraen de las llaves simultáneamente muestras de aproximadamente 100 ml (se debe tener en cuenta purgar para evitar errores en las lecturas), las cuales son analizadas desde el tiempo cero para determinar la concentración de sólidos en suspensión y/o la turbiedad junto con el pH de las mismas. También es necesario registrar la variación en el nivel de líquido en la columna, esto con el fin de establecer la profundidad real a la cual se encuentran las llaves en el momento de tomar la muestra.

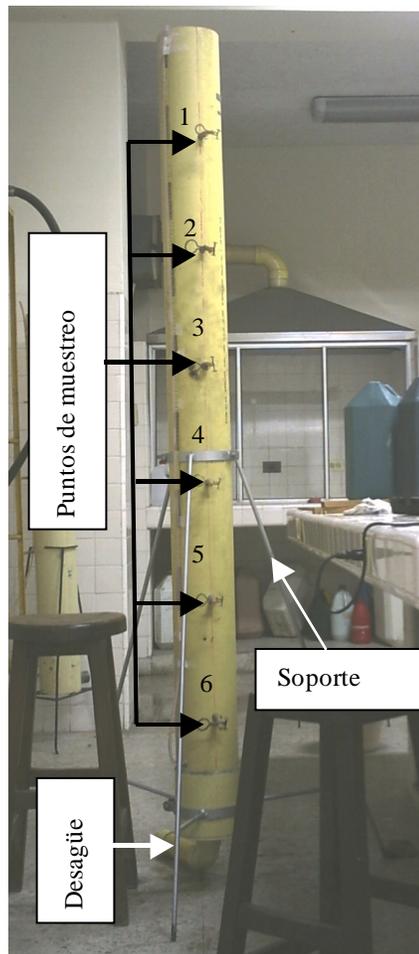
De acuerdo con Perry [27], los intervalos de tiempo están determinados básicamente por la velocidad de sedimentación de las partículas y deben seleccionarse de manera tal, que al menos, una serie de cuatro produzcan datos que engloben la meta deseada de eliminación de sólidos. Este procedimiento indica también si el tiempo de retención es o no un factor importante en la velocidad de clarificación. En general los intervalos pueden tener una duración de 30 min y la última serie de muestras que representan los resultados a obtener, se extraen con un tiempo de retención de 2 h.

La velocidad de sedimentación nominal (V_s) de la muestra se determina dividiendo la profundidad correspondiente a la llave de muestreo entre el tiempo transcurrido desde el inicio de la prueba hasta el momento de toma de la muestra.

3.3 DATOS OBTENIDOS EN LA COLUMNA DE SEDIMENTACIÓN

En la Tabla 12, Tabla 13 y Tabla 14, se presentan los datos obtenidos en los puntos de muestreo para la primera prueba de sedimentación, los datos obtenidos en las diferentes muestras evaluadas del efluente de “mancha” se presentan en el anexo A.

Figura 10. Esquema de la columna de sedimentación.



Fuente propia

Tabla 12. Datos obtenidos en la columna de sedimentación durante la prueba 1 en los puntos 1 y 2

Tiempo [min]	Punto 1				Punto 2				
	Turb. [NTU]	ST** [mg/l]	h [cm]	Vs [cm/min]	Turb. [NTU]	ST [mg/l]	h [cm]	Vs [cm/min]	pH
0	2109	3083,99			2109	3083,99			5,42
28	2017	3023,65	10,9	0,38929	2037	3036,77	40,9	1,46071	5,28
77	1229	2506,80	9,7	0,12597	1852	2915,43	39,7	0,51558	5,11
109	583	2083,09	8,6	0,07890	655	2130,31	38,6	0,35413	5,00
134	412	1970,93	6,9	0,05149	432	1984,05	36,9	0,27537	4,94
168	361	1937,48	6,1	0,03631	388	1955,19	36,1	0,21488	4,91
198	339	1923,05	6,0	0,03030	347	1928,30	36,0	0,18182	4,88
228	325	1913,87	4,8	0,02105	342	1925,02	34,8	0,15263	4,80
258	318	1909,28	3,9	0,01512	331	1917,80	33,9	0,13140	4,74
318	314	1906,65	2,8	0,00881	316	1907,96	32,8	0,10314	4,64
378	313	1906,00	1,5	0,00397	298	1896,16	31,5	0,08333	4,56
438	293	1892,88	0,4	0,00091	304	1900,09	30,4	0,06941	4,47
544					299	1896,81	29,3	0,05386	4,36
625					305	1900,75	28,5	0,04560	4,27
717					305	1900,75	27,5	0,03835	4,18
830					304	1900,09	26,6	0,03205	4,14
1070					299	1896,81	25,4	0,02374	4,00
1407					288	1889,60	21,0	0,01493	3,78

** (Sólidos totales) se obtuvo a partir de la correlación $y = 0,6559x + 1700,7$ donde y representa la concentración de sólidos (mg/L) y x representa la turbiedad (NTU). Los datos utilizados para establecer la correlación se presentan en el Anexo C.

Tabla 13 Datos obtenidos en la columna de sedimentación durante la prueba 1 en los puntos 3 y 4

Tiempo [min]	Punto 3				Punto 4			
	Turb. [NTU]	ST [mg/l]	h [cm]	Vs [cm/min]	Turb. [NTU]	ST [mg/l]	h [cm]	Vs [cm/min]
0	2109	3083,99			2109	3083,99		
28	2058	3050,54	70,9	2,53214	2072	3059,72	100,9	3,60357
77	1938	2971,83	69,7	0,90519	1868	2925,92	99,7	1,29481
109	689	2152,62	68,6	0,62936	697	2157,86	98,6	0,90459
134	452	1997,17	66,9	0,49925	461	2003,07	96,9	0,72313
168	400	1963,06	66,1	0,39345	409	1968,96	96,1	0,57202
198	374	1946,01	66,0	0,33333	380	1949,94	96,0	0,48485
228	347	1928,30	64,8	0,28421	359	1936,17	94,8	0,41579
258	335	1920,43	63,9	0,24767	343	1925,67	93,9	0,36395
318	332	1918,46	62,8	0,19748	327	1915,18	92,8	0,29182
378	317	1908,62	61,5	0,16270	317	1908,62	91,5	0,24206
438	296	1894,85	60,4	0,13790	288	1889,60	90,4	0,20639
544	313	1906,00	59,3	0,10901	310	1904,03	89,3	0,16415
625	307	1902,06	58,5	0,09360	306	1901,41	88,5	0,14160
717	303	1899,44	57,5	0,08020	305	1900,75	87,5	0,12204
830	304	1900,09	56,6	0,06819	314	1906,65	86,6	0,10434
1070	316	1907,96	55,4	0,05178	308	1902,72	85,4	0,07981
1407	270	1877,79	51,0	0,03625	267	1875,83	81,0	0,05757

Tabla 14. Datos obtenidos en la columna de sedimentación durante la prueba 1 en los puntos 5 y 6

Tiempo [min]	Punto 5				Punto 6			
	Turb. [NTU]	ST [mg/l]	h [cm]	Vs [cm/min]	Turb. [NTU]	ST [mg/l]	h [cm]	Vs [cm/min]
0	2109	3083,99			2109	3083,99		
28	2071	3059,07	130,9	4,67500	2071	3059,07	160,9	5,74643
77	1993	3007,91	129,7	1,68442	1940	2973,15	159,7	2,07403
109	753	2194,59	128,6	1,17982	808	2230,67	158,6	1,45505
134	501	2029,31	126,9	0,94701	473	2010,94	156,9	1,17090
168	517	2039,80	126,1	0,75060	431	1983,39	156,1	0,92917
198	387	1954,53	126,0	0,63636	382	1951,25	156,0	0,78788
228	359	1936,17	124,8	0,54737	361	1937,48	154,8	0,67895
258	356	1934,20	123,9	0,48023	353	1932,23	153,9	0,59651
318	318	1909,28	122,8	0,38616	321	1911,24	152,8	0,48050
378	324	1913,21	121,5	0,32143	317	1908,62	151,5	0,40079
438	293	1892,88	120,4	0,27489	301	1898,13	150,4	0,34338
544	309	1903,37	119,3	0,21930	306	1901,41	149,3	0,27445
625	310	1904,03	118,5	0,18960	308	1902,72	148,5	0,23760
717	309	1903,37	117,5	0,16388	307	1902,06	147,5	0,20572
830	322	1911,90	116,6	0,14048	318	1909,28	146,6	0,17663
1070	314	1906,65	115,4	0,10785	320	1910,59	145,4	0,13589
1407	273	1879,76	111,0	0,07889	273	1879,76	141,0	0,10021

3.4 ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS EN LA COLUMNA DE SEDIMENTACIÓN

Según Perry [27], con las partículas de sólidos que presentan poca o ninguna tendencia a adherirse, los puntos en una grafica de concentración de sólidos como función de la velocidad nominal de sedimentación forman por lo general una línea recta, independiente del tiempo de retención. Lo cual indica que las áreas de sedimentación disponibles en el tanque (la columna) determinan el grado de eliminación de sólidos y que la profundidad afecta poco los resultados.

En la Figura 11 se representan los datos de turbiedad y velocidad nominal de sedimentación para los diferentes tiempos de retención, y en la Figura 12 los valores obtenidos para la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación en los diferentes tiempos de retención. Como es de esperarse ambas figuras presentan un comportamiento análogo, en el cual, la turbiedad y la concentración de sólidos disminuyen a través de toda la columna al incrementarse el tiempo de retención.

Observado el comportamiento de la velocidad nominal de sedimentación en la Figura 11 y en la Figura 12 podría pensarse que esta disminuye hacia un valor constante, pero al estudiar la Figura 13, la Figura 14 y la Figura 15 se encuentra que aunque el intervalo para el valor de la velocidad nominal de sedimentación se hace mas pequeño al aumentar el tiempo de retención, esta no alcanza un valor constante, además queda claro que en ningún momento los datos forman una línea independiente del tiempo de retención, así que para cada tiempo de retención se producen concentraciones de sólidos distintas a la misma velocidad nominal de sedimentación. Esto muestra que los sólidos tienen una tendencia a adherirse

La Figura 16 y 17 muestran como la turbiedad y la concentración tienen un punto de quiebre en el tiempo de retención de aproximadamente 200 min lo cual lleva a pensar que este tiempo es el adecuado como parámetro para determinar la velocidad de sedimentación para el diseño, pero al observar el comportamiento de la turbiedad y la concentración en la Figura 30 y Figura 31 de la segunda prueba de sedimentación, el punto de quiebre está en un tiempo aproximado de 300 minutos, por lo tanto el tiempo de 200 minutos no garantiza las mejores remociones para todos los casos. En las tres pruebas se observa que la turbiedad y los sólidos tienden a un valor aproximadamente constante para tiempos de retención superiores a 400 min, por consiguiente este valor puede considerarse como el tiempo de retención mínimo para alcanzar el máximo porcentaje de remoción de sólidos. Una medida de la dispersión de la concentración de sólidos (o de la turbiedad) en la columna a través del tiempo, se obtiene calculando la desviación estándar para los datos en cada uno de los tiempos de retención. La Figura 18 muestra el comportamiento de la desviación estándar respecto al tiempo de retención, puede observarse que esta se hace bastante pequeña y prácticamente constante para tiempos mayores a 400 min. Lo cual reafirma

la hipótesis sobre la existencia de los valores constantes ya mencionados para la concentración de sólidos y la turbiedad. La Figura 16 y la Figura 17 también permiten observar que el valor límite hacia el cual tiende la concentración de sólidos (o la turbiedad) puede considerarse independiente de la profundidad, ya que en estas gráficas cada punto representa una profundidad diferente de la columna de sedimentación. En la Figura 19 se presenta la eficiencia de remoción de sólidos como función del tiempo. Para las pruebas efectuadas se encontró que la eficiencia de remoción de sólidos oscila entre el 37 y el 38%, y esta se alcanza con un tiempo de retención mínimo de 400 min.

Figura 11. Relación entre la turbiedad y la velocidad nominal de sedimentación en la prueba 1.

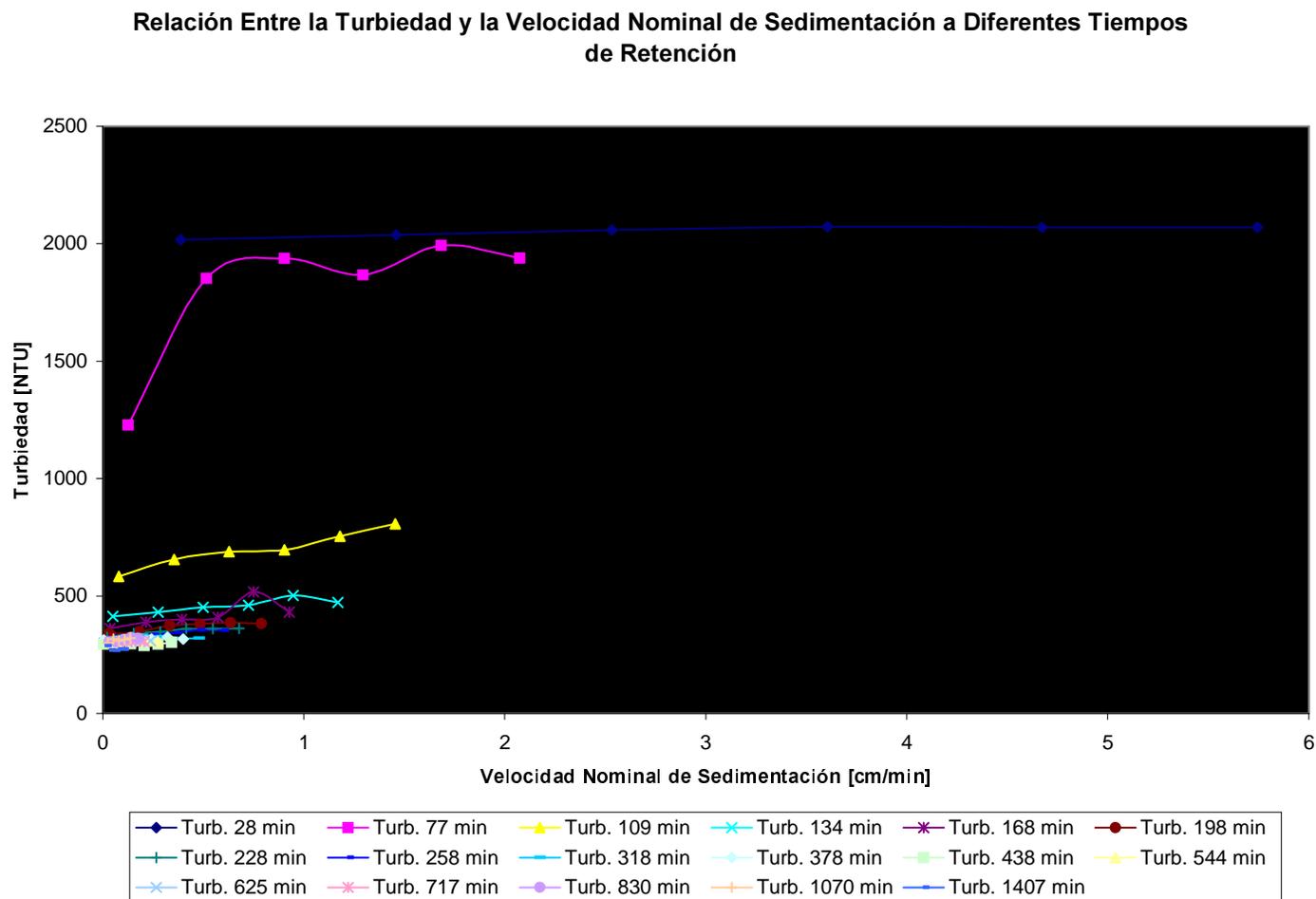


Figura 12 Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación en la prueba 1.

Relación Entre la Concentración de Sólidos y la Velocidad Nominal de Sedimentación a Diferentes Tiempos de Retención

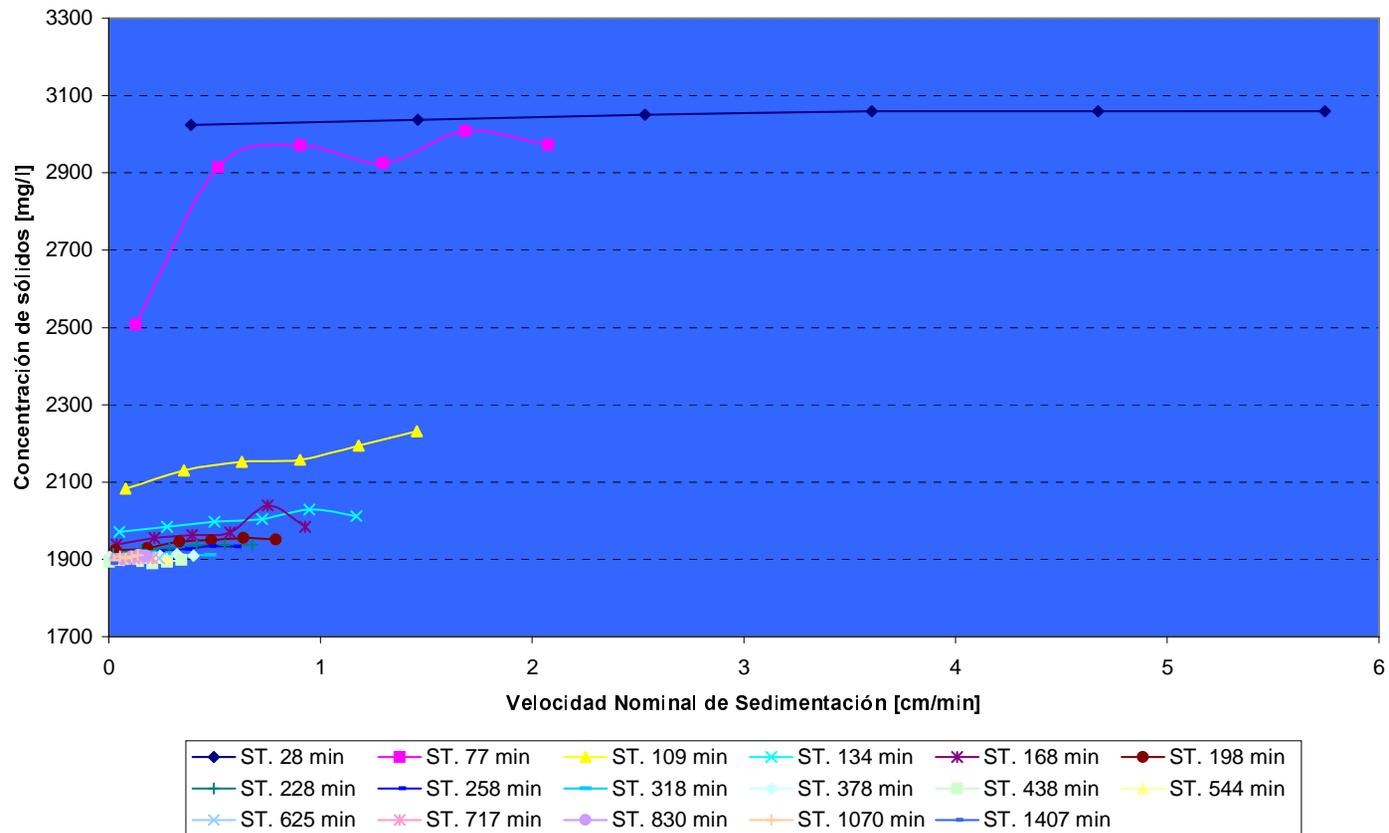


Figura 13. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación la prueba 1 para tiempos de retención entre 28 y 30 min.

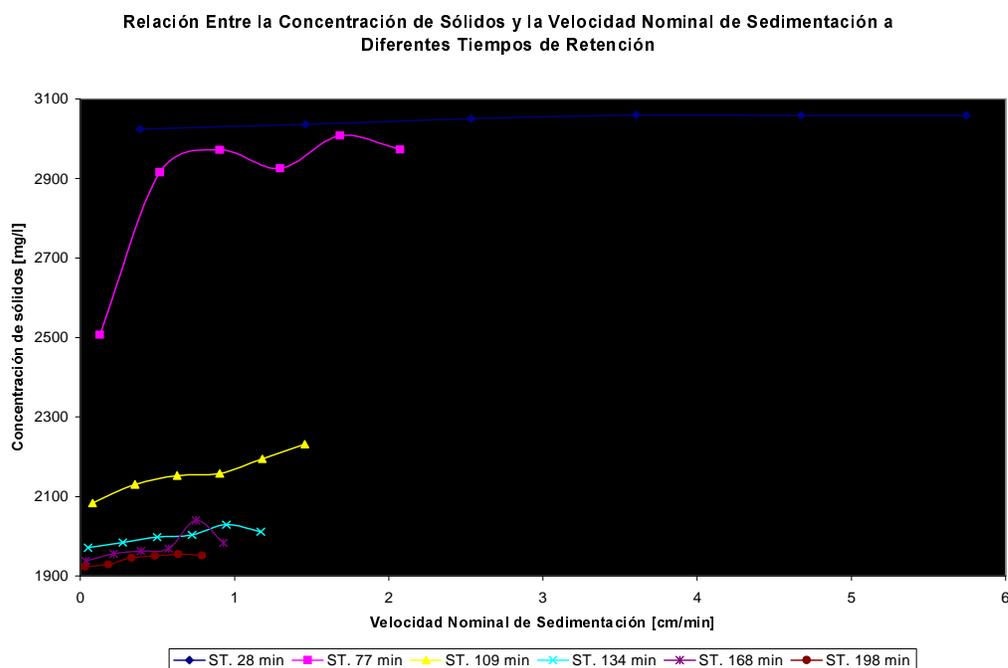


Figura 14. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación la prueba 1 para tiempos de retención entre 228 y 540 min.

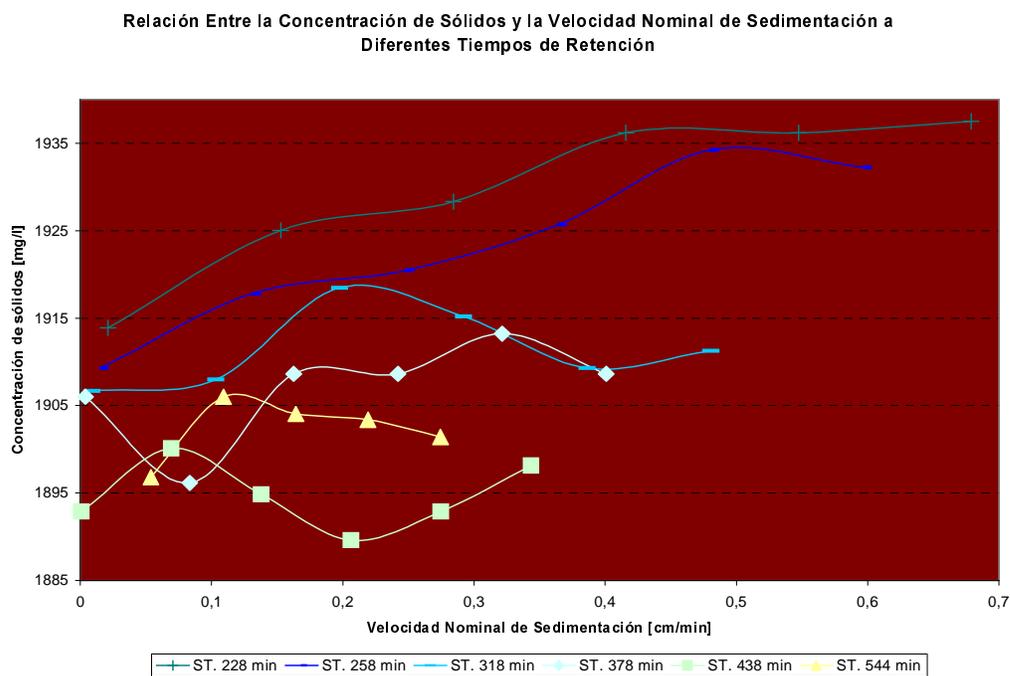


Figura 15. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación la prueba 1 para tiempos de retención entre 625 y 1470 min

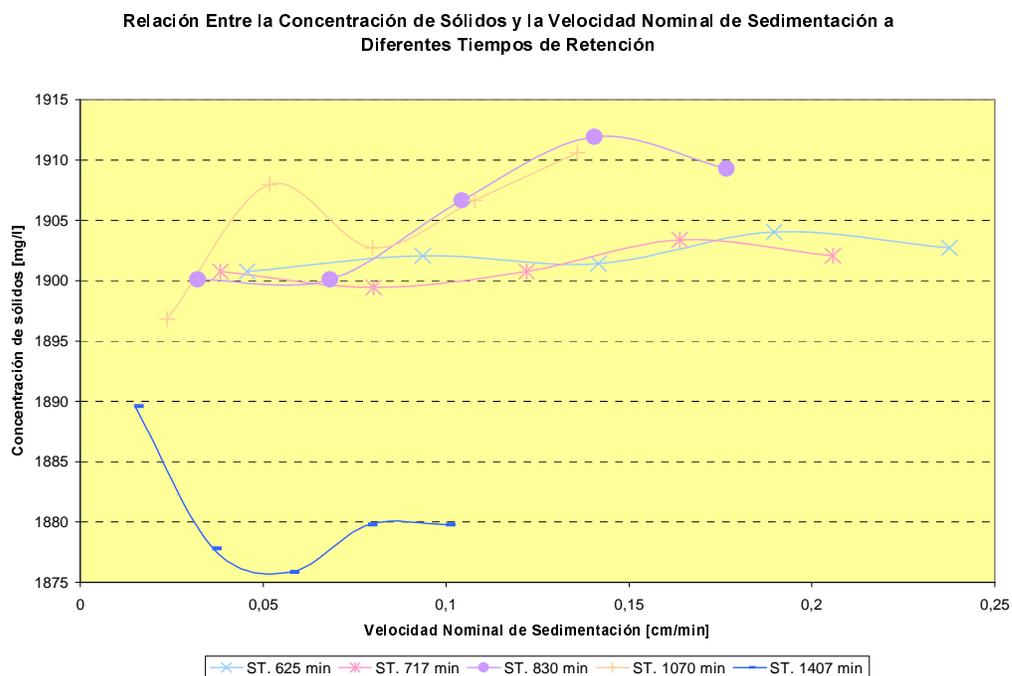


Figura 16. Relación entre la turbiedad y el tiempo de retención en cada punto de muestreo en la prueba 1.

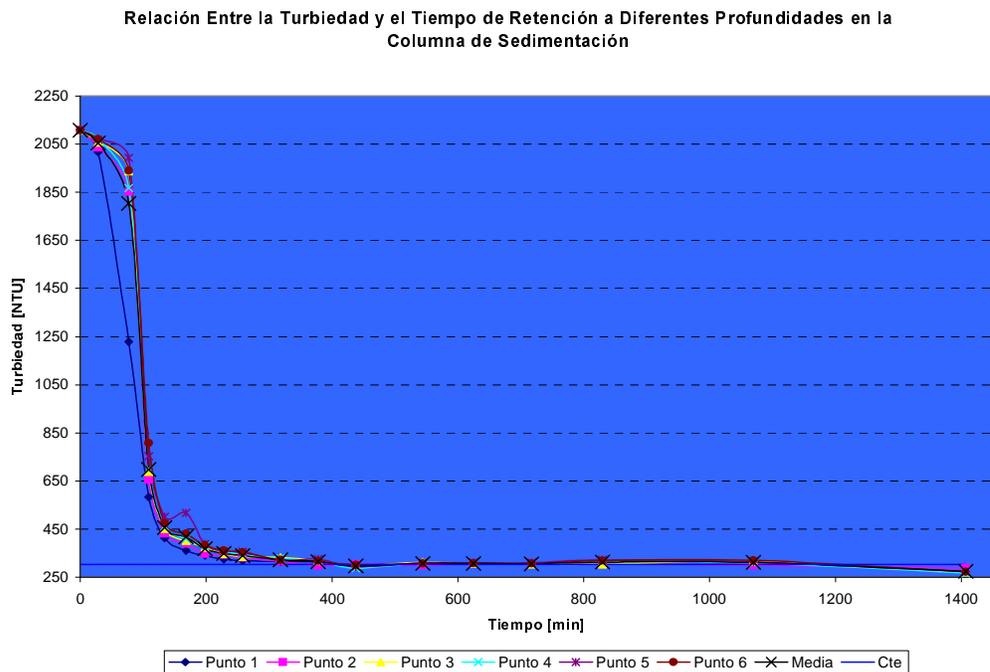


Figura 17. Relación entre la concentración de sólidos y el tiempo de retención en cada punto de muestreo en la prueba 1.

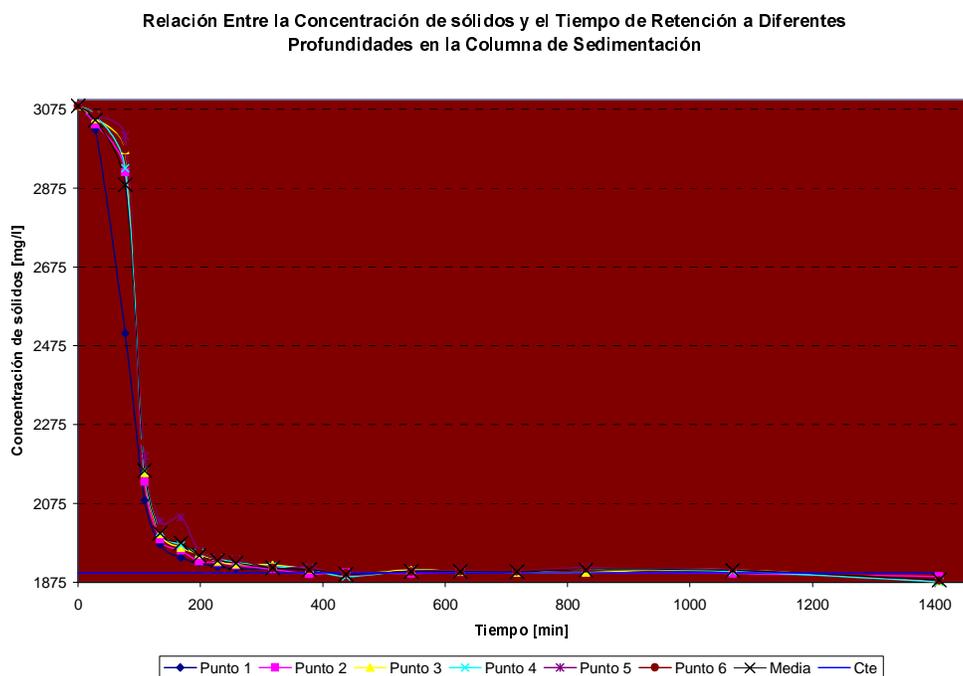


Figura 18. Dispersión de los datos de Concentración de sólidos y turbiedad a través del tiempo en la prueba 1.

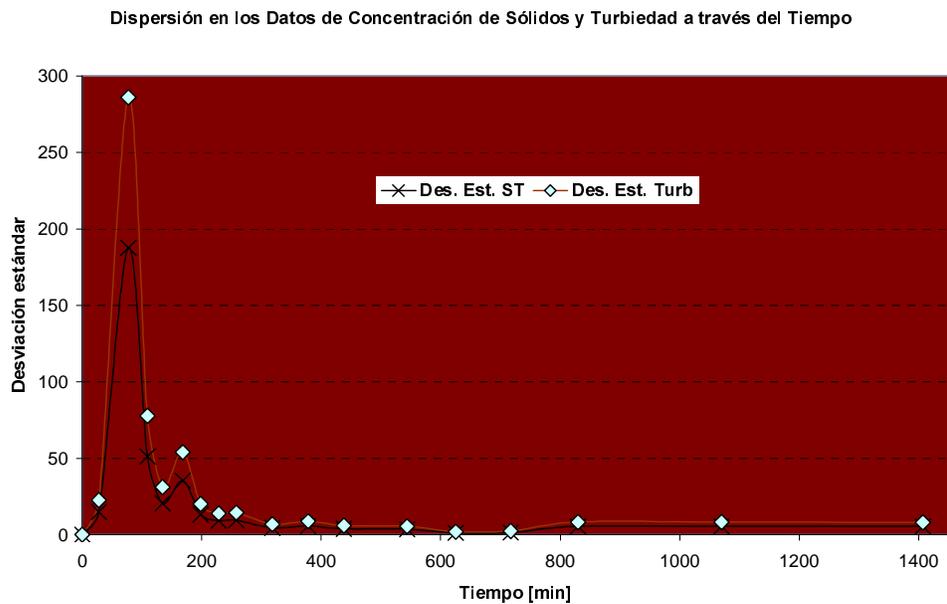


Figura 19. Porcentaje de remoción de sólidos a través del tiempo en la prueba 1.

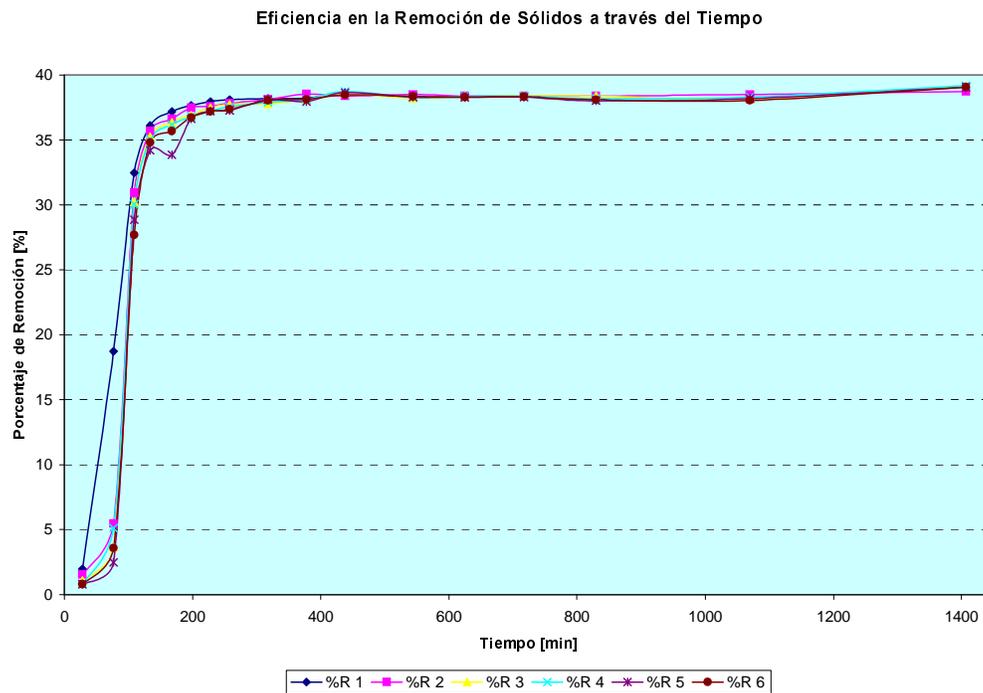
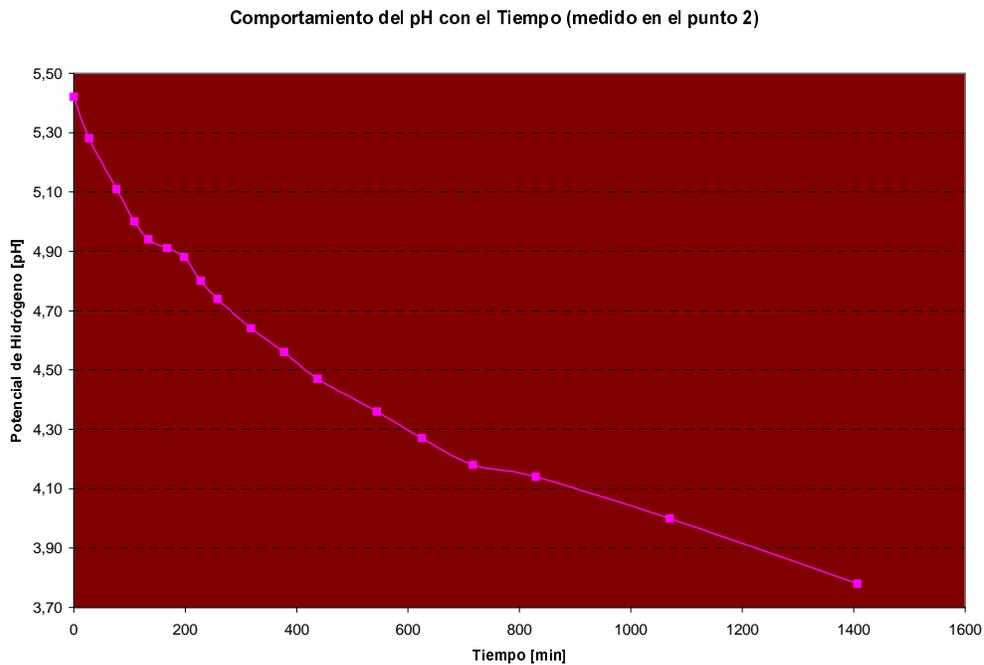


Figura 20. Comportamiento del pH con el tiempo medido en el punto 2 durante la prueba 1.



3.5 EL pH EN LA PRUEBA DE SEDIMENTACIÓN

Durante la prueba de sedimentación en la columna, se registró el pH en la muestra de la segunda llave de muestreo. En la

Figura 20 se presenta el comportamiento del pH con el tiempo y puede observarse como este decrece a través del tiempo, teniendo en cuenta que la concentración de sólidos tiende a estabilizarse en un valor al incrementar el tiempo, es decir a valores de pH bajos, se hizo lógico explorar la posibilidad de mejorar el proceso de sedimentación ajustando el pH en valores más ácidos al inicio de la prueba.

Se efectuaron dos pruebas una a pH 4,80 y otra a 3,73. los datos obtenidos se presenta en el Anexo B. Aplicando la misma metodología de análisis que a los datos sin modificación inicial de pH, se puede concluir que el comportamiento de la turbiedad y la concentración de sólidos con la velocidad nominal de sedimentación es completamente análogo, sin embargo los valores hacia los cuales tienden son sustancialmente mayores a los encontrados cuando no se ajusta el pH y un que el tiempo para el cual se estabiliza la concentración de sólidos y la turbiedad es mucho menor los porcentajes de remoción en estos casos no superaron el 70% para la turbiedad, ni el 30% para los sólidos. Esto es razón suficiente para desistir de la idea de mejorar la sedimentación de la “mancha” a través de un ajuste de pH en medio ácido.

3.6 CONCLUSIONES

Las partículas del efluente del sedimentador de almidón tienen tendencia a adherirse dado que para una misma velocidad nominal de sedimentación se presentan diferentes concentraciones de sólidos.

En la relación entre concentración de sólidos y tiempo de retención en la prueba de sedimentación se observa que alrededor de los 200 minutos existe un punto de quiebre o inflexión y en tiempos de retención superiores a 400 min la concentración tienden a ser constante, por consiguiente este último tiempo se considera como el tiempo de retención mínimo para alcanzar el máximo porcentaje de remoción de sólidos que oscila entre el 37 y el 38%.

El parámetro principal para la evaluación de eficiencias de remoción en el sedimentador de mancha debe ser Sólidos Totales y no Turbiedad, pues al evaluar la relación entre estos dos parámetros se observó que una remoción del 83,3 % en turbiedad equivale en sólidos una remoción del 37,4%.

Las pruebas modificadas a pH 4,80 y a 3,73, el comportamiento de la turbiedad y la concentración de sólidos con la velocidad nominal de sedimentación es completamente análogo, pero los valores hacia los cuales tienden son sustancialmente mayores a los encontrados cuando no se ajusta el pH y aunque el tiempo para el cual se estabiliza la

concentración de sólidos y la turbiedad es mucho menor, los porcentajes de remoción en estos casos no superaron el 70% para la turbiedad, ni el 30% para los sólidos.

Para un tiempo de retención aproximado a 400 minutos se obtuvo que la velocidad máxima y mínima promedio de sedimentación es de 5,21 m/d y 0,13 m/d respectivamente, las cuales son el parámetro principal para el diseño de los sedimentadores de mancha.

4 DISEÑO Y EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE SEDIMENTADOR

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se calcularán las dimensiones para la construcción de un sedimentador como medio para retener mancha, de tal forma que el diseño sea lo más compacto y se requiera la menor área superficial, partiendo de los estudios previos de sedimentación.

4.2 CONCEPTOS GENERALES [21]

Se entiende por sedimentación la remoción por efecto gravitacional de las partículas en suspensión presentes en el agua. Estas partículas deberán tener un peso específico mayor que el fluido.

La remoción de partículas en suspensión en el agua puede conseguirse por sedimentación o filtración. De allí que ambos procesos se consideren como complementarios. La sedimentación remueve las partículas más densas, mientras que la filtración remueve aquellas partículas que tienen una densidad muy cercana a la del agua o que han sido resuspendidas y, por lo tanto, no pudieron ser removidas en el proceso anterior.

La sedimentación es, en esencia, un fenómeno netamente físico y constituye uno de los procesos utilizados en el tratamiento del agua para conseguir su clarificación. Está relacionada exclusivamente con las propiedades de caída de las partículas en el agua. Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión más concentrada. A menudo se utilizan para designar la sedimentación los términos de clarificación y espesamiento. Se habla de clarificación cuando hay un especial interés en el fluido clarificado, y de espesamiento cuando el interés está puesto en la suspensión concentrada.

Las partículas en suspensión sedimentan en diferente forma, dependiendo de las características de las partículas, así como de su concentración. Es así que podemos referirnos a la sedimentación de partículas discretas, sedimentación de partículas floculentas y sedimentación de partículas por caída libre e interferida.

4.3 SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS DISCRETAS

Se llama partículas discretas a aquellas partículas que no cambian de características (forma, tamaño, densidad) durante la caída.

Se denomina sedimentación o sedimentación simple al proceso de depósito de partículas discretas. Este tipo de partículas y esta forma de sedimentación se presentan en los

desarenadores, en los sedimentadores y en los presedimentadores como paso previo a la coagulación en las plantas de filtración rápida y también en sedimentadores como paso previo a la filtración lenta.

4.4 SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS FLOCULENTAS

Partículas floculentas son aquellas producidas por la aglomeración de partículas coloides desestabilizadas a consecuencia de la aplicación de agentes químicos. A diferencia de las partículas discretas, las características de este tipo de partículas -forma, tamaño, densidad- sí cambian durante la caída.

Se denomina sedimentación floculenta o decantación al proceso de depósito de partículas floculentas. Este tipo de sedimentación se presenta en la clarificación de aguas, como proceso intermedio entre la coagulación -floculación y la filtración rápida.

4.5 SEDIMENTACIÓN POR CAÍDA LIBRE E INTERFERIDA

Cuando existe una baja concentración de partículas en el agua, éstas se depositan sin interferir. Se denomina a este fenómeno caída libre. En cambio, cuando hay altas concentraciones de partículas, se producen colisiones que las mantienen en una posición fija y ocurre un depósito masivo en lugar de individual. A este proceso de sedimentación se le denomina depósito o caída interferida o sedimentación zonal.

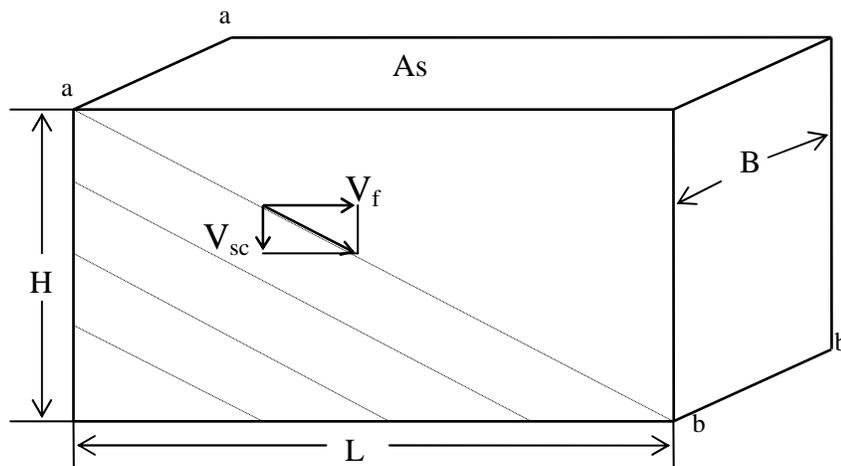
Cuando las partículas ya en contacto forman una masa compacta que inhibe una mayor consolidación, se produce una compresión o zona de compresión. Este tipo de sedimentación se presenta en los concentradores de lodos de las unidades de decantación con manto de lodos.

4.6 SEDIMENTADOR CONVENCIONAL: MODELO HAZEN Y CAMP

Para el diseño este sedimentador tiene una significación esencial el área superficial horizontal, mientras que el volumen en lo que concierne al fondo o profundidad de los tanques solo tiene importancia en dos situaciones: en el diseño de la región de espesamiento y en el diseño de sedimentadores flexibles en sedimentación no estacionaria [16]

Según Arboleda, V.[6], el sedimentador ideal se diseña para eliminar el 100% de partículas que tengan una determinada velocidad de sedimentación crítica V_{sc} o mayor, que son las que estando en las posiciones extremas a-a de la zona de sedimentación son retenidas en las posiciones extremas b-b de la zona de lodos, como se ilustra en la Fuente .

Figura 21. Diagrama de Velocidades



Fuente adaptado de Arboleda, [6]

4.7 PARÁMETROS DE DISEÑO

- Velocidad de sedimentación (V_s)

Se promediaron entre los ensayos, la velocidad de sedimentación máxima y mínima para tiempos próximos a 400 minutos, correspondiendo la máxima y mínima al punto de muestreo seis y uno, respectivamente. Para obtener una velocidad media de sedimentación, se toma la velocidad de ensayo que se aproxime a la media entre las velocidades máximas y mínimas y que corresponda al mismo tiempo de retención. La Tabla 15 presenta los datos de velocidad de sedimentación obtenidos experimentalmente y que se utilizan en el cálculo de la velocidad de sedimentación. A continuación se desarrolla un ejemplo de cálculo para una velocidad promedio de 5,21 m/d

Tabla 15. Velocidad de sedimentación obtenida en los ensayos de sedimentación.

Ensayo N°	Tiempo (min)	Velocidad máxima (cm/min)	Velocidad mínima (cm/min)	Velocidad cercana al promedio (cm/min)
1	438	0.34338	0.00548	0.20693
2	422	0.36445	0.01374	0.22227
3	403	0.37593	0.00868	0.22705
Velocidad promedio (cm/min)		0.36125	0.00930	0.21875
Velocidad promedio (m/d)		5.21	0.1339	3.15

4.7.1 ECUACIONES BÁSICAS DE DISEÑO

La velocidad de flujo, como se ilustra en la Fuente , puede calcularse como

$$V_f = \frac{Q}{B \times H} \quad \text{Ecuación 2.}$$

donde Q = caudal

de la semejanza de triángulos formados por H y L y por el diagrama vectorial de velocidades se tiene:

$$\frac{V_{sc}}{V_f} = \frac{H}{L} \quad \text{Ecuación 3.}$$

$$V_{sc} = V_f \times \frac{H}{L} = \frac{Q \times H}{B \times H \times L} = \frac{Q}{B \times L} = \frac{Q}{As} \quad \text{Ecuación 4}$$

donde As es igual al área superficial del sedimentador

Al cociente $\frac{Q}{As}$ que se tiene esencialmente dimensiones de velocidad se le denomina carga superficial y se lo expresa en:

$$\frac{m^3}{m^2/día} \quad \text{ó} \quad \frac{m^3}{m^2/hora}$$

Tomando una velocidad de sedimentación $V_{sc} = 5,21$ m/d, y despejando el área superficial del sedimentador (As) de la Ecuación 4, obtenemos lo siguiente:

$$As = \frac{Q}{V_{sc}} = \frac{96,03 \text{ m}^3/d}{5,21 \text{ m/d}} = 18,43 \text{ m}^2$$

De acuerdo a las condiciones de espacio de esta rallandería, se optó por tomar una relación entre largo y ancho, de 1:8 y una relación entre largo y profundidad de 1:10 [24]

$$As = B \times L = B \times 8B = 8B^2$$

Despejando el ancho (B), se obtiene:

$$B = \sqrt{\frac{As}{8}} = \sqrt{\frac{18,43m^2}{8}} = 1,52m$$

Como $L = 8 \times B$

$$L = 8 \times 1,52m = 12,14m$$

Así mismo se obtiene la profundidad,

como $L = 10 \times H$, entonces

$$H = \frac{12,14m}{10} = 1,21m$$

Se puede obtener el tiempo de retención hidráulico (TRH) con la ecuación de caudal:

$$Q = \frac{V}{t}, \text{ donde } t = TRH \text{ y } V = L \times B \times H$$

$$TRH = \frac{L \times B \times H}{Q}, \text{ reemplazando valores se obtiene}$$

$$TRH = \frac{12,14m \times 1,52m \times 1,21m}{96,03m^3/d} \times \frac{1440min}{1dia} = 334,81min$$

En la Tabla 16 se puede apreciar los anteriores resultados para las otras velocidades de sedimentación.

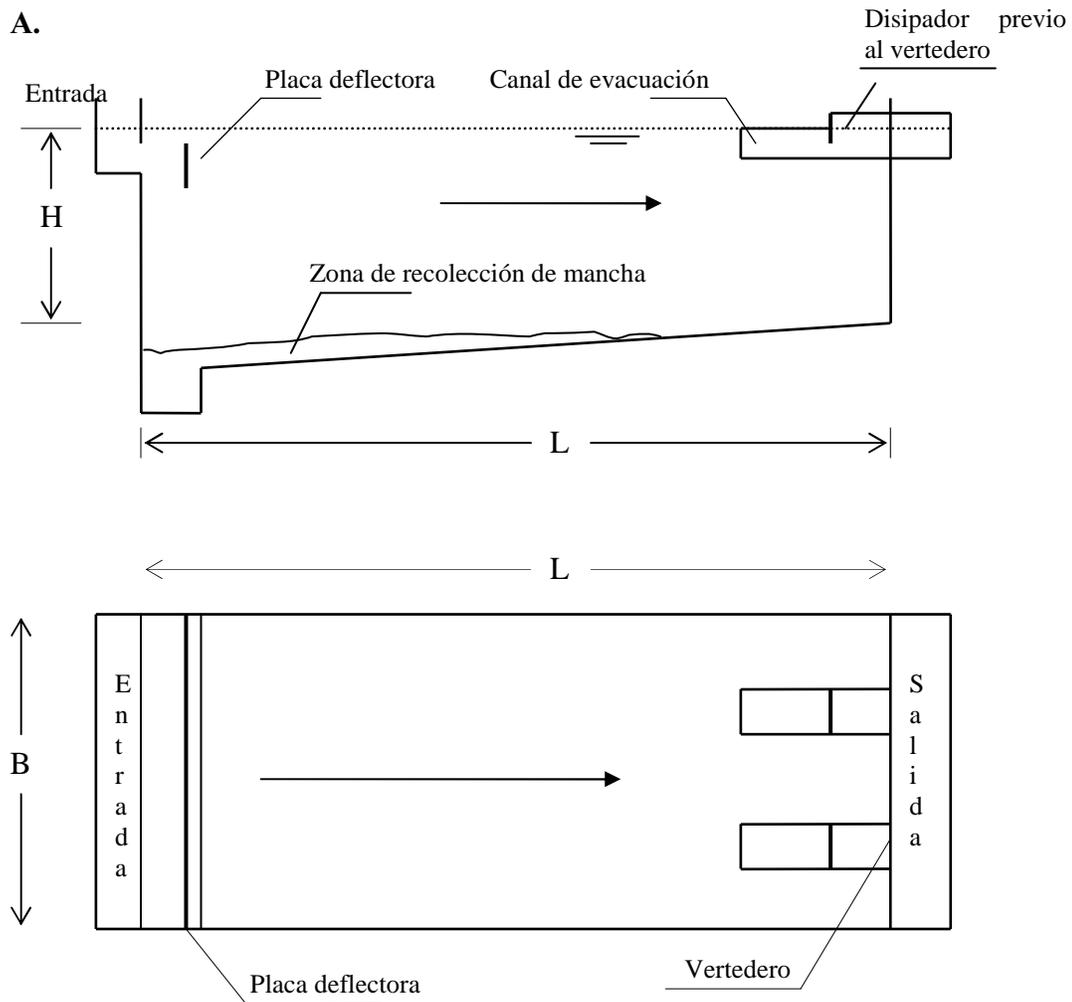
Tabla 16. Parámetros y resultados diseño sedimentador flujo horizontal

Caudal	Vs	Carga superficial	B	L	H	TRH
M ³ /d	m/d	m ²	m	m	m	min
96,03	5,21	18,43	1,52	12,14	1,21	334,81
96,03	3,15	30,51	1,95	15,62	1,56	714,79
96,03	0,1339	717,07	9,47	75,74	7,57	81440,9
96,03	4,64	20,7	1,61	12,87	1,29	400

4.7.2 ESTRUCTURA DE ENTRADA

La entrada del agua a los sedimentadores debe ser realizada por un dispositivo hidráulico capaz de distribuir el caudal uniformemente a través de toda la sección transversal, disipar la energía que trae el agua y garantizar una velocidad longitudinal uniforme, de igual intensidad y dirección.[24]. El dispositivo hidráulico más sencillo de utilizar es una placa deflectora, tal como se ilustra en la Adaptado de Hernández, M [17].

Figura 22 Esquema general del sedimentador de flujo horizontal. A. Sección Longitudinal. B. Vista en planta.



Adaptado de Hernández, M [17]

4.7.3 ESTRUCTURA DE SALIDA

Debe estar constituida por vertederos, canaletas o tubos con perforaciones, como se puede observar en la Figura 22. Se recomienda vertederos triangulares ya que son utilizados para caudales menores de 30 L/s, estos con elementos hidráulicos sencillos, fuertes, de bajo costo tanto de adquisición como de instalación. Los vertederos pueden ser fabricados de madera, pero se sugiere, preferiblemente utilizar placas de acero o material sintético. La descarga del vertedor es medida registrando la lámina de agua por arriba del punto más profundo sobre la cresta del vertedor. La altura de la lámina de agua, es función del caudal y del ángulo formado en la escotadura del vertedor.

Para facilitar la construcción se sugieren ángulos de 15, 30, 45, 60 ó 90°, de tal manera que las láminas de agua para el caudal de diseño sean superiores a 0,10m. Así, para caudales inferiores a 1,0 L/s se recomiendan ángulos de 15, 30 o 45°, de tal manera que pequeñas variaciones en la lámina de agua no implique cambios significativos de caudal.

4.8 SEDIMENTADOR DE ALTA RATA O PLACAS PARALELAS

Según Gutiérrez y Bueno [16], la posibilidad de ampliar la superficie de transferencia por dispersión o creación de interfases mediante la presencia de materiales inertes (rellenos), encuentra su aplicación en sedimentación, donde la división de flujo y el empleo de superficies ampliadas permiten incrementar la relación superficie/volumen del tanque, dando lugar a diseños más compactos. A continuación se desarrolla el diseño de sedimentador laminar según Yao y Torres.

4.8.1 PARÁMETROS DE DISEÑO

- Velocidad de sedimentación (V_s)

Teniendo en cuenta que a tiempos de retención superiores a 400 minutos las remociones tienden a ser constantes la V_s adecuada para el diseño debe estar en el rango que se presenta en las tablas de resultados de ensayos de sedimentación. Por lo tanto se promediaron, entre los ensayos, la velocidad de sedimentación máxima y mínima para tiempos próximos a 400 minutos, correspondiendo la máxima y mínima al punto de muestreo seis y uno, respectivamente. Para obtener una velocidad media de sedimentación, se toma la velocidad de ensayo que se aproxime a la media entre las velocidades máximas y mínimas y que corresponda al mismo tiempo de retención. La Tabla 15 presenta los datos de velocidad de sedimentación obtenidos experimentalmente y que se utilizan en el cálculo de la velocidad media de sedimentación. A continuación se desarrolla un ejemplo de cálculo para una velocidad promedio de 5.21 m/d.

Angulo de inclinación de las placas

Para facilitar el deslizamiento del lodo depositado sobre las placas, el valor adoptado para el ángulo inclinación de las placas en este diseño es de, $\theta = 60^\circ$, la Adaptado de Hernández, M [17] muestra como se define el ángulo en el sedimentador de placas.

- Separación perpendicular de las placas

Se recomienda una separación $e = 0.10$ m (máximo recomendado por Gutiérrez [16])

- Viscosidad cinemática

Para el agua a 22° C, es $\nu = 0.0831$ m²/d

- Altura de la placas

Según Gutiérrez [16] la altura máxima recomendado es $H = 0.80$ m

- Dimensión de placas

Algunos autores recomiendan el uso de placas de asbesto cemento, pero la acidez propia del efluente de mancha, hace que este sea muy corrosivo para el asbesto cemento. El Polimetacrilato de Metilo de Colada, es un material ligero de fácil consecución y una alta resistencia al ataque químico, especialmente a ácidos tan fuertes como el ácido sulfúrico, esto lo convierten en la mejor alternativa para las placas del sedimentador.

Teniendo en cuenta las dimensiones comerciales de las láminas de acrílico (1,80 x 1,20 m), se recomiendan placas con las siguientes dimensiones:

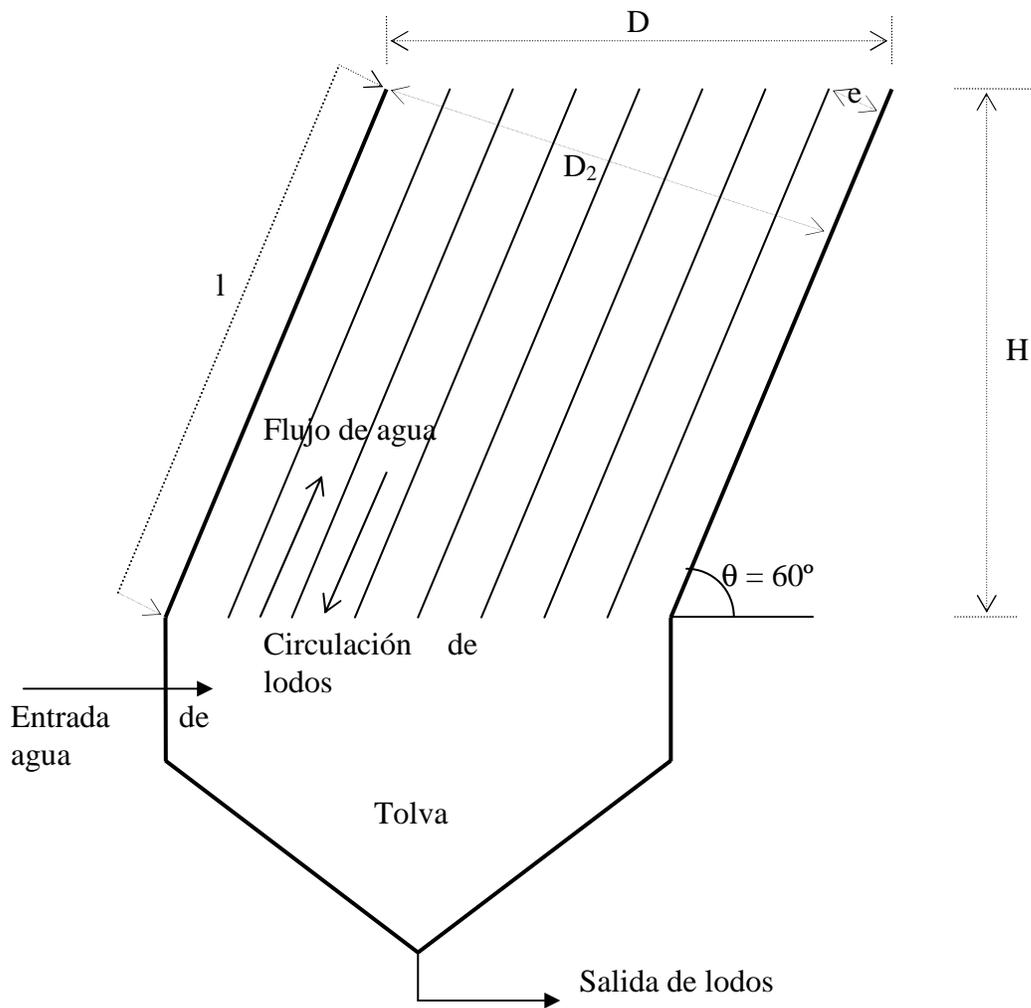
$$l = 0.90m, B = 1.20m \text{ y } w = 0.005m \text{ de espesor.}$$

Teniendo en cuenta la relación geométrica de l con la profundidad H

$$l = \frac{H}{\text{sen}\theta} = \frac{0.8}{\text{sen}60} = 0.92 \text{ m}$$

Observando que con el valor establecido para la altura H se obtiene un desperdicio de 0.02 m, se optó por disminuir H a 0.78, de modo que se obtiene un $l = 0.90$ m

Figura 23. Sección transversal de un sedimentador de placas paralelas con flujo en contracorriente



Fuente Adpatado de Hernández, M [17]

4.8.2 ECUACIÓN BÁSICA DE CÁLCULO

Para el cálculo de cargas equivalentes en sedimentadores de placas se parte de las siguientes hipótesis:

- La velocidad V_0 es la media con que avanza la masa de agua. No hay distorsión significativa de los perfiles de velocidad dentro de las placas debido al escurrimiento de los lodos, ni deslizamiento de la partícula con respecto al fluido. [6]
- La distancia X_L de entrada, donde, según Khundsen y Katz (1958), el flujo laminar se establece, la sedimentación que se hace es pequeña y debe por tanto descontarse de la longitud útil.[6]

Partiendo de estas hipótesis y teniendo en cuenta la ecuación de Yao (1970), según la cual la velocidad de sedimentación de una partícula en placas paralelas esta dada por:

$$V_s = \frac{Sc \times V_0}{Sen\theta + LCos\theta} \quad \text{Ecuación 5}$$

donde

Sc = 1 para placas paralelas. Movimiento Uniforme

V_s = velocidad de sedimentación de la partícula

Esta ecuación puede describirse como:

$$V_s = \frac{Sc \times V_0}{Sen\theta + L_u \times Cos\theta} \quad \text{Ecuación 6}$$

donde el valor L_u es la longitud útil de la placa (descartada la zona inicial donde no se establece un flujo laminar completo) y puede calcularse así:

$$L_u = \frac{l}{e} - X_L \quad \text{Ecuación 7}$$

donde

- $\frac{l}{e}$ es la relación adimensional referida a la distancia normal entre placas (L)

$$X_L = 0.013N_R \quad (\text{Knudsed y Katz}) \quad \text{Ecuación 8}$$

$$N_R = \frac{V_0 \times e}{\nu} \quad \text{Ecuación 9}$$

Combinando la ecuación 5 y 6, y reemplazando en la ecuación 4, se obtiene:

$$L_u = \frac{l}{e} - 0.013 \times \frac{V_0 \times e}{\nu} \quad \text{Ecuación 10}$$

Sustituyendo la ecuación.10 en la ecuación 6, se obtiene que la velocidad ascensional V_0 es:

$$V_0 = \frac{V_s \times v(e \times \text{sen} \theta + l \times \text{cos} \theta)}{e(v + 0.013 \times e \times V_s \times \text{cos} \theta)} = 26.86 \frac{m}{d} \quad \text{Ecuación 11}$$

Una vez conocida la velocidad de ascensión se puede determinar el área normal requerida para la sedimentación mediante la ecuación de caudal:

$$Q = V_0 \times A \quad \text{Ecuación 12}$$

donde

Q = caudal del efluente de la rallandería

A = área normal requerida sin placas

por lo tanto

$$A = \frac{Q}{V_0} = 3.58 m^2$$

Con el área normal requerida se calcula la longitud normal sin placas,

$$D_1 = \frac{A}{B} = \frac{3.58}{1.20} = 2.98 m$$

Con D_1 se calcula el número de canales

$$\text{N}^\circ \text{ canales} = \frac{D_1}{e} = \frac{2.98}{0.1} = 29.8 \approx 30$$

Por lo tanto el número de placas requeridas es de:

$$\text{N}^\circ \text{ de placas} = \text{N}^\circ \text{ de canales} + 1 = 31$$

La longitud horizontal superficial del sistema de placas es de

$$D_2 = D_1 + w \times \text{N}^\circ \text{ de placas} = 2.98 + 0.005 \times 29$$

$$D_2 = 3.13 \text{ m}$$

La longitud de superficial del sistema de placas, D :

$$D = \frac{D_2}{\text{sen} \theta} = \frac{3.1}{\text{sen} 60} = 3.62$$

Por lo tanto el área requerida por las placas es de:

$$A_p = 3,62m \times 1,20m = 4,34m^2$$

En la Tabla 17 se presentan los resultados de diseño para las otras velocidades de sedimentación.

4.8.3 FACTORES CONDICIONANTES

Según Hernández Muñoz [17], el funcionamiento correcto de los sedimentadores laminares así como los resultados obtenidos, quedan supeditados a un cierto número de factores condicionantes.

En todos los tipos de sedimentadores es preciso mantener un régimen laminar o, dicho de otra manera, conseguir mantener el número de Reynolds entre 100 y 200, es decir:

$$Re = \frac{V_o \times e}{\nu} \leq 250$$

Para el caso en cuestión:

$$Re = \frac{27.97 \times 0.1}{0.0831} = 33.66$$

El valor obtenido para el número de Reynolds esta por debajo del valor máximo recomendado para alcanzar el flujo laminar.

Tabla 17 Dimensiones del sedimentador de placas para los valores de velocidad de sedimentación seleccionados

Caudal m ³ /d	θ grados	H m	V_s m/d	V_s cm/s	e m	v_{\square} m ² /d	Ancho. de placa B m	Espesor placa W m	largo l m
96,03	60	0,78	5,21	0,3618	0,1	0,0831	1.20	0,005	0,90
96,03	60	0.78	3,15	0,2186	0,1	0,0831	1.20	0,005	0,90
96,03	60	0.78	0,13	0,0093	0,1	0,0831	1.20	0,005	0,90

V_o m/d	L m	$A_{\text{sin placas}}$ m ²	D_1 m	canales	Placas	D_2 m	D m	Área total m ²	Reynolds
26.86	8.58	3.58	2.98	30	31	3.13	3.62	4,34	32.33
16.50	8.74	5.82	4.85	49	50	5.1	5.9	7,1	19.85
0.697	8.99	137.8	114.83	1148	1149	120.58	139.24	167,1	0.839

- A = área normal de la superficie sin placas
- D_1 = longitud normal sin placas
- D_2 = longitud normal con placas
- D = longitud horizontal del conjunto del sistema de placas

4.8.4 ESQUEMA SEDIMENTADOR DE PLACAS PARALELAS

- Sistema de entrada

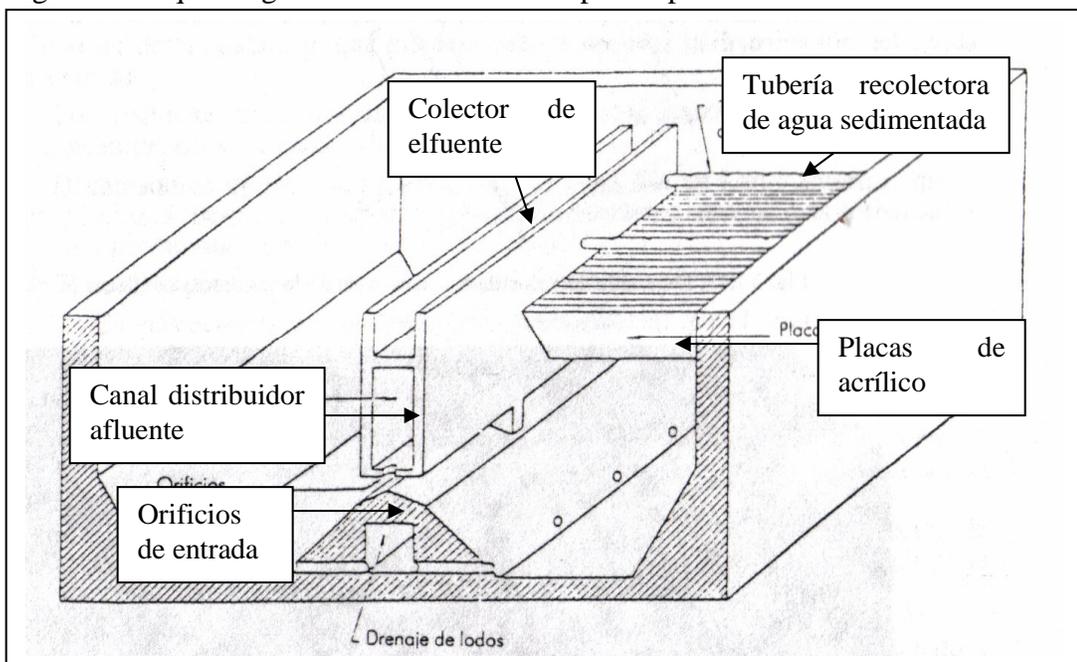
De acuerdo a la disponibilidad de espacio en la rallandería y distribución de los sistemas del proceso de extracción de almidón, se recomienda la construcción del vertedero al final del sedimentador de almidón.

La entrada del agua a los sedimentadores debe ser realizada por un dispositivo hidráulico capaz de distribuir el caudal uniformemente a través de toda la sección transversal, disipar la energía que trae el agua y garantizar una velocidad [22] ascensional uniforme, de igual intensidad y dirección. El dispositivo hidráulico que se recomienda es una tubería perforada que atraviese longitudinalmente el sedimentador.

- Sistema de salida

El sistema debe cubrir la totalidad del área de sedimentación y debe constar de tuberías perforadas o canaletas que trabajen con un tirante de agua no inferior a 8 cm [24]. En la Figura 24 se muestra este sistema utilizando tubería perforada.

Figura 24 Esquema general sedimentador de placas paralelas.



Fuente Adaptado de Arboleda. [6]

4.9 DISCUSIÓN

Los valores obtenidos en las pruebas de sedimentación son muy bajas al comparar con las recomendaciones de Várgas de Cánepa [31], quien sugiere que la velocidad de sedimentación para el diseño de sedimentador de placas paralelas debe oscilar entre 10 y 60 m/d, por lo tanto las dimensiones del sistema de sedimentación son muy grandes comparadas con otros diseñados para partículas discretas o floculentas.

Se encontró que el parámetro común para alcanzar las máximas eficiencias de remoción está alrededor de un tiempo mínimo de retención hidráulica de 400 minutos. Este tiempo se puede alcanzar con una velocidad de sedimentación intermedia de 4,64 m/d en el sedimentador de flujo horizontal, tal como se puede observar el tiempo de retención hidráulica en la Figura 60.

4.10 CONCLUSIONES

El sedimentador horizontal tiene un área muy extensa respecto al flujo que se maneja y las áreas disponibles en el proceso. La relación entre el área superficial del sedimentador de flujo horizontal y el área superficial del sedimentador de placas paralelas es de 4,3:1, lo cual indica que la implementación de placas hace efectivamente más compacto el diseño.

5 FACTIBILIDAD DE USO DE LOS SUBPRODUCTOS

5.1 INTRODUCCIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos del análisis alimenticio realizado al subproducto mancha e información de estudios previos sobre su uso en la alimentación para animales, se dará un panorama general y recomendaciones sobre la factibilidad de uso como insumo para la alimentación animal

5.2 FACTIBILIDAD DE USO

La “mancha” y el afrecho de yuca al igual que la harina han sido utilizados también como ingredientes en la alimentación de cerdos, pollos de engorde y gallinas ponedoras en niveles hasta del 30%, encontrándose en términos generales que en los niveles de 10 y 20% no afectan significativamente la ganancia de peso o el porcentaje de postura, pero al aumentarse el consumo de la ración, la conversión desmejora (Pillai et al 1968; Manickam y Gopalakrishnan 1978; Buitrago 1972, citados por Chará [12]).

En el trabajo Niveles de “mancha” y Afrecho de Yuca (*Manihot esculenta*) como Fuente Energética en la Dieta de Patos Pekín (*Anas platyrhynchos*), Chará [12] utilizó cuatro mezclas en proporciones “mancha”/afrecho de 1:0, 1:1, 1:2 y 1:3. Además a todos los suministró diariamente 55.5 g/d de núcleo proteico del 36% de proteína por animal, para garantizar el consumo de 20 g/d de proteína cruda por animal. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 18.

En el Apéndice G se aprecia los resultados del estudio alimenticio realizado a la mancha obtenida en una jornada de muestreo, con estos resultados se demuestra la alta concentración de carbohidratos (47,2%) que sirven como fuente de energía en la alimentación animal y además muestra una 22% de contenido en proteína, lo cual demuestra que es una fuente económica para la alimentación animal y sería viable su comercialización.

Tabla 18. Resultados del uso de mezclas “mancha”/afrecho en el crecimiento del Pato Pekín.

Parámetro	“mancha”	“mancha”/Afrecho		
		1:1	1:2	1:3
Animales/tratamiento	10	10	10	10
Días del ensayo	35	35	35	35
Peso vivo (g)				
Inicial	887.5	895	877.5	900
Final	2055	2127.5	2070	1963.9
Incremento peso (g/d)	33.4	35.2	34.1	30.4
Consumo (g/d)				
Núcleo proteico	55.5	55.5	55.5	55.5
“mancha”	139.5	74.2	49.5	33.3
Afrecho	----	69.3	93.7	89.2
Consumo de materia				
seca (g/d)	174.5	176.4	175.6	157.2
Conversión alimenticia	5.22	5.01	5.15	5.16

Fuente: Adaptado de Chará[12]

5.3 CONCLUSIONES

Según Chará [12] los subproductos de la industria del almidón resultan adecuados para la alimentación del Pato Pekín, lográndose rendimientos biológicos y económicos aceptables. Se encontró a partir de éste estudio que la mezcla más adecuada de mancha/afrecho para la alimentación de patos fue en proporción 1:1 seguida por la proporción 1:2 que aparentemente brindan un nivel de fibra adecuado para esta especie.

El costo de la fracción proteica representa el rubro más elevado por lo cual es de gran importancia realizar investigaciones tendientes a encontrar fuentes proteicas que resulten en un buen beneficio biológico y económico en el Pato Pekín. Con este fin se deben realizar nuevas investigaciones suministrando las dietas que mostraron mejores resultados en lo encontrado en la literatura y reemplazando parte del suplemento proteico por soya, lombrices u otros recursos de fácil consecución en la zona, que ayuden a disminuir los costos.

La mancha posee una alta concentración de carbohidratos y una aceptable concentración proteica que la hacen susceptible para la alimentación animal y su posible comercialización.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

Durante la sedimentación de mancha se presenta el fenómeno de adherencia, puesto que para cada tiempo de retención se producen concentraciones de sólidos distintas a la misma velocidad nominal de sedimentación. Además el parámetro que asegura las mejores eficiencias de remoción de sólidos, para este caso, es un tiempo de retención hidráulica de 400 minutos el cual determina la velocidad de sedimentación crítica para el diseño.

El sedimentador de flujo horizontal cuenta con áreas muy grades respecto al flujo que se maneja y a las áreas disponibles en la planta espacial y económicamente poco atractiva para su implementación, por otro lado, en el diseño de placas paralelas, la velocidad de sedimentación crítica es muy inferior a las recomendadas por algunos autores, por lo tanto la unidad de sedimentación es relativamente más grande comparada con otras diseñadas para partículas discretas o floculetas, pero al compararlo con el sedimentador de flujo horizontal la implementación de placas hace efectivamente más compacto el sistema y se podría garantizar una remoción de sólidos entre el 37 y 38%.

Al aplicar el factor de biodegradabilidad a la caracterización fisicoquímica del efluente del sedimentador de mancha se encontró que éste tiene una buena susceptibilidad al tratamiento biológico siempre y cuando el pH sea controlado de manera adecuada ya que este es un tensor en el tratamiento biológico.

El subproducto mancha puede ser utilizado como fuente energética y económica, para la alimentación de diversos tipos de animales entre ellos: cerdos, gallinas ponedoras, pollos de engorde y patos.

6.2 RECOMENDACIONES

Para determinar el comportamiento de los sólidos en el efluente de lavado, se deben tomar las muestras a diferentes tiempos para cada Batch de lavado, puesto que las concentraciones disminuyen condiserablemente partiendo de concentraciones desde los 30.000 mg/L en el primer minuto hasta 2.152 mg/L al final del Batch con un tiempo promedio de lavado de 15 minutos.

Para minimizar errores en la determinación de los parámetros fisicoquímicos y en la prueba de sedimentación, el transporte de las muestras del efluente del sedimentador de mancha y almidón al laboratorio, se debe hacer en el menor tiempo posible o en el

sitio, debido a la naturaleza ácida del efluente y además por el fenómeno de adherencia que presentan las partículas.

Para el balance de masa, para disminuir errores en la cuantificación de los productos y subproductos, se deben realizar los rendimientos de producción a escala en el laboratorio para posteriormente compararlos con los rendimientos de campo.

Se recomienda la instalación de vertederos triangulares debidamente calibrado al final de los canales de sedimentación de almidón y en los canales de evacuación del efluente de lavado para mayor facilidad en la determinación de caudales.

Es necesario evaluar el pH como tensor en el tratamiento biológico, estudiando a escala piloto en el sitio para garantizar el pH adecuado para dichos tratamiento, ya que se observó que en el transcurso del tiempo durante el transporte de las muestras al laboratorio, el pH disminuía considerablemente lo que representa error entre los resultados obtenidos en el laboratorio y en la rallandería.

Se recomienda evaluar la posibilidad de retener mancha por coagulación-floculación lo que incrementaría la velocidad de sedimentación crítica de la partícula o una centrifuga o hidrociclón los cuales son métodos que no dependen de la fuerza gravitacional

De acuerdo con los resultados obtenidos se pudo comprobar que el efluente del sedimentador de mancha tiene una mejor biodegradabilidad por el tiempo de retención hidráulica en el sedimentador de mancha.

Para complementar la estrategia de producción más limpia, es indispensable implementar un sistema de gestión ambiental y de calidad, que de una mayor competitividad a esta industria. Por ejemplo en Salud Ocupacional se debe hacer una valoración de los riesgos de la rallandería identificando y valorando factores de riesgo, realizar un plan de gestión integral de residuos sólidos, cumplir con las normas sanitarias, entre otras.

Se observa la necesidad de mejorar el diseño de la lavadora/peladora y la coladora para mejorar la eficiencia energética y disminuir el consumo de agua, por lo tanto se recomienda las variables forma y tamaño de orificios del tambor, espacio libre entre el volumen del tambor y yuca, forma de dispersión del agua, cantidad de agua, evacuación de residuos, tiempo mínimo de lavado, revoluciones por minuto, entre otras.

Para el diseño del desarenador del efluente de lavado, hacer la respectiva prueba de sedimentación por columna o por sólidos sedimentables en un cono Imhoff.

Para un mejor aprovechamiento del subproducto “afrecho” se debe explorar, para mejorar su comercialización, alternativas de diferentes al uso en la alimentación

animal. Como puede ser fabricación de papel, compostaje, procesos donde se requiera fibra, artesanías, entre otras. De igual manera, para mejorar la alternativa del compostaje de la cascarilla, es necesario hacer el estudio para este proceso para determinar su rendimiento, requerimientos de carbono/nitrógeno, así como mezclas con otros residuos orgánicos.

APÉNDICES

A. DATOS PRUEBAS DE SEDIMENTACIÓN

Tabla 19. Datos obtenidos en la columna de sedimentación durante la prueba 2 en los puntos 1 y 2

Tiempo [min]	Punto 1				Punto 2				
	Turb. [NTU]	ST [mg/l]	h [cm]	Vs [cm/min]	Turb. [NTU]	ST [mg/l]	h [cm]	Vs [cm/min]	pH
0	2280	3196,15			2280	3196,15			6,06
2	2228	3162,05	11,7	5,85000	2221	3157,45	12,0	6,00000	6,05
32	2120	3091,21	11,1	0,34688	2117	3089,24	11,4	0,35625	5,87
62	2108	3083,34	10,5	0,16935	2114	3087,27	10,8	0,17419	6,69
100	1880	2933,79	9,8	0,09800	2143	3106,29	10,1	0,10100	5,56
122	1647	2780,97	9,1	0,07459	2085	3068,25	9,4	0,07705	5,45
152	1415	2628,80	8,6	0,05658	2107	3082,68	8,9	0,05855	5,30
185	860	2264,77	8,0	0,04324	1555	2720,62	8,3	0,04486	5,18
212	687	2151,30	7,5	0,03538	749	2191,97	7,8	0,03679	5,05
245	588	2086,37	6,8	0,02776	628	2112,61	7,1	0,02898	4,98
272	553	2063,41	6,2	0,02279	580	2081,12	6,5	0,02390	4,94
304	528	2047,02	5,7	0,01875	556	2065,38	6,0	0,01974	4,85
340	528	2047,02	5	0,01471	580	2081,12	5,3	0,01559	4,82
362	541	2055,54	4,4	0,01215	543	2056,85	4,7	0,01298	4,80
422	509	2034,55	3,8	0,00900	532	2049,64	4,1	0,00972	4,64
482	549	2060,79	3,2	0,00664	518	2040,46	3,5	0,00726	4,55
1052	437	1987,33	2,7	0,00257	457	2000,45	3,0	0,00285	4,22

Tabla 20. Datos obtenidos en la columna de sedimentación durante la prueba 2 en los puntos 3 y 4

Tiempo [min]	Punto 3				Punto 4			
	Turb. [NTU]	ST [mg/l]	h [cm]	Vs [cm/min]	Turb. [NTU]	ST [mg/l]	h [cm]	Vs [cm/min]
0	2280	3196,15			2280	3196,15		
2	2174	3126,63	71,7	35,85000	2047	3043,33	101,7	50,85000
32	2135	3101,05	71,1	2,22188	2069	3057,76	101,1	3,15938
62	2108	3083,34	70,5	1,13710	2120	3091,21	100,5	1,62097
100	2107	3082,68	69,8	0,69800	2109	3083,99	99,8	0,99800
122	2112	3085,96	69,1	0,56639	2154	3113,51	99,1	0,81230
152	2130	3097,77	68,6	0,45132	2144	3106,95	98,6	0,64868
185	1628	2768,51	68,0	0,36757	1698	2814,42	98,0	0,52973
212	788	2217,55	67,5	0,31840	792	2220,17	97,5	0,45991
245	632	2115,23	66,8	0,27265	642	2121,79	96,8	0,39510
272	586	2085,06	66,2	0,24338	601	2094,90	96,2	0,35368
304	557	2066,04	65,7	0,21612	577	2079,15	95,7	0,31480
340	592	2088,99	65,0	0,19118	572	2075,87	95,0	0,27941
362	538	2053,57	64,4	0,17790	551	2062,10	94,4	0,26077
422	530	2048,33	63,8	0,15118	542	2056,20	93,8	0,22227
482	535	2051,61	63,2	0,13112	542	2056,20	93,2	0,19336
1052	457	2000,45	62,7	0,05960	488	2020,78	92,7	0,08812

Tabla 21. Datos obtenidos en la columna de sedimentación durante la prueba 2 en los puntos 5 y 6

Tiempo [min]	Punto 5				Punto 6			
	Turb. [NTU]	ST [mg/l]	h [cm]	Vs [cm/min]	Turb. [NTU]	ST [mg/l]	h [cm]	Vs [cm/min]
0	2280	3196,15			2280	3196,15		
2	2052	3046,61	131,7	65,85000	1896	2944,29	161,7	80,85000
32	2080	3064,97	131,1	4,09688	2103	3080,06	161,1	5,03438
62	2122	3092,52	130,5	2,10484	2131	3098,42	160,5	2,58871
100	2111	3085,30	129,8	1,29800	2148	3109,57	159,8	1,59800
122	2159	3116,79	129,1	1,05820	2127	3095,80	159,1	1,30410
152	2172	3125,31	128,6	0,84605	2143	3106,29	158,6	1,04342
185	1605	2753,42	128,0	0,69189	1664	2792,12	158,0	0,85405
212	832	2246,41	127,5	0,60142	869	2270,68	157,5	0,74292
245	669	2139,50	126,8	0,51755	656	2130,97	156,8	0,64000
272	610	2100,80	126,2	0,46397	593	2089,65	156,2	0,57426
304	592	2088,99	125,7	0,41349	594	2090,30	155,7	0,51217
340	557	2066,04	125,0	0,36765	568	2073,25	155,0	0,45588
362	551	2062,10	124,4	0,34365	551	2062,10	154,4	0,42652
422	526	2045,70	123,8	0,29336	538	2053,57	153,8	0,36445
482	529	2047,67	123,2	0,25560	544	2057,51	153,2	0,31784
1052	479	2014,88	122,7	0,11663	453	1997,82	152,7	0,14515

Figura 25. Relación entre la turbiedad y la velocidad nominal de sedimentación en la Prueba 2.

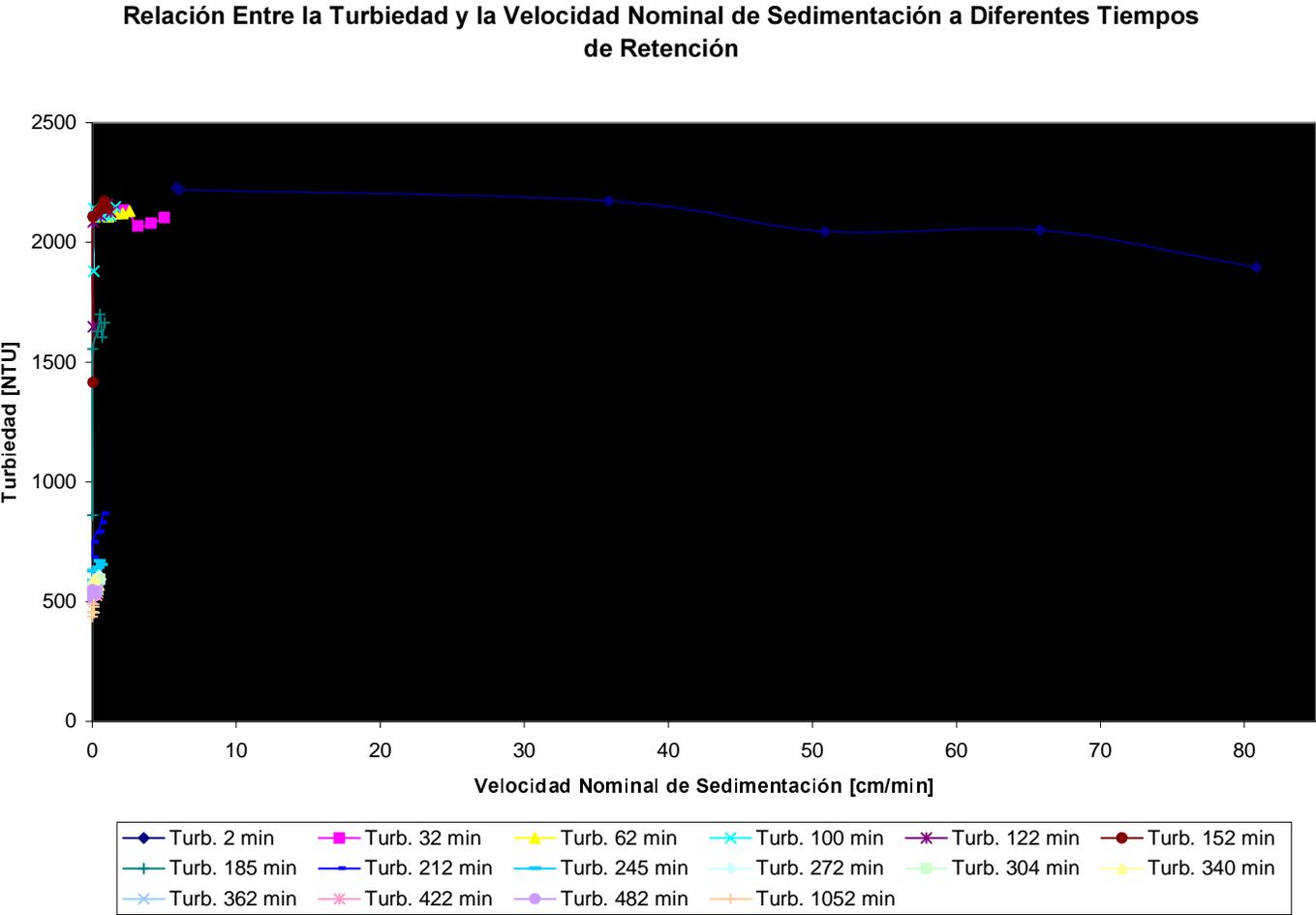


Figura 26. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación en la Prueba 2.

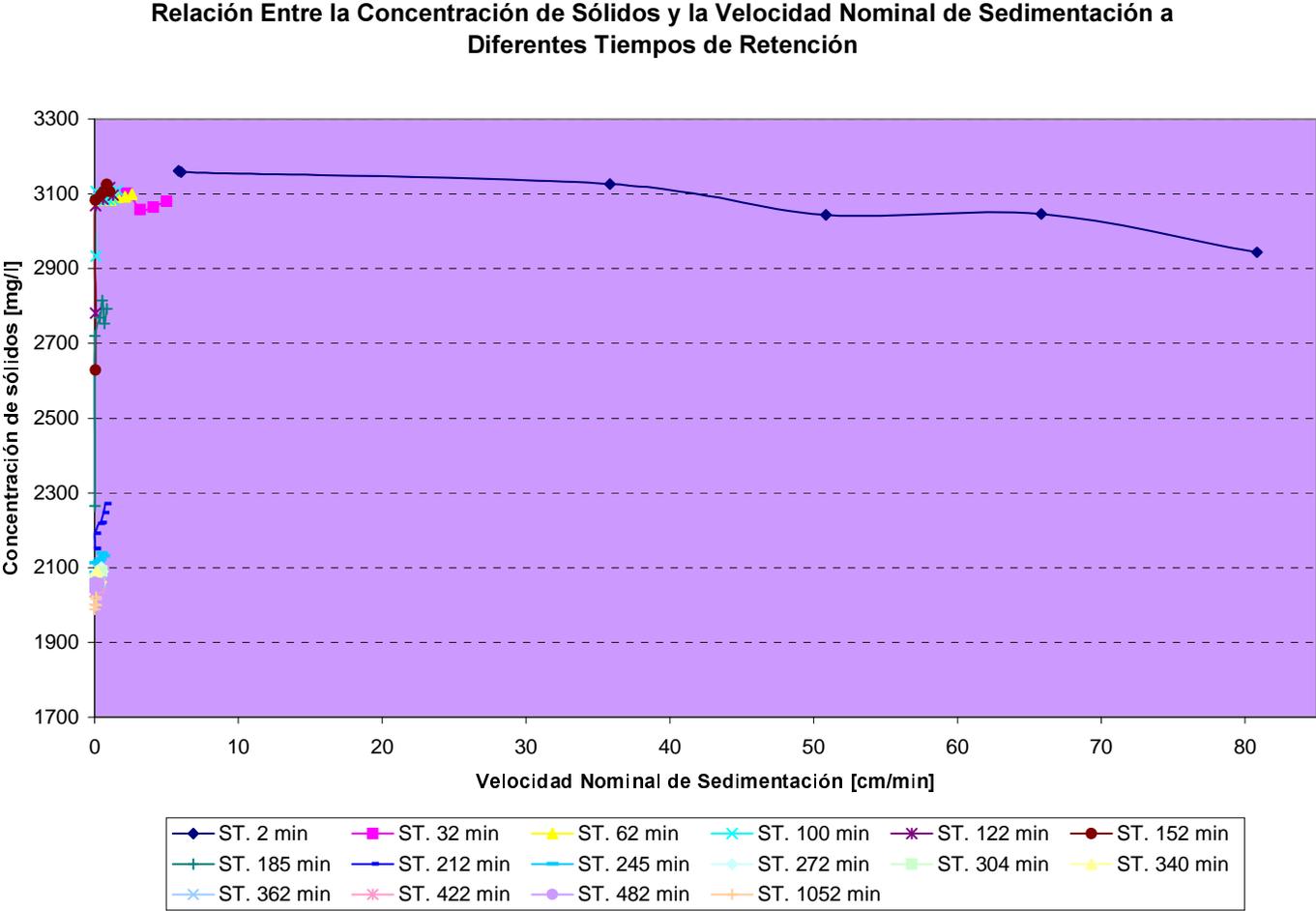


Figura 27. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación la Prueba 2 para tiempos de retención entre 32 y 152 min.

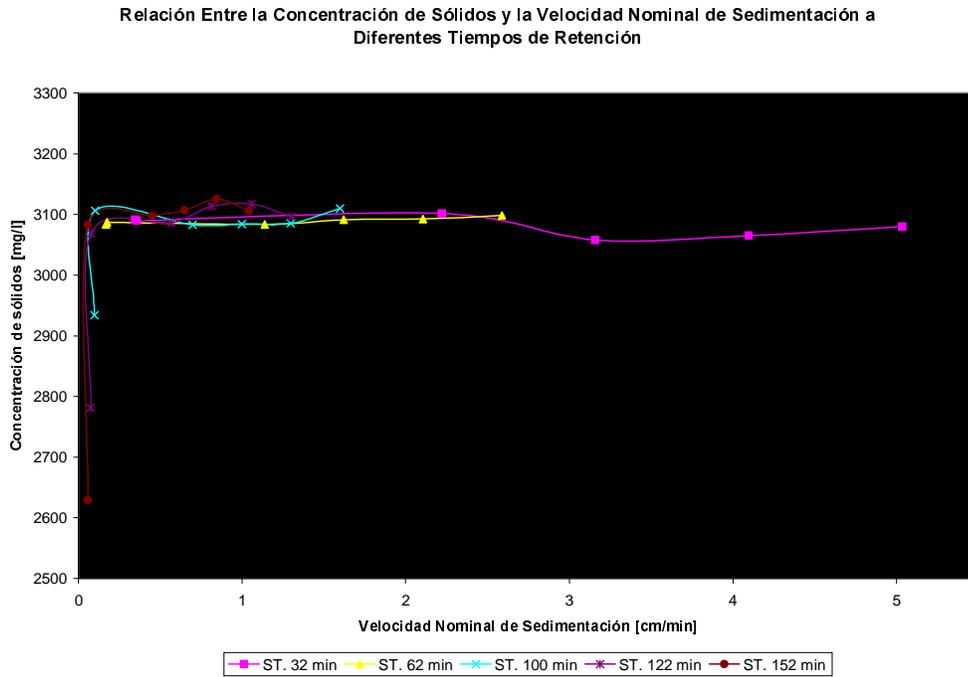


Figura 28. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación la Prueba 2 para tiempos de retención entre 185 y 340 min.

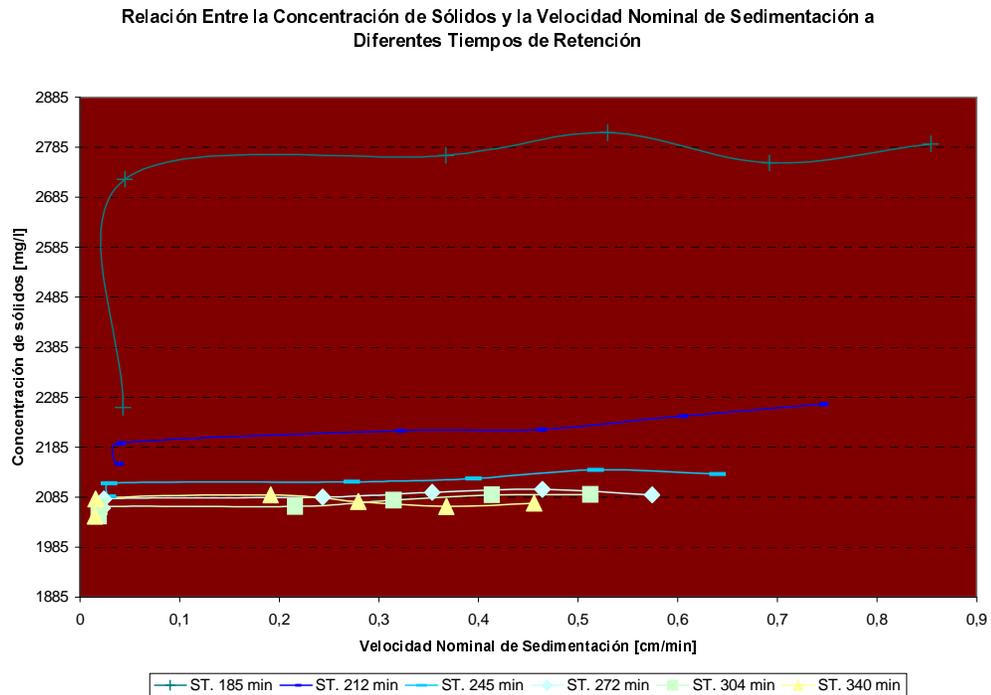


Figura 29. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación la Prueba 2 para tiempos de retención entre 362 y 1052 min.

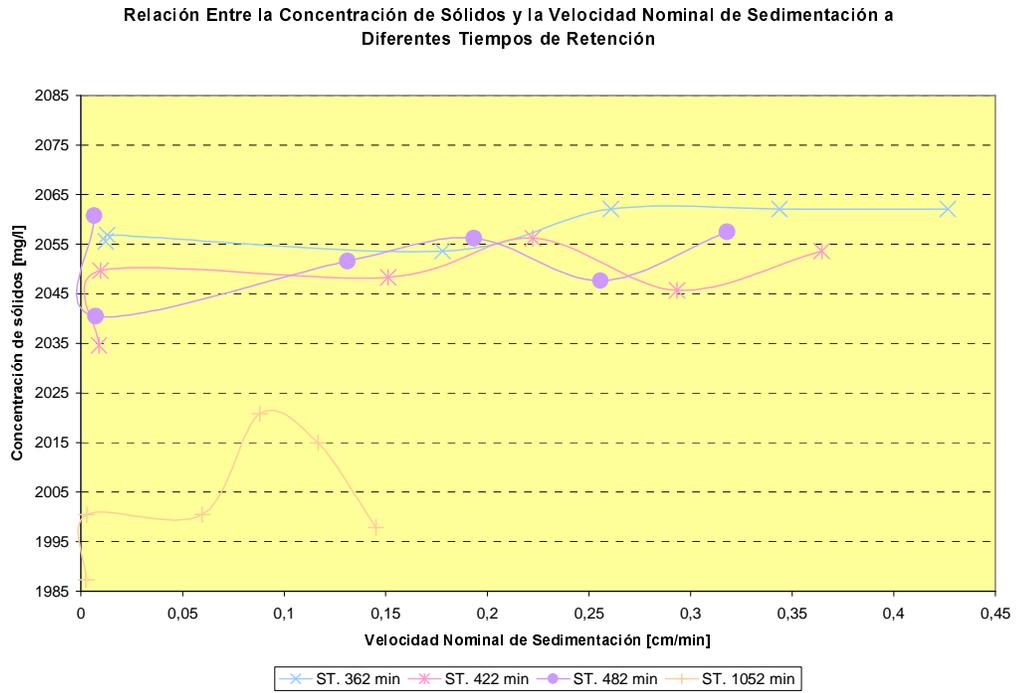


Figura 30. Relación entre la turbiedad y el tiempo de retención en cada punto de muestreo en la Prueba 2.

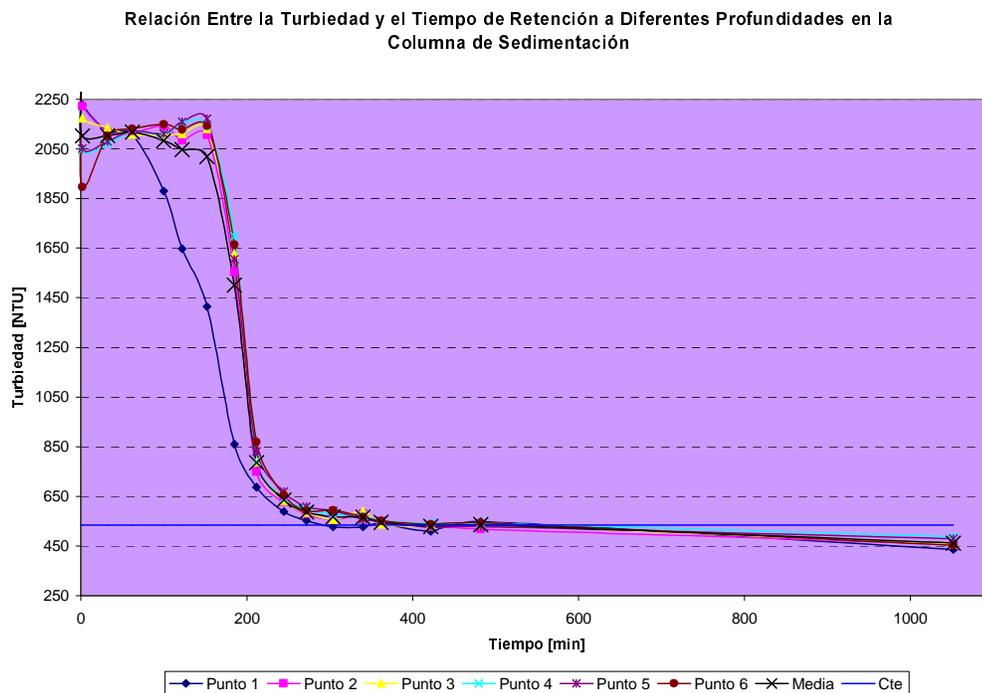


Figura 31. Relación entre la concentración de sólidos y el tiempo de retención en cada punto de muestreo en la Prueba 2.

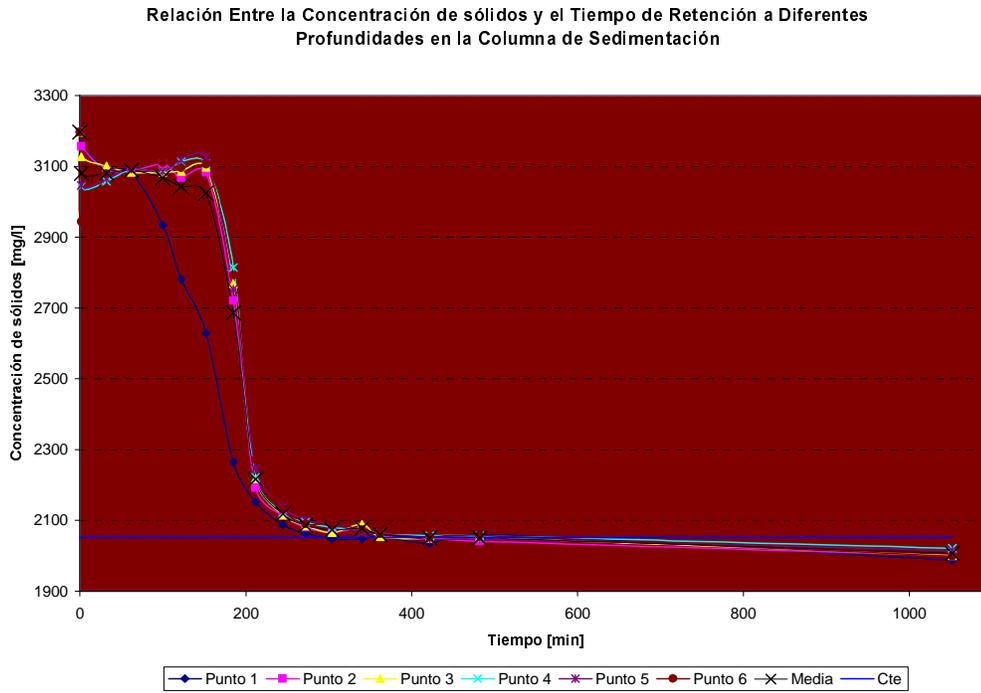


Figura 32. Dispersión de los datos de Concentración de sólidos y turbiedad a través del tiempo en la Prueba 2.

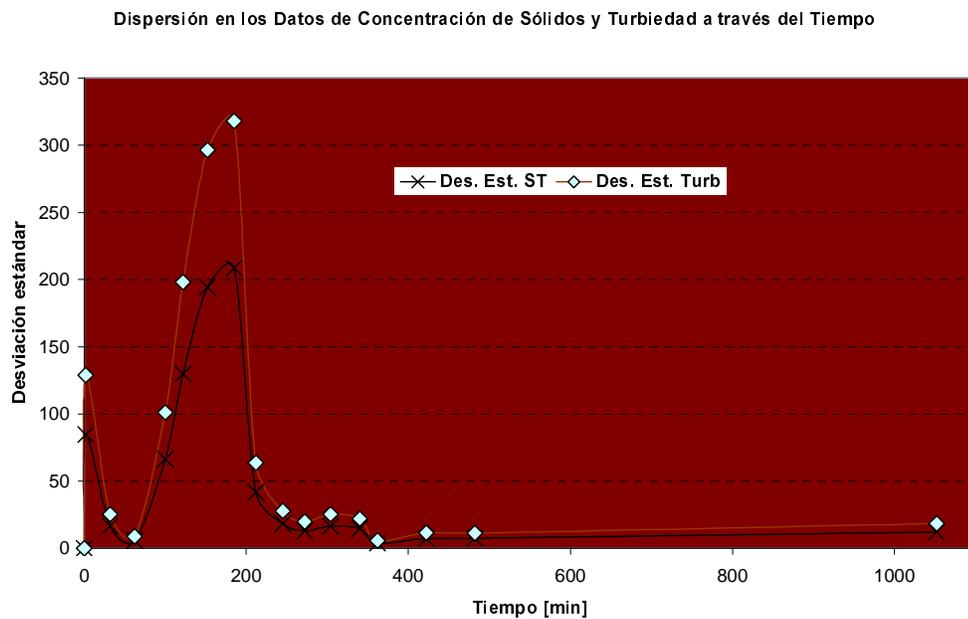


Figura 33. Porcentaje de remoción de sólidos a través del tiempo en la prueba 2.

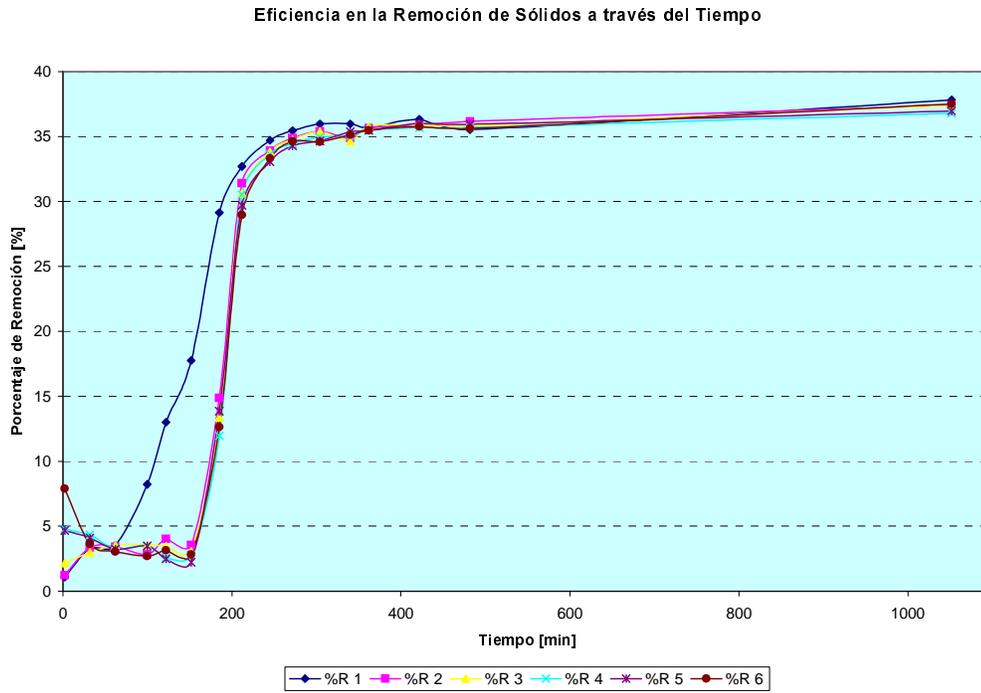


Tabla 22. Datos obtenidos en la columna de sedimentación durante la prueba 3 en los puntos 1 y 2

Tiempo [min]	Punto 1				Punto 2				
	Turb. [NTU]	ST [mg/l]	h [cm]	Vs [cm/min]	Turb. [NTU]	ST [mg/l]	h [cm]	Vs [cm/min]	pH
0	2350	3242,07			2350	3242,07			5,21
13	1448	2650,44	8,4	0,64615	1443	2647,16	38,4	2,95385	5,09
43	1257	2525,17	8,2	0,19070	1779	2867,55	38,2	0,88837	4,97
73	668	2138,84	7,8	0,10685	718	2171,64	37,8	0,51781	4,89
103	624	2109,98	7,2	0,06990	630	2113,92	37,2	0,36117	4,74
133	572	2075,87	6,4	0,04812	553	2063,41	36,4	0,27368	4,71
163	567	2072,60	5,9	0,03620	556	2065,38	35,9	0,22025	4,67
193	446	1993,23	5,3	0,02746	562	2069,32	35,3	0,18290	4,63
223	530	2048,33	4,7	0,02108	547	2059,48	34,7	0,15561	4,56
253	459	2001,76	4,0	0,01581	536	2052,26	34,0	0,13439	4,51
283	437	1987,33	3,4	0,01201	447	1993,89	33,4	0,11802	4,43
313	446	1993,23	2,7	0,00863	456	1999,79	32,7	0,10447	4,36
343	444	1991,92	2	0,00583	453	1997,82	32,0	0,09329	4,35
403	370	1943,38	1,5	0,00372	438	1987,98	31,5	0,07816	4,26
463	361	1937,48	0,9	0,00194	439	1988,64	30,9	0,06674	4,18
523	344	1926,33	0,2	0,00038	429	1982,08	30,2	0,05774	4,08
643					419	1975,52	29,7	0,04619	4,00
809					422	1977,49	29,0	0,03585	3,70

Tabla 23. Datos obtenidos en la columna de sedimentación durante la prueba 3 en los puntos 3 y 4

Tiempo [min]	Punto 3				Punto 4			
	Turb. [NTU]	ST [mg/l]	h [cm]	Vs [cm/min]	Turb. [NTU]	ST [mg/l]	h [cm]	Vs [cm/min]
0	2350	3242,07			2350	3242,07		
13	1670	2796,05	68,4	5,26154	1908	2952,16	98,4	7,56923
43	1705	2819,01	68,2	1,58605	1897	2944,94	98,2	2,28372
73	829	2244,44	67,8	0,92877	887	2282,48	97,8	1,33973
103	672	2141,46	67,2	0,65243	692	2154,58	97,2	0,94369
133	610	2100,80	66,4	0,49925	677	2144,74	96,4	0,72481
163	575	2077,84	65,9	0,40429	613	2102,77	95,9	0,58834
193	573	2076,53	65,3	0,33834	593	2089,65	95,3	0,49378
223	568	2073,25	64,7	0,29013	578	2079,81	94,7	0,42466
253	556	2065,38	64,0	0,25296	578	2079,81	94,0	0,37154
283	467	2007,01	63,4	0,22403	490	2022,09	93,4	0,33004
313	463	2004,38	62,7	0,20032	490	2022,09	92,7	0,29617
343	459	2001,76	62,0	0,18076	489	2021,44	92,0	0,26822
403	453	1997,82	61,5	0,15261	474	2011,60	91,5	0,22705
463	445	1992,58	60,9	0,13153	460	2002,41	90,9	0,19633
523	435	1986,02	60,2	0,11511	457	2000,45	90,2	0,17247
643	422	1977,49	59,7	0,09285	429	1982,08	89,7	0,13950
809	461	2003,07	59,0	0,07293	490	2022,09	89,0	0,11001

Tabla 24. Datos obtenidos en la columna de sedimentación durante la prueba 3 en los puntos 5 y 6

Tiempo [min]	Punto 5				Punto 6			
	Turb. [NTU]	ST [mg/l]	h [cm]	Vs [cm/min]	Turb. [NTU]	ST [mg/l]	h [cm]	Vs [cm/min]
0	2350	3242,07			2350	3242,07		
13	2001	3013,16	128,4	9,87692	1780	2868,20	158,4	12,18462
43	1941	2973,80	128,2	2,98140	2071	3059,07	158,2	3,67907
73	928	2309,38	127,8	1,75068	859	2264,12	157,8	2,16164
103	712	2167,70	127,2	1,23495	616	2104,73	157,2	1,52621
133	695	2156,55	126,4	0,95038	576	2078,50	156,4	1,17594
163	618	2106,05	125,9	0,77239	542	2056,20	155,9	0,95644
193	606	2098,18	125,3	0,64922	601	2094,90	155,3	0,80466
223	599	2093,58	124,7	0,55919	597	2092,27	154,7	0,69372
253	589	2087,03	124,0	0,49012	586	2085,06	154,0	0,60870
283	512	2036,52	123,4	0,43604	515	2038,49	153,4	0,54205
313	495	2025,37	122,7	0,39201	502	2029,96	152,7	0,48786
343	492	2023,40	122,0	0,35569	498	2027,34	152,0	0,44315
403	488	2020,78	121,5	0,30149	493	2024,06	151,5	0,37593
463	479	2014,88	120,9	0,26112	479	2014,88	150,9	0,32592
523	461	2003,07	120,2	0,22983	476	2012,91	150,2	0,28719
643	424	1978,80	119,7	0,18616	454	1998,48	149,7	0,23281
809	495	2025,37	119,0	0,14710	469	2008,32	149,0	0,18418

Figura 34. Relación entre la turbiedad y la velocidad nominal de sedimentación en la Prueba 3.

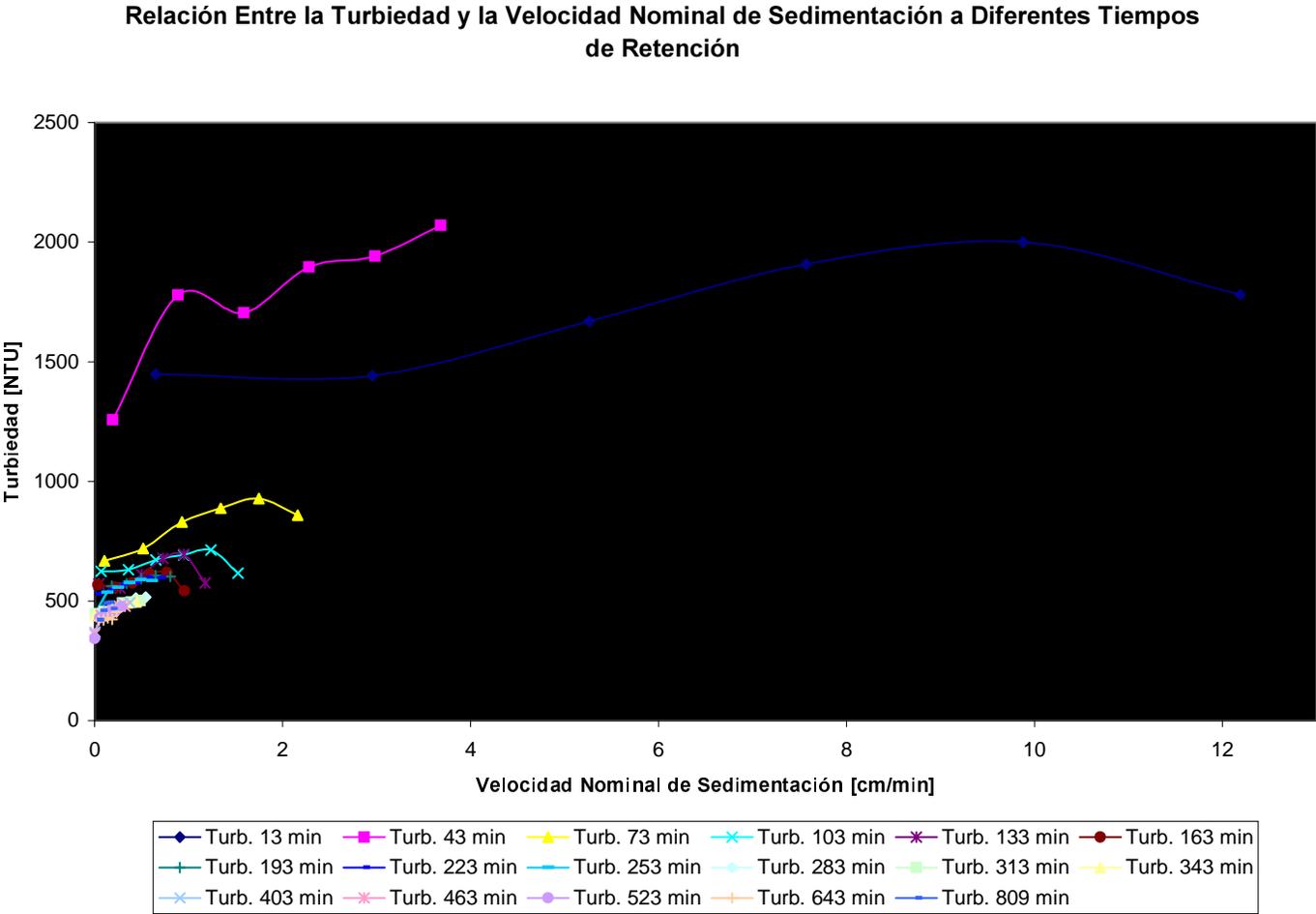


Figura 35. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación en la Prueba 3.

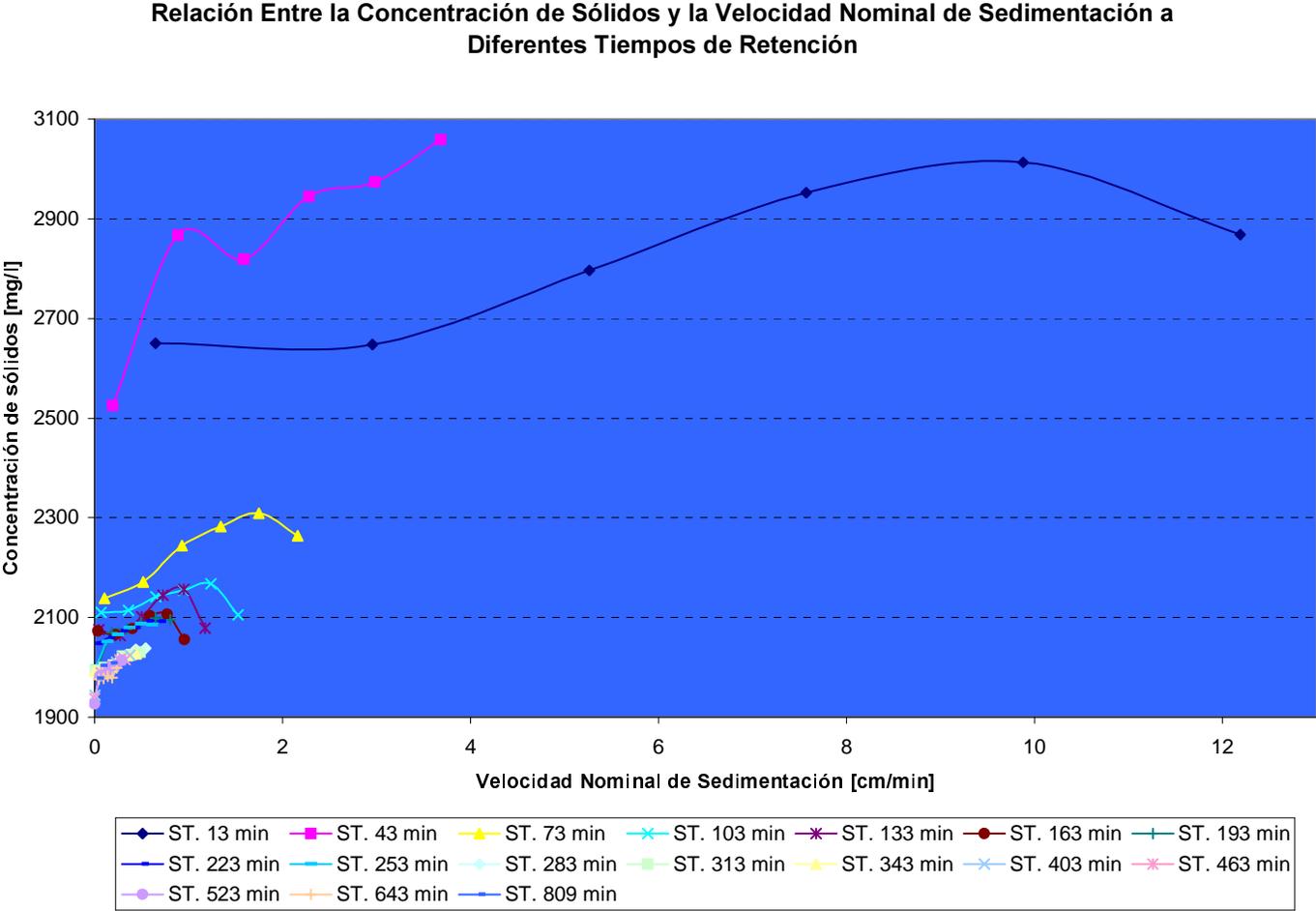


Figura 36. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación la Prueba 3 para tiempos de retención entre 13 y 163 min.

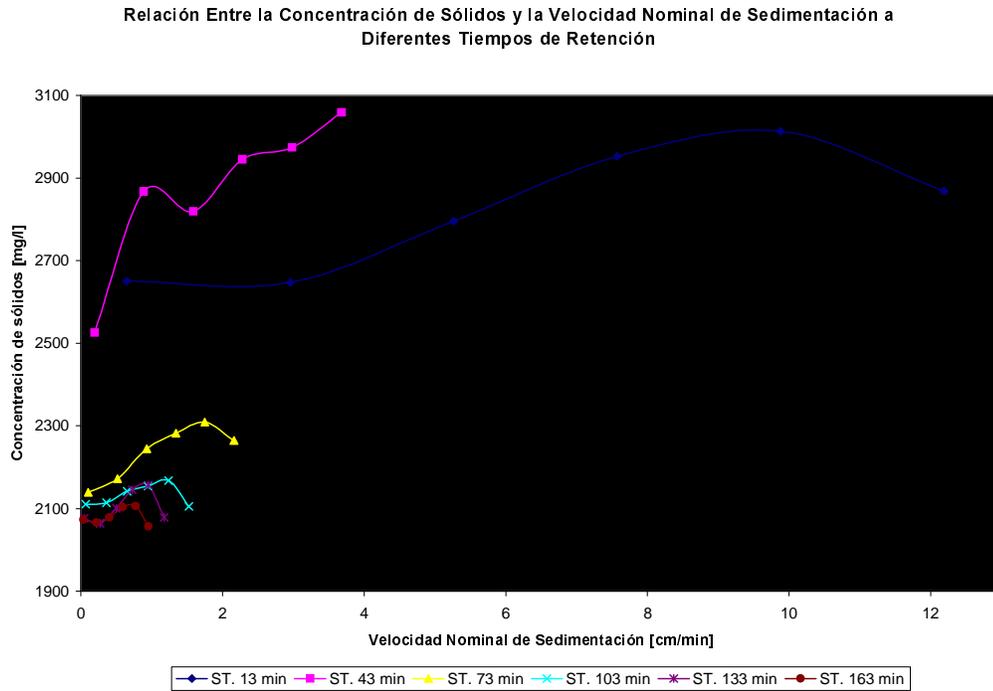


Figura 37. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación la Prueba 3 para tiempos de retención entre 193 y 343 min.

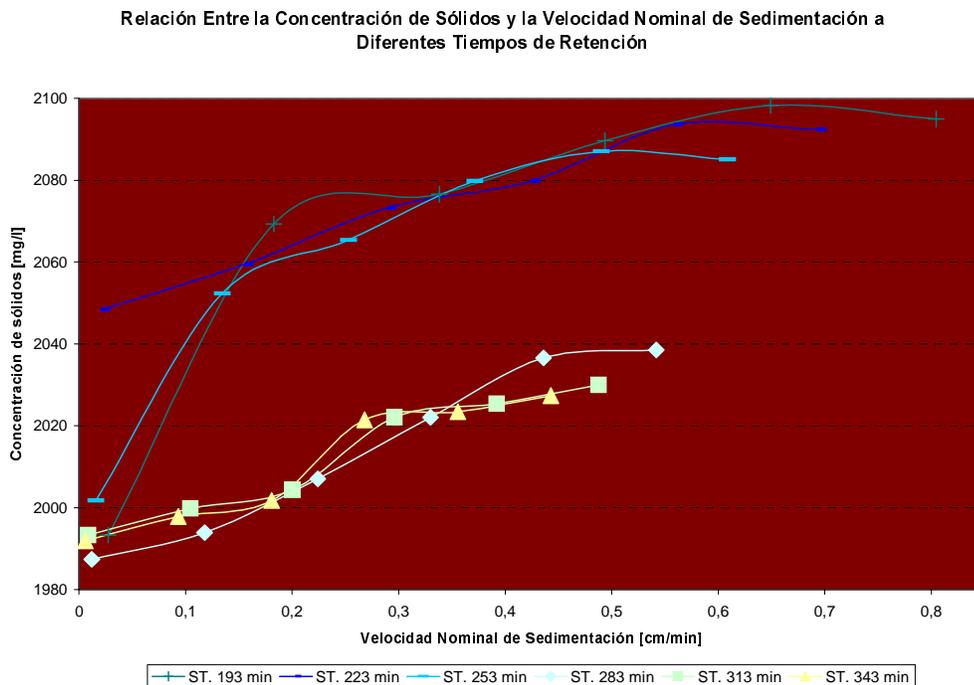


Figura 38. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación la Prueba 3 para tiempos de retención entre 403 y 809 min.

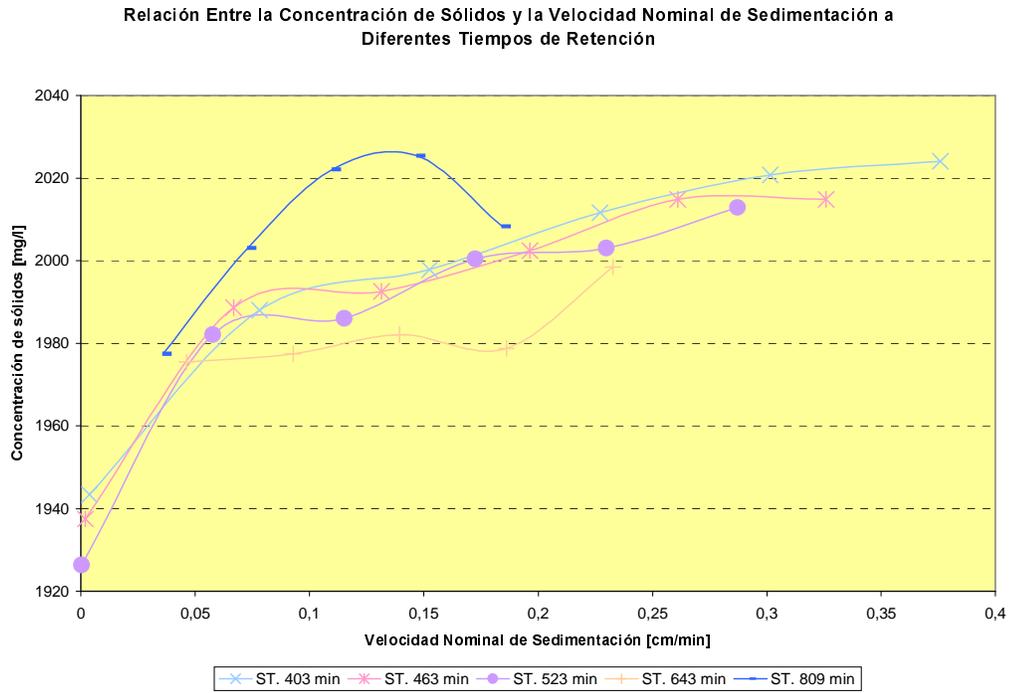


Figura 39. Relación entre la turbiedad y el tiempo de retención en cada punto de muestreo en la Prueba 3.

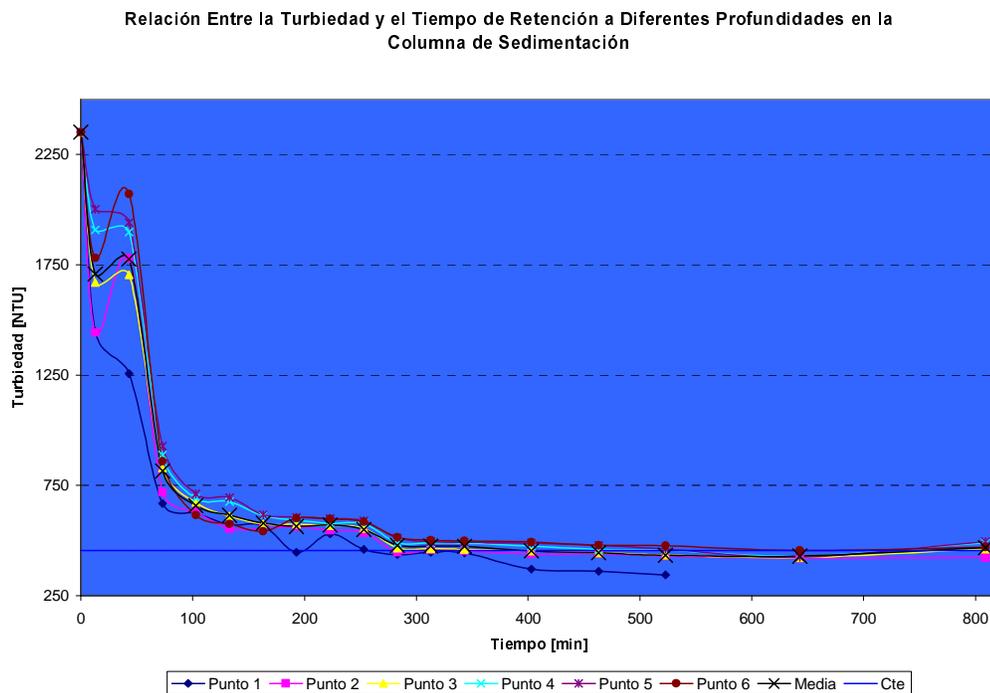


Figura 40. Relación entre la concentración de sólidos y el tiempo de retención en cada punto de muestreo en la Prueba 3.

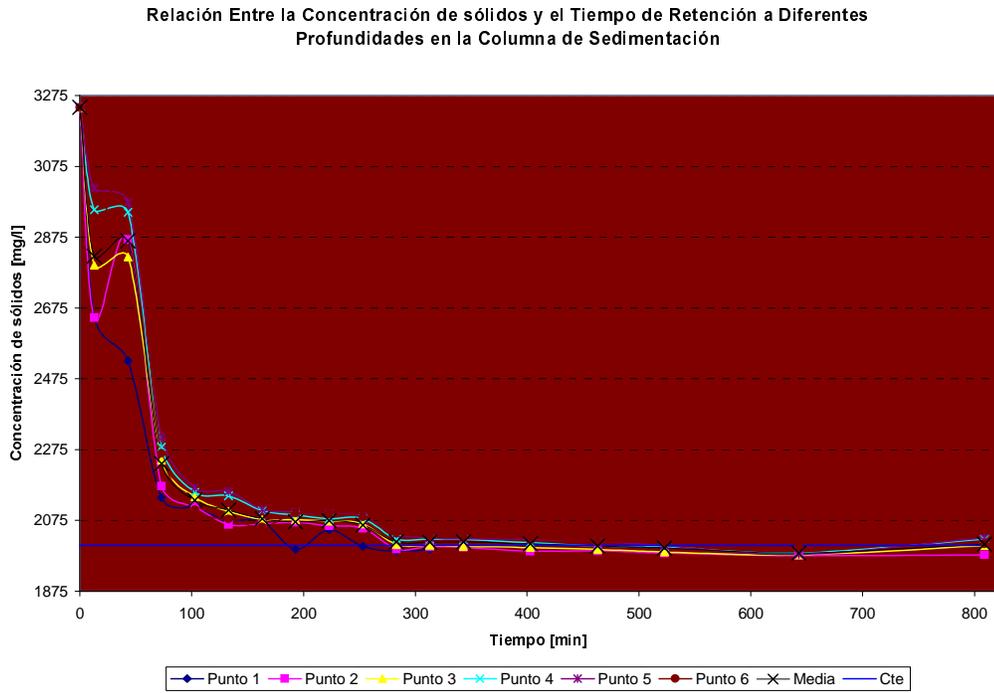


Figura 41. Dispersión de los datos de Concentración de sólidos y turbiedad a través del tiempo en la Prueba 3.

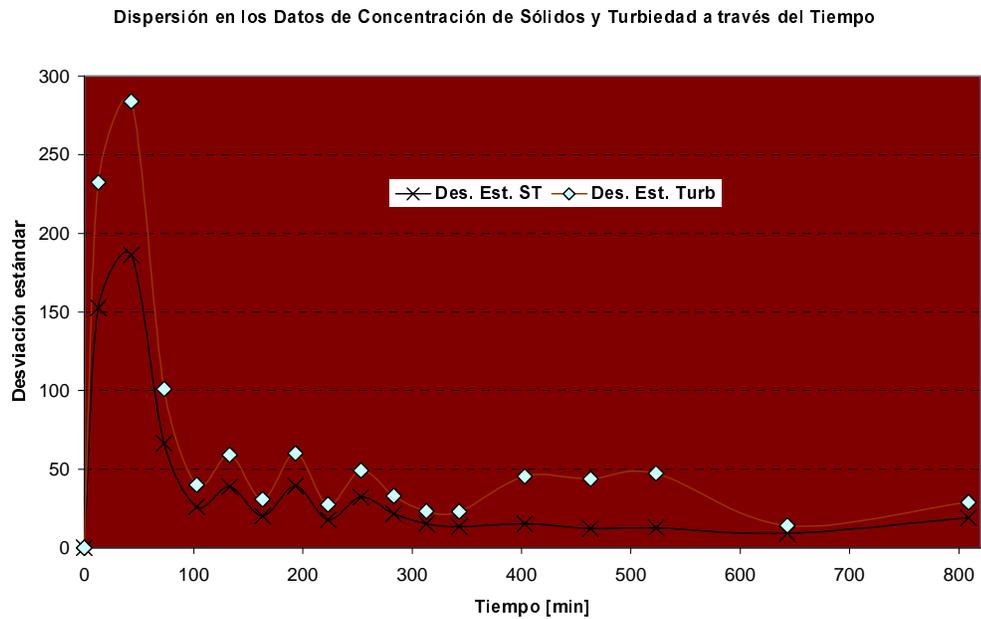
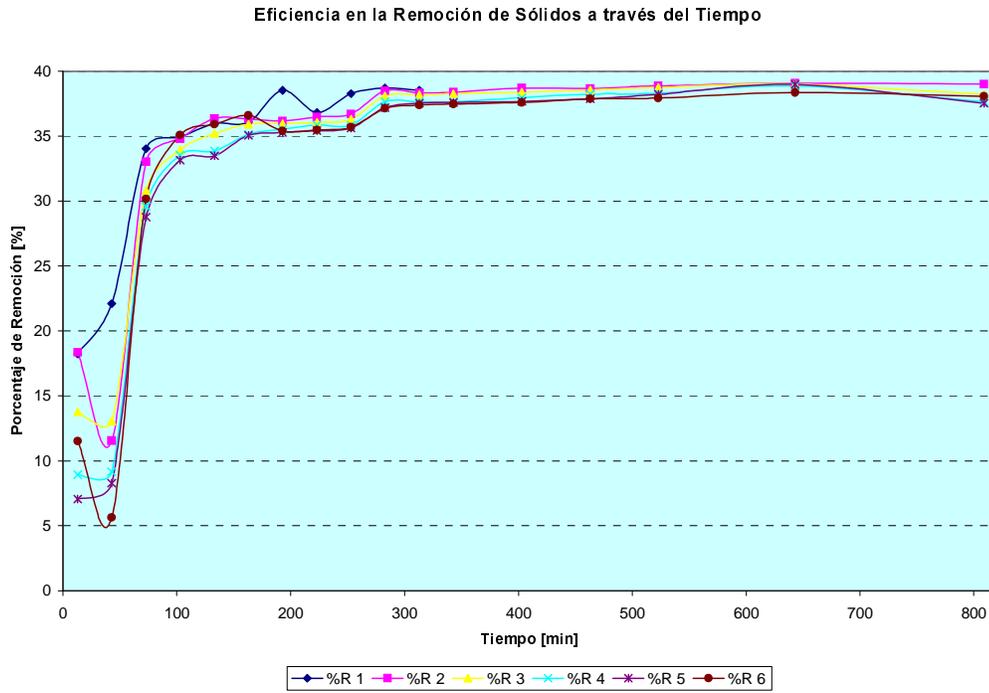


Figura 42. Porcentaje de remoción de sólidos a través del tiempo en la prueba 3.



B. DATOS DE SEDIMENTACIÓN CON MODIFICACIÓN DE pH

Tabla 25. Datos obtenidos en la columna de sedimentación durante la prueba a pH 3,73 en los puntos 1 y 2

Tiempo [min]	Punto 1				Punto 2			
	Turb. [NTU]	ST [mg/l]	h [cm]	Vs [cm/min]	Turb. [NTU]	ST [mg/l]	h [cm]	Vs [cm/min]
0	1660	2789,49			1660	2789,49		
15	679	2146,06	19,9	1,32667	706	2163,77	49,9	3,32667
30	629	2113,26	18,4	0,61333	631	2114,57	48,4	1,61333
45	609	2100,14	17,5	0,38889	627	2111,95	47,5	1,05556
55	595	2090,96	16,6	0,30182	598	2092,93	46,6	0,84727
70	598	2092,93	15,6	0,22286	588	2086,37	45,6	0,65143
85	568	2073,25	14,6	0,17176	594	2090,30	44,6	0,52471
100	574	2077,19	13,8	0,13800	589	2087,03	43,8	0,43800
115	561	2068,66	13,0	0,11304	569	2073,91	43,0	0,37391
130	565	2071,28	12,0	0,09231	586	2085,06	42,0	0,32308
160	551	2062,10	10,9	0,06813	566	2071,94	40,9	0,25563
190	556	2065,38	10,0	0,05263	556	2065,38	40,0	0,21053
215	552	2062,76	9	0,04186	554	2064,07	39,0	0,18140
280	549	2060,79	8,5	0,03036	550	2061,45	38,5	0,13750

Tabla 26. Datos obtenidos en la columna de sedimentación durante la prueba a pH 3,73 en los puntos 3 y 4

Tiempo [min]	Punto 3				Punto 4			
	Turb. [NTU]	ST [mg/l]	h [cm]	Vs [cm/min]	Turb. [NTU]	ST [mg/l]	h [cm]	Vs [cm/min]
0	1660	2789,49			1660	2789,49		
15	984	2346,11	77,9	5,19333	1638	2775,06	107,9	7,19333
30	650	2127,04	76,4	2,54667	628	2112,61	106,4	3,54667
45	614	2103,42	75,5	1,67778	604	2096,86	105,5	2,34444
55	613	2102,77	74,6	1,35636	589	2087,03	104,6	1,90182
70	598	2092,93	73,6	1,05143	595	2090,96	103,6	1,48000
85	578	2079,81	72,6	0,85412	579	2080,47	102,6	1,20706
100	595	2090,96	71,8	0,71800	580	2081,12	101,8	1,01800
115	586	2085,06	71,0	0,61739	587	2085,71	101,0	0,87826
130	592	2088,99	70,0	0,53846	583	2083,09	100,0	0,76923
160	576	2078,50	68,9	0,43063	576	2078,50	98,9	0,61813
190	564	2070,63	68,0	0,35789	571	2075,22	98,0	0,51579
215	553	2063,41	67,0	0,31163	577	2079,15	97,0	0,45116
280	599	2093,58	66,5	0,23750	582	2082,43	96,5	0,34464

Tabla 27. Datos obtenidos en la columna de sedimentación durante la prueba a pH 3,73 en los puntos 5 y 6

Tiempo [min]	Punto 5				Punto 6			
	Turb. [NTU]	ST [mg/l]	h [cm]	Vs [cm/min]	Turb. [NTU]	ST [mg/l]	h [cm]	Vs [cm/min]
0	1660	2789,49			1660	2789,49		
15	1638	2775,06	137,9	9,19333	1553	2719,31	167,9	11,19333
30	628	2112,61	136,4	4,54667	642	2121,79	166,4	5,54667
45	609	2100,14	135,5	3,01111	597	2092,27	165,5	3,67778
55	589	2087,03	134,6	2,44727	585	2084,40	164,6	2,99273
70	595	2090,96	133,6	1,90857	580	2081,12	163,6	2,33714
85	579	2080,47	132,6	1,56000	573	2076,53	162,6	1,91294
100	580	2081,12	131,8	1,31800	593	2089,65	161,8	1,61800
115	587	2085,71	131,0	1,13913	561	2068,66	161,0	1,40000
130	583	2083,09	130,0	1,00000	589	2087,03	160,0	1,23077
160	576	2078,50	128,9	0,80563	545	2058,17	158,9	0,99313
190	571	2075,22	128,0	0,67368	580	2081,12	158,0	0,83158
215	577	2079,15	127,0	0,59070	574	2077,19	157,0	0,73023
280	582	2082,43	126,5	0,45179	600	2094,24	156,5	0,55893

Figura 43. Relación entre la turbiedad y la velocidad nominal de sedimentación en la Prueba a pH 3,73.

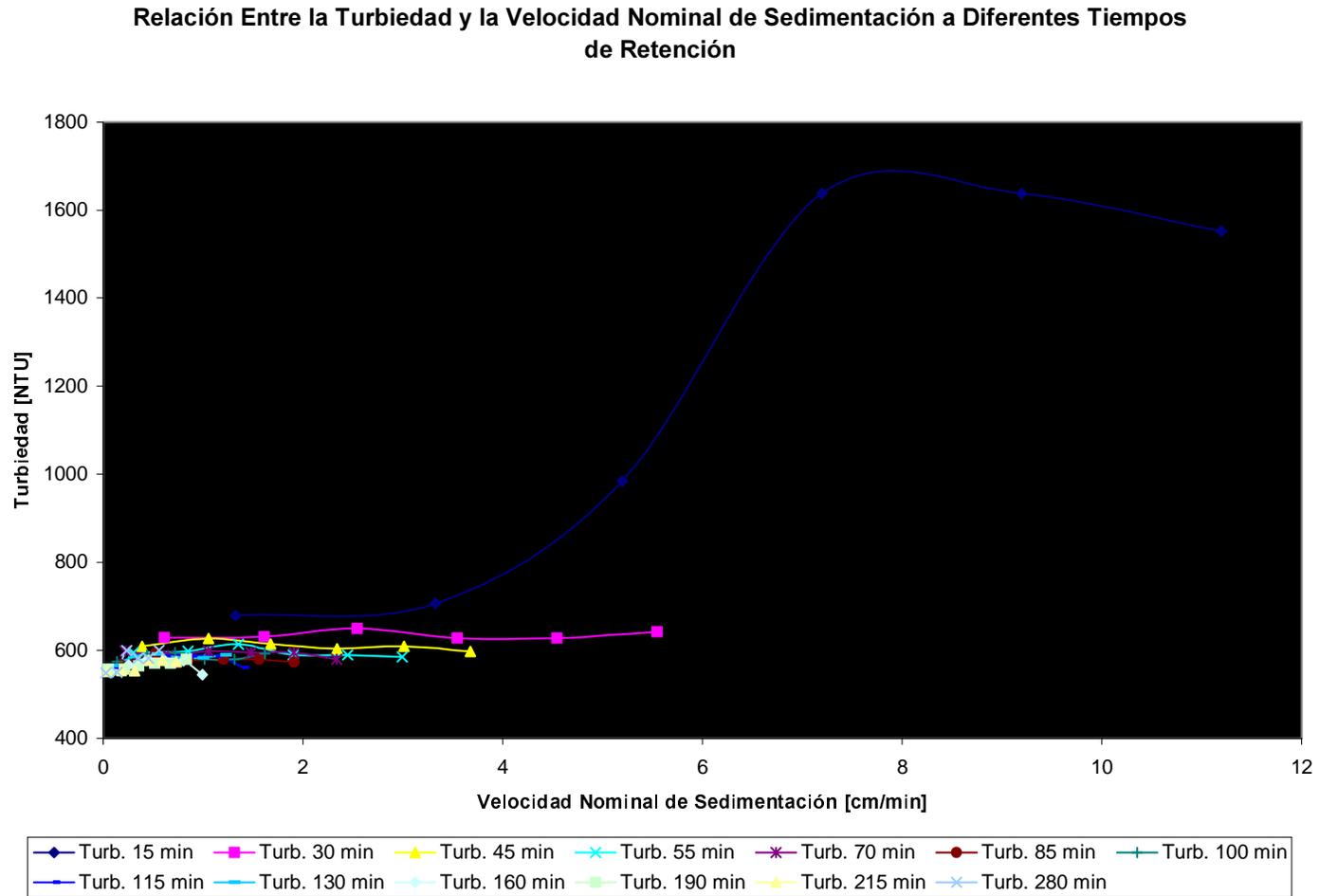


Figura 44. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación en la Prueba a pH 3,73.

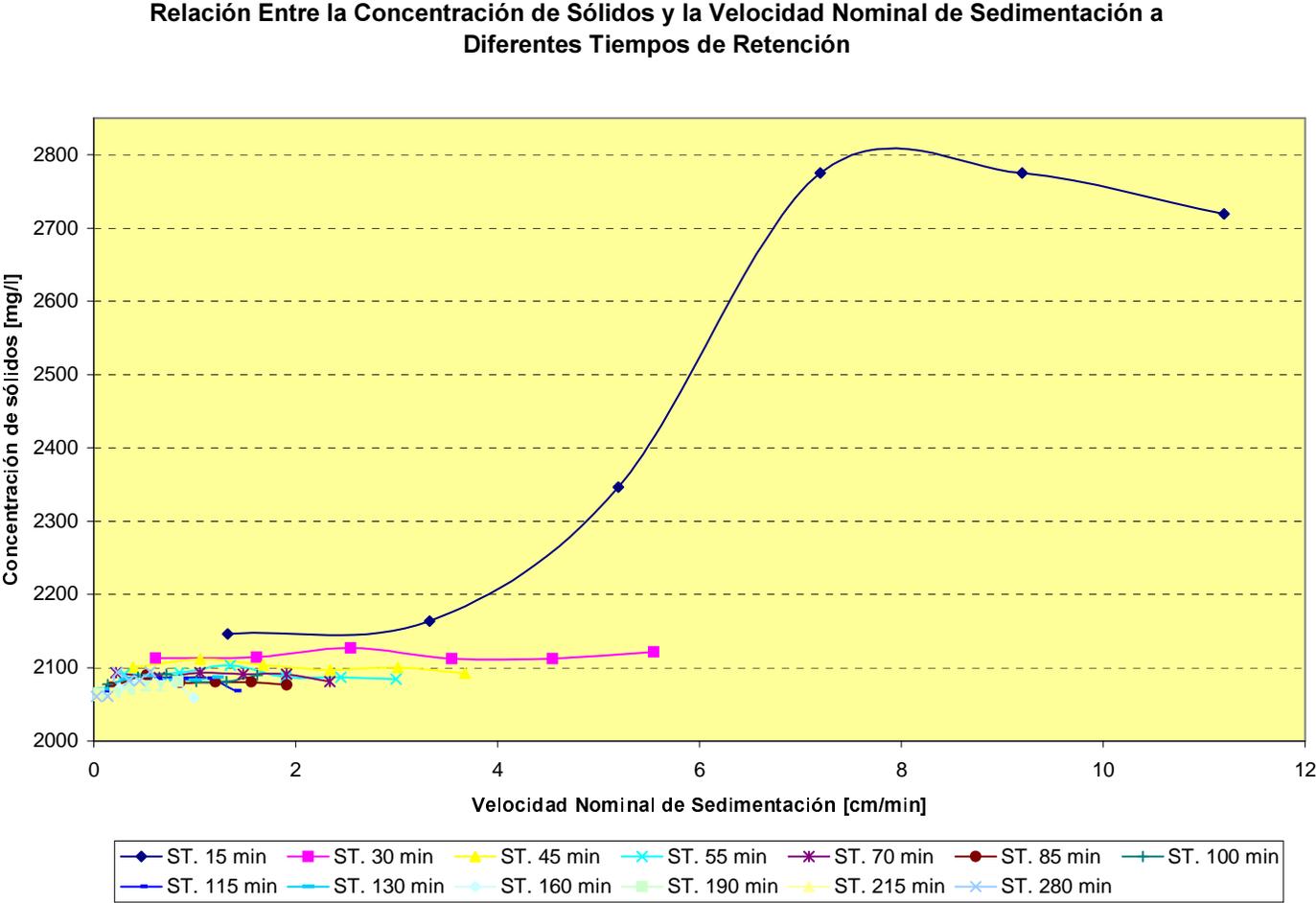


Figura 45. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación la Prueba a pH 3,73 para tiempos de retención entre 15 y 85 min.

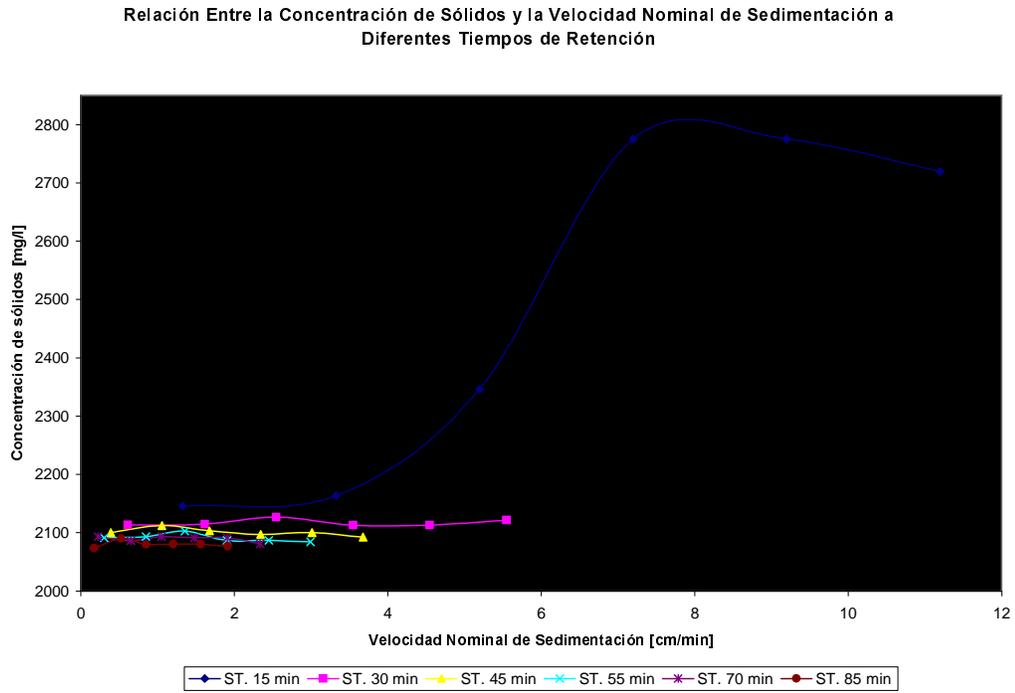


Figura 46. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación la Prueba a pH 3,73 para tiempos de retención entre 100 y 280 min.

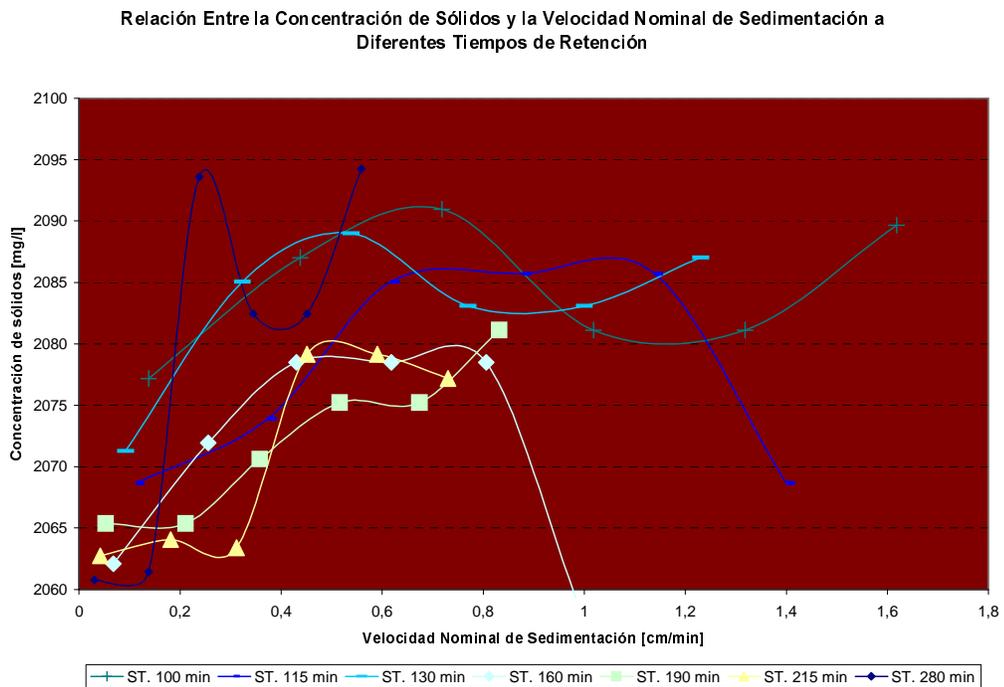


Figura 47. Relación entre la turbiedad y el tiempo de retención en cada punto de muestreo en la Prueba a pH 3,73.

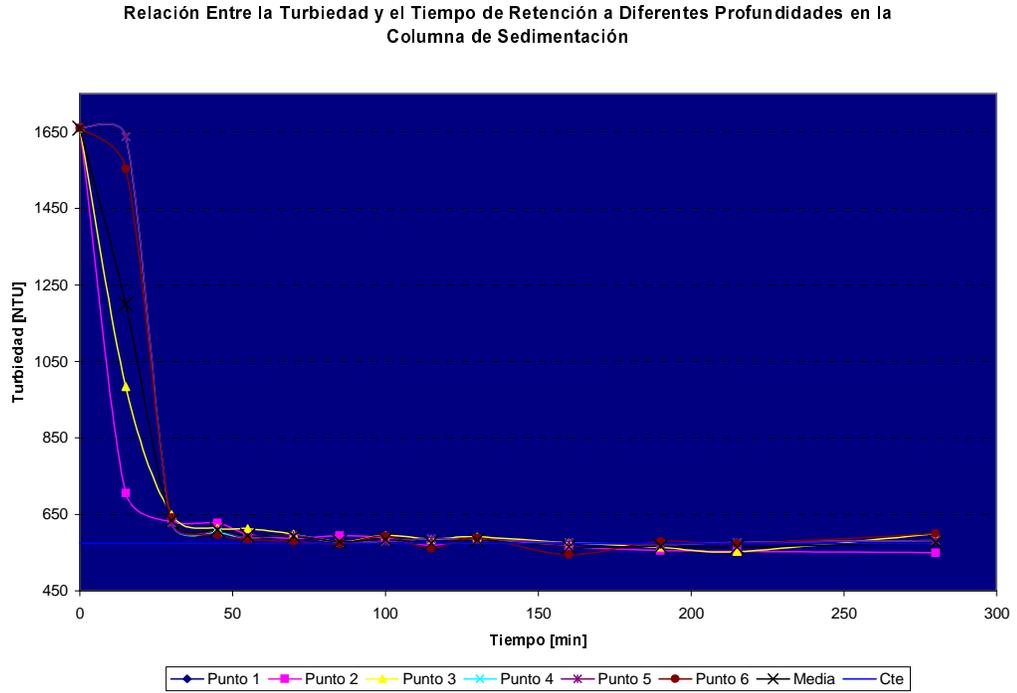


Figura 48. Relación entre la concentración de sólidos y el tiempo de retención en cada punto de muestreo en la Prueba a pH 3,73.

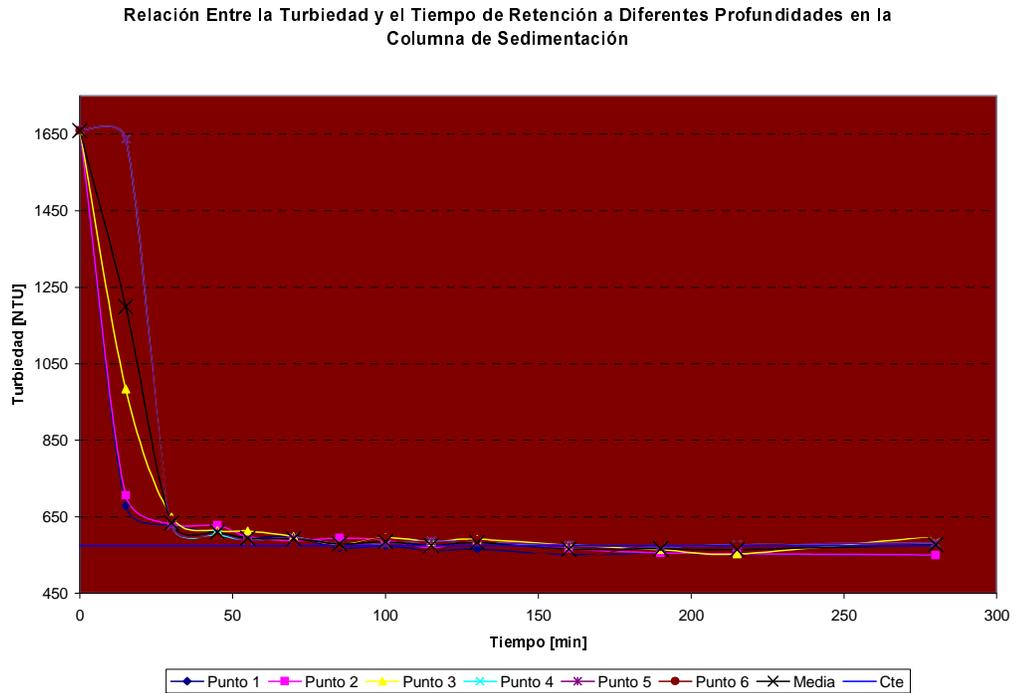


Figura 49. Dispersión de los datos de Concentración de sólidos y turbiedad a través del tiempo en la Prueba a pH 3,73.

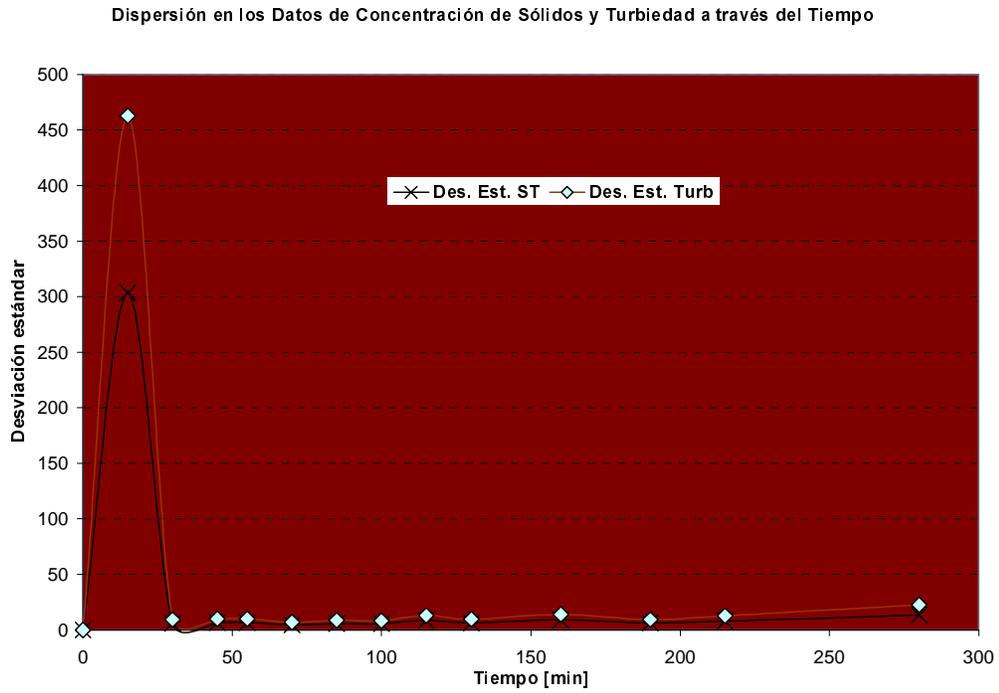


Figura 50. Porcentaje de remoción de sólidos a través del tiempo en la prueba a pH 3,73.

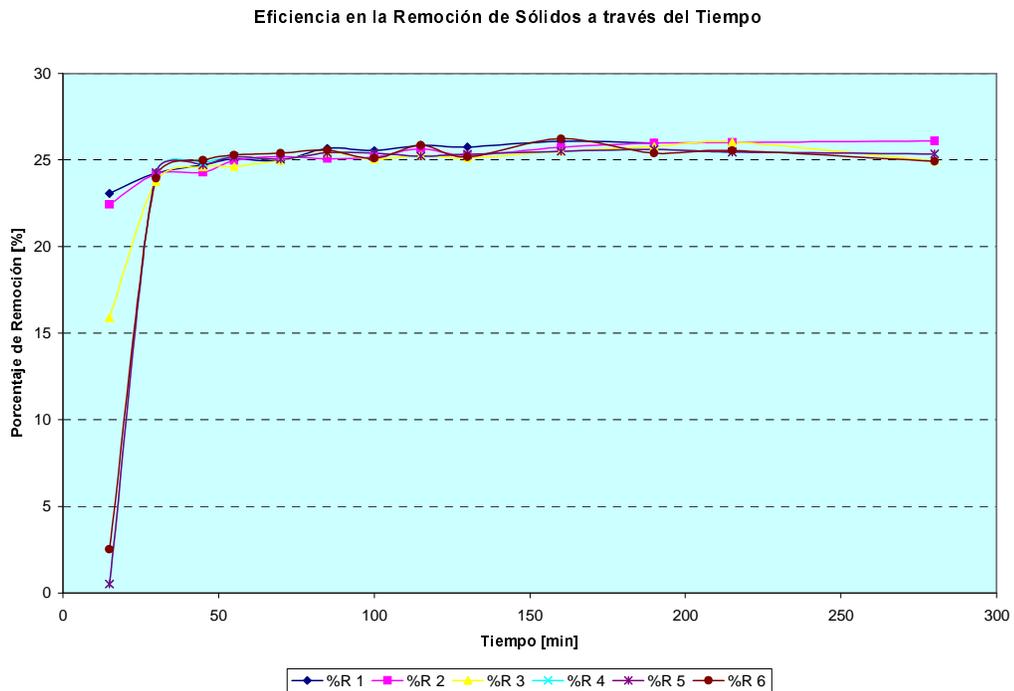


Tabla 28. Datos obtenidos en la columna de sedimentación durante la prueba a pH 4,8 en los puntos 1 y 2

Tiempo [min]	Punto 1				Punto 2			
	Turb. [NTU]	ST [mg/l]	h [cm]	Vs [cm/min]	Turb. [NTU]	ST [mg/l]	h [cm]	Vs [cm/min]
0	920	2304,13			920	2304,13		
10	890	2284,45	7,2	0,72000	916	2301,50	37,2	3,72000
20	873	2273,30	6,5	0,32500	1008	2361,85	36,5	1,82500
30	663	2135,56	5,9	0,19667	714	2169,01	35,9	1,19667
40	623	2109,33	5,0	0,12500	658	2132,28	35,0	0,87500
50	570	2074,56	4,0	0,08000	633	2115,88	34,0	0,68000
60	544	2057,51	3,3	0,05500	602	2095,55	33,3	0,55500
70	494	2024,71	2,4	0,03429	573	2076,53	32,4	0,46286
80	465	2005,69	0,3	0,00375	558	2066,69	30,3	0,37875
90					542	2056,20	30,1	0,33444
100					523	2043,74	30,0	0,30000
110					505	2031,93	29,0	0,26364
120					526	2045,70	28,2	0,23500
135					480	2015,53	27,5	0,20370
150					456	1999,79	26,8	0,17867
165					461	2003,07	26,0	0,15758
180					444	1991,92	25,2	0,14000
195					443	1991,26	24,8	0,12718
209					418	1974,87	24,5	0,11722
239					414	1972,24	24,0	0,10042
269					408	1968,31	23,3	0,08662
299					394	1959,12	22,6	0,07559
329					386	1953,88	21,4	0,06505

Tabla 29. Datos obtenidos en la columna de sedimentación durante la prueba a pH 4,8 en los puntos 3 y 4

Tiempo [min]	Punto 3				Punto 4			
	Turb. [NTU]	ST [mg/l]	h [cm]	Vs [cm/min]	Turb. [NTU]	ST [mg/l]	h [cm]	Vs [cm/min]
0	920	2304,13			920	2304,13		
10	1108	2427,44	65,2	6,52000	1153	2456,95	95,2	9,52000
20	938	2315,93	64,5	3,22500	960	2330,36	94,5	4,72500
30	784	2214,93	63,9	2,13000	850	2258,22	93,9	3,13000
40	683	2148,68	63,0	1,57500	731	2180,16	93,0	2,32500
50	642	2121,79	62,0	1,24000	655	2130,31	92,0	1,84000
60	619	2106,70	61,3	1,02167	627	2111,95	91,3	1,52167
70	596	2091,62	60,4	0,86286	599	2093,58	90,4	1,29143
80	565	2071,28	58,3	0,72875	560	2068,00	88,3	1,10375
90	551	2062,10	58,1	0,64556	548	2060,13	88,1	0,97889
100	514	2037,83	58,0	0,58000	534	2050,95	88,0	0,88000
110	520	2041,77	57,0	0,51818	517	2039,80	87,0	0,79091
120	521	2042,42	56,2	0,46833	510	2035,21	86,2	0,71833
135	493	2024,06	55,5	0,41111	502	2029,96	85,5	0,63333
150	473	2010,94	54,8	0,36533	489	2021,44	84,8	0,56533
165	467	2007,01	54,0	0,32727	476	2012,91	84,0	0,50909
180	453	1997,82	53,2	0,29556	462	2003,73	83,2	0,46222
195	460	2002,41	52,8	0,27077	462	2003,73	82,8	0,42462
209	442	1990,61	52,5	0,25120	445	1992,58	82,5	0,39474
239	416	1973,55	52	0,21757	429	1982,08	82	0,34310
269	412	1970,93	51,3	0,19071	429	1982,08	81,3	0,30223
299	399	1962,40	50,6	0,16923	418	1974,87	80,6	0,26957
329	398	1961,75	49,4	0,15015	416	1973,55	79,4	0,24134

Tabla 30. Datos obtenidos en la columna de sedimentación durante la prueba a pH 4,8 en los puntos 5 y 6

Tiempo [min]	Punto 5				Punto 6			
	Turb. [NTU]	ST [mg/l]	h [cm]	Vs [cm/min]	Turb. [NTU]	ST [mg/l]	h [cm]	Vs [cm/min]
0	920	2304,13			920	2304,13		
10	1134	2444,49	125,2	12,52000	1186	2478,60	155,2	15,52000
20	910	2297,57	124,5	6,22500	960	2330,36	154,5	7,72500
30	895	2287,73	123,9	4,13000	880	2277,89	153,9	5,13000
40	739	2185,41	123,0	3,07500	784	2214,93	153,0	3,82500
50	658	2132,28	122,0	2,44000	688	2151,96	152,0	3,04000
60	614	2103,42	121,3	2,02167	610	2100,80	151,3	2,52167
70	585	2084,40	120,4	1,72000	595	2090,96	150,4	2,14857
80	563	2069,97	118,3	1,47875	550	2061,45	148,3	1,85375
90	558	2066,69	118,1	1,31222	546	2058,82	148,1	1,64556
100	532	2049,64	118,0	1,18000	536	2052,26	148,0	1,48000
110	491	2022,75	117,0	1,06364	503	2030,62	147,0	1,33636
120	513	2037,18	116,2	0,96833	508	2033,90	146,2	1,21833
135	508	2033,90	115,5	0,85556	496	2026,03	145,5	1,07778
150	491	2022,75	114,8	0,76533	501	2029,31	144,8	0,96533
165	483	2017,50	114,0	0,69091	485	2018,81	144,0	0,87273
180	470	2008,97	113,2	0,62889	474	2011,60	143,2	0,79556
195	465	2005,69	112,8	0,57846	466	2006,35	142,8	0,73231
209	446	1993,23	112,5	0,53828	453	1997,82	142,5	0,68182
239	435	1986,02	112	0,46862	433	1984,70	142	0,59414
269	424	1978,80	111,3	0,41375	436	1986,67	141,3	0,52528
299	414	1972,24	110,6	0,36990	421	1976,83	140,6	0,47023
329	416	1973,55	109,4	0,33252	422	1977,49	139,4	0,42371

Figura 51. Relación entre la turbiedad y la velocidad nominal de sedimentación en la Prueba a pH 4,8.

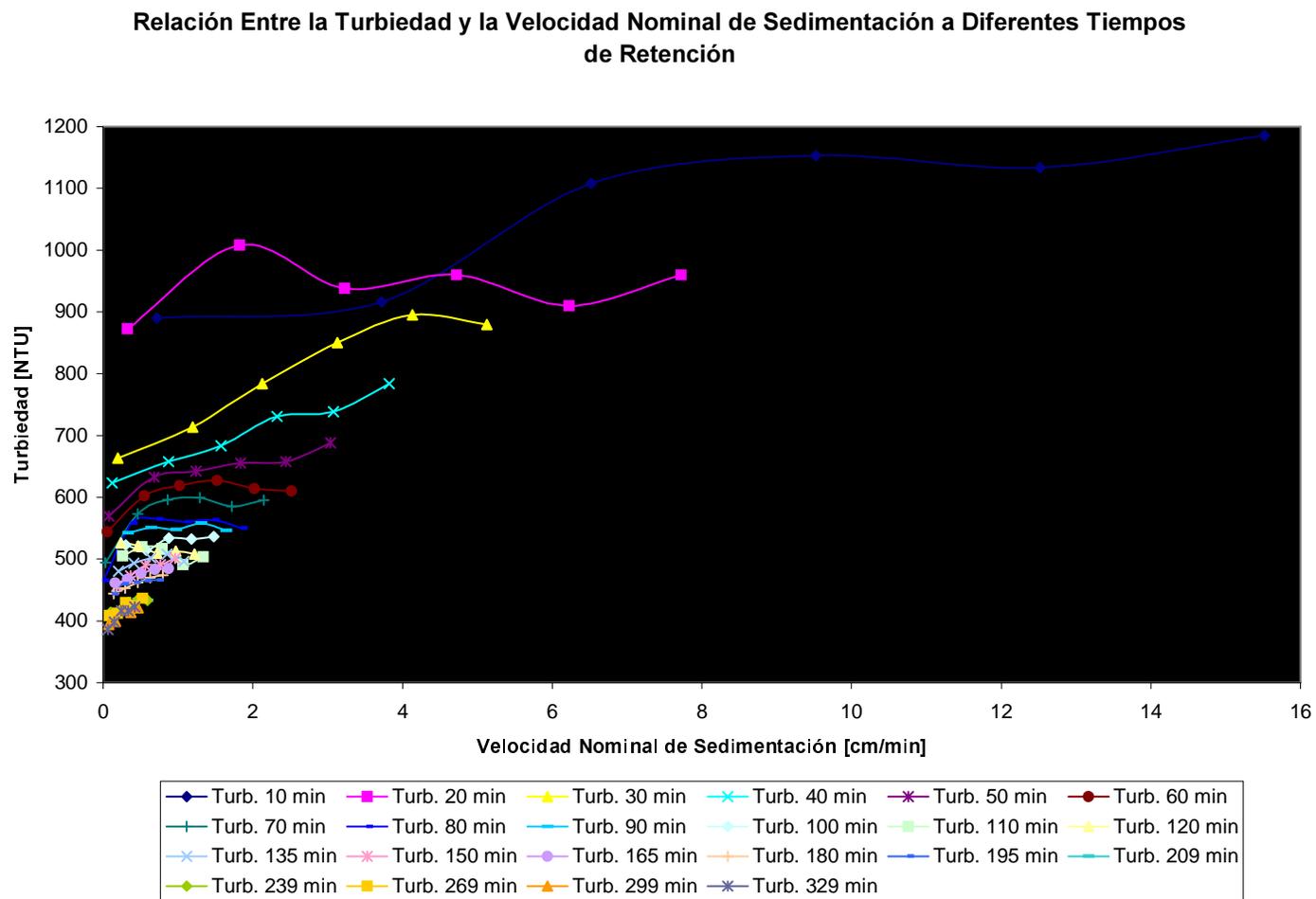


Figura 52. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación en la Prueba a pH 4,8.

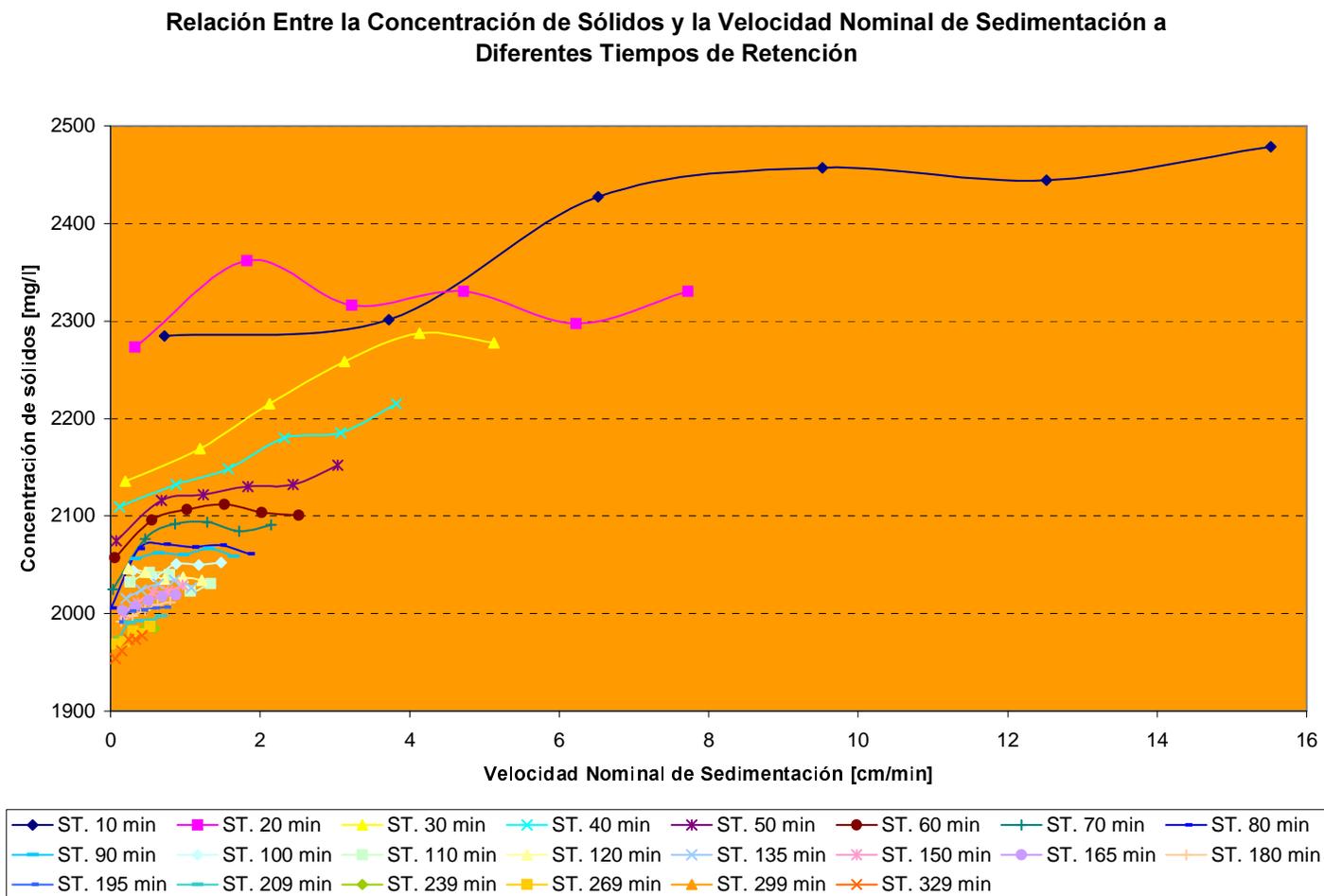


Figura 53. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación la Prueba a pH 4,8 para tiempos de retención entre 10 y 100 min.

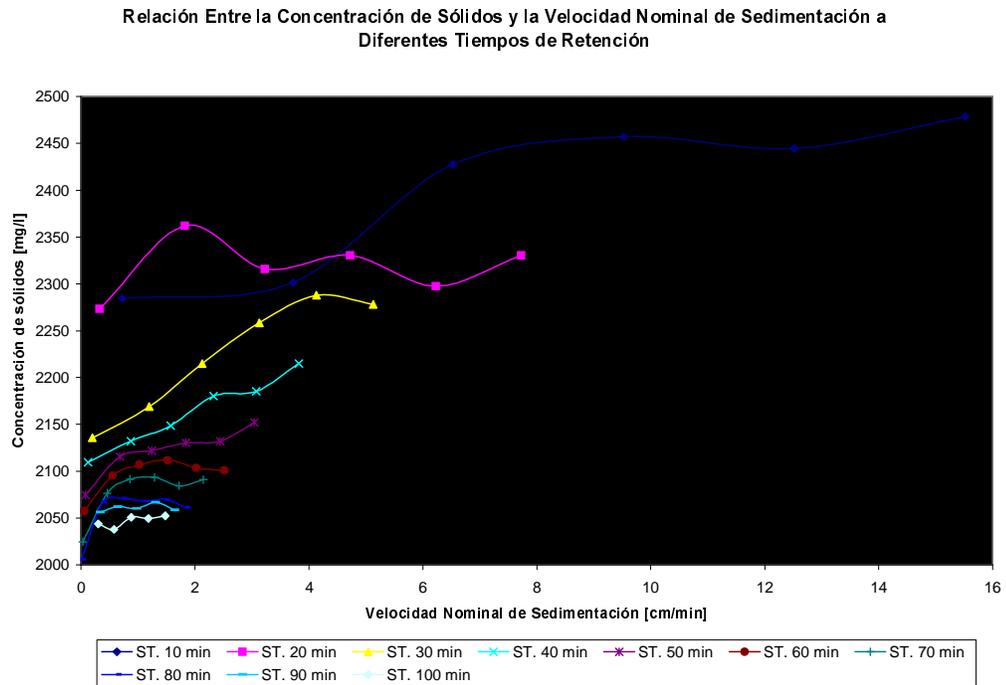


Figura 54. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación la Prueba a pH 4,8 para tiempos de retención entre 110 y 195 min.

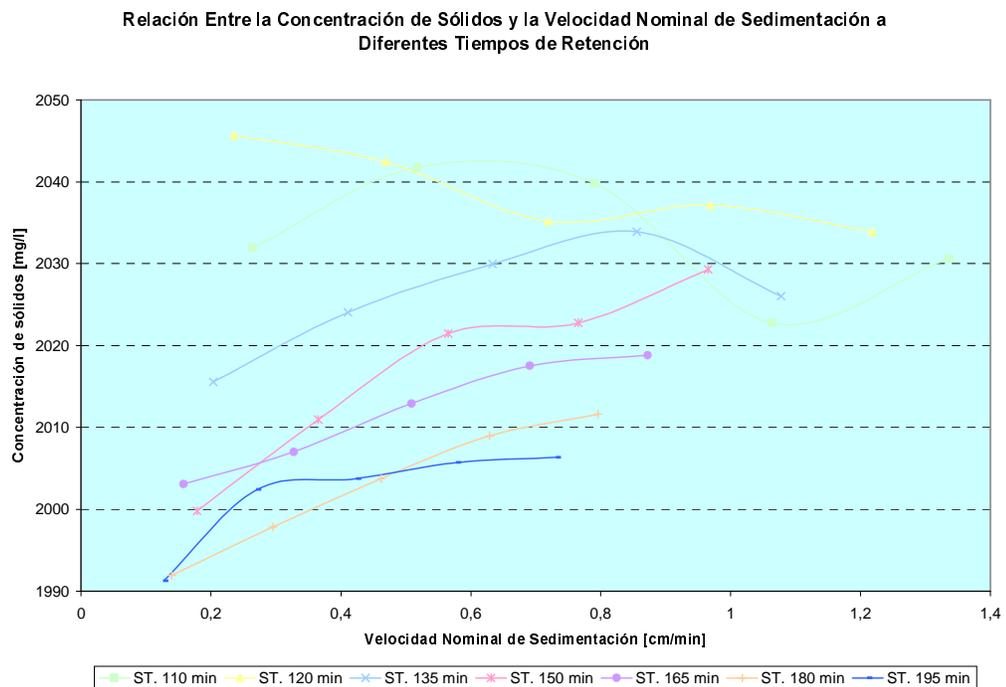


Figura 55. Relación entre la concentración de sólidos y la velocidad nominal de sedimentación la Prueba a pH 4,8 para tiempos de retención entre 403 y 809 min.

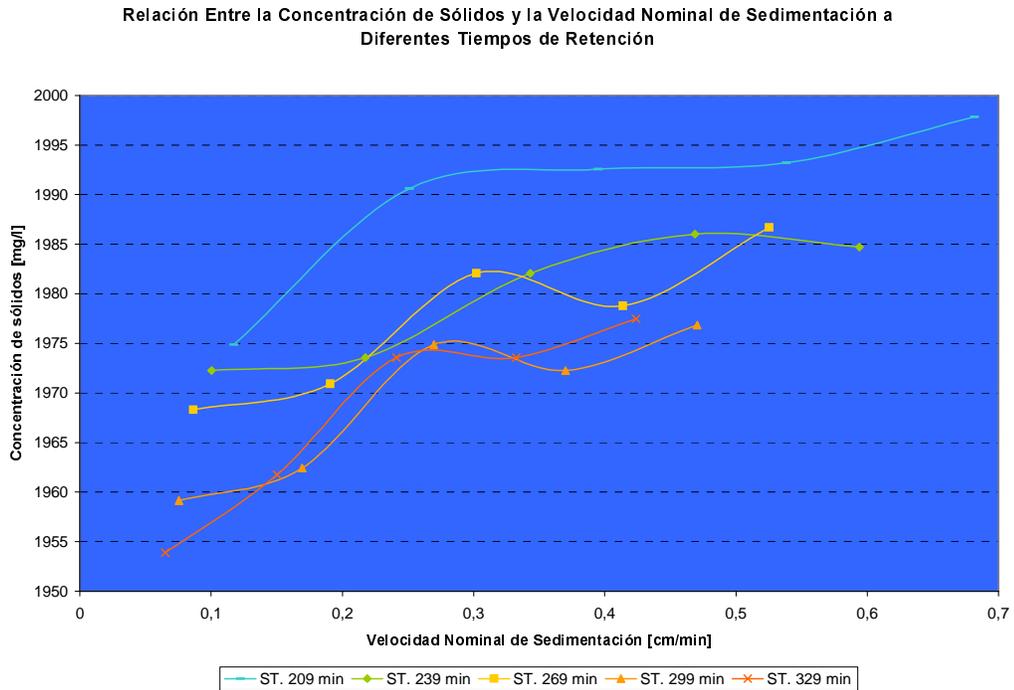


Figura 56. Relación entre la turbiedad y el tiempo de retención en cada punto de muestreo en la Prueba a pH 4,8.

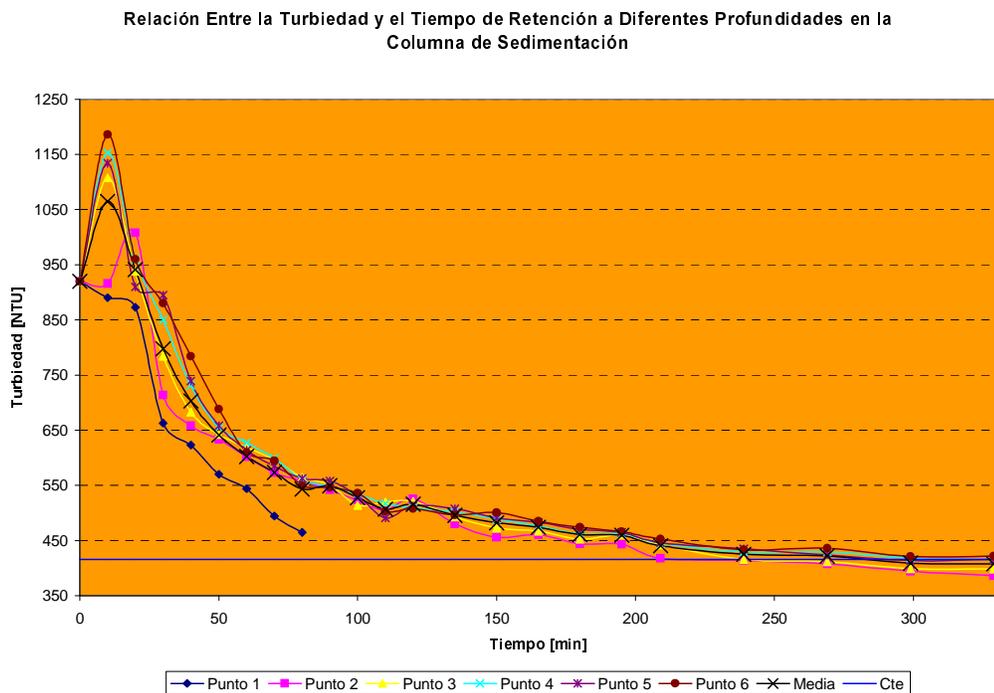


Figura 57. Relación entre la concentración de sólidos y el tiempo de retención en cada punto de muestreo en la Prueba a pH 4,8.

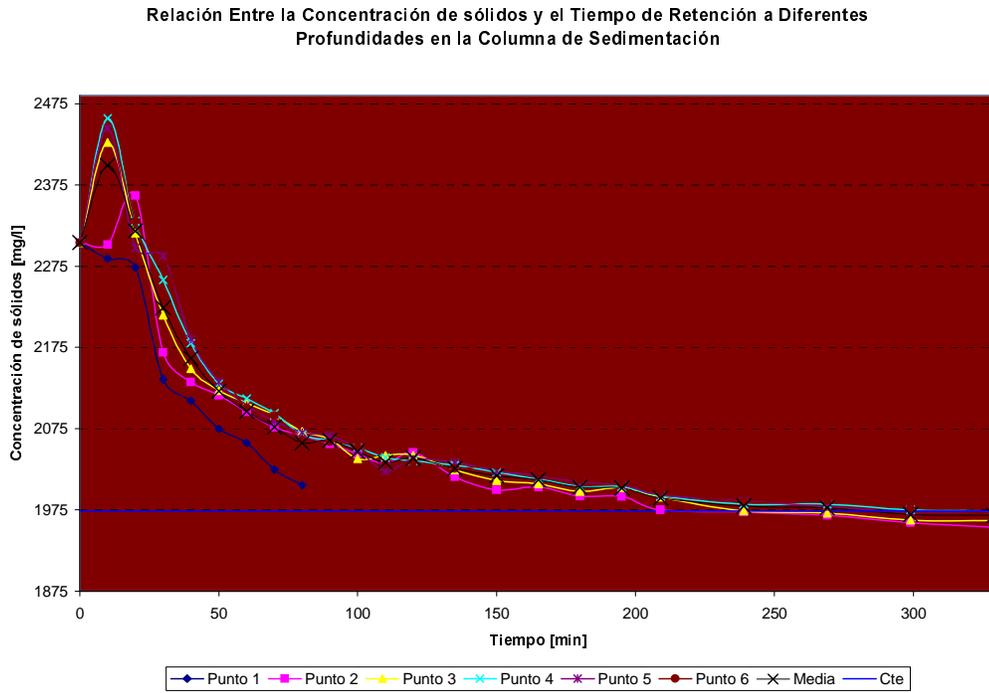


Figura 58. Dispersión de los datos de Concentración de sólidos y turbiedad a través del tiempo en la Prueba a pH 4,8.

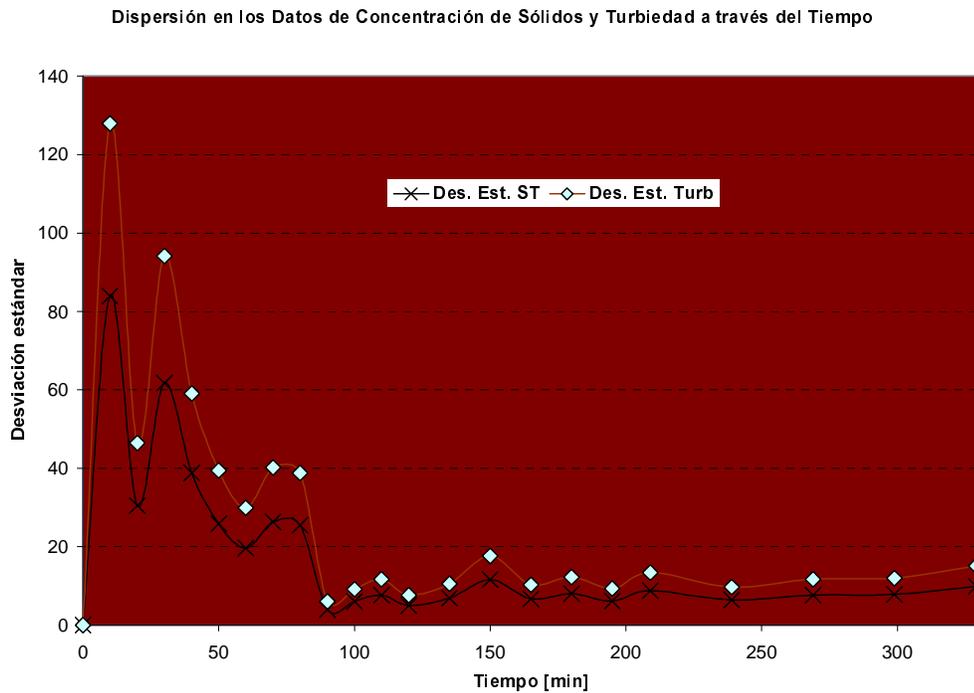
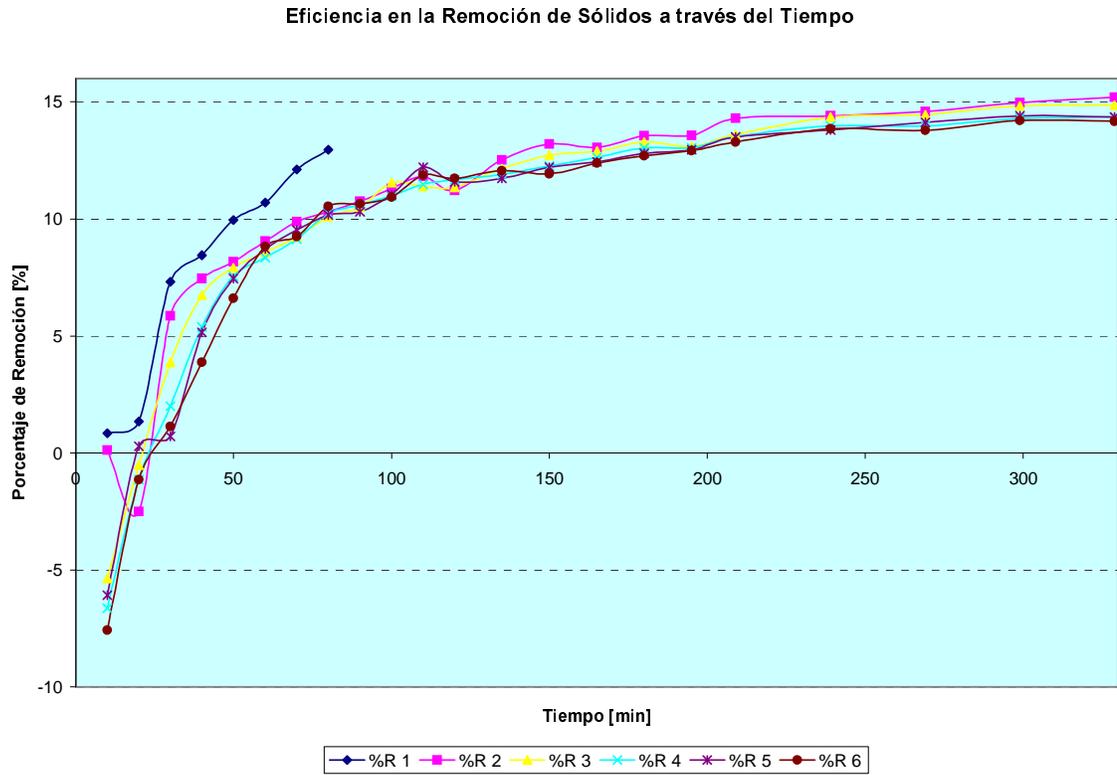


Figura 59. Porcentaje de remoción de sólidos a través del tiempo en la prueba a pH 4,8.

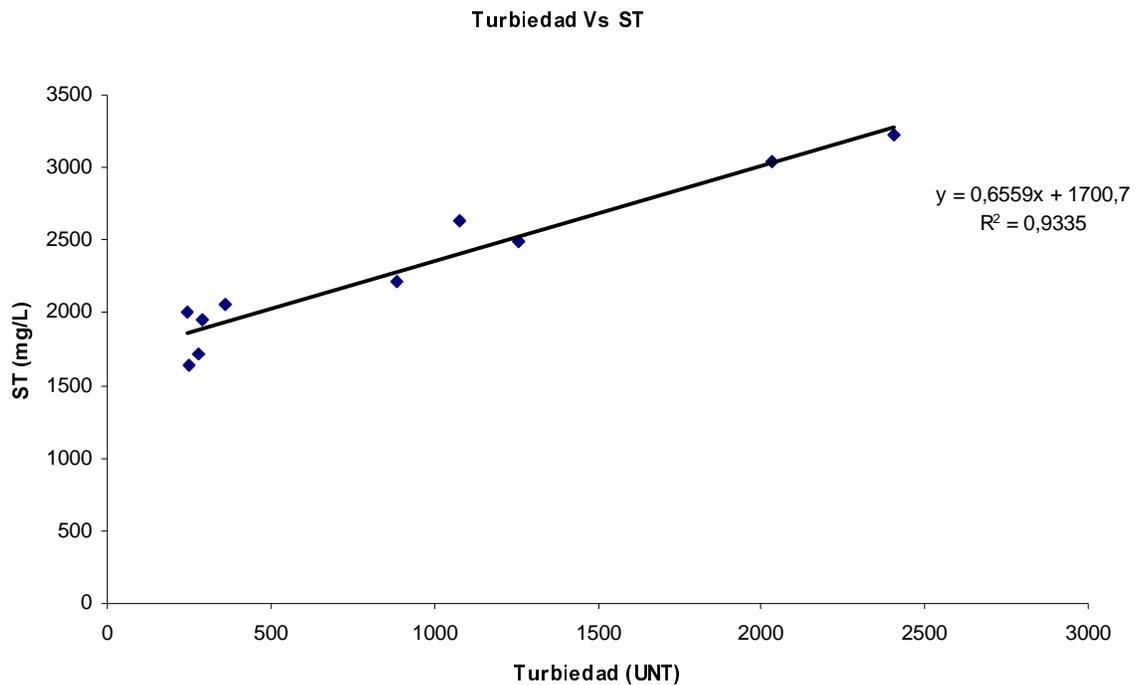


C. DATOS DE TURBIEDAD Y CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS (ST)

Tabla 31. Turbiedad Vs Sólidos Totales

TURBIEDAD [NTU]	ST [mg/L]
2405	3222
2035	3036
1080	2630
1256	2492
888	2220
364	2057
246	2000
290	1955
282	1723
251	1639

Figura 60. Turbiedad vs. Sólidos Totales



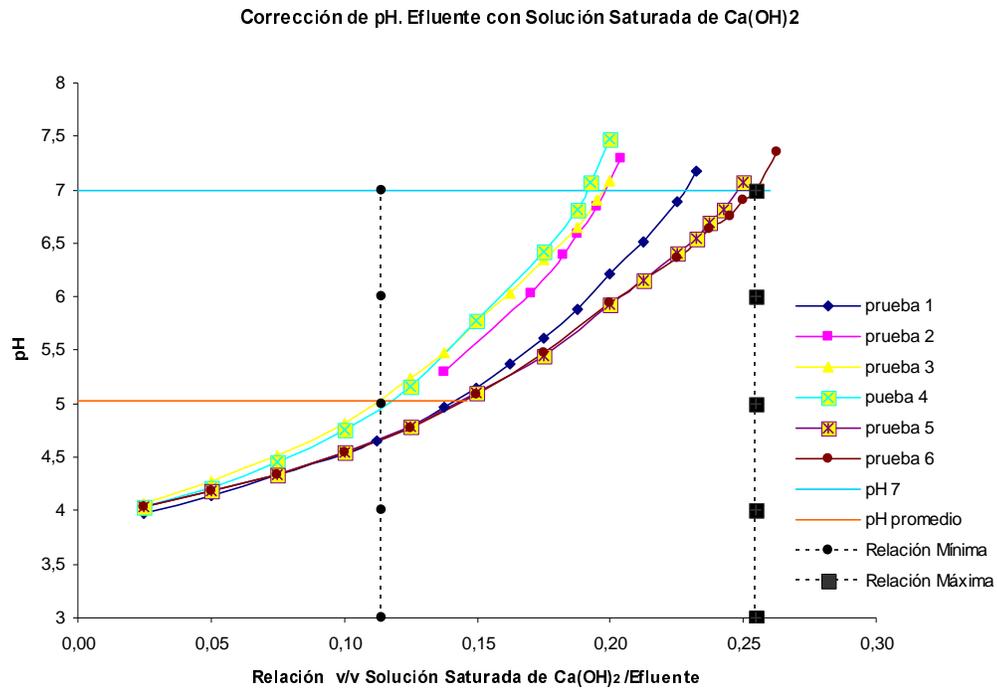
Fuente propia

D. NEUTRALIZACIÓN DE EFLUENTES DE RALLANDERÍA

Tabla 32. Datos de titulación de efluente de rallandería (40 ml) con agua saturada de cal hidratada (CaOH)₂, pH = 12.52

Nº Muestra	1	pH final	3,84	3,98	4,14	4,33	4,53	4,65	4,79	4,96	5,15	5,37	5,61	5,89	6,21	6,52	6,89	7,17
pH inicial	3,84	Vol. sln cal (ml)	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,3
Nº Muestra	2	pH final	3,87	5,3	6,04	6,4	6,59	6,85	7,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
pH inicial	3,87	Vol. sln cal (ml)	0,0	5,5	6,8	7,3	7,5	7,8	8,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nº Muestra	3	pH final	3,89	4,06	4,27	4,52	4,81	5,24	5,47	5,77	6,04	6,35	6,65	6,91	7,09	-	-	-
pH inicial	3,89	Vol. sln cal (ml)	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	7,8	8,0	-	-	-
Nº Muestra	4	pH final	3,87	4,03	4,22	4,46	4,75	5,16	5,78	6,42	6,81	7,07	7,48	-	-	-	-	-
pH inicial	3,87	Vol. sln cal (ml)	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	7,5	7,7	8,0	-	-	-	-	-
Nº Muestra	5	pH final	3,89	4,03	4,18	4,33	4,55	4,78	5,1	5,45	5,93	6,15	6,41	6,55	6,69	6,81	7,07	-
pH inicial	3,89	Vol. sln cal (ml)	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	8,5	9,0	9,3	9,5	9,7	10,0	-
Nº Muestra	6	pH final	3,9	4,03	4,19	4,34	4,54	4,77	5,09	5,48	5,95	6,36	6,63	6,76	6,9	6,99	7,35	-
pH inicial	3,9	Vol. sln cal (ml)	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	9,5	9,8	10,0	10,2	10,5	-

Figura 61. Corrección del pH en el efluente de mancha con una solución saturada de Hidróxido de Calcio.



Fuente propia

E. RECOMENDACIONES PARA EL MUESTREO Y PRESERVACIÓN DE MUESTRAS

Tabla 33. Recomendaciones para el muestreo y preservación de muestras.
Tomado de Toma y Preservación de Muestras del IDEAM [19]

Determinación	Recipiente ^{††}	Volumen mínimo de muestra, mL	Tipo de muestra ^{‡‡}	Preservación ^{§§}	Almacenamiento máximo recomendado
Cianuro: Total	P, V	500	s, c	Agregar NaOH hasta pH > a 12, refrigerar en la oscuridad	14 d
Conductividad	P;V	500	s, c	Refrigerar	28 d
DBO	P;V	1000	s	Refrigerar	48 h
DQO	P;V	1000	s, c	Analizar lo más pronto posible, o agregar H ₂ SO ₄ hasta pH < 2; refrigerar	28 d
pH	P;V	50	s	Análisis inmediato	-
Sólidos	P;V	200	s, c	Refrigerar	2 – 7 d
Temperatura	P;V	-	s	Análisis inmediato	-
Turbiedad	P;V	100	s, c	Analizar el mismo día; para más de 24 horas guardar en la oscuridad, refrigerar	48 h

^{††} P = plástico (polietileno o equivalente); V = vidrio; V(A) o P(A) = enjuagado con HNO₃ 1+1; V(B) = vidrio, enjuagado con solventes orgánicos o secado en estufa

^{‡‡} S = simple; C = compuesta

^{§§} Refrigerar = almacenar a 4°C en ausencia de Luz. La preservación de la muestra debe realizarse en el momento de la toma de muestra.

F. METODOLOGÍA UTILIZADA EN LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS

Se realizó la caracterización fisicoquímica de los efluentes del proceso de extracción de almidón agrio de yuca en el sitio y en las instalaciones del laboratorio de Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca, dependiendo del parámetro a medir. A continuación se mencionan los análisis realizados.

TURBIEDAD (FAU). Se adoptó el método 8237 del espectrofotómetro de haz simple HACH DR/2010, en éste método se hace la relación de una solución estándar de Formazin 4000 FAU es equivalente a 4000 NTU. El método de medición óptica es muy diferente al método Nefelométrico. Para minimizar las interferencias por el color la lectura debe llevarse a cabo a 860 nm.

POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH). Las medias de éste parámetro se realizaron en el sitio durante el muestreo. Se empleó un pHmetro HANDY LAB1.

TEMPERATURA (°C). Se hicieron las mediciones directas en las descargas de acuerdo con las recomendaciones de toma y preservación de muestras por medio del método termométrico.

CONDUCTIVIDAD (s). Se hicieron las mediciones directas en las descargas utilizando un conductivímetro HANNA HI 8733.

SÓLIDOS TOTALES (mg/L). Se determinó de acuerdo a la Norma del Standard Methods 2540-B/2000[1]

SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (mg/L). Se determinó de acuerdo a la Norma del Standard Methods 2540-D/2000[1]. Utilizando filtro Selection Filtred Schleicher Schuel 595. 100 Stück. ϕ 125 mm. Ref. N° 10311611.

DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (DBO₅ mg/L). Se determinó de acuerdo a la Norma del Standard Methods 5210-B/2000[1]. La medición del oxígeno disuelto se realizó por el método iodométrico de la Norma SM 4500-OC/2000[1] con modificación azida de la Norma SM 4500-OB/2000[1]. Las diluciones realizadas estuvieron en el rango de 0,1 y 0,3%, rango mínimo que especifica la Norma SM para efluentes industriales.

Para las mediciones de DBO₅ soluble, la muestra se introdujo en una centrifuga CLAY ADAMS BECTON DICK INSON por un tiempo de 20 minutos, tomando el sobrenadante para hacerle el respectivo análisis de DBO₅.

DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO mg/L). Se determinó con el método de reflujo cerrado colorimétrico de acuerdo a la Norma del SM Colorimétrico 5220-B/2000[1], empleando el espectrofotómetro de haz simple HACH DR/2010 llevándose a cabo la lectura a 600 nm y cuya curva es $Y = 3,9674 \times 10^{-4} X + 1,3109 \times 10^{-3}$, donde Y = absorbancia y X = DQO mg/L factor de dilución.

Para las mediciones de DQO soluble, la muestra se introdujo en una centrifuga CLAY ADAMS BECTON DICK INSON por un tiempo de 20 minutos, tomando el sobrenadante para hacerle el respectivo análisis de DQO.

CIANURO (CN⁻ mg/L). Se determinó la no presencia de interferencias de acuerdo a la Norma SM 4500 CNN- B/2000[1]. La destilación previa para la determinación se hizo de acuerdo a la Norma SM 4500 CNN- C/2000[1]. La concentración de cianuro se cuantificó usando el método volumétrico de acuerdo a la Norma SM 4500 CN⁻ D[1] cuyo intervalo de concentración es de 1 a 10 mg/L de CN⁻

MEDICIÓN VOLUMÉTRICA MANUAL DEL CAUDAL. La medición del caudal se realiza de forma manual utilizando un cronometro y un recipiente aforado. El procedimiento a seguir es toma un volumen de muestra cualquiera y medir el tiempo transcurrido desde que se introduce a la descarga hasta que se retira de ella; la relación de estos dos valores permite reconocer el caudal en ese instante de tiempo. Se debe tener un especial cuidado en el momento de la toma de muestra y la medición del tiempo, ya que es un proceso simultaneo donde el tiempo de muestra y la medición del tiempo, ya que es un proceso simultaneo donde el tiempo comienza a tomarse en el preciso instante que el recipiente se introduce a la descarga y se detiene en el momento en que se retira de ella. Siendo $Q = L/s$, $V =$ volumen en L, y $t =$ tiempo en s, el caudal se calcula como:

$$Q = V/t$$

Este método tiene la ventaja de ser el más sencillo y confiable, siempre y cuando el lugar donde se realice el aforo garantice que el recipiente lleve todo el volumen de agua que sale por la descarga. Entre sus desventajas se cuenta que la mayoría de veces es necesario adecuar el sitio de aforo y toma de muestras para evitar pérdida de muestra en el momento de aforar, también se deben evitar represamientos que permitan la acumulación de sólidos y grasas.

G. ANÁLISIS ALIMENTICIO DEL SUBPRODUCTO MANCHA

 UNIVERSIDAD DEL VALLE Departamento de Química Laboratorio de Análisis Industriales		
CERTIFICADO DE ANALISIS DE LABORATORIO		
Número de registro: 33105	Fecha de emisión: 08 de noviembre de 2005	
Empresa: UNIVERSIDAD DEL CAUCA	Solicitado por: Sr. Carlos César Cabezas Profesor T.C.	
Dirección: Calle 5 No. 4-70	Teléfono: 820 9800 Ext. 2220	Fax: 820 9800 Ext. 2205
Nombre de la muestra: Mancha		
DETERMINACION	RESULTADO	MÉTODO
Humedad, en % (m/m)	18,31	NTC 282
Cenizas, en % (m/m)	0,97	NTC 282
Grasa, en % (m/m)	10,88	NTC 668
Fibra, en % (m/m)	0,36	NTC 668
Proteína (Nx6,25), en % (m/m)	22,29	NTC 282
Carbohidratos, en % (m/m)	47,18	Por diferencia
Azúcar total, en % (m/m)	N.D.	Método de Leyne y Einon
Calcio como Ca, en ppm (µg/g)	176,47	A.A., por llama
Hierro como Fe, en ppm (µg/g)	141,48	A.A., por llama
Sodio como Na, en ppm (µg/g)	75,13	A.A., por llama
Vitamina C como ácido ascórbico, en mg/100 g muestra	58,89	Volumetría
Calorías, en K cal/100 g	306,05	Calorimetría
Fósforo como P, en ppm (µg/g)	723,77	A.A., por llama
NOTA: A.A. Significa Análisis realizados por Espectrofotometría de Absorción Atómica NTC Significa Norma Técnica Colombiana del ICONTEC N.D. significa No Detectable		
Los anteriores análisis fueron elaborados por la Tecnóloga Química Jenny Patricia Angel C. Para cualquier información adicional sírvase citar el No 33105 correspondiente a su muestra.		
Resultados válidos únicamente para la(s) muestra(s) analizada(s) y no para otro(s) material(es) de la misma procedencia. La(s) muestra(s) analizada(s) se guardará(n) por el tiempo de dos meses a partir de la emisión de este informe, transcurrido este tiempo se desechará(n) o se devolverá(n) al cliente si éste lo solicita. El presente documento no posee validez alguna sin el sello del laboratorio y las firmas respectivas. Se prohíbe su reproducción total o parcial, excepto con aprobación de la Universidad del Valle.		
 RUBEN A. SANGHEZ ANDICA., PQ-1350 Jefe Laboratorio de Análisis Industriales	 JENNY PATRICIA ANGEL C. Tecnóloga Química	
Digitó: Alba Lucía Gómez		

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA, AWWA Y WPCF. Standard Methods for the examination of water and wastewater. 20^a edition. USA 1998.
2. Alarcón, M. F., y otros. “Almidón Agrío de Yuca en Colombia .Tomo I. Planta procesadora: Descripción de planos y equipos”. CIAT, 2001.
3. Alarcón, M. F., y otros. “Almidón Agrío de Yuca en Colombia .Tomo II. Planta procesadora: Descripción de planos y equipos”. CIAT, 2001.
4. Amatya, P. y Annachhatre, A. P., “UASB Treatment of Tapioca Starch Wastewater”. Journal of Environmental Engineering. December 2000. pg 1149
5. Annachhatre, A. P. y Amomkaew, A., “Upflow anaerobic sludge blanket treatment of starch wastewater containing cyanide”. Water Environment Research. Tomo 73, N° 5; pg 622, 11pgs, 2001.
6. Arboleda V, J. “Teoría y Práctica de la Purificación del Agua”. Tercera Edición. MacGraw Hill. Santa fe de Bogotá. 2000
7. Arroyave, G. Rojas, O., Y Torres, P. “Depuración anaerobia de aguas residuales el proceso de extracción de almidón de yuca en sistemas de fases de fases separadas”. Universidad del Valle. En: XI SINAFERM Simposio Nacional de Fermentaciones. Universidad Federal de Sao Carlos. Brasil. 1996.
8. Cajigas, A. y Pérez, A., “Corrección de pH en reactores anaerobios tratando aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca”. Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería. Cali, 2002.
9. Cajigas, C. A., Pérez, V. A., y Torres, L. P., “Importancia del pH y la Alcalinidad en el Tratamiento Anaerobio de las aguas Residuales del Proceso de Extracción de Almidón de Yuca”. Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería. Cali. 2002.
10. Ceballos, H. y De la Cruz, A. G., “Taxonomía y Morfología de la Yuca en: La Yuca en el Tercer Milenio: Sistemas Modernos de Producción Procesamiento, Utilización y Comercialización”. Título A, Capítulo 2. CIAT. 2002
11. Centro Nacional de Producción Más Limpia y Tecnologías Ambientales. “Casos de Aplicación de Producción Más Limpia en Colombia”. Editorial Claves. Bogotá. 2002.

12. Chará, J. D., “Niveles de “mancha” y Afrecho de Yuca (*Manihot esculenta*) como Fuente Energética en la Dieta de Patos Pekín (*Anas platyrhynchos*)”. *Livestock Research for Rural Development*. Vol. 4, número 2. 1992.
13. Corporación Autónoma Regional del Cauca CRC. “*Caracterización de Vertimientos Municipales e Industriales y Evaluación de la Calidad del Agua en Tramos de Ríos, Objeto de la Aplicación del Decreto 901/97*”. Resumen Final de las Caracterizaciones. Proyecto N° 2003-006. Santiago de Cali. 2004.
14. Corporación Autónoma Regional del Cauca CRC. “*Proyecto de Control de la Contaminación Hídrica y Producción Mas Limpia en el Sector Rallanderías del Cauca*”. Subdirección de Gestión Ambiental. Popayán 2004.
15. González M., L., Libro “*Hidrología Practica y Gestión Ambiental*”. Tomo I. Memorias Clase Hidrología. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad del Cauca. 2003
16. Gutiérrez, L. A., y Bueno de las H, J., “*Los Sedimentadores Lamelares en el tratamiento de las aguas residuales*”. Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente. Universidad de Oviedo. 2000
17. Hernández, M. A., “*Depuración de Aguas Residuales*”. Servicio de Publicaciones de la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid. (U.P.M.). Madrid. 1998
18. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN [online]. Prestación de servicios de asistencia técnica, capacitaciones, publicaciones y gestión de proyectos. “*Manual de Introducción de Producción Más Limpia en la Industria*”. [ICONTEC] <<http://www.cnpml.org/html/archivos/GuiasDocumentos/GuiasDocumentos-ID13.pdf>>
19. INSTITUTO DE HIDROLÓGICA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES.[online] “*Toma y Preservación de Muestras*” [IDEAM]<<http://www.ideam.gov.co>>
20. Legislación Ambiental Sistematizada [CD-ROM]. [Cali, Colombia]. Ediciones Sistematizada Equidad, 2005.
21. Maldonado, Y. V., [online] “*Sedimentación. Capítulo 7*”. <<http://www.cepis.ops-oms.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manualI/tomoII/siete.pdf>>
22. Manual de ayudas Hidráulicas de la asignatura de Hidráulica. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad del Cauca. 2002

23. Metcalf Y Eddy. *“Tratamiento y Depuración de las Aguas Residuales”*. Editorial Labor S.A. España. 1981
24. Ministerio de Desarrollo. *“Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. RAS 2000”*. Santa Fé de Bogotá. 2000
25. Molina V. D. *“Informe Técnico Final: Diversificación del Uso de Tres Tipos de Yuca (Amarga, Armenia y Chile) Producidas en la Provincia de Guanentá Mediante el Aprovechamiento de sus Subproductos”*. Universidad Industrial de Santander. 2001.
26. Moraes M, R. *“Memorias XI Encuentro Nacional de Químicos y Técnicos de la Industria del Cuero. Curso: Tratamiento de Efluente de Curtiembre y Tecnología Limpia, Tratamiento Biológico”*. Río Negro, Antioquia. Noviembre de 2004.
27. Perry, R. H., et al., *“Perry manual del ingeniero químico,”* McGraw-Hill, (1992).
28. Programa Ambiental de las Naciones Unidas [PNUMA]. [online] <<http://www.unep.org/>>
29. Torres, P. y Rodríguez, J., *“Tratamiento de Aguas Residuales del Proceso de Extracción de Almidón de Yuca en Filtro Anaerobio: Influencia del Medio de Soporte”*. Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería. Cali, 2003.
30. Rodríguez, J., Rojas, O. y Torres, P. *“Extracción de Almidón de Yuca. Manejo Integral y Control de la contaminación Hídrica”*. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. 2002.
31. Vargas de C. L., [online] *“Planta de Tratamiento de Filtros Rápidos. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente”*. Organización Mundial de la Salud. <<http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/fulltext/tratagua/rapida/rapida1.html>>
32. Vigneswaran, S., Jegatheesan V. y Visvanathan C., *“Industrial waste minimization initiatives in Thailand: concepts, examples and pilot scale trials”*. Journal of Cleaner Production 7 (1999) 43–4. Received 12 January 1998; accepted 27 July 1998.
33. Zaror Z, Claudio A. *“Introducción a la Ingeniería Ambiental para la Industria de Procesos”*. Concepción. Chile. 2000