



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**



**EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA REDUCIR LA CONCENTRACIÓN DE
FÓSFORO EN EL EFLUENTE DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO
DE AGUAS RESIDUALES DE LA CERVECERÍA POLAR, C.A.**

Prof. Viky Mujica
Tutor Académico

Ing. Dinorah Morao
Tutor Industrial

Autor:
Br. Willian Silva

Valencia, febrero de 2007



RESUMEN

El objetivo fundamental del trabajo presentado, fue el de evaluar alternativas para reducir la concentración de fósforo total en el efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Cervecería Polar, C.A. Planta San Joaquín, a fin del cumplimiento de la normativa ambiental estipulada en el Decreto 3219, la cual establece que la concentración de fósforo total en cuerpos de aguas descargadas en el Lago de Valencia, no puede exceder 1 ppm.

Para el logro de los objetivos planteados se llevó a cabo la recolección de diversos datos como lo son: caudal de operación en distintos puntos de la planta, concentración de fósforo total, reactivo, no reactivo y fósforo asociado a sólidos en el agua, en su avance por la PTAR.

La investigación se realizó en la Cervecería Polar, donde se lleva a cabo el tratamiento de las aguas residuales mediante dos sistemas: anaeróbico, (reactores UASB), unidades cuyo fundamento está basado en la presencia de lodos activados, compuesto por bacterias anaerobias que son capaces de degradar compuestos orgánicos, y el sistema aeróbico, basado en lagunas de aireación en donde la biomasa (lodos activados aerobios) entra en contacto con el afluente, con la finalidad de remover materia orgánica, oxidar amoníaco (nitrificación), remover fósforo; producir un efluente de calidad aceptable.

La estrategia metodológica para el logro de los objetivos, se llevo a cabo de la siguiente manera: se determinó el comportamiento de la concentración de fósforo en la PTAR, se evaluaron alternativas químicas y biológicas para reducir la concentración de fósforo y se seleccionó una de ellas para ser implementada a modo de prueba de campo, se determino la efectividad del tratamiento seleccionado y finalmente se realizó un estudio comparativo entre la alternativa propuesta y el tratamiento actual de la planta para el control del nutriente, donde se tomó en cuenta la función costo-beneficio, la operación y el control de ambos procesos.

Entre los logros mas importantes, está el hecho de haber evaluado a nivel de laboratorio y de campo, una alternativa que logró remover hasta un 98 % del fósforo total presente en el efluente de la PTAR, proporcionó una mejor relación costo beneficio y mejora las condiciones operacionales más problemáticas de la planta.

Entre las conclusiones más resaltantes se tiene que, más del 60 % del fósforo presente en el efluente de la PTAR es fósforo reactivo, el nutriente a la salida de la prueba de campo alcanzó niveles de hasta 0,04 ppm y el costo del tratamiento propuesto es de 40 Bs/Hl env.

Las recomendaciones de mayor valor son, tratar de mantener un F/M constante y cercano 0,20, no realizar desvíos de más de 15 % diariamente a la producción actual e implementar la alternativa propuesta para la remoción de fósforo en el efluente de la PTAR.



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	2
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	6
1.2.1. Situación Actual	7
1.2.2. Situación Deseada	7
1.3. OBJETIVOS	8
1.3.1. Objetivo General	8
1.3.2. Objetivos Específicos	8
1.4. JUSTIFICACIÓN	9
1.5. LIMITACIONES	10
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	11
2.1. ANTECEDENTES	11
2.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	15
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO	36
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES	54
CONCLUSIONES	107
RECOMENDACIONES	108
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
APÉNDICES	111
APÉNDICE A. MODELOS DE CÁLCULO	111
APÉNDICE B. TABLAS Y FIGURAS BIBLIOGRÁFICAS	136
APÉNDICE C. MATERIAL EXPERIMENTAL ADICIONAL	139
Tabla de Datos	139
Metodología Experimental	165
Diagrama de flujo detallado de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales	171



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 3.1: Caudal de operación diario de los principales equipos de la planta de tratamiento de aguas residuales	37
Tabla 3.2: Concentración de fósforo reactivo, disuelto y total diaria en muestras compuestas de 24 horas en la PTAR	38
Tabla 3.3: Alternativas propuestas para eliminar fósforo en el efluente de la PTAR mediante tratamientos alternos	41
Tabla 3.4: Datos obtenidos en la prueba de remoción de fósforo mediante el tratamiento biológico Bardenpho en la PTAR	42
Tabla 3.5: Concentración de fósforo en el recirculado del espesador de lodos de la PTAR	44
Tabla 3.6: Datos experimentales del ensayo de prueba de jarras para la remoción de fósforo en muestras de la PTAR	44
Tabla 3.7: Matriz de selección de alternativas para la remoción de fósforo total en el efluente de la PTAR	45
Tabla 3.8: Caracterización del efluente de la PTAR y del efluente del tratamiento propuesto para la remoción del fósforo	48
Tabla 3.9: Características de operación y datos de calidad del agua tratada mediante el tratamiento propuesto en la PTAR	49
Tabla 3.10: Estimación de costos para el cálculo de la inversión inicial requerida para implementar el tratamiento de remoción de fósforo en el efluente de la PTAR	50
Tabla 4.1: Comportamiento del fósforo en el agua residual con respecto a las entradas y salidas de los principales equipos que conforman la PTAR	55
Tabla 4.2: Comportamiento de la concentración de fósforo total, reactivo y disuelto del agua de desecho en la PTAR	56
Tabla 4.3: Tipo de fósforo encontrado en los puntos de muestreo seleccionados de la PTAR	56
Tabla 4.4: Resultados obtenidos en la prueba biológica de remoción de fósforo Bardenpho en la PTAR	66
Tabla 4.5: Concentración de fósforo en el recirculado del espesador de lodos en la PTAR antes y después de modificar las condiciones de operación	68
Tabla 4.6: Resultados obtenidos en el ensayo de prueba de jarras con cloruro férrico realizado en muestras de agua tratada de la PTAR	69
Tabla 4.7: Resultados obtenidos en el ensayo de prueba de jarras con cloruro férrico realizado en muestras a la salida de la piscina de aireación de la PTAR	70
Tabla 4.8: Resultados obtenidos en el ensayo de prueba de jarras con policloruro de aluminio realizado en muestras de agua tratada de la planta de tratamiento de aguas residuales	71
Tabla 4.9: Resultados obtenidos en el ensayo de prueba de jarras con policloruro de aluminio realizado en muestras a la salida de la piscina de aireación de la PTAR	71



Tabla 4.10: Caracterización una vez realizadas las pruebas de jarras a la dosis óptima estimada de coagulante en muestras de agua tratada de la PTAR	75
Tabla 4.11: Matriz de selección de alternativas para reducir la concentración de fósforo total en el efluente de la PTAR	83
Tabla 4.12: Especificación de las condiciones de operación del tratamiento propuesto para remover fósforo en la PTAR	86
Tabla 4.13: Comportamiento del tratamiento propuesto en la remoción de la concentración de fósforo total	87
Tabla 4.14: Comportamiento del porcentaje de humedad en la torta de lodo de desecho del filtrobanda	88
Tabla 4.15: Estimación de costos para el cálculo de la inversión inicial requerida para implementar el tratamiento propuesto	92
Tabla 4.16: Estimación de los costos operacionales del tratamiento de remoción de fósforo propuesto	93
Tabla 4.17: Comportamiento del tratamiento actual en función de la concentración de fósforo, así como también los costos del mismo en función de la producción	96
Tabla 4.18: Comportamiento del tratamiento propuesto en función de la concentración de fósforo, así como también los costos del mismo en función de la producción	96
Tabla B.1: Índice de Floculación de Wilcomb	138
Tabla C.1: Caudal de operación diario de los principales equipos de la PTAR	139
Tabla C.2: Concentración de fósforo reactivo, disuelto y total diaria en muestras compuestas de 24 horas en la PTAR	141
Tabla C.3: Concentración de fósforo reactivo, disuelto y total diaria en muestras compuestas de 24 horas en la PTAR	142
Tabla C.4: Datos de la curva de calibración en función de la absorbancia y la concentración de fósforo del espectrofotómetro Agilent 8453	142
Tabla C.5: Propuesta de evaluación de alternativas para eliminar fósforo en al efluente de la PTAR mediante tratamientos biológicos	144
Tabla C.6: Propuesta de evaluación de alternativas para eliminar fósforo en al efluente de la PTAR mediante tratamientos químicos	145
Tabla C.7: Propuesta de evaluación de alternativas para eliminar fósforo en al efluente de la PTAR mediante tratamientos alternos	145
Tabla C.8: Datos obtenidos en la prueba biológica de remoción de fósforo Bardenpho en la PTAR	146
Tabla C.9: Datos obtenidos de la concentración de fósforo en el recirculado del espesador de lodos de la PTAR	146
Tabla C.10: Datos obtenidos en el ensayo de prueba de jarras con cloruro férrico realizado en muestras de agua tratada de la PTAR	147
Tabla C.11: Datos obtenidos en el ensayo de prueba de jarras con cloruro férrico realizado en muestras de agua tratada de la PTAR	148
Tabla C.12: Datos obtenidos en el ensayo de prueba de jarras con cloruro férrico realizado en muestras de lodo a la salida de la piscina de aireación de la PTAR	149
Tabla C.13: Datos obtenidos en el ensayo de prueba de jarras con cloruro férrico y lechada de cal realizado en muestras de agua tratada de la PTAR	150



Tabla C.14: Datos obtenidos en el ensayo de prueba de jarras con cloruro férrico y un polímero de alto PM realizado en muestras de agua tratada de la PTAR	151
Tabla C.15: Datos obtenidos en el ensayo de prueba de jarras con policloruro de aluminio realizado en muestras de agua tratada de la PTAR	151
Tabla C.16: Datos obtenidos en el ensayo de prueba de jarras con policloruro de aluminio realizado en muestras de agua tratada de la PTAR	152
Tabla C.17: Datos obtenidos en el ensayo de prueba de jarras con policloruro de aluminio realizado en muestras de lodo a la salida de la piscina de aireación de la PTAR	152
Tabla C.18: Caracterización una vez realizadas las pruebas de jarras a la dosis óptima estimada de coagulante en muestras de agua tratada de la PTAR	153
Tabla C.19: Características de operación y datos de calidad del agua tratada mediante el tratamiento de remoción de fósforo implementado en la PTAR	154
Tabla C.20: Costos para el cálculo de la inversión inicial requerida para implementar el tratamiento propuesto	155
Tabla C.21: Datos de placa de los equipos que conforman la piscina de aireación y el sistema de deshidratación de lodos de la PTAR	155
Tabla C.22: Datos del comportamiento del fósforo en función a la cantidad de cloruro férrico dosificado a nivel de laboratorio	155
Tabla C.23: Datos del comportamiento del fósforo en función al porcentaje de desviado de agua cruda al tratamiento aerobio	156
Tabla C.24: Datos obtenidos de la simulación de la PTAR a diferentes escenarios de producción en función a un desvío de agua cruda a la etapa de aireación del 10%	157
Tabla C.25: Datos obtenidos de la simulación de la PTAR a diferentes escenarios de producción en función a un desvío de agua cruda a la etapa de aireación del 20%	158
Tabla C.26: Datos obtenidos de la simulación de la PTAR a diferentes escenarios de producción en función a un desvío de agua cruda a la etapa de aireación del 30%	159
Tabla C.27: Datos obtenidos de la simulación de la PTAR a diferentes escenarios de producción en función a un desvío de agua cruda a la etapa de aireación del 40%	160
Tabla C.28: Datos obtenidos de la simulación de la PTAR a diferentes escenarios de producción en función a un desvío de agua cruda a la etapa de aireación del 50%	161
Tabla C.29: Datos obtenidos de la simulación de la PTAR a diferentes escenarios de producción en función a diferentes dosis de cloruro férrico en el efluente planta	162
Tabla C.30: Datos obtenidos de la simulación de la PTAR a diferentes escenarios de producción en función a diferentes dosis de cloruro férrico en el efluente planta	163
Tabla C.31: Datos obtenidos de la simulación de la PTAR a diferentes escenarios de producción en función a diferentes dosis de cloruro férrico en el efluente planta	164



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1: Diagrama de flujo de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales	4
Figura 1.2: Comportamiento de la concentración de fósforo en los meses abril – mayo del año 2006 en el punto de muestreo Agua Tratada de la PTAR con un porcentaje de desvío promedio de 8 % de agua cruda a la piscina de aireación	5
Figura 2.1: Calidad del licor mixto en función a la biodiversidad de microorganismos presentes en el mismo	25
Figura 2.2: Diagrama de proceso biológico de eliminación conjunta de fósforo y nitrógeno A/O	30
Figura 2.3: Diagrama de proceso biológico de eliminación de fósforo Phostrip	31
Figura 2.4: Diagrama de proceso biológico de eliminación de fósforo Bardenpho	32
Figura 2.5: Posibles puntos de dosificación de coagulante para el tratamiento fisicoquímico de remoción de fósforo	33
Figura 3.1: Marcha experimental para medir fósforo total, reactivo y disuelto en los distintos puntos de muestreo de la PTAR	39
Figura 3.2: Ruta de cálculo para el descarte y validación de los puntos de muestreo en la PTAR para determinar el comportamiento de la concentración de fósforo en el agua residual	39
Figura 3.3: Ruta de cálculo para determinar el comportamiento de la concentración de fósforo en la PTAR	40
Figura 3.4: Modo de operación de la piscina aeróbica de la PTAR para la prueba experimental de campo Bardenpho	42
Figura 3.5: Ruta de cálculo del porcentaje de remoción de fósforo en el punto de muestreo, antes y después de implementar la prueba experimental	43
Figura 3.6: Ruta de cálculo para determinar los costos del tratamiento de remoción de fósforo en función de la producción en hectolitros	53
Figura 4.1: Ubicación de los puntos de muestreo seleccionados para realizar el balance de fósforo en la PTAR	59
Figura 4.2: Distribución de las formas fosfatadas que describen el comportamiento de la concentración de fósforo en los puntos de muestreos seleccionados de la PTAR	60
Figura 4.3: Distribución de las formas fosfatadas que describen el comportamiento de la carga de fósforo del sistema en los puntos de muestreo seleccionados de la PTAR	61
Figura 4.4: Porcentaje de fósforo asociado a sólido con respecto al fósforo disuelto total en los punto de muestreo seleccionados de la PTAR	62
Figura 4.5: Porcentajes de fósforo reactivo, no reactivo y asociado a sólido con respecto al fósforo total en los puntos de muestreo seleccionados en la PTAR	63
Figura 4.6: Porcentajes de fósforo reactivo en función de la concentración de fósforo presente en el efluente de la PTAR a condiciones normales de operación	64



Figura 4.7: Biodiversidad de microorganismos luego de desvíos intencionales de agua cruda al reactor biológico y después de implementar la prueba biológica de remoción de fósforo Bardenpho	66
Figura 4.8: Condición de operación del espesador de lodos antes de las modificaciones de carga y flujo de operación en la PTAR	68
Figura 4.9: Resultados de la prueba de jarras para determinar la cantidad óptima de cloruro férrico en muestras de agua tratada de la PTAR	69
Figura 4.10. Relación experimental de cantidad de coagulante dosificado por ppm de fósforo removido con $FeCl_3$ en muestras a la salida del clarificador (Agua) y a la salida de la piscina (Lodo) en la PTAR	72
Figura 4.11. Relación experimental de cantidad de coagulante dosificado por ppm de fósforo removido con PAC en muestras a la salida del clarificador (Agua) y a la salida de la piscina (Lodo) en la PTAR	73
Figura 4.12: Resultados de la prueba de jarras para determinar la cantidad óptima de policloruro de aluminio en muestras de agua tratada de la PTAR	74
Figura 4.13: Comportamiento de la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR con respecto a la relación DBO/DQO	77
Figura 4.14: Comportamiento de la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR con respecto a los SST	78
Figura 4.15: Comportamiento de la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR con respecto a los SSVLM en la piscina de aireación	79
Figura 4.16: Comportamiento de la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR con respecto a los SSTLM en la piscina de aireación	79
Figura 4.17: Comportamiento de la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR ante cambios en la concentración de fósforo en Elaboración	80
Figura 4.18: Comportamiento de la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR ante cambios en la concentración de fósforo en Estación Bombeo	81
Figura 4.19: Comportamiento de la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR ante cambios en la DQO en Estación Bombeo	82
Figura 4.20: Comportamiento de la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR ante cambios en el porcentaje de agua cruda alimentada a la piscina de aireación	82
Figura 4.21: Comportamiento de la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR ante cambios en la relación F/M	83
Figura 4.22: Marcha experimental de remoción de fósforo mediante la dosificación de coagulante a diferentes concentraciones para determinar dosis óptima	84
Figura 4.23. Diagrama de instrumentación y tuberías del tratamiento propuesto para la remoción de la concentración de fósforo total en el efluente de la PTAR	85
Figura 4.24: Implementación de la alternativa seleccionada para la remoción de fósforo en el efluente de la PTAR	85
Figura 4.25: Comportamiento de la concentración de fósforo total a la salida del tratamiento propuesto contra el efluente de la PTAR	89
Figura 4.26: Comportamiento de la concentración de fósforo total a la entrada del tratamiento propuesto contra la relación coagulante fósforo removido	90
Figura 4.27: Diagrama del proceso de remoción propuesto para el tratamiento del 100 % del efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales	94



Figura 4.28: Comportamiento del fósforo en el efluente de la PTAR función al porcentaje de desvió a la etapa de aireación	97
Figura 4.29: Comportamiento del fósforo en el efluente de la PTAR función al porcentaje de desvió a la etapa de aireación	98
Figura 4.30: Costos del tratamiento de remoción de fósforo actual en función a la producción de cerveza y malta	99
Figura 4.31: Costos del tratamiento de remoción de fósforo propuesto en el efluente de la PTAR (agua) y a la salida de las piscinas de aireación (lodo) en función a la producción de cerveza y malta	100
Figura 4.32: Toneladas de lodo generadas en exceso en función al tratamiento actual y propuesto para la remoción de fósforo en la PTAR a dos escenarios de producción, 500 y 600 mil hectolitros	102
Figura 4.33: Toneladas de lodo generadas en exceso en función al tratamiento actual y propuesto para la remoción de fósforo en la PTAR a dos escenarios de producción, 500 y 600 mil hectolitros	103
Figura 4.34: Capacidad de aireación de las piscinas en función a la producción y distintos porcentajes de desvió de agua cruda a la piscina de aireación (tratamiento actual) de la PTAR	105
Figura 4.35: Gráfico histórico que muestra el comportamiento del oxígeno disuelto en las piscinas al realizar un desvió intencional al tratamiento aeróbico	106
Figura B.1: Pasos del análisis de fosfato en agua residual	136
Figura B.2 Microorganismos presentes en los lodos activados aerobios	137
Figura B.3: Comparador para estimar el tamaño de floc producido en la coagulación según el WRA	138
Figura C.1: Curva de calibración de absorbancia en función de la concentración de fósforo de la muestra del espectrofotómetro utilizado en el Laboratorio Central	143



INTRODUCCIÓN

En la presente investigación se evalúan alternativas para la reducción de la concentración de fósforo total en el efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Cervecería Polar, C.A. Planta San Joaquín. Con el propósito de cumplir dicha meta, se estudia a nivel de laboratorio el comportamiento del nutriente en su avance por cada una de las etapas de la PTAR. La información que se recauda en la primera fase del proyecto, permite generar posibles alternativas para la reducción de la concentración de fósforo total por debajo de 1 ppm en el efluente de la planta. De esta manera se implementa; a modo de prueba de campo, la alternativa seleccionada y se estudian los efectos del tratamiento propuesto contra la alternativa actual utilizada por la empresa para el control del nutriente, tomando en cuenta la función costo beneficio de cada proceso.

Esta investigación tiene un área de aplicación directa en el área de tratamiento de aguas residuales; específicamente en tratamientos avanzados y aplicación indirecta en áreas como: química analítica, transferencia de energía y diseño de procesos. En el desarrollo de la misma, se establece cual es la manera mas concluyente de medir el fósforo en el agua residual, se explica como influyen las variables más importantes de la PTAR en la remoción del nutriente y se determina, como estudiando el comportamiento del fósforo en la planta, se puede identificar si el mismo es removible química ó biológicamente.

El proyecto está estructurado en 4 capítulos: planteamiento de problema, marco teórico referencial, marco metodológico y un capítulo de análisis de resultado. En adición a esto, se encuentran las conclusiones y recomendaciones, la bibliografía y por último los apéndices.

Las razones que justifican la importancia de la presente investigación son principalmente: aportar una estrategia para determinar y remover; de manera efectiva, el fósforo en el agua residual, contribuir a la recuperación del Lago de Valencia por medio del cumplimiento de la normativa ambiental estipulada en el Decreto 3219 y disminución de costos en función al control del nutriente por parte de la empresa.



CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En esta sección se dará a conocer el problema en estudio, especificándose su propósito, la situación actual y deseada, así como el objetivo general y los específicos de la investigación. De igual forma se presentan las razones que justifican la investigación, las limitaciones y el alcance de la misma.

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Lorenzo Mendoza Fleury junto a un grupo de hombres, gestaron la creación de una empresa cervecera en el año 1939. Fue en la parroquia de Antímano donde se forjaron los cimientos de Polar. Así nace Cervecería Polar, C.A. a comienzos de 1941. Hoy en día, cuatro plantas se dedican a la producción y comercialización de cerveza y malta, con una capacidad instalada de 2.295 millones de litros anuales, situadas en puntos estratégicos de Venezuela: Planta San Joaquín, Planta Modelo; ubicada en Maracaibo, Planta Los Cortijos; ubicada en Caracas y Planta Oriente; ubicada en Barcelona.

Planta San Joaquín, domiciliada en San Joaquín Estado Carabobo, cuenta con la más avanzada tecnología operada bajo estrictas normas de seguridad e higiene por profesionales especialistas en el arte de elaborar cerveza y malta; elementos que se suman para lograr un producto que se ha hecho merecedor del primer lugar gracias a la preferencia del consumidor venezolano y a obtener un buen posicionamiento a nivel internacional, además de poseer estándares mundiales de calidad que le han permitido obtener la certificación ISO 9000.

Cervecería Polar, C.A. Planta San Joaquín, está estructurada principalmente en dos gerencias: La Gerencia de Elaboración, encargada de procesar las materias primas para obtener un producto interno y la Gerencia de Envasado, encargada de embotellar y controlar la calidad del producto terminado. Dentro de la gerencia de elaboración se encuentra la Superintendencia de Aguas y Ambiente, la cual se encarga de la extracción, procesamiento según el uso y control de la calidad del agua destinada a: la elaboración de cerveza y/o malta, los servicios generales, las calderas y el agua de las

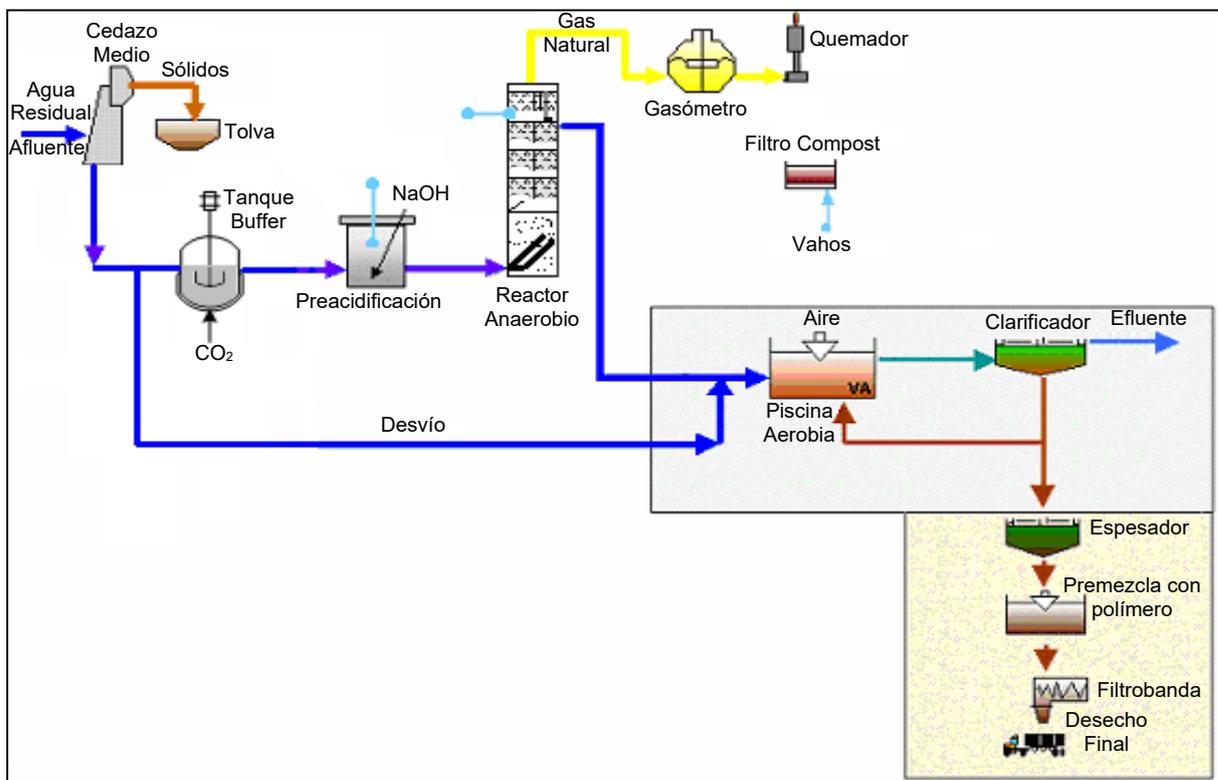


lavadoras de botellas para envasado. De igual forma esta superintendencia se encarga del tratamiento de las aguas residuales proveniente de elaboración, envasado y de las aguas sanitarias, con el propósito de devolverlas a su entorno natural cumpliendo con la normativa y estándares ambientales. Es la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) la destinada a cumplir con esta última labor, con el compromiso de contribuir con el desarrollo sostenible, visto como el crecimiento compatible con el entorno natural y humano que rodea sus actividades.

El proceso de tratamiento comienza cuando las aguas residuales de la planta son enviadas a una fosa de bombeo donde primeramente se hacen pasar a través de unos cedazos medios (tamices) para retirar sólidos y partículas. Los sólidos separados son almacenados en una tolva de recepción y el agua residual se bombea a la PTAR donde gran parte de la misma es alimentada a un tanque agitado continuo (buffer), con el fin de homogenizar la composición, carga poluente, pH (mediante la dosificación de CO_2) y temperatura del agua residual; la otra parte es desviada a la piscina de aireación extendida, con el fin de alimentar agua cruda con alta carga de DQO al proceso aeróbico. El agua residual ya homogenizada se bifurca y se hace pasar por unos filtros de placas inclinadas (lamella), para retener arena o cualquier sólido que no haya logrado retener los cedazos, para luego ser alimentada a unos tanques de preacidificación donde se le da un tiempo de residencia suficiente para promover la formación de ácidos grasos volátiles (AGV) de manera controlada mediante la dosificación de NaOH. El agua residual ya acondicionada se somete a un proceso de tratamiento anaeróbico en cuatro reactores de flujo ascendente UASB, en los cuales se produce gas natural a expensas de la síntesis de nutrientes y remoción de la DQO, el gas producido por las bacterias anaerobias, es almacenado en un gasómetro y por último quemado. Posteriormente el agua tratada anaerobicamente es alimentada a una piscina de aireación extendida para ser sometida a un proceso aerobio, a objeto de aumentar la eficiencia de remoción de nutrientes y DQO, allí unos rotores mantienen los niveles de oxígeno requerido para la actividad bacteriana. Seguidamente el agua pasa a clarificadores donde se sedimenta el licor mixto; parte del mismo se recircula a la piscina de aeración extendida y otra parte es sometido a un proceso de deshidratación, el cual consiste en enviar el lodo a un espesador donde se sedimenta y se envía a un



filtrobanda; que mediante la adición de un agente polimérico coagulante de alto peso molecular, prensa el lodo para ser donado como materia prima para la elaboración de abono orgánico (compost). El agua de rebose en los clarificadores es descargada a una laguna de pulimento y por último, es enviada al Lago de Valencia. Por otra parte, todos los gases generados (Vahos) en los equipos y tanques del proceso anaeróbico, son purificados al hacerlos pasar por un filtro compost empacado con trozos de madera mojada, para finalmente liberarlos a la atmósfera. En la figura 1.1. se observa un diagrama simplificado de lo expuesto anteriormente.



Fuente: Guía Operacional de Tratamiento de Aguas, GOTAS 1999.

Figura 1.1: Diagrama de flujo de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

Entre los nutrientes que deben ser eliminados con propósito de dar cumplimiento al Decreto 3219 (Normas para la clasificación y el control de la calidad de las aguas de la cuenca del lago de Valencia) se encuentra el fósforo total en el agua residual, el cual no debe superar una concentración de 1 ppm; ya que, a concentraciones elevadas contribuye a la eutrofización en lagos, ríos, canales, etc. Éste proviene del prensado y



remojo del grano para la producción de la cerveza, lavados de planta, detergentes, alimentos descompuestos, desechos humanos, anticorrosivos y químicos utilizados para el mantenimiento de equipos. En su mayoría el fósforo total proviene del proceso de elaboración de cerveza y malta.

Por otra parte, en los últimos 4 años ha aumentado la demanda de cerveza y malta, originándose de manera proporcional un incremento en la producción; lo que ha afectado notablemente el tratamiento aeróbico; y por ende, el proceso de remoción de fósforo en el agua residual. Vale la pena mencionar que la PTAR no fue diseñada para obtener una concentración de fósforo total en el efluente menor a 1 ppm.

Lo mencionado anteriormente, tal como se muestra en la figura 1.2., ha afectado la concentración de fósforo total en el efluente de la PTAR de tal manera que supera la concentración de 1 ppm.

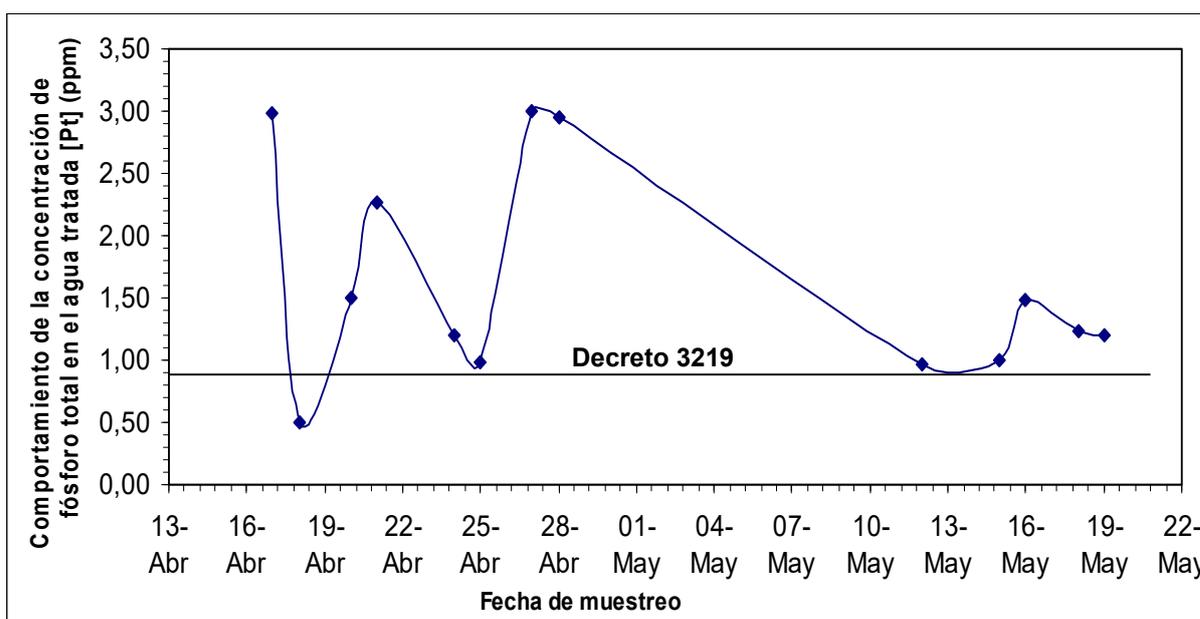


Figura 1.2: Comportamiento de la concentración de fósforo en los meses abril – mayo del año 2006 en el punto de muestreo Agua Tratada de la PTAR con un porcentaje de desvío promedio de 8 % de agua cruda a la piscina de aireación

La alternativa actual tomada por la empresa para controlar la concentración de fósforo total en el agua tratada ha sido aumentar entre un 20-30% el porcentaje de desviación del agua residual cruda a la piscina de aireación, a objeto de incrementar la carga de DQO que ya ha sido reducida de manera eficiente en el tratamiento



anaeróbico, promoviéndose de esta manera la reproducción de $\frac{1}{2}$ Kg de lodo aerobio por cada 1 Kg DBO, para que consuma el fósforo indispensable para su nutrición y reproducción celular. Sin embargo, esta alternativa genera problemas operacionales debido al exceso de lodo, elevados gastos económicos asociados al consumo de energía para proporcionar el oxígeno demandado por las bacterias existentes en el licor mixto, inestabilidad en el comportamiento de la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR y supervisión continua por parte del operador del porcentaje de desvío.

Respondiendo a lo antes expuesto y en la búsqueda de continuar con el crecimiento industrial sustentable sin producir impacto ambiental, se plantea como estrategia la evaluación de alternativas para reducir la concentración de fósforo total en el efluente de la PTAR con el propósito del cumplimiento de la norma establecida en el Decreto 3219, para lo cual se requiere el estudio del comportamiento de la concentración de fósforo en la planta de tratamiento de aguas residuales de la Cervecería Polar, C.A. Planta San Joaquín.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente en Cervecería Polar, C.A. Planta San Joaquín, se invierten importantes sumas de dinero asociada a energía eléctrica para mantener funcionando los rotores o aireadores que suministran el oxígeno necesario para alcanzar la máxima eficiencia de remoción de fósforo total por medio del tratamiento aeróbico, lo que promueve el aumento de la tasa de reproducción del lodo aerobio a tal punto que se generan problemas de manejo del mismo, taponamiento en tuberías, subdiseño de equipos, supervisión y control continuo del porcentaje de desvío. Por otra parte la planta se encuentra en una situación de vulnerabilidad con el MARN (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales) debido a la inestabilidad en el comportamiento de la concentración de fósforo en el efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

Tomando en cuenta esta situación, se plantea la interrogante de evaluar posibles alternativas para reducir la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR, mediante tratamiento químico y/o biológico del agua residual, a fin de reducir el porcentaje de desvío de agua residual cruda a la etapa de aireación y de esta manera



disminuir la incidencia de problemas operacionales, supervisión continua y gastos económicos en concepto de energía eléctrica.

1.2.1. Situación actual

El agua residual tratada por la planta de tratamiento de aguas residuales de la Cervecería Polar, C.A. Planta San Joaquín, posee una concentración de fósforo total mayor a la establecida en el Decreto 3219; esta situación ha obligado a la empresa a incrementar el porcentaje de desvío de agua cruda al proceso aerobio, a fin de no infringir con la ley ambiental, lo que ha generado gastos económicos, problemas de manejo del lodo aeróbico y supervisión exhaustiva.

En caso de que la Cervecería Polar, C.A. Planta San Joaquín, no trate de solucionar el problema planteado, traería como consecuencias:

- Comportamiento inestable de la concentración de fósforo total en el efluente de la PTAR.
- Gastos económicos asociados a elevado consumo de energía eléctrica.
- Reproducción excesiva de lodo aeróbico.
- Taponamiento en las tuberías de salida de lodo del clarificador.
- La capacidad del filtrobanda de prensar lodo estaría en condición de subdiseño.
- La capacidad del espesador de lodos sobrepasaría sus niveles operacionales.
- Malos olores por anoxia prolongada del lodo aeróbico.
- Liberación de nutrientes que posteriormente serán recirculados al sistema por la muerte o descomposición total del lodo.

1.2.2. Situación deseada

Cervecería Polar, C.A. Planta San Joaquín, requiere disponer de un estudio que determine la factibilidad de reducir la concentración de fósforo total en el efluente (agua tratada) de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales mediante métodos alternativos que garanticen mayor estabilidad en el comportamiento del mismo, para de esta manera cumplir con la norma establecida en el Decreto 3219 produciendo menor



impacto ambiental y disminuyendo la incidencia de problemas operacionales por excesiva reproducción de lodo aerobio.

Se propone desarrollar alternativas para reducir los gastos económicos asociados al consumo de energía eléctrica necesaria para efectuar la aireación extendida demandada por las bacterias que conforman el lodo, reducir la incidencia de problemas operacionales promovidos por la producción excesiva de lodo por parte de las piscinas de aireación extendida, en su función de tratar aeróbicamente el agua residual. Así como también, obtener una concentración de fósforo en el efluente de la planta de tratamiento de aguas menor a 1 ppm sin afectar otras variables y parámetros operacionales del proceso, mediante modificaciones en planta y tomando en cuenta una mejor relación costo beneficio para la empresa.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

Evaluar alternativas para reducir la concentración de fósforo total en el efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Cervecería Polar, C.A. Planta San Joaquín, con propósito del cumplimiento de la normativa ambiental estipulada en el Decreto 3219.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Determinar el comportamiento de la concentración de fósforo en la planta de tratamiento de aguas residuales, a fin de ubicar las zonas que deben ser sometidas a una evaluación para la generación de alternativas.
2. Plantear alternativas para la reducción de la concentración de fósforo total a nivel de laboratorio y de planta, a fin de seleccionar las soluciones al problema en estudio.
3. Implementar la alternativa seleccionada de reducción de la concentración de fósforo total a nivel de planta, a fin de determinar la efectividad del proceso.



4. Determinar el efecto del tratamiento seleccionado en el efluente de la PTAR, a fin de identificar cambios en el comportamiento del mismo.
5. Evaluar la función costo beneficio del proceso de reducción de la concentración de fósforo, a fin de verificar la factibilidad económica y operacional del proceso propuesto.

1.4. JUSTIFICACIÓN

Esta investigación tiene pertenencia social y ambiental puesto que, está destinada a la reducción de la concentración de fósforo total en el efluente de la planta con propósito de dar cumplimiento al Decreto 3219, logrando con ello contribuir al proyecto de recuperación del Lago de Valencia, el cual posee condiciones críticas de contaminación en agua.

En cuanto a la conveniencia de la empresa, esta investigación científica aportará una solución para reducir los gastos económicos asociados a la energía eléctrica consumida por las piscinas de aireación extendida, ayudando además a reducir la excesiva reproducción de lodo aerobio, el cual genera gastos adicionales y problemas en equipos, tuberías, entre otros. Es importante recalcar que durante la elaboración del presente trabajo de investigación se llevarán a cabo ensayos y análisis químicos que permitirán adquirir nuevos conocimientos y habilidades, además de reforzar los adquiridos a lo largo de la carrera universitaria, específicamente en el área de conservación ambiental, tratamiento de aguas, química analítica, fenómenos de transporte y diseño de procesos. Por otra parte, está el beneficio de ofrecer una experiencia en el ámbito laboral e industrial.

Entre las implicaciones prácticas esta el hecho de proporcionar una solución multifuncional, ya que aunque va orientada a disminuir la concentración de fósforo en el efluente para el cumplimiento de la norma, genera la disminución de gastos e incidencia de problemas operacionales.

De igual forma, esta investigación presenta un aporte metodológico importante, ya que se establecerá una metodología para la determinación del comportamiento de la concentración de fósforo en el agua de una PTAR, también se diseñará una estrategia



para remover el fósforo del agua residual, ofreciéndose así una ejemplificación de una alternativa para la solución de problemas similares en alguna de la numerosas plantas de tratamiento de aguas residuales a nivel industrial ó piloto.

Desde el punto de vista teórico es de relevancia para la Universidad de Carabobo, ya que podría contribuir al proceso de aprendizaje, referente al tratamiento de aguas residuales, específicamente en el área de: remoción de fósforo mediante tratamientos químicos y/o biológicos en el agua residual. Ofreciendo así, una fuente de información para los estudiantes interesados en el área y un antecedente para el desarrollo de futuras investigaciones afines.

1.5. LIMITACIONES

En el presente trabajo de investigación se encuentran algunas condiciones y restricciones que pudieran limitar la correcta y satisfactoria realización del mismo, como el tiempo establecido para su culminación en base al lapso de permanencia del autor en la empresa para el desarrollo de dicho proyecto. La cantidad de reactivos y disposición de los equipos necesarios para desarrollar el alto número de ensayos y pruebas necesarias, a fin de realizar el estudio experimental.

Entre otros aspectos esta el traslado del investigador al sitio de recolección de muestras y la posibilidad de obtenerlas en los puntos seleccionados estratégicamente, para el adecuado muestreo de las mismas.



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

En esta sección se presentan de manera simplificada los objetivos y conclusiones más importantes de otros trabajos cuyos objetivos generales los convierten en antecedentes de este proyecto y servirán como referencia a lo largo del desarrollo del mismo. Además de las bases teóricas que fundamentan esta investigación.

2.1. ANTECEDENTES

En el año 2003, Ramírez P. y Rodríguez L., realizaron el Trabajo de Grado titulado, **Evaluación a escala de laboratorio de la remoción de fósforo en la planta de tratamiento de aguas residuales La Mariposa utilizando lodos provenientes de la planta de potabilización Alejo Zuloaga**, presentado a la Universidad de Carabobo.

El trabajo mencionado tuvo como objetivo principal la evaluación a escala de laboratorio la remoción de fósforo del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales La Mariposa utilizando lodos de desecho provenientes de la planta de potabilización Alejo Zuloaga, con la finalidad de plantear posibles mejoras que contribuyan a aumentar la remoción de fósforo. Entre las conclusiones más importantes se encuentra que la planta de tratamiento La Mariposa opera eficientemente en cuanto a remoción de la DBO, DQO, nitrógeno amoniacal y sólidos suspendidos pero la remoción de fósforo es baja; no se obtuvieron resultados satisfactorios en cuanto a la aplicación del lodo de la unidad densificadota como agente removedor de fósforo, ya que la presencia de metales inhibe el crecimiento de las bacterias.

La similitud del trabajo citado con la presente investigación es que en ambos se evalúan alternativas de tratamiento biológico para la remoción de fósforo del agua residual, además de las similitudes que se presentan en el método de análisis químico para la determinación de fósforo en el laboratorio. Las diferencias radican en que en el trabajo de investigación a desarrollar se evaluarán como alternativas tratamientos químicos y se realizaran pruebas de campo para desarrollar el diseño de la alternativa



más adecuada. Por otra parte en este trabajo no se pretende evaluar la concentración de nitrógeno amoniacal, la DQO ni la DBO.

Para el año 2000, el trabajo de investigación de Woods N., titulado, **Recuperación de fósforo de las aguas residuales urbanas**, fue publicado en la Revista, Ingeniería Química, 365, 117-128. Madrid.

El objetivo del artículo científico, fue evaluar la viabilidad económica de la recuperación del fósforo para la industria europea de tratamiento de aguas residuales, y comparar los costos operativos de las principales alternativas de eliminación de fósforo y escoger la más rentable. Como resultados de los estudios discutidos en este artículo, se presentan las siguientes conclusiones: el proceso crystalactor es seleccionado como tecnología para la recuperación de fósforo, mediante la misma, la regeneración de lodos puede reducirse hasta un 49%, la recuperación resulta mas interesante en plantas que tratan aguas residuales con elevado contenido en fósforo y baja concentración de la DBO.

La principal semejanza entre ambos trabajos es el estudio del comportamiento del fósforo en el agua residual, y que tanto la recuperación como la remoción se realiza en aguas industriales. La principal diferencia radica en que el trabajo citado plantea una recuperación de fósforo para su posterior uso en las industrias de fosfatos y fertilizantes, mientras que el presente trabajo persigue como principal objetivo la búsqueda de alternativas para su eliminación.

Sanquiz L., En el año 2000, elaboró el trabajo de grado titulado, **Estudio de alternativas para disminuir el contenido de fósforo presente en los efluentes de una planta de tratamiento de una empresa farmacéutica**, presentado a la Universidad de Carabobo.

El objetivo general del citado estudio, fue evaluar alternativas de solución factibles, tanto técnica como económicamente que permitan disminuir la cantidad de fósforo presente en los efluentes de una planta de tratamiento en una empresa farmacéutica. Entre las conclusiones más importantes obtenidas, se tiene que el sistema de tratamiento que existe en la empresa no resulta suficiente para disminuir la



concentración de fósforo por debajo del nuevo valor establecido en la reglamentación ambiental por lo que es necesario implementar un tratamiento adicional. Además se encontró que la precipitación química utilizando sulfato de aluminio como precipitante es más eficiente removiendo fósforo que el sulfato férrico.

Entre la principal similitud que presenta la citada investigación con la actual es que se realizará una evaluación de alternativas a nivel de laboratorio para remover el fósforo del agua residual. Las diferencias entre ambos trabajos es que en la investigación a realizar, se evaluarán alternativas en el agua de desecho proveniente de un proceso cervecero, se realizarán pruebas de campo en función a los resultados obtenidos en el laboratorio y finalmente se evaluará la alternativa más factible técnica y económicamente.

Para el año 1999, el trabajo de investigación de Cortuelo L., titulado, **Eliminación de nutrientes en aguas residuales**, fue publicado en la revista, Ingeniería Química, 363, 139-145. Madrid.

El objetivo principal de la investigación mencionada, fue desarrollar múltiples procesos de base fisicoquímica y biológica que reduzcan las concentraciones de los compuestos nitrógeno y fósforo presentes en las aguas residuales. En dicha investigación se pudo concluir lo siguiente: durante el tratamiento biológico los compuestos orgánicos de fósforo y polifosfatos son retenidos por los lodos, por otra parte la precipitación química empleando una buena combinación entre el coagulante y el floculante puede conducir a rendimientos de eliminación de fósforo de hasta un 95%.

Las similitudes del citado trabajo con la investigación a desarrollar es que se realizará el estudio de alternativas para remover fósforo a través de tratamientos químicos y/o biológicos. Las diferencias existentes son que en el presente trabajo no se estudiarán las alternativas para remover nitrógeno amoniacal, y adicionalmente en el mismo se desarrollara una metodología para determinar las distintas formas fosfatadas en el agua residual, con el propósito de obtener datos concluyentes.



Hernández J. En el año 1996, realizó el trabajo de grado titulado, **Evaluación del funcionamiento de la planta de tratamiento anaeróbica y aeróbica con respecto a los niveles de nitrógeno y fósforo**, presentado a la Universidad de Carabobo.

El objetivo general de esta investigación fue analizar y estudiar el comportamiento de los niveles de nitrógeno y fósforo en la planta de tratamiento aeróbica una vez puesto en marcha en su totalidad el presente tratamiento anaeróbico. La conclusión más resaltante fue que la planta de tratamiento aeróbica resultó ser más eficiente en la eliminación de nutrientes.

Entre las similitudes del citado trabajo de investigación con el llevado a cabo, es que se estudiará el comportamiento del fósforo antes y después de los tratamientos biológicos. Entre las diferencias se tiene que: en esta investigación se realizará una metodología para poder evaluar el comportamiento de la concentración de fósforo en el agua residual. Se generará, diseñará e implementará a modo de prueba de campo una alternativa para reducir la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR.

Para el año 1996, Manzini S., elaboró el trabajo de grado titulado, **Evaluación y rediseño de una planta de tratamiento de aguas residuales en una industria de alimentos**, presentado a la Universidad de Carabobo.

El objetivo de este trabajo fue realizar una evaluación del funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa Proagro, C.A., a fin de lograr el correcto funcionamiento de la misma. La conclusión más importante de este trabajo fue que la inestabilidad ocasionada por la variación de la carga se soluciona mediante modificaciones a la laguna de oxidación y la instalación de un vertedero tipo V.

Este antecedente presenta similitud con la investigación que se va a llevar a cabo en el tipo de proceso que será estudiado, ya que el agua residual a tratar en ambos casos es proveniente de industrias de alimentos, donde las características microbiológicas de los organismos y su comportamiento son similares. Además en el presente se realizará una modificación en el diseño o rediseño de la PTAR. La diferencia específica es que este trabajo esta destinado única y exclusivamente a la remoción de fósforo total en el efluente de la PTAR.



En el año 1982, Jones L. y Rodríguez O., realizaron el trabajo de grado titulado, **Estudio comparativo de métodos analíticos para la determinación de ortofosfatos, fosfatos hidrolizables y fósforo total en aguas naturales y residuales**, presentado a la Universidad Central de Venezuela.

El citado trabajo de grado tuvo como objetivo general la evaluación y comparación de los diferentes métodos existentes para la determinación de las diferentes formas de fósforo que pueden estar presentes en aguas naturales y residuales. Entre las conclusiones mas importantes se tienen que: las muestras deben llevarse a un pH=7,00 ya que este influye en la absorbancia de los complejos y que la estabilidad encontrada en los complejos en orden decreciente es: complejo del método del ácido vanado molibdofosfórico, complejo del método del ácido ascórbico y complejo del método del cloruro estagnoso.

Este antecedente muestra similitud con la investigación que se va a llevar a cabo en la metodología de algunos de los análisis químicos que serán realizados. Las diferencias son, que en el presente trabajo se analizará la concentración de fósforo solo en el agua residual, se determinara un método operatorio para determinar las tipos de formas fosforadas que pueden existir en el agua residual, a objeto de observar como son afectadas en su paso por cada equipo de una PTAR.

2.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.2.1. Generalidades del agua residual

La comunidad genera residuos sólidos, gaseosos y líquidos. Los desechos líquidos, llamados "agua residual", se definen como la combinación de los residuos líquidos, o como aguas portadoras de residuos. Estas proceden tanto de residencias como instituciones públicas y establecimientos industriales o comerciales, a los que puede agregarse, eventualmente, aguas subterráneas, superficiales y pluviales contaminadas.

Toda corriente o cuerpo receptor de aguas de desecho posee una capacidad limitada para asimilar las cargas orgánicas contaminantes, descomponerlas y completar este proceso hasta que vuelva a su estado de pureza original, el cual se denomina



autopurificación y lo lleva a cabo la naturaleza por medios físicos, químicos y biológicos. Cuando las cargas orgánicas superan esta capacidad, se satura la corriente receptora por la acumulación y el estancamiento de agua residual, promoviendo la destrucción total de la flora y la fauna. Si se permite, la descomposición de materia orgánica que contiene puede conducir a la generación de grandes cantidades de gases tóxicos y malolientes. A este hecho cabe añadir la frecuente presencia o proliferación de numerosos microorganismos patógenos en el agua residual.

Determinados factores como el grado de estancamiento o velocidad del agua, temperatura, número y tipo de organismos vivos y condiciones químicas, son elementos clave para la determinación del potencial de autopurificación.

(GOTAS, 1999)

Variables fisicoquímicas importantes en el agua residual

DQO: La demanda química de oxígeno (DQO), se utiliza como una medida del equivalente de oxígeno del contenido de materia orgánica, de una muestra susceptible a oxidación, por un oxidante químico fuerte. Para las muestras de una fuente específica, la DQO puede relacionarse empíricamente con la DBO, el carbono orgánico, o la materia orgánica. La mayor parte de la materia orgánica resulta oxidada por una mezcla de los ácidos crómico y sulfúrico. Se somete a reflujo una muestra en una solución ácida fuerte con exceso conocido de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$). Después de la digestión, el $K_2Cr_2O_7$ no reducido que quede, se determina con sulfato de amonio ferroso, para determinar la cantidad de $K_2Cr_2O_7$ consumido y calcular la materia orgánica oxidable en términos de equivalente de oxígeno. Los haluros pueden interferir en el análisis, pero las interferencias pueden ser superadas en gran medida, aunque no del todo, mediante la formación de un complejo con el sulfato de mercurio.

(GOTAS, 1999)

DBO: La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es una prueba empírica, en la que se utilizan procedimientos estandarizados de laboratorio, para determinar los requerimientos relativos de oxígeno de las aguas residuales, efluentes y contaminadas. La prueba tiene su aplicación, mas extendida, en la determinación de las cargas residuales en las instalaciones de tratamiento y en la evaluación de la eficacia de extracción de DBO, de tales sistemas de tratamiento. La prueba mide el oxígeno



utilizado, durante un período de incubación especificado, para la degradación bioquímica de materia orgánica (requerimiento de carbono), y el oxígeno utilizado para oxidar materia orgánica, como los sulfuros y el ion ferroso. Los procedimientos de siembra y disolución proporcionan una valoración de DBO a un pH entre 6,5 y 7,5.

(GOTAS, 1999)

Fósforo: El fósforo se encuentra en las aguas naturales y residuales casi exclusivamente en forma de fosfatos, clasificados en ortofosfatos, fosfatos condensado piro, meta y otros polifosfatos, y los ligados orgánicamente. Se presentan en solución, partículas o detritos, o en los cuerpos de organismos acuáticos. El análisis del fósforo incluye dos pasos generales:

- Conversión de la forma fosforada en ortofosfato disuelto mediante digestión ácida
- Determinación calorimétrica del ortofosfato disuelto

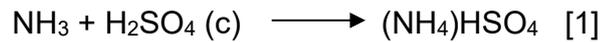
Dado que el fósforo se puede presentar en combinación con materia orgánica, un método de digestión para determinar fósforo total debe ser capaz de oxidar la materia orgánica eficazmente para liberar el fósforo como ortofosfato.

(GOTAS, 1999)

Nitrógeno: Las formas de nitrógeno de mayor interés en las aguas residuales son, por orden decreciente de su estado de oxidación, nitrato, nitrito, amoníaco y nitrógeno orgánico. Todas esas formas del nitrógeno, lo mismo que el nitrógeno gaseoso (N_2), son interconvertibles bioquímicamente y forman parte del ciclo de nitrógeno. El nitrógeno orgánico se define funcionalmente como nitrógeno ligado orgánicamente en el estado de oxidación trinegativo. No incluye a los compuestos orgánicos del nitrógeno, como por ejemplo en forma de azida, azina, azo, hidrazona, nitrato, nitrito, nitrilo, nitroso, oxima y semicarbazona, pero si incluye productos naturales, como las proteínas y péptidos, ácidos nucleicos y urea, y numerosos materiales orgánicos sintéticos. Analíticamente, el nitrógeno orgánico y el amoníaco se pueden determinar juntos y se han denominado "nitrógeno kjeldahl", un término que refleja la técnica utilizada en su determinación. Si se determina individualmente el nitrógeno kjeldahl y el amoniacal, se puede obtener el "nitrógeno orgánico" por diferencia. El nitrógeno orgánico también se obtiene eliminando el amoníaco antes de digerir la muestra según método kjeldahl. Las



sustancias orgánicas se convierten por incineración húmeda con ácido sulfúrico concentrado y peróxido de hidrógeno en CO_2 , H_2O y NH_3 . Este último reacciona con el ácido sulfúrico formando sulfato de amonio [1]:



Por un posterior tratamiento con soda cáustica se libera el amoníaco [2], el cual destila a un recipiente con cierta cantidad de ácido bórico al 2,0 % y es fijado por el ácido formando borato de amonio [3]:



Luego se titula con ácido sulfúrico 0,1 n hasta un pH de 4,80, convirtiendo el borato de amonio en sulfato de amonio [4]:



El pH 4,80 corresponde al punto promedio de equivalencia en la titulación del borato de amonio con el ácido sulfúrico. Este punto promedio es el resultado de pruebas realizadas, destilando y titulando soluciones de bajas y altas concentraciones de borato de amonio (pH 4,96 - pH 4,66). El punto teórico de equivalencia es a pH 4,76.

(GOTAS, 1999)

SST: (Sólidos suspendidos totales) Los Sólidos son materiales suspendidos o disueltos en aguas residuales. Su análisis es importante en el control de procesos de tratamiento biológico y físico en aguas residuales, y para evaluar el cumplimiento de las limitaciones que regulan su vertido. "Sólidos totales" es la expresión que se aplica a los residuos de material que quedan en un recipiente después de la evaporación de una muestra y su consecutivo secado en estufa a temperatura definida. Los sólidos totales incluyen los "sólidos totales suspendidos" y los "sólidos disueltos totales". Se evapora una muestra, correctamente mezclada, en una cápsula de porcelana previamente pesada y llevada a



peso constante, en una estufa a 103 – 105 °C. El incremento de peso sobre el de la cápsula de porcelana vacía representa los sólidos totales.

(GOTAS, 1999)

SSV: (Sólidos suspendidos volátiles) representa la concentración de biomasa suspendida (sedimentables y coloidales) ó disuelta en el agua residual.

(GOTAS, 1999)

Dureza: La dureza se expresa principalmente por la suma de los cationes metálicos divalentes, Ca^{2+} y Mg^{2+} . Estos cationes reaccionan con el jabón para formar precipitados y con otros iones presentes en el agua para formar incrustaciones en las calderas. Los iones que provocan dureza tienen su origen en el suelo y en las formaciones geológicas. La dureza se mide en ppm de CaCO_3 .

(GOTAS, 1999)

Alcalinidad: La capacidad del agua para aceptar los iones H^+ , es una medida de la capacidad neutralizadora ácida y se describe generalmente como la capacidad amortiguadora. La alcalinidad se mide en ppm de CaCO_3 .

(GOTAS, 1999)

Conductividad: Es una medida de la capacidad de una solución acuosa para transportar la corriente eléctrica. La corriente eléctrica es conducida en la solución mediante el movimiento de los iones y así cuanto mayor sea el número de sales disueltas mayor es la movilidad iónica y en consecuencia mayor magnitud de la conductividad. La conductividad se mide en $\mu\text{S}/\text{cm}$, por un lado el agua pura tiene una conductividad de $0,05 \mu\text{S}/\text{cm}$ y el agua de mar tiene una conductividad aproximada de $40.000 \mu\text{S}/\text{cm}$.

(GOTAS, 1999)

Turbidez: La turbidez en el agua es una medida de la nubosidad. Es causada por la presencia de la materia en suspensión la cual dispersa y absorbe la luz a gran profundidad. En los lagos, la turbidez es debida a las suspensiones coloidales o finas. Son notables los lagos limpios en los que la luz puede penetrar a gran profundidad. La turbidez se mide en ppm de SiO_2 .

(GOTAS, 1999)



Color: El color en el agua es producido por minerales disueltos, colorantes o ácidos húmicos de las plantas. La descomposición de la lignina produce compuestos coloreados de taninos y ácidos húmicos. Este último produce un color pardo-amarillo a pardo-negro. Los residuos coloreados, incluyendo las plantas de colorante, o pulpa y las de papel, también causan color, como la presencia de hierro, magnesio y plancton. El color se mide en ppm de platino y en ríos oscila entre 5 y 200 ppm.

(GOTAS, 1999)

2.2.2. Tratamiento anaeróbico del agua residual

El tratamiento anaeróbico se refiere a la remoción de materia orgánica del agua residual sin la inyección de aire. El metabolismo de las bacterias anaeróbicas es muy lento por lo que se necesitan mayores tiempos de residencia del agua residual a tratar en un proceso anaeróbico que en uno aeróbico, lo que se traduce en una baja tasa de crecimiento celular. Ello implica que sólo una pequeña fracción del residuo orgánico biodegradable es transformada en nuevas células, la mayor parte es convertida en metano, un gas combustible, lo que lo convierte en un producto final útil. Esto significa que se tiene una menor acumulación de lodo producido por el proceso de digestión anaeróbica.

La conversión anaeróbica de materia orgánica hasta productos finales inofensivos es compleja, resulta de un gran número de reacciones interdependientes y simultáneas. El proceso de digestión puede ser clasificado en cuatro etapas principales íntimamente relacionadas. Estas se nombran a continuación:

- Hidrólisis
- Acidogénesis
- Acetogénesis
- Metanogénesis

Bajo condiciones de equilibrio, todas estas reacciones deben estar ocurriendo con la misma velocidad puesto que no hay acumulación de productos intermedios. La bacteria fermentadora realiza las dos primeras etapas de degradación de la materia orgánica (hidrólisis y acidogénesis). Un segundo grupo de bacterias, acetogénicas,



sintetiza los productos de la acidogénesis, dando lugar principalmente al acetato entre otros compuestos como CO_2 , H_2 . La bacteria metanogénica convierte este acetato y el H_2 en metano consumiendo CO_2 para ello. Esta también transforma otros compuestos como metanol, formato, monóxido de carbono y metil aminas, que son de menor importancia en la mayoría de los procesos de digestión anaeróbica.

Únicamente las bacterias acetogénicas y metanogénicas son estrictamente anaeróbicas, las hidrolíticas y acidogénicas se componen de bacterias facultativas y anaerobias. Las bacterias facultativas son aquellas que pueden vivir tanto en la presencia de oxígeno como en su ausencia.

(GOTAS, 1999)

2.2.3. Tratamiento aeróbico del agua residual

El tratamiento aeróbico es un proceso biológico que emplea las reacciones metabólicas de los microorganismos para producir un efluente de calidad aceptable, mediante la remoción de sustancias que tienen una demanda de oxígeno (materia orgánica). Este método de tratamiento, considerado un proceso de tratamiento secundario, generalmente sigue un tratamiento primario de separación de sólidos de tamaño mayor a 3mm.

La mayoría de los procesos de lodos activados (lodos aeróbicos) son empleados para degradar DBO carbónico. También es posible diseñar y operar el sistema con el fin de oxidar amoníaco (nitrificación). Muchas plantas son diseñadas para alcanzar la nitrificación. Otras modificaciones del sistema incluyen la remoción de fósforo y desnitrificación biológica.

En un sistema de tratamiento aeróbico, por lo general, se tienen las unidades que se describen a continuación. El agua residual entra en un tanque o laguna aireada donde la biomasa, previamente generada, entra en contacto con el afluente. La materia orgánica es una fuente de carbón y energía para el crecimiento de las células, y es convertida en tejido celular y productos finales de la oxidación (principalmente dióxido de carbono).



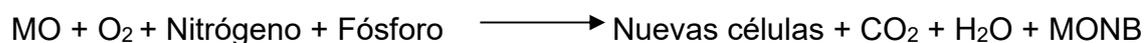
El contenido de las piscinas de aireación (agua residual mezclada con la biomasa) es llamado licor mixto. La masa biológica es referida a los sólidos suspendidos del licor mixto (MLSS) o a los sólidos suspendidos volátiles del licor mixto (MLVSS) y está constituido principalmente por microorganismos, materia suspendida inerte, y materia suspendida no biodegradable.

Los microorganismos están compuestos por un 70 a 90 % de materia orgánica y un 10 a 30 % de materia inorgánica. El crecimiento de las células varía dependiendo de la composición química del agua residual y las características específicas de los organismos en la biomasa.

Mientras que el licor mixto abandona la unidad de aireación, un clarificador por gravedad es utilizado para separar los sólidos suspendidos (SS) del agua residual tratada. Los sólidos biológicos concentrados son recirculados hacia las piscinas de aireación para mantener una determinada concentración de población de microorganismos para tratar el agua residual. Como los microorganismos son continuamente producidos, se prevé una forma de retirar parte del lodo generado. Generalmente, esto es retirado del clarificador, aún cuando este puede ser retirado directamente de la piscina de aireación. Dependiendo del diseño y operación del proceso, es posible maximizar o minimizar la producción de lodo aeróbico.

En el proceso de lodos activados, el agua residual entra en el tanque de aireación donde se lleva a cabo la reacción bioquímica en la que la materia orgánica contenida en el agua residual es retirada. Ello se ilustra como sigue:

células



Donde:

MO: Materia Orgánica (Biodegradable + No Biodegradable)

MONB: Materia Orgánica No Biodegradable

(GOTAS, 1999)

Microbiología del lodo activado aerobio

Desde el punto de vista microbiológico, la especie predominante que se desarrolle en el sistema dependerá de las características del agua residual, las condiciones ambientales, el diseño del proceso, y el modo de operación de la planta. El



éxito de una planta de lodos activados depende del cultivo de una comunidad biológica que remueva y asimile el material de desecho, formando flóculos sedimentables para producir un lodo concentrado a recircular.

Dos tipos básicos de microorganismos están presentes en el lodo activado, vegetales y animales. Los vegetales incluyen las bacterias, y en menor proporción algas y hongos; de estos, las bacterias son las más importantes. Estas son las principales responsables de la remoción de materia orgánica del agua residual. Algas y hongos también están presentes pero no juegan un papel crucial. Dentro de los animales se encuentran los protozoarios, crustáceos y rotíferos. Estos se alimentan de bacterias dispersas que no se sedimentan bien, colaborando de forma activa con el pulimento del efluente.

Aún cuando la comunidad de microorganismos esté dominada por bacterias heterotróficas; aquellas que requieren de compuestos orgánicos como fuente de carbón y energía, existirá una población de hongos y protozoarios. Las bacterias autótrofas, nitrificadoras, están presentes en diferentes cantidades, dependiendo del modo de operación y las concentraciones de nitrógeno y carbón presentes. Los rotíferos son encontrados con mayor frecuencia en sistemas con largos períodos de aireación (6 a 30 horas) o cuando las edades del lodo superan los 10 días.

A continuación se presentan cada uno de los grupos nombrados hasta ahora:

Bacterias: Las bacterias estarán presentes en tamaños que varían desde los micrones hasta colonias gelatinosas visibles (zooglea). Algunas de las bacterias en los lodos activados son aeróbicas estrictas, y no pueden vivir en condiciones anaeróbicas. El lodo activado puede también contener esporas de bacterias anaeróbicas estrictas.

La mayoría de las bacterias presentes en el lodo activado son anaeróbicas facultativas, es decir, que pueden vivir tanto en ausencia como en la presencia de oxígeno molecular (disuelto). Esto es crítico para garantizar la sobrevivencia del lodo activado durante períodos de deficiencia de oxígeno. Pero es importante mantener las condiciones aerobias dado que estas bacterias pueden generar problemas de olores y poca sedimentabilidad ante condiciones anaeróbicas. El bajo pH, bajo oxígeno, bajo nitrógeno y fósforo, y/o altos carbohidratos provocan el crecimiento de los organismos

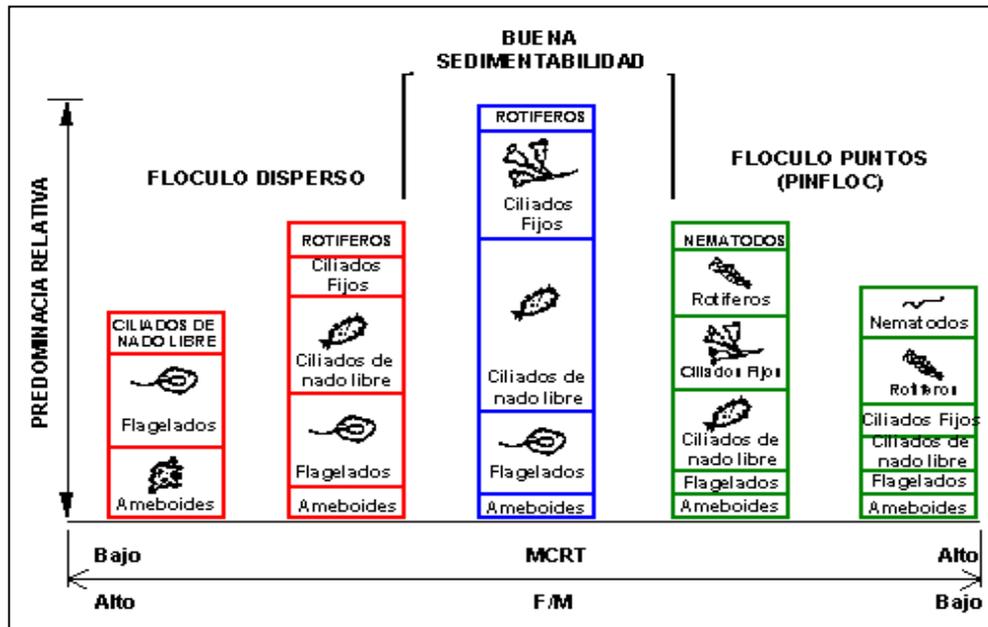


filamentosos en el lodo activado, lo que puede llevar a problemas en la separación de los sólidos del sistema.

Protozoarios: Los protozoarios son microorganismos unicelulares rodeados por una membrana. Estos pueden ingerir alimentos sólidos como bacterias y partículas de tamaño coloidal. Los protozoarios ciliados suelen ser la forma más común, pudiéndose identificar más de 200 especies de protozoarios en piscinas de aireación. Casi todos los miembros de la familia de los protozoarios se distinguen entre si por su tipo de organelo locomotor (flagelo,seudópodo, o cilios). Por su tamaño -10 a 200 micrones, o aproximadamente uno o dos órdenes de magnitud más grandes que las bacterias- y su metabolismo, los protozoarios pueden ser empleados como un indicador biológico de la operación. La mayoría de los protozoarios son aeróbicos estrictos, por lo que son excelentes indicadores de un ambiente aeróbico. Algunos protozoarios, aún así, pueden sobrevivir hasta 12 horas bajo anaerobiosis. Los protozoarios son mucho más sensibles a condiciones tóxicas que las bacterias, y su ausencia o reducción de movilidad puede indicar un problema de toxicidad. Un número substancial de protozoarios en el licor mixto, por lo general reflejan un sistema de lodos activados estable y bien operado.

Rotíferos: Existen más de 1500 especies de rotíferos (o rotatorios) descritos. Son formas de vida de mayor orden, siendo organismos multicelulares de mayor tamaño que los protozoarios. Son capaces de ingerir partículas del tamaño de un flóculo y microbios individuales. Los rotíferos son aeróbicos estrictos, como los protozoarios, y son encontrados en sistemas de lodos activados muy estables y de edades de lodo altas. La mayoría de los rotíferos miden de 0.1 a 1 mm de largo, esto significa que son apenas mayores que los protozoarios ciliados más largos. Su cuerpo está conformado por unas 1000 células. El cuerpo, por lo general, es transparente aunque algunos rotíferos son verdes, anaranjados, rojos o de color marrón por la coloración de su aparato digestivo. El cuerpo largo o saquiforme de estos organismos está cubierto por una cutícula bien definida. En uno de sus extremos posee un órgano ciliado denominado corona, característico de todos los miembros de esta familia.

(GOTAS, 1999)



Fuente: Guía Operacional de Tratamiento de Aguas, GOTAS 1999.

Figura 2.1: Calidad del licor mixto en función a la biodiversidad de microorganismos presentes en el mismo

2.2.4. La eutrofización, control y clasificación

Un río, un lago o un embalse sufren eutrofización cuando sus aguas se enriquecen en nutrientes (nitrógeno, fósforo), lo que facilita la proliferación de las algas y otros organismos.

Cuando las algas mueren son descompuestas por las bacterias en procesos aeróbicos que consumen el oxígeno. Al terminarse el oxígeno muchos restos orgánicos quedan depositados en el fondo sufriendo procesos anaeróbicos que desprenden H_2S (olor desagradable) y otros gases, dando un aspecto nauseabundo a las aguas en los casos de eutrofización extrema y las aguas dejan de ser aptas para la mayor parte de los seres vivos. El resultado final es un ecosistema casi destruido.

Las principales fuentes de eutrofización son: Los vertidos urbanos, que llevan detergentes que aportan fosfatos y desechos orgánicos de origen fecal que aportan nitratos al agua y los vertidos ganaderos y agrícolas, que aportan fertilizantes, desechos orgánicos y otros residuos ricos en fosfatos y nitratos.



Las principales características que presenta un lago eutrófico son: Las algas proliferan excesivamente, la luz penetra con dificultad en el agua, las aguas son turbias, hay carencia de oxígeno, los seres vivos que se encuentran son los característicos de las aguas pobres en oxígeno.

El proceso de eutrofización es fácilmente previsible si se toman medidas tales como:

- Usar un tratamiento avanzado de los desechos para remover los fosfatos provenientes de las plantas industriales y de tratamiento antes de que lleguen a un lago.
- Prohibir o establecer límites bajos de fosfatos para los detergentes.
- A los agricultores se les puede pedir que planten árboles entre sus campos y aguas superficiales.

(Winkler, 1994)

2.2.5. El fósforo en el agua residual

Los compuestos de fósforo son componentes característicos de los organismos vivientes y son liberados por la descomposición de las células, de manera que los residuos humanos y animales y las aguas residuales procedentes de industrias que poseen materiales biológicos; como la industria alimentaria, constituyen las fuentes principales de los compuestos de fósforo. Los detergentes, tanto para uso doméstico como industrial contienen frecuentemente fosfato para aumentar la efectividad del producto, y el contenido de fósforo de las aguas negras de origen doméstico se origina de los residuos humanos y los detergentes en proporciones aproximadamente iguales. Las industrias "biológicas" acostumbran también efectuar frecuente lavados de planta y contribuyen así compuestos orgánicos procedentes de los detergentes así como los de fuentes orgánicas.

Otras fuentes de aguas residuales que contengan fósforo, aparte de las industrias biológicas, son las operaciones donde se fabrican fosfatos y ácido fosfórico, muy especialmente la industria de los fertilizantes, la industria de acabado de los metales, y los compuestos de fósforo tienen mucho uso en general para la inhibición de



las incrustaciones en las calderas, intercambiadores de calor, circuitos de enfriamiento y como un inhibidor de la corrosión en general.

Los compuestos de fósforo que se encuentran en las aguas residuales son de tres tipos principalmente, ortofosfatos, polifosfatos y compuestos de fósforo orgánico.

Los ortofosfatos existen en varias formas diferentes, en equilibrio unas con otras, fosfato (PO_4^{3-}), fosfato monoácido (HPO_4^{2-}), fosfato ácido (H_2PO_4^-) y ácido fosfórico no ionizado (H_3PO_4). Para niveles de pH cerca del punto de neutralidad predominan los iones de fosfato monoácido (HPO_4^{2-}).

Los polifosfatos o fosfatos "condensados" se pueden considerar como polímeros de condensación del fosfato e incluyen formas tales como $\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$, $\text{P}_3\text{O}_{10}^{5-}$, y $\text{P}_3\text{O}_9^{3-}$. Los polifosfatos se utilizan en los detergentes y también lo sintetizan los organismos vivos. La síntesis bacteriana de los polifosfatos es el mecanismo clave en los procesos de remoción biológica de los fosfatos. Los polifosfatos forman ortofosfatos cuando se hidrolizan completamente y los compuestos de fósforo orgánico también se descomponen para formar ortofosfatos.

Las tres formas del fósforo están presentes en las aguas residuales domésticas, y el fósforo también se encuentra en los procesos de tratamiento de agua residual, formando parte del sobrenadante de la digestión de los lodos. Durante el tratamiento biológico, los compuestos de fósforo orgánico y la mayoría de los polifosfatos se convierten en ortofosfatos.

El fósforo es esencial para el crecimiento de los microorganismos y puede ser el nutriente limitador de la productividad primaria de un cuerpo en el agua. En los casos en que constituye el nutriente limitador del crecimiento, la descarga de aguas residuales brutas o tratadas, drenados agrícolas o ciertos residuos industriales a esa agua puede estimular el crecimiento del micro y macroorganismos acuáticos fotosintéticos en cantidades molestas.

Los fosfatos pueden aparecer también en los sedimentos de fondos y en cienos biológicos, tanto en formas inorgánicas precipitadas como incorporados a cuerpos orgánicos.

(Winkler, 1994)



2.2.6. Métodos espectrofotométricos para determinar fósforo

El análisis del fósforo incluye dos pasos generales en los métodos: a) conversión de la forma fosforada en ortofosfato disuelto, b) determinación colorimétrica del ortofosfato disuelto. La separación del fósforo en sus varias formas se define analíticamente, pero se ha seleccionado las diferenciaciones analíticas de modo que puedan utilizarse con fines interpretativos.

La filtración a través de un filtro de membrana de 0,45 μm de diámetro del poro separa las formas disueltas del fósforo de las suspendidas. No se pretende que esa filtración sea una separación real de las formas suspendidas y disueltas del fósforo: es solo una técnica analítica cómoda y repetible destinada a conseguir una separación grosso modo.

Se ha elegido la filtración por membrana en lugar de la filtración en profundidad por la mayor probabilidad de obtener una separación regular de las partículas por tamaños. Para mejorar la tasa de filtración se puede hacer una prefiltración a través de fibra de vidrio.

Los fosfatos que responden a las pruebas colorimétricas sin hidrólisis o digestión oxidante previas en la muestra se denominan fósforo reactivo (ortofosfato). Aunque el fósforo reactivo es sobretodo una medida del ortofosfato es inevitable una pequeña fracción de algún fosfato condensado presente, hidrolizado normalmente en el procedimiento. El fósforo reactivo se encuentra en las formas disueltas y suspendidas.

La hidrólisis ácida a la temperatura de ebullición del agua transforma los fosfatos condensados, disueltos y en partículas en ortofosfato disuelto. La hidrólisis libera inevitablemente algo de fosfato a partir de los compuestos orgánicos; pero puede reducirse al mínimo eligiendo cuidadosamente la fuerza del ácido y el tiempo y temperatura de la hidrólisis. Para esta fracción es preferible el término "fósforo hidrolizable por ácido" al de "fosfato condensado".

Las fracciones de fosfato convertidas en ortofosfato solo por destrucción oxidante de la materia orgánica presente se consideran fósforo "orgánico" o "ligado orgánicamente". La intensidad de la oxidación requerida para esta conversión depende de la forma del fósforo orgánico presente y, hasta cierto punto, de su cantidad. Al igual



que el fósforo reactivo y el hidrolizable con ácido, el fósforo orgánico se encuentra tanto en la fracción disuelta como en la suspendida.

Tanto el fósforo total como las fracciones disueltas y suspendidas pueden dividirse analíticamente en los tres tipos químicos descritos: reactivo, hidrolizable con ácido y fósforo orgánico.

a) Método de digestión: Dado que el fósforo se puede presentar en combinación con materia orgánica un método de digestión para determinar fósforo total debe ser capaz de oxidar la materia orgánica eficazmente para liberar el fósforo como ortofosfato. Se ofrecen tres métodos de digestión. El método de ácido perclórico, el más drástico y lento, se recomienda solo para muestras especialmente difíciles, como los sedimentos. El método del ácido nítrico - ácido sulfúrico, se recomienda para la mayoría de las muestras. El método más sencillo con diferencia es la técnica de oxidación con persulfato. Se recomienda comprobar este método en relación con una o más técnicas de digestión drástica, adoptándolo si se obtienen recuperaciones idénticas. Tras la digestión determínese el ortofosfato liberado por el método colorimétrico correspondiente. En cuestiones de interferencias y concentración mínima detectable, el método colorimétrico está por encima del procedimiento de digestión.

b) Métodos colorimétricos: Se describen tres métodos para determinación de ortofosfato. La elección depende considerablemente de la concentración de ortofosfato. El método del ácido vanadomolibdofosfórico es más útil para análisis de rutina en el rango de 1 a 20 ppm, el principio de este método consiste en una solución diluida de ortofosfato, el molibdato amónico reacciona en condiciones ácidas para formar heteropoliácido, ácido molibdofosfórico, que en presencia de vanadio, se forma ácido vanadomolibdofosfórico amarillo, donde la intensidad del color amarillo es proporcional a la concentración de fósforo.

El método de cloruro estannoso es más adecuado para el rango de 0,01 a 6 ppm se recomienda un paso de extracción para los niveles más bajos de este rango, cuando haya que superar interferencias, el principio de este método consiste en formar ácido molibdofosfórico que se reduce con cloruro estannoso a azul de molibdeno.

El método de ácido ascórbico es utilizado para el mismo rango que el del método de cloruro estannoso; en este, el molibdato amónico y el tartrato antimonílico potásico



reaccionan en medio ácido con ortofosfato para formar un ácido heteropoliácido fosfomolibdico que se reduce a azul de molibdeno, de color intenso por el ácido ascórbico.

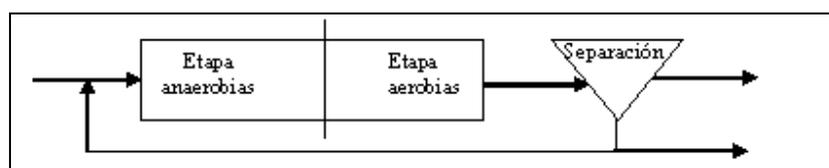
(APHA, AWWA, WPCF, 1998)

2.2.7. Tratamientos para la remoción de fósforo

Proceso A/O (Eliminación de fósforo en la corriente principal)

El proceso A/O se utiliza para llevar a cabo conjuntamente la oxidación de carbono y eliminación de fósforo del agua residual. El proceso A/O es un sistema de cultivo en suspensión de fango único que combina secuencialmente etapas anaerobias y aerobias (Figura 2.2.). Si se quiere que, adicionalmente, se produzca la nitrificación, es necesario procurar el suficiente tiempo de detención en la fase aerobia. El fango sedimentado se recircula a la entrada del reactor y se mezcla con el agua residual entrante. Bajo condiciones anaerobias, el fósforo presente en el agua residual y la masa residual recirculada se libera en forma de fosfatos solubles. En esta etapa también se produce una cierta eliminación de DBO. A continuación, el fósforo es asimilado por la masa celular de la zona aerobia. El fósforo se separa de la corriente líquida a través de la purga de fango activado. La concentración de fósforo en el efluente depende, principalmente, de la relación DBO/fósforo en el agua residual a tratar. Se ha observado que cuando esta relación es mayor a 10:1, se pueden alcanzar concentraciones de fósforo soluble en el efluente iguales o inferiores a 1 ppm. En los casos en los que la relación DBO/fósforo es inferior a 10:1, para conseguir concentraciones bajas de fósforo en el efluente, se pueden añadir sales metálicas al proceso.

(Girard, 1999)



Fuente: Ingeniería Ambiental, Girard Kiely 1999.

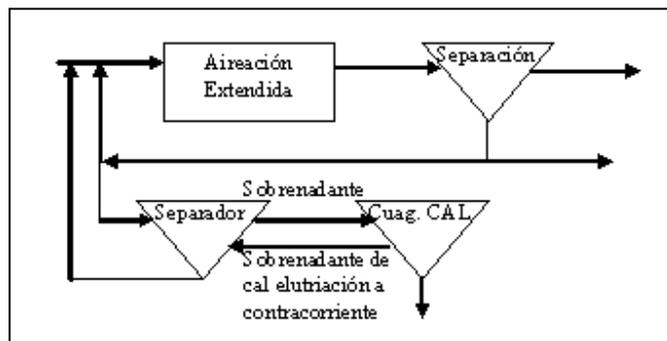
Figura 2.2: Diagrama de proceso biológico de eliminación conjunta de fósforo y nitrógeno A/O



Proceso Phostrip (Eliminación de fósforo en la corriente auxiliar)

En el proceso Phostrip, también patentado, se desvía a un tanque aerobio de eliminación de fósforo, una parte del fango de recirculación del proceso de tratamiento biológico (véase figura 2.3.). EL tiempo de retención en el tanque anaeróbico varía, normalmente, entre 8 y 10 horas. El fósforo liberado en este tanque se extrae junto con los sobrenadantes, y el fango activado de bajo contenido de fósforo se recircula al tanque de aireación. El sobrenadante rico en fósforo se trata con cal u otro coagulante en un tanque independiente, y se conduce a los tanques de decantación primaria o a un tanque de floculación/clarificación independiente para separar los sólidos. El fósforo se extrae del sistema como componente del precipitado químico. Los sistemas Phostrip diseñados con criterios conservadores y los sistemas de fangos activados asociados son capaces de conseguir, consistentemente, efluentes con contenidos totales de fósforo inferiores a 1,5 ppm antes de la filtración.

(Winkler, 1994)



Fuente: Tratamiento Biológico de Aguas de Desecho, Winkler 1994.

Figura 2.3: Diagrama de proceso biológico de eliminación de fósforo Phostrip

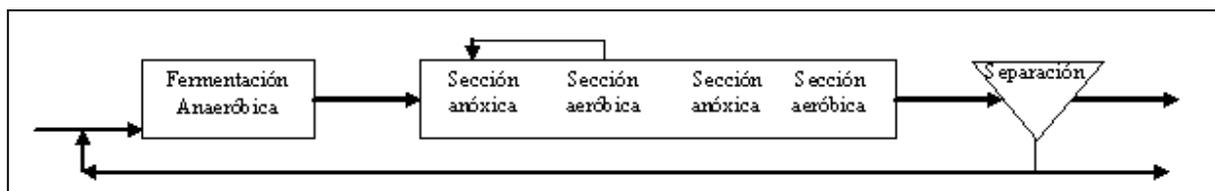
Proceso Bardenpho

El proceso Bardenpho propone la exposición del licor mixto a secuencias alternadas de condiciones anóxicas y aerobias con alguna recirculación a la primera zona anóxica, forzando a los microorganismos a consumir cantidades de fósforo superiores a los niveles de consumo normales. El fósforo, no solo se emplea para el mantenimiento celular, síntesis y transporte de energía, sino también se almacena para su uso posterior. El fango que contiene exceso de fósforo se desecha del sistema. Inicialmente este proceso estuvo diseñado para la eliminación de nitrógeno y después de investigar



más, resulto evidente el consumo de fósforo, por ello fue puesta en operación una etapa adicional, llamada la etapa de fermentación, delante de la primera etapa anóxica, (véase figura 2.4.), y la aplicación del proceso produjo niveles promedio de fósforo de 0,8 ppm.

(Winkler, 1994)



Fuente: Tratamiento Biológico de Aguas de Desecho, Winkler 1994.

Figura 2.4: Diagrama de proceso biológico de eliminación de fósforo Bardenpho

Remoción Físicoquímica del fósforo

Los fosfatos son precipitados por la adición de cal o compuestos de aluminio o hierro, conocidos como coagulantes. Luego se separa el precipitado en una unidad de sedimentación. Todos los polifosfatos se hidrolizan en forma gradual, en solución acuosa, y se representan a la forma (PO_4^{3-}) de la cual se obtuvieron.

Al añadir la cal, los iones de calcio y ortofosfato forman hidroxiapatito, $\text{Ca}_5(\text{OH})(\text{PO}_4)_3$, y como la cal no es una sal de calcio, el proceso no introduce solutos adicionales indeseables en las aguas residuales. No obstante, se requiere un valor alto de pH, y puede que haya que corregirlo antes del tratamiento biológico.

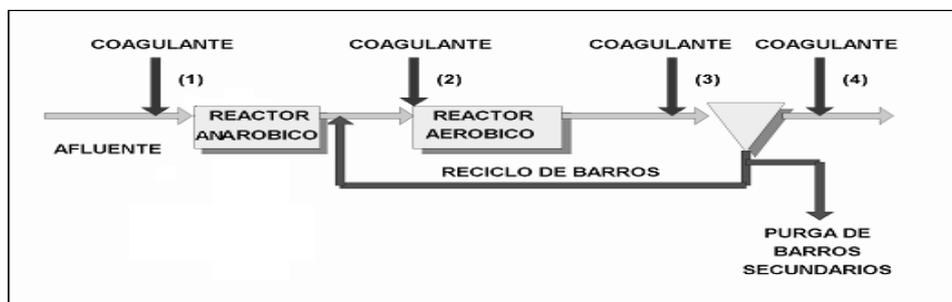
Los iones de aluminio se añaden en forma de alumbre, sulfato de aluminio hidratado, para precipitarse como fosfato de aluminio. El proceso causa descenso del pH y la introducción en el agua residual de iones sulfato adicionales. El aluminato de sodio, NaAlO_2 , es una fuente alternativa de aluminio. Dicho aluminato precipita fosfato de aluminio, aumenta el pH e introduce iones sodio adicionales.

El cloruro férrico y los sulfatos ferrosos y férrico son las sales de hierro utilizadas en la precipitación del fósforo, lo que causa el descenso del pH y la introducción del anión apropiado. Las aguas residuales que contienen hierro, como el licor del baño ácido para limpiar metales, que contienen ácidos libres se utilizan también como fuentes de hierro.



Los coagulantes se pueden añadir a varias etapas de los sistemas de tratamiento biológico, antes del asentamiento primario, en la etapa de aireación ó justamente antes de la clarificación y después de la clarificación y terminación del tratamiento. Cuando se utiliza la cal, con sus problemas asociados de pH, solo resulta adecuada la coagulación primaria. La coagulación antes del asentamiento primario aumenta la sedimentación y reduce la carga sobre la etapa de tratamiento aeróbico. El precipitado actúa como acondicionador de los lodos, lo que ayuda en la manipulación y tratamiento posteriores de ellos. La desventaja de la coagulación primaria es que una porción significativa del fósforo presente en dicha etapa puede que no este presente como ortofosfato y será mas difícil de separar. Esta coagulación pasará a través de la etapa primaria y se convertirá a ortofosfato en la etapa de tratamiento aeróbico. La remoción después del tratamiento biológico, como una adición o como una alternativa a la coagulación primaria, presenta la ventaja adicional aparte de la remoción de fósforo, de proveer una etapa de retención en el caso de un excesivo rebose de lodo biológicos debido al mal funcionamiento de la operación. Ya habrá ocurrido en esta etapa una conversión casi completa de fósforo a ortofosfato. La adición de coagulantes en la etapa de aireación de lodos activados puede aumentar el asentamiento de los lodos en el clarificador. La turbulencia en el tanque de aireación puede romper los flóculos químicos, por lo que se prefiere la adición entre el tanque de aireación y el clarificador. La coagulación primaria utilizando la cal puede ser provechosa para la nitrificación en la etapa de aireación subsiguiente, puesto que puede producir el medio débilmente alcalino preferido por las bacterias nitrificantes.

(Winkler, 1994)



Fuente: Tratamiento Biológico de Aguas de Desecho, Winkler 1994.

Figura 2.5: Posibles puntos de dosificación de coagulante para el tratamiento fisicoquímico de remoción de fósforo



2.2.8. Ensayo de prueba de jarras y variables de calidad cualitativas

Ensayo de prueba de jarras

El ensayo de jarras es un procedimiento que busca simular el proceso de coagulación-floculación tal como ocurre en planta. El experimento consiste en colocar muestras en varias jarras donde se agregan cantidades variables de coagulante y floculante durante cierto periodo de agitación, el contenido residual sedimentará por gravedad posteriormente.

El uso más común del ensayo es el de estimar la dosis óptima de coagulante y/o floculante. Sin embargo es una herramienta versátil que puede usarse para investigar muchas variables o parámetros en el proceso de clarificación y/o drenaje de efluentes, a continuación se encuentran enumerados los diferentes usos del ensayo de jarra:

- 1) Estimar dosis óptima de coagulante(s) y/o floculante(s).
- 2) Determinar pH óptimo de coagulación.
- 3) Estimar velocidad de floculación.
- 4) Evaluar el comportamiento de agentes floculantes y ayudantes de coagulación.
- 5) Estimar la velocidad de sedimentación.
- 6) Establecer guías para fijar los parámetros de diseño de una planta, tales como tiempo de mezcla rápida, intensidad de la misma, velocidad de sedimentación o carga hidráulica, etc.

(Arboleda, 2000)

Variables de calidad cualitativas en el ensayo de prueba de jarras

a) Tamaño del flóculo producido: Se observa el tamaño del flóculo producido y se le evalúa cualitativamente según sus características. Puede expresarse su tamaño en mm de acuerdo con el comparador desarrollado por el Water Research Institute (WRA) de Inglaterra (véase figura B.3.), ó según el índice de Wilcomb que se incluye en la tabla B.1. Se escoge como dosis óptima la de la jarra que produce una partícula más grande, de mayor velocidad de asentamiento aparente y que deje ver el agua más cristalina entre los flóculos. Esta determinación subjetiva, depende del criterio del observador.

b) Tiempo inicial de formación del flóculo: Determinar, en segundos, el tiempo que tarda en aparecer la etapa de formación del flóculo, es uno de los sistemas para



calificar la velocidad de reacción. La iluminación de la base del agitador ayuda en esta determinación. Ni aún así suele ser fácil, pues el flóculo recién formado suele ser incoloro. Por otra parte, el flóculo que se forma más rápidamente no necesariamente es el mejor. En esta evaluación debe tenerse en cuenta la diferencia de tiempo con que se agregaron los coagulantes a los vasos d precipitado.

(Arboleda, 2000)



CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

Esta sección engloba lo relacionado a la manera en que se llevó a cabo la investigación, para poder cumplir con los objetivos planteados.

Para llevar a cabo la investigación, se plantea una metodología que está basada en una serie de pasos lógicos y secuenciales que se describen de forma breve, siguiendo las directrices de los objetivos específicos planteados de manera que faciliten la comprensión de esta metodología.

Según los objetivos planteados, la investigación es de tipo proyecto factible (Méndez, 1998), ya que, durante el desarrollo de la investigación se pretende crear una propuesta para ser incorporada al proceso de tratamiento de aguas residuales de la planta, ofreciéndose así, un tratamiento para la remoción de fósforo de las aguas de desecho provenientes de una industria cervecera.

En cuanto a la estrategia o diseño de la investigación, es del tipo experimental (Méndez, 1998), ya que se manipularán intencionalmente las variables para observar su incidencia en el comportamiento de la variable a controlar, para finalmente obtener un proceso en donde, mediante el ajuste de las variables manipuladas, se garantizará la mejor condición de operación para la remoción de fósforo en el agua residual.

Para el desarrollo sistemático de la investigación (DSI), se plantean las siguientes fases:

- Determinación del comportamiento de la concentración de fósforo.
- Plantear alternativas para reducir la concentración de fósforo en el efluente de la planta de tratamiento.
- Especificación del proceso de remoción de fósforo en planta.
- Determinar el efecto del tratamiento seleccionado en el efluente de la PTAR.
- Evaluar la relación costo beneficio del proceso de remoción de fósforo seleccionado.



3.1. Determinación del comportamiento de la concentración de fósforo en la planta de tratamiento de aguas residuales

3.1.1. Determinación de la carga hidráulica que manejan los equipos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

La PTAR cuenta con medidores de flujo electrónicos, una parte de ellos están conectados a las pantallas de control y operación del proceso, la otra parte se encuentran en campo para ser verificados en línea. Tomando diariamente las lecturas de estos (véase la tabla 3.1) y realizando balances de masa en los puntos donde no se cuenta con medición electrónica, se logra determinar y registrar la carga hidráulica que manejan los principales equipos que conforman la PTAR los días de muestreo del agua.

TABLA 3.1: CAUDAL DE OPERACIÓN DIARIO DE LOS PRINCIPALES EQUIPOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Caudal de Operación (m ³ /h) ↓ / Fecha →	07-May	08-May	09-May...	...29-May
Afluente PTAR				
Desvío al tratamiento aeróbico				
Tanque buffer				
Tanques de preacidificación				
Reactores Anaeróbicos				
Piscina Aeróbica				
Efluente PTAR				
Recirculado tanquilla de lodo				
Espesador de lodos				
Recirculado Espesador de lodos				
Filtrobanda				
Recirculado Filtrobanda				

3.1.2. Selección de los puntos de muestreo en la PTAR.

Al no contar con información suficiente que muestre el comportamiento de la concentración de fósforo en la PTAR, se tomó como estrategia inicial, medir la concentración de fósforo a la entrada y salida de los principales equipos de tratamiento, para observar como incide cada etapa en el fósforo presente en el agua. Se planificó el experimento por un período de 4 días y se identificó como variables involucradas en la toma de datos, la concentración de fósforo reactivo, disuelto y total, (véase la tabla 3.2).



TABLA 3.2: CONCENTRACIÓN DE FÓSFORO REACTIVO, DISUELTO Y TOTAL DIARIA EN MUESTRAS COMPUESTAS DE 24 HORAS EN LA PTAR

Punto de Muestreo ↓ / Fecha →		07-May	08-May	09-May	11-May
Concentración de fósforo afluente PTAR (ppm)	Reactivo				
	Disuelto				
	Total				
Concentración de fósforo salida lamella (ppm)	Reactivo				
	Disuelto				
	Total				
Concentración de fósforo salida preácidos (ppm)	Reactivo				
	Disuelto				
	Total				
Concentración de fósforo salida T. anaerobico (ppm)	Reactivo				
	Disuelto				
	Total				
Concentración de fósforo entrada T. aerobico (ppm)	Reactivo				
	Disuelto				
	Total				
Concentración de fósforo salida T. aerobico (ppm)	Reactivo				
	Disuelto				
	Total				
Concentración de fósforo efluente PTAR (ppm)	Reactivo				
	Disuelto				
	Total				
Concentración de fósforo recirculado de la tanquilla de lodo (ppm)	Reactivo				
	Disuelto				
	Total				
Concentración de fósforo recirculado del espesador de lodos (ppm)	Reactivo				
	Disuelto				
	Total				
Concentración de fósforo licor recirculado del filtrobanda (ppm)	Reactivo				
	Disuelto				
	Total				

Se procedió a la toma de muestras compuestas refrigeradas de 24 horas mediante el uso de muestreadores automáticos (ISCO), paralelo a esto se realizaron las lecturas de caudal promedio de las últimas 24 horas. La metodología para la toma de las muestras se realizó según lo recomendado por el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1998).

Posteriormente se aplicó la metodología experimental (véase la figura 3.1) para determinar la concentración fósforo reactivo, disuelto y total en el agua residual.

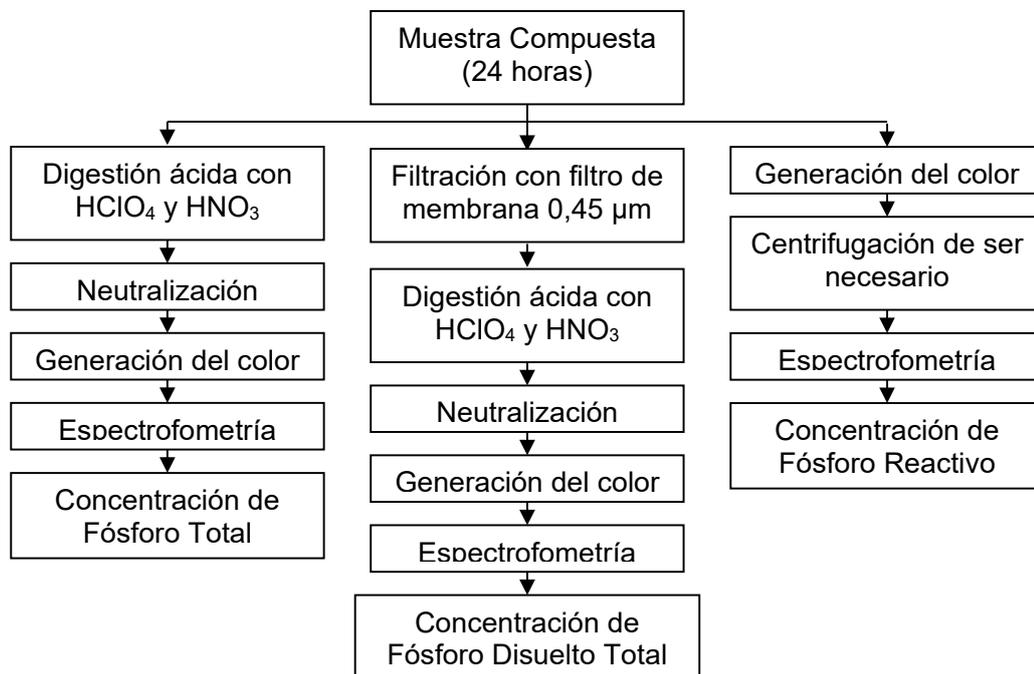


Figura 3.1: Marcha experimental para medir fósforo total, reactivo y disuelto en los distintos puntos de muestreo de la PTAR

Una vez obtenidos los resultados, se graficó la concentración de fósforo en los puntos de muestreo y se calculó el porcentaje de desviación de la concentración de fósforo a la entrada y salida de los equipos (véase la figura 3.2), logrando observar como varia el fósforo al pasar por cada etapa de tratamiento. De esta manera se determinan las etapas del proceso donde la concentración de fósforo permanece aproximadamente invariable, para así descartar y seleccionar los puntos de la PTAR que deben ser tomados en cuenta para el logro del objetivo planteado. El propósito es utilizar la menor cantidad de producto químico y tiempo, el cual es necesario para realizar el ensayo de fósforo en agua residual.

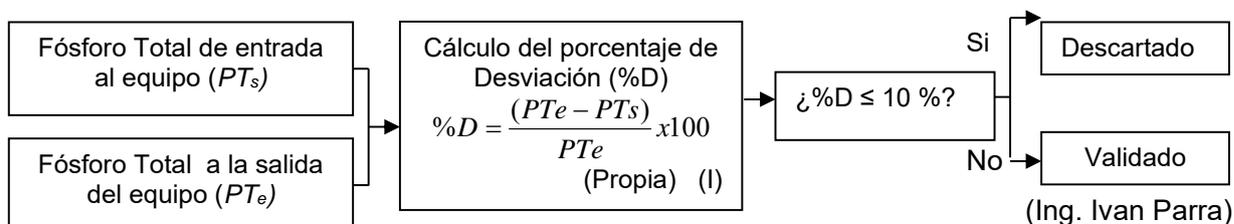


Figura 3.2: Ruta de cálculo para el descarte y validación de los puntos de muestreo en la PTAR para determinar el comportamiento de la concentración de fósforo en el agua residual



3.1.3. Determinación de la concentración de fósforo en los puntos de muestreo seleccionados.

Se procedió a la toma de muestras y se desarrolló la metodología experimental mostrada en la figura 3.1 en los nuevos puntos de muestreo seleccionados por un mes aproximadamente; tal como lo recomienda el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1998). De esta manera se registraron los caudales y concentración de fósforo en los instrumentos de recolección de datos mostrados (tabla 3.1 y 3.2), excluyendo los puntos descartados.

3.1.4. Realización de un balance de masa en fósforo reactivo, disuelto y total en la PTAR.

Tal como se muestra en la figura 3.3 y con la información recaudada anteriormente, se realiza un balance de fósforo en la PTAR.

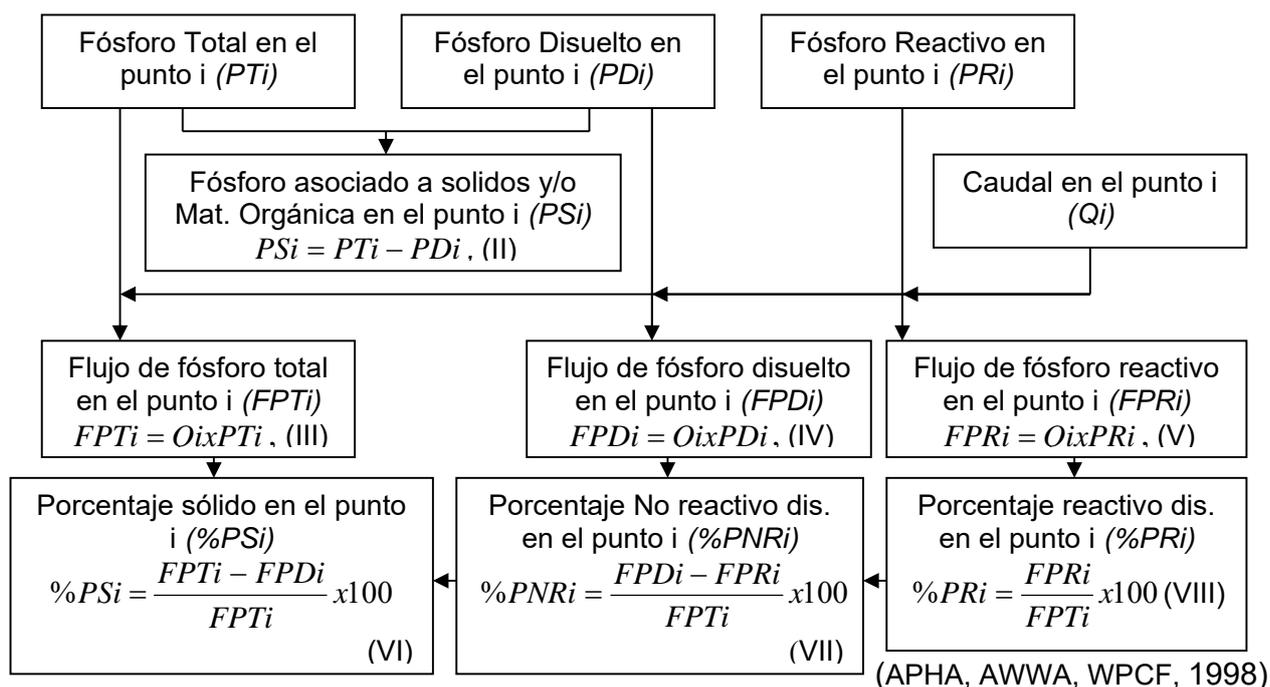


Figura 3.3: Ruta de cálculo para determinar el comportamiento de la concentración de fósforo en la PTAR

3.1.5. Identificación del comportamiento de la concentración de fósforo en la PTAR.

Se construyeron gráficos que muestran el comportamiento de la concentración de fósforo en la PTAR, como fósforo reactivo, no reactivo, total, disuelto y fósforo asociado a sólidos, a medida que avanza por la PTAR.



3.2. Planteamiento de alternativas para la reducción de la concentración de fósforo total a nivel de laboratorio y de planta

3.2.1. Identificación de las distintas tecnologías para la remoción de fósforo.

Esta etapa del trabajo consistió principalmente en dos actividades; la primera se basó en investigar de manera profunda, como esta presente el fósforo en el agua residual y como puede ser removido de manera biológica y fisicoquímica, la segunda actividad fue la realización de reuniones con la dirección técnica de Aguas y Ambiente de Empresas Polar, donde se observaron los resultados obtenidos en el objetivo anterior y se llevo a cabo el análisis de los datos históricos de la planta en el último año, a fin de ubicar las condiciones de operación mas favorables para la reducción de la concentración de fósforo total en el efluente de la misma. Lo que trajo como consecuencia una lluvia de ideas y posibles alternativas para la disminución de la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR, (véase la tabla 3.3).

TABLA 3.3: ALTERNATIVAS PROPUESTAS PARA ELIMINAR FÓSFORO EN EL EFLUENTE DE LA PTAR MEDIANTE TRATAMIENTOS ALTERNOS

Tratamiento Alterno	Ventajas Aparentes	Desventajas Aparentes

3.2.2. Verificación de la existencia de equipos, materiales y medios para la realización de las pruebas de laboratorio y de campo.

Mediante la información recaudada en el punto 3.2.1, se verifican la disponibilidad de medios para desarrollar y evaluar las distintas alternativas de remoción de fósforo. De esta manera se selecciona entre todas las alternativas de la lluvia de ideas, las que serán sometidas a pruebas experimentales, obedeciendo las necesidades de Cervecería Polar, C.A. Planta San Joaquín y tomando en cuenta el diseño de la PTAR.

3.2.3. Desarrollo de la metodología experimental para llevar a cabo las distintas pruebas a nivel de laboratorio y de campo.

En esta fase del objetivo planteado se dividen las alternativas a evaluar en dos grupos: alternativas biológicas y alternativas fisicoquímicas. Se muestran como sigue:



La primera de las alternativas evaluadas fue el tratamiento para remoción de fósforo Bardenpho. Este consistió en adecuar la operación de la piscina aeróbica en modo manual, todo esto para fomentar las condiciones que se exponen en los fundamentos teóricos, (véase la figura 3.4). Se dan condiciones alternadas de anoxia y aireación para que el microorganismo entre en stress y consuma nutrientes en exceso.

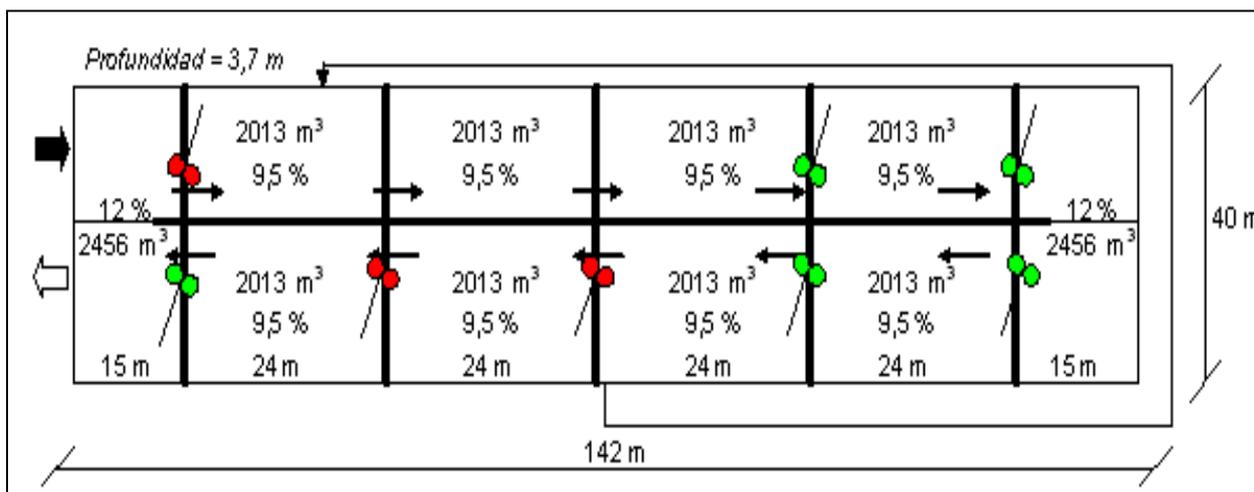


Figura 3.4: Modo de operación de la piscina aeróbica de la PTAR para la prueba experimental de campo Bardenpho

Una vez puesta en marcha la prueba, se procedió a registrar la concentración de fósforo en el efluente y el índice de sedimentabilidad del licor mixto (IVL), y se lleva a cabo en un cono Inhoff midiendo el porcentaje de sólidos sedimentables en una hora y al sobrenadante se le midió fósforo. (véase tabla 3.4). También se llevo un control cualitativo de los microorganismos presentes en el licor mixto. Donde se tomo en cuenta: microorganismos que predominan en la muestra y tamaño con respecto al promedio. Como indicador final se calculó el porcentaje de remoción de fósforo, (véase la figura 3.5).

TABLA 3.4: DATOS OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE REMOCIÓN DE FÓSFORO MEDIANTE EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO BARDENPHO EN LA PTAR

IVL antes (%)	IVL después (%)	Fósforo antes (ppm)	Fósforo después (ppm)	Porcentaje Remoción (%R)

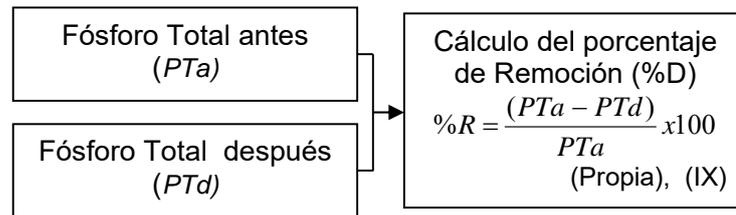


Figura 3.5: Ruta de cálculo del porcentaje de remoción de fósforo en el punto de muestreo, antes y después de implementar la prueba experimental

La segunda alternativa evaluada, fue modificar la condición de operación del espesador de lodos. Durante la determinación del comportamiento de la concentración de fósforo, se identificaron condiciones desfavorables para el proceso de remoción de fósforo. Esta consistió en adecuar la operación del espesador de lodos, verificando los niveles de flujo y carga de diseño del equipo como sigue:

$$Flow_{op} = \frac{Q * fact1}{A_{transversal}} < 10 \frac{m^3}{m^2 día}, \text{ (Winkler, 1994) (X)}$$

Donde:

$Flow_{ope}$: Flujo de Operación de equipo ($m^3/m^2 \cdot h$).

Q: Caudal de alimentación al espesador de lodos (m^3/h).

$A_{transversal}$: Área transversal del espesador de lodos (m^2)

Fact1: Factor de conversión (24h/1día)

$$Carga_{op} = [SSTLM] * fact2 * fact3 * Flow_{op} < 32 \frac{kgSST}{m^2 día}, \text{ (Winkler, 1994) (XI)}$$

Donde:

[SSTLM]: Concentración de sólidos suspendidos totales de licor mixto (ppm).

Fact2: Factor de conversión (1kg/1.000.000mg).

Fact3: Factor de conversión (1000 L/1m³).

Una vez modificada la condición de operación del equipo, se procedió a registrar la concentración de fósforo del recirculado del espesador de lodos a la piscina de aireación, (véase tabla 3.5) y se calculó el porcentaje de remoción según la figura 3.5.



TABLA 3.5: CONCENTRACIÓN DE FÓSFORO EN EL RECIRCULADO DEL ESPESADOR DE LODOS DE LA PTAR

Fósforo total antes (ppm)	Fósforo total después (ppm)	Remoción (%)

La tercera alternativa evaluada fue la remoción de fósforo mediante el uso de coagulantes nacionales comerciales, como: cloruro férrico, policloruro de aluminio y sulfato de aluminio. Para la realización de los ensayos de prueba de jarras, se selecciono un punto único de la planta, el cual, gracias a la metodología experimental desarrollada en el objetivo número uno, era identificado como el punto donde el fósforo era más vulnerable o fácil de remover. En vista que, la mayoría de los coagulantes mencionados modifican el pH del agua, esta variable fue la limitante para determinar el rango de estudio en las dosis de químico, adicionalmente se tomaron en cuenta variables como: tiempo de formación del flóculo, tiempo de sedimentación del precipitado, el índice de Wilcomb, la prueba WRA y porcentaje de remoción de fósforo para el diseño de los instrumentos de recolección de datos, (véase tabla 3.6).

TABLA 3.6: DATOS EXPERIMENTALES DEL ENSAYO DE PRUEBA DE JARRAS PARA LA REMOCIÓN DE FÓSFORO EN MUESTRAS DE LA PTAR

Dosis de coagulante (ppm)	Tiempo de FLOC (s)	Tiempo de sediment. (min)	Índice de Wilcomb	WRA-SS (%)	pH final	Fósforo (ppm)	Porcent. remoción (%)

pH inicial de la muestra: () adim.

Concentración de fósforo inicial: () ppm.

Inicialmente para llevar a cabo la primera corrida experimental, se estableció el rango de dosificación de coagulante según el rango de pH estipulado en el Decreto 3219. Luego de obtener los resultados parciales de la primera experiencia, se escoge un rango óptimo de dosificación y se reduce el paso entre dosis de coagulante, con el propósito de efectuar una segunda corrida experimental.



Luego de llevar a cabo la metodología experimental descrita, se procedió a determinar la dosis óptima de cada coagulante, usando como apoyo el porcentaje de remoción de fósforo en función de la cantidad de coagulante añadido a la jarra.

3.2.4. Selección del tratamiento más adecuado.

Ya recolectada la información referente a las pruebas experimentales mencionadas anteriormente y en función a los resultados obtenidos, se descartan alternativas no potenciales en una reunión realizada con la dirección técnica de Aguas y Ambiente y se llevan a una matriz de selección las alternativas aprobadas. Para el desarrollo de la matriz de selección, se identificaron los criterios a tomar en cuenta para la selección, con sus respectivos ponderados, como sigue: efectividad, costos, manejo y control del proceso e impacto ambiental, (véase la tabla 3.7). Los porcentajes asignados a cada criterio se establecieron según los requerimientos de la empresa en una reunión técnica con la Dirección de Aguas y Ambiente de la misma.

TABLA 3.7: MATRIZ DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS PARA LA REMOCIÓN DE FÓSFORO TOTAL EN EL EFLUENTE DE LA PTAR

Tratamiento (1-10)	Tratamiento 1...	Tratamiento 2...	...Tratamiento n
Criterios (1-100) %			
Eficiencia (45%)			
Costos (30%)			
Manejo y control (10%)			
Impacto Ambiental (15%)			
Total (100%)			

Una vez realizada la matriz de selección, se calculó el puntaje total correspondiente a cada tratamiento y se procedió a seleccionar una alternativa, a fin de identificar soluciones al problema en estudio y llevar a cabo la implantación de la misma, a modo de prueba de campo durante mínimo 1 mes de duración; el cual fue el mismo periodo de tiempo en el que se realizó el estudio del comportamiento de la concentración de fósforo en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la empresa cervecera y recomendado por el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1998).



3.3. Implementación de la alternativa seleccionada de reducción de la concentración de fósforo total a nivel de planta

3.3.1. Revisión de los equipos y accesorios existentes disponibles, para ejecutar el diseño de la alternativa seleccionada en planta.

Según lo requerido para la implementación en campo de la alternativa seleccionada, se realizó un inventario en stock de almacén de los accesorios y equipos existentes que podrían ser utilizados, se verificó la operabilidad de los equipos a utilizar y se le realizaron mantenimientos mecánicos según los requerimientos de los mismos.

3.3.2. Diseño de la alternativa a nivel de planta.

Para el diseño de la alternativa seleccionada, se determinó las condiciones de operación del proceso tomando en cuenta principalmente la capacidad de equipos tales como: bombas, tanques, entre otros. Se procedió a realizar un diagrama de instrumentación y tuberías de la misma. Adicionalmente se acordó suspender; de manera definitiva, la alternativa actual utilizada por la empresa para controlar la concentración de fósforo total en el efluente de la PTAR, -se cancelaron los desvíos intencionales de agua cruda a la etapa de aireación-.

En esta etapa fue necesario determinar el caudal de operación de la prueba para ello se conectó a la bomba que suministraría el agua residual al tanque de precipitación, a un medidor de flujo electrónico (Danfost). Posteriormente se verificó que la velocidad de sedimentación del precipitado fuese mayor a la velocidad ascendente del tanque, esto se logra calculando el tiempo de retención necesario para la llegada del sólido al fondo del tanque versus el tiempo de residencia de la mezcla en el mismo, como sigue:

$$V = V_s - V_a, \text{ (Arboleda, 2000) (XII)}$$

Donde:

V : Velocidad de sedimentación del sólido en el tanque (m/h).

V_A : Velocidad ascendente del agua en el tanque (m/h).

V_S : Velocidad de sedimentación del sólido en jarra (m/h).

$$t_{need} = \frac{H}{V} < \frac{V_T}{Q} = t_r, \text{ (Arboleda, 2000) (XIII)}$$



Donde:

H : Altura del tanque del (m).

t_{need} : Tiempo de retención necesario para que el sólido sedimente (h).

t_r : Tiempo de residencia del agua en el tanque (h).

Q : Caudal de alimentación al tanque (m^3/h).

V_T : Capacidad de tanque (m^3).

Una vez verificada esta condición, se realizan las consideraciones y ajustes necesarios en el caudal de operación, ya que tal como lo muestran las ecuaciones matemáticas, la mayoría de las variables dependen de manera directa del mismo. De esta manera se logra determinar el caudal de químico a dosificar, en función del caudal de operación. Esta última información fue de suma importancia para determinar la cantidad de producto químico a utilizar en el proceso, los costos asociados y modo de almacenamiento del mismo, para garantizar el cumplimiento de las normas de seguridad industrial exigidas en la planta.

$$Q_{coag} = \frac{[Coag] \cdot Q}{1000 \cdot \rho_{coag}}, \text{ (Arboleda, 2000) (XIV)}$$

Donde:

Q_{coag} : Caudal de coagulante (L/h).

$[Coag]$: Concentración de coagulante a dosificar (ppm).

ρ_{coag} : Densidad del coagulante (kg/L).

Después que han sido determinadas las condiciones de operación del proceso, se procede a establecer el protocolo de prueba, donde se presentan las garantías del proceso propuesto. Esto se realiza caracterizando el efluente actual de la PTAR y el efluente obtenido a nivel de laboratorio después de aplicarle el tratamiento propuesto. Tal como se muestra en la tabla 3.8, se determino a nivel de laboratorio características de calidad del agua, como: la conductividad, alcalinidad, dureza, turbidez, fósforo total, DQO, nitrógeno, hierro, entre otras.



TABLA 3.8: CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE DE LA PTAR Y DEL EFLUENTE DEL TRATAMIENTO PROPUESTO PARA LA REMOCIÓN DEL FÓSFORO

CALIDAD DEL AGUA			
Variable Característica	Sin Tratamiento	Con Tratamiento	Decreto 3219
Conductividad (L) mS/cm			-----
Alcalinidad (Alc) ppm			-----
Dureza Total (D _T) ppm			-----
pH adim			6,00 – 9,00
Turbidez (T) NTU			-----
Fósforo Total (P _T) ppm			1,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO) ppm			350,00
Nitrógeno Total (N _T) ppm			10,00
Hierro (Fe _T) ppm			10,00
Aluminio (Al _T) ppm			1,00
CALIDAD DEL PRECIPITADO			
Tiempo de Sedim. (t _{SED}) min			
WRA-SS (%)			
Índice de Wilcomb			

Adicionalmente se establecen las especificaciones de los equipos, accesorios y tuberías que transportan el fluido. Tomando en cuenta las propiedades del agua residual y del coagulante, se procede a seleccionar el material y el diámetro mas adecuado para las tuberías.

3.3.3. Ejecución de las modificaciones en planta.

Para la ejecución de las modificaciones en planta se conformo un equipo de trabajo conformado por: un mecánico, un instrumentista, un electricista y una contratista para el despacho e instalación del material extra necesario, siguiendo de manera fiel el diseño de instrumentación y tuberías en el punto anterior.

3.3.4. Identificación del comportamiento de la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR después de implementar la alternativa seleccionada.

Una vez terminada la implementación, se procede al arranque de la prueba y verificación de las condiciones de operación preestablecidas, para de esta manera identificar, el tiempo de estabilización del tratamiento propuesto y el efecto del mismo en la concentración de fósforo total en el agua residual.



3.4. Determinación del efecto del tratamiento seleccionado en el efluente de la PTAR

3.4.1. Determinación del comportamiento de la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR.

Luego de seleccionar los puntos de muestreo según lo acordado en la determinación del comportamiento de la concentración de fósforo, se identifican las variables involucradas en la toma de datos, como lo son: caudal de operación, dosis de coagulante, pH y la concentración de fósforo total. Estos ensayos se realizaron diariamente, durante un período de un mes.

A continuación en la tabla 3.9 se muestra el instrumento utilizado para la recolección de los datos.

TABLA 3.9: CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN Y DATOS DE CALIDAD DEL AGUA TRATADA MEDIANTE EL TRATAMIENTO PROPUESTO EN LA PTAR

Punto de Muestreo ↙ / Fecha →	06-Oct	10-Oct	11-Oct...	...08-Nov
Caudal de Operación (m ³ /h)				
Dosis de FeCl ₃ (ppm)				
pH efluente PTAR				
pH efluente Pba.Campo				
Fósforo Total PTAR (ppm)				
Fósforo Total Pba. Campo (ppm)				
Porcentaje de Remoción (%R)				

Una vez recolectadas las muestras, se desarrolla la metodología experimental; para determinar fósforo total, descrita en la figura 3.1.

3.4.2. Identificación de cambios en el comportamiento de la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR antes y después de la implementación.

Para identificar los efectos del tratamiento propuesto, se calcula el porcentaje de remoción de fósforo, tal como se muestra en la figura 3.5 y se construye una gráfica que muestre el comportamiento de la concentración de fósforo total, en el efluente de la PTAR antes de tratamiento, versus el comportamiento de la concentración de fósforo en



eléctrica y mantenimiento. Esto se realiza, utilizando los índices y tarifas que maneja actualmente la cervecería.

Los costos por consumo de reactivos químicos, se estimaron en función a la dosis óptima de coagulante determinada y el caudal de diseño de los equipos que anteceden el tratamiento propuesto. Para ello se solicitó un presupuesto a la empresa proveedora de coagulantes, Hessa Chemical C.A. suscrita y codificada al sistema SAP de Empresas Polar, la cual colocó su propuesta de precio en bolívares por kilogramo de producto, por el período de un año.

$$C_{PQ} = \frac{Bs_{PQ} \cdot Q \cdot [R_{Coag}] \cdot fact1}{1000}, \text{ (Propia) (XVI)}$$

Donde:

C_{PQ} : Costos por consumo de producto químico diario (Bs/ppmP_{rem} día).

Bs_{PQ} : Costo por kilogramo de producto (Bs/kg).

Q : Caudal de agua a tratar (m³/h).

$[R_{Coag}]$: Dosis de coagulante para remover 1 ppm de fósforo (ppmCoag/ppmP_{rem})

Los costos asociados a consumo de energía eléctrica, se estimaron mediante el uso de la ecuación mostrada a continuación y utilizando los datos técnicos de los equipos necesarios para el proceso:

$$C_{EE} = \frac{0,85 \cdot V_N \cdot I_N \cdot \sqrt{3}}{1000} \cdot t_{OP} \cdot Bs / KWh, \text{ (GOTAS, 1999) (XVII)}$$

Donde:

C_{EE} : Costos asociados al consumo de energía eléctrica (Bs)

Bs / KWh : Costo en bolívares del Kilovatio en una hora (Bs/KWh).

I_N : Corriente nominal del equipo; "dato de placa" (A).

V_N : Voltaje nominal del equipo; "dato de placa" (V).

t_{OP} : Tiempo de operación del equipo eléctrico (h).

Para el cálculo de las horas hombre empleadas, se toman en cuenta la operación y los análisis químicos extras del proceso, para lo que fue necesario determinar: salario del operador por hora y la frecuencia de operación del equipo. El primer dato se obtiene, mediante el costo actual de las horas hombre de la planta y el segundo se extrae del plan de inspección y ensayos de Aguas y Ambiente. Con esta



información de calculan los costos de las horas hombre, como se muestra a continuación:

$$C_{HH} = (C_{op} \cdot t) + (C_{an} \cdot t), \text{ (Kiely, 2001) (XVIII)}$$

Donde:

C_{HH} : Costos asociado a las horas hombre (Bs).

C_{op} : Salario del operador por hora (Bs/h).

C_{an} : Salario del analista por hora (Bs/h).

t : Tiempo de operación (h).

La estimación de costos por mantenimiento de equipos se divide en dos modalidades: costos por mantenimiento preventivo y costos por mantenimiento correctivo. Los costos por mantenimiento preventivo se estimas según el plan de mantenimiento mecánico de la cervecería, el cual fue presupuestado para el período 2007, esto fue posible ya que los equipos a utilizar en el diseño propuesto, son de uso común de la planta. Para el cálculo de los costos por mantenimiento correctivo se emplea la normativa interna de Empresas Polar, la cual indica que estos no deben ser mayores al 30% de los costos por mantenimiento preventivo.

Una vez recaudada toda la información mencionada anteriormente, se logra estimar los flujos monetarios y costos por concepto de operación y puesta en marcha del proceso de remoción de fósforo seleccionado.

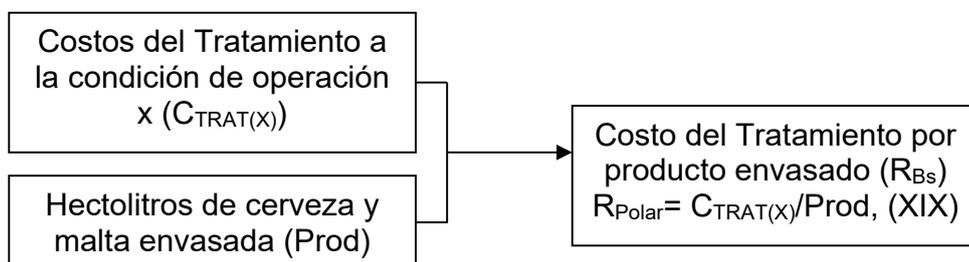
3.5.3. Estimación de los beneficios del proceso de reducción de fósforo seleccionado.

Mediante los resultados obtenidos en el estudio de alternativas para la remoción del fósforo, se obtiene el porcentaje de remoción de fósforo en el efluente de la PTAR después de aplicar el tratamiento propuesto. Esta información se utiliza para predecir la cantidad de fósforo removido en función del tratamiento aplicado al agua residual, lo que representa el principal beneficio y objetivo de la investigación presentada. Para el cálculo del porcentaje de fósforo removido, se determinó el comportamiento de la concentración de fósforo una vez implementado el proceso propuesto (objetivo 4), por el mismo periodo de tiempo en el que se evaluó el comportamiento de la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR (objetivo 1). Adicionalmente; para la evaluación del tratamiento propuesto, se acordó cancelar de manera definitiva los desvíos



intencionales de agua cruda a la etapa de aireación, para lograr la remover el fósforo a los niveles exigidos por la normativa ambiental legal.

Adicionalmente del beneficio expuesto anteriormente, se evalúa el comportamiento del proceso propuesto, con respecto a los problemas formulados en el capítulo 1 de la presente investigación. Para ello se realiza una evaluación comparativa entre el tratamiento actual y el tratamiento propuesto, comenzando por el cálculo del costo en bolívares de ambos tratamientos por hectolitro de producto envasado, a diferentes condiciones de operación, (véase la figura 3.6), dentro de los costos de cada tratamiento se identifico la etapa controlante que representa la mayor cantidad de dinero en gasto. Posteriormente se graficó el comportamiento de la concentración de fósforo ante distintas condiciones de operación en ambos tratamientos, con el propósito de verificar la estabilidad y control del mismo. Se calculó la generación de lodo en exceso que producen ambos tratamientos; tanto el actual como el propuesto, a distintas condiciones de operación, a fin de identificar los impactos de los mismos en operabilidad de la PTAR.



(GOTAS, 1999)

Figura 3.6: Ruta de cálculo para determinar los costos del tratamiento de remoción de fósforo en función de la producción en hectolitros

Para poder cuantificar los beneficios expuestos, adicionalmente se encontró un beneficio común que los interrelaciona a todos, el cual fue reducir de manera importante la condición de vulnerabilidad en la que se encuentra la cervecería con el MARN. Según esto, se calculan las pérdidas de dinero que podrían generar la parada de la cervecería, para la apertura de un proceso de auditoria ambiental por incumplimiento de la norma, el cual tiene como mínimo, una duración de 3 días.



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

El siguiente capítulo muestra los resultados obtenidos y el análisis de los mismos luego de la aplicación de los modelos matemáticos sobre los datos experimentales recopilados durante la ejecución de las pruebas de laboratorio y de campo.

4.1. DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA CONCENTRACIÓN DE FÓSFORO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Los resultados presentados en la tabla 4.1, corresponden al muestreo preliminar del fósforo total en diferentes puntos de la PTAR. Este se basó en una semana de muestreo para la recolección de los datos. Luego de verificar los datos obtenidos, fueron procesados según se explica en la figura 3.2, este procedimiento se realizó con el objetivo, de seleccionar de manera estratégica, cuales iban a ser los puntos de evaluación del comportamiento de la concentración de fósforo en la PTAR. Tal como podemos observar en la tabla 4.1, la concentración de fósforo no se ve afectada por los filtros de placas inclinadas (lamella), tanques de preacidificación, tanques de recirculación y reactores anaeróbicos, por ello, en la etapa de tratamiento anaerobio se selecciona como punto de muestreo solo la salida de los reactores, vale la pena mencionar que este punto de muestreo se ve favorecido, por contar con un muestreador automático ISCO.

La alimentación de las piscinas de aireación extendida está compuesta por: el agua residual proveniente de los reactores anaeróbicos, el lodo de recirculación, el recirculado de los espesadores de lodo, el recirculado del licor del filtrobanda y agua residual cruda desviada del tratamiento anaeróbico (opcional). Considerando que en este punto ocurre el proceso de remoción de fósforo y se encuentran presente la mezcla de varios tipos de aguas con características distintas, se valida el muestreo a la entrada de la piscina aeróbica y adicionalmente se muestrean por separados los afluentes a la misma, atendiendo a la necesidad de tomar muestras compuestas en los puntos mencionados e identificar corrientes que aportan fósforo al sistema.



TABLA 4.1: COMPORTAMIENTO DEL FÓSFORO EN EL AGUA RESIDUAL CON RESPECTO A LAS ENTRADAS Y SALIDAS DE LOS PRINCIPALES EQUIPOS QUE CONFORMAN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Equipo Evaluado	Fósforo Total Entrada (P _T) ppm	Fósforo Total Salida (P _T) ppm	Porcentaje de desviación (%D) %
Filtro de placas inclinadas	7,31	7,98	9,17%
Tanques preácidos	7,98	7,95	0,38%
Tanques de recirculación	7,95	7,45	6,29%
Reactores UASB	7,45	7,97	6,98%
Piscina Aeróbica	29,19	31,54	8,05%
Clarificador	31,54	1,30	95,88%
Espesador de lodo	34,21	43,35	26,72%
Filtrobanda	30,95	9,87	68,11%

Una vez recaudada la información expuesta anteriormente, se selecciona como puntos de muestreo para la realización del balance de fósforo, el agua cruda afluyente a la PTAR (Est. Bombeo), la salida del tratamiento anaeróbico (Reactores UASP), afluyente a la piscina de aireación extendida, efluente de la PTAR (salida de agua clara de los clarificadores), recirculado de la tanquilla de lodo (Lodo de recirculación y licor del filtrobanda) y el recirculado de los espesadores. Para mayor información del detalle de la ubicación de los puntos de muestreo, véase la figura 4.1.

Después de obtener los resultados mostrados en la tabla 4.2, se calcularon los porcentajes de los tipos de fósforo presente en el agua residual, para la realización de un análisis más profundo y detallado, tal como se muestra en la tabla 4.3. En la tabla 4.2 se muestra que la concentración de fósforo total en el efluente de la PTAR es 1,6 ppm; mayor a 1 ppm, y la concentración de fósforo a la entrada de la misma es de 8,43, estos datos arrojan que el porcentaje de remoción de fósforo de la planta es aproximadamente de 81 %. Vale la pena mencionar, que los datos fueron recolectados con un porcentaje de desvío de agua cruda a la etapa de aireación diario de un 10 %.

Para conocer el comportamiento del fósforo en los puntos de muestreo seleccionados, (véase tabla la 4.2.) y en búsqueda de un posible tratamiento fisicoquímico para la remoción del mismo, se requería obtener en uno de los puntos de la PTAR un pico de ortofosfato PO₄³⁻, ya que es este tipo de fósforo, llamado también fósforo reactivo, el que reacciona con los coagulantes y no los demás, para formar una sal fosfatada o producto de solubilidad.



TABLA 4.2: COMPORTAMIENTO DE LA CONCENTRACIÓN DE FÓSFORO TOTAL, REACTIVO Y DISUELTO DEL AGUA DE DESECHO EN LA PTAR

Punto de Muestreo (ver figura 4.1)	Carga Hidráulica (Q) m ³ /h	Fósforo Reactivo (P _R)		Fósforo Disuelto (P _D)		Fósforo Total P _T	
		(ppm)	(Kg/h)	(ppm)	(Kg/h)	(ppm)	(Kg/h)
1	Total	2,03	0,87	6,99	2,98	8,43	3,60
	By-pass		0,08		0,26		0,32
	Buffer		0,79		2,72		3,28
2	389,54	3,10	1,21	6,61	2,57	9,44	3,68
3	793,50	2,30	1,83	4,60	3,65	29,19	23,18
4	430,48	0,93	0,40	1,57	0,68	1,64	0,70
5	315,73	0,87	0,28	1,52	0,48	53,22	16,80
6	50,54	5,25	0,27	6,64	0,34	47,10	2,38

* Producción de cerveza y malta: 480.000,00 HI envasado

Se determinó, tal como se muestra en la tabla 4.3, que en el agua clarificada, el 60 % del fósforo total es ortofosfato o fósforo reactivo, lo que indica que mediante un tratamiento fisicoquímico se podría mejorar en un 60 % o más, la efectividad de remoción de fósforo. A continuación se muestran una serie de gráficos resultantes, de los datos recolectados para el estudio del comportamiento de la concentración de fósforo en la PTAR.

TABLA 4.3: TIPO DE FÓSFORO ENCONTRADO EN LOS PUNTOS DE MUESTREO SELECCIONADOS DE LA PTAR

Punto de Muestreo (ver figura 4.1)	Carga Hidráulica (Q) m ³ /h	Fósforo Reactivo (P _R) %	Fósforo No reactivo (P _{NR}) Disuelto %	Fósforo asociado sólidos (P _S) %
1	Total	24,00	59,00	17,00
	By-pass			
	Buffer			
2	389,54	33,00	37,00	30,00
3	794,37	10,00	9,00	81,00
4	430,48	57,00	39,00	4,00
5	315,73	2,00	1,00	97,00
6	50,54	11,00	3,00	86,00

* Con dos bombas de recirculación de lodo encendidas, operando con la piscina N° 2.

** Con una bomba de exceso de lodo encendida.

Producción de cerveza y malta: 480.000,00 HI envasado



En la figura 4.2 se muestra que la concentración de fósforo total a la entrada de la PTAR se mantiene aproximadamente constante en el transcurso del tratamiento anaeróbico, lo que demuestra que en esta etapa del proceso no ocurre remoción del mismo en el agua residual, ya que este tipo de microorganismos consumen en su mayoría carbono orgánico total, que se traduce como el sustrato primario que constituye la DBO. En las muestras con lodo, como lo son: la entrada a la piscina de aireación, recirculado de la tanquilla de lodo y recirculado del espesador de lodos, registran alta concentración de fósforo total, esto se debe a que las muestras de agua estuvieron compuestas por una fracción de licor mixto. Los microorganismos aeróbicos en presencia de las condiciones adecuadas, consume ortofosfato y lo almacena en sus células como polifosfato para la reproducción celular, de esta manera transportan ATP (información genética) a sus descendientes.

Por otra parte entre las observaciones más resaltantes, esta el aumento de la concentración de fósforo reactivo a medida que transcurre el tiempo de anoxia del licor mixto en los equipos de la PTAR, lo que demuestra que, tal como es almacenado el fósforo; (ver punto 4 del eje x de la figura 4.3), puede ser desechado o liberado por mecanismo de supervivencia o muerte del mismo. La liberación de fósforo en los microorganismos, se da por oxidación de los polifosfatos almacenados en los citoplasmas de sus células. De la misma manera, en la figura 4.3 se observan flujos máxicos de fósforo altos y bajos, el equipo que maneja la mayor carga hidráulica es la piscina de aireación (afluentes y recirculaciones), a esto se le suma la alta concentración de fósforo total asociado a sólidos volátiles.

La remoción de nutrientes disueltos en el agua residual es la vía de tratamiento biológico mas segura, a menos, que se someta el licor mixto a condiciones o procesos endógenos. Respondiendo a esto se construyo una gráfica que muestra la fracción del fósforo total, disuelta en agua, contra la fracción asociada a materia sólida, (véase la figura 4.4). Evaluando los resultados obtenidos se muestra, como en muestras claras (muestras sin licor mixto) el porcentaje de fósforo disuelto es mayor y viceversa. El descenso del fósforo disuelto en el tratamiento anaeróbico se debe al consumo del sustrato secundario (fósforo orgánico disuelto) de la DBO y el ascenso del fósforo asociado a sólidos se reproduce al arrastre de lodo anaeróbico fuera del reactor, esta



observación fue comprobada en la toma de muestras a la salida del reactor UASB, donde se notaron trazas de lodo anaeróbico. El bajo porcentaje de fósforo disuelto a la entrada a la piscina de aireación, es por la alta concentración de sólidos (10.000 ppm aprox.) presentes que lo hacen insignificante, lo opuesto ocurre en el efluente de la PTAR, a lo que se le suma la remoción de fósforo disuelto en la piscina de aireación. Por otra parte en los puntos subsiguientes se observa como aumenta el fósforo disuelto, liberado debido a la anoxia prolongada que experimenta el licor mixto en los equipos y al mismo tiempo disminuye la concentración de fósforo asociado a sólidos.

Para observar de manera más profunda el comportamiento del fósforo contenido en el agua residual tratada por la planta, se realiza una gráfica; (véase la figura 4.5), que representa los tipos de fósforo encontrados en el agua, la diferencia entre la figura 4.4 y esta, es que se tomó el fósforo disuelto y se dividió en sus dos fracciones más importantes: fósforo reactivo (ortofosfato) y fósforo no reactivo (polifosfatos y fósforo orgánico disueltos), para analizar el comportamiento del fósforo en la fase disuelta. Se pudo observar que el afluente de la PTAR cuenta con un gran porcentaje de fósforo no reactivo, esto se debe a los químicos y biocidas inyectados en línea; ricos en polifosfatos, para el mantenimiento preventivo de los equipos y control microbiológico, además del prensado del grano remojado en los filtros meura. En el tratamiento anaeróbico se observó, que existe una conversión del fósforo complejo (polifosfatos y fósforo orgánico), a la forma reactiva (ortofosfato), esto se debe a la digestión ácida que experimenta el agua residual en los tanque preácidos, donde se le da al agua un tiempo suficiente de residencia; (entre 4 y 6 horas), para la formación de ácidos grasos volátiles. Por otra parte se identifica el punto de la planta donde la concentración de fósforo reactivo es máxima, el 60% del fósforo total en el agua residual en efluente de la PTAR es fósforo reactivo, esto se debe al mecanismo de consumo de fósforo de los microorganismos, el cual consiste en, la conversión del fósforo complejo en las piscinas de aireación a ortofosfato, posteriormente se efectúa el almacenamiento del mismo en las células y una vez dentro de ellas lo reconvierten a polifosfato, el cual es un complejo que hace la mismas resistentes y estables.

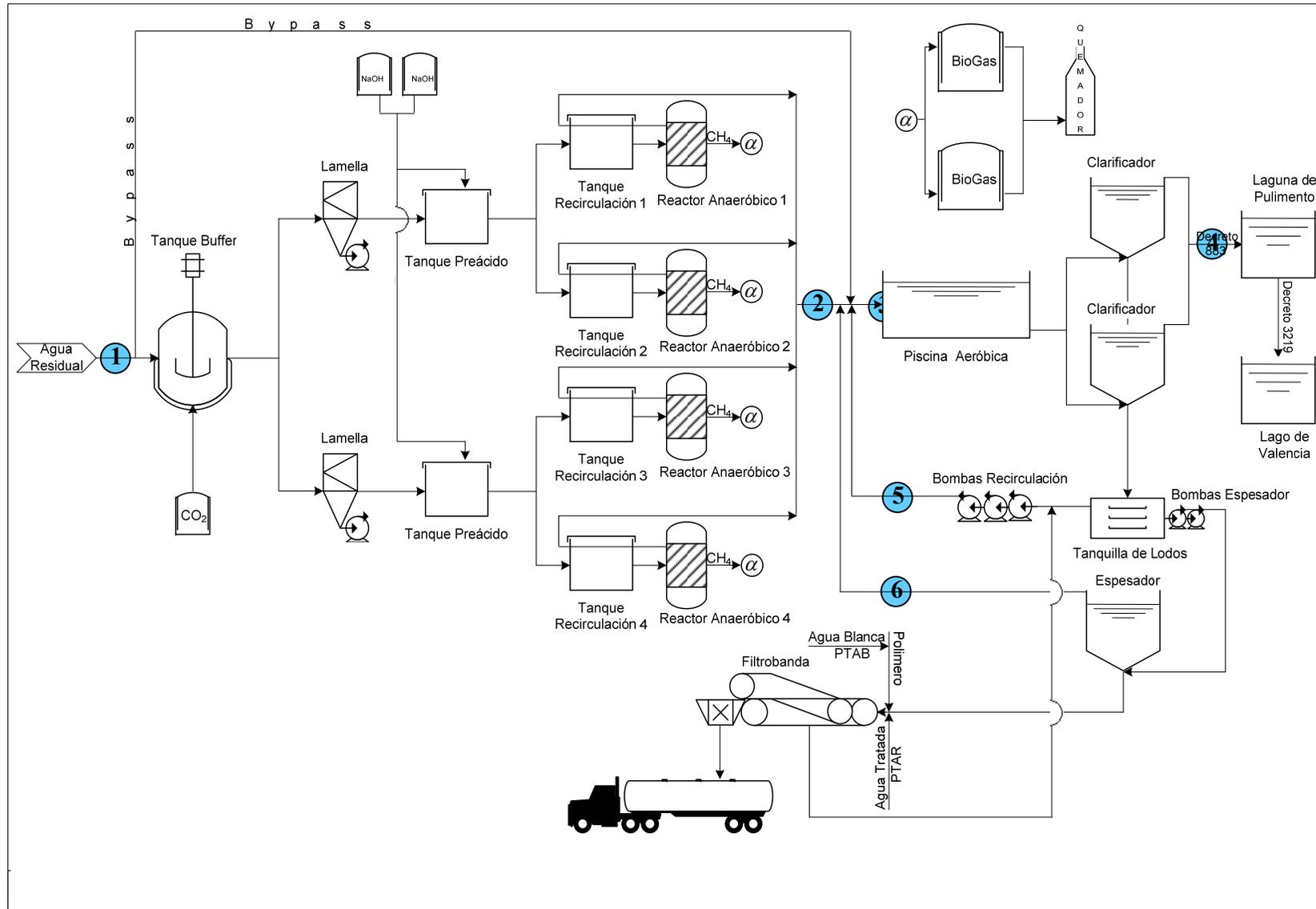


Figura 4.1: Ubicación de los puntos de muestreo seleccionados para realizar el balance de fósforo en la PTAR

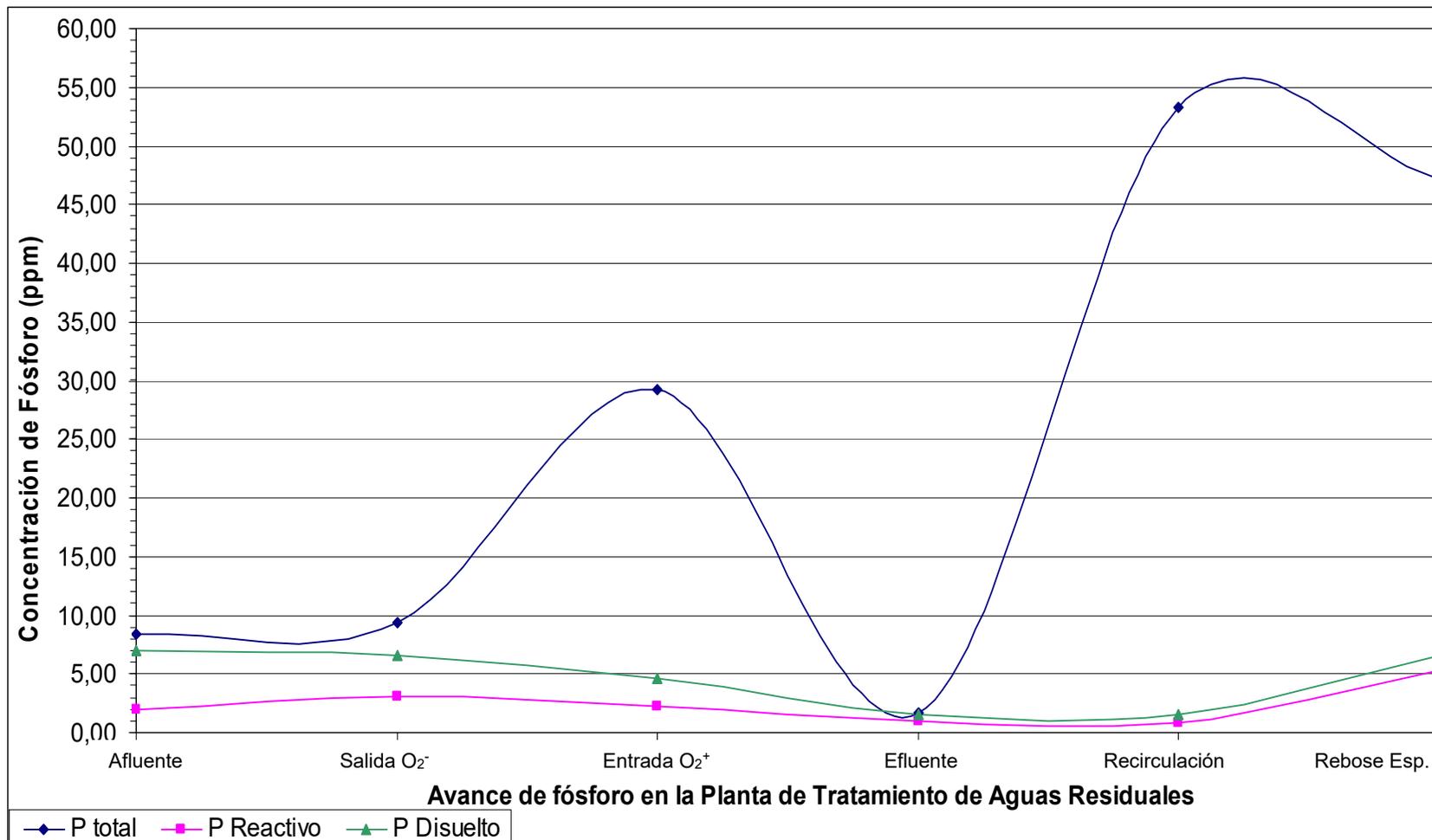


Figura 4.2: Distribución de las formas fosfatadas que describen el comportamiento de la concentración de fósforo en los puntos de muestreos seleccionados de la PTAR

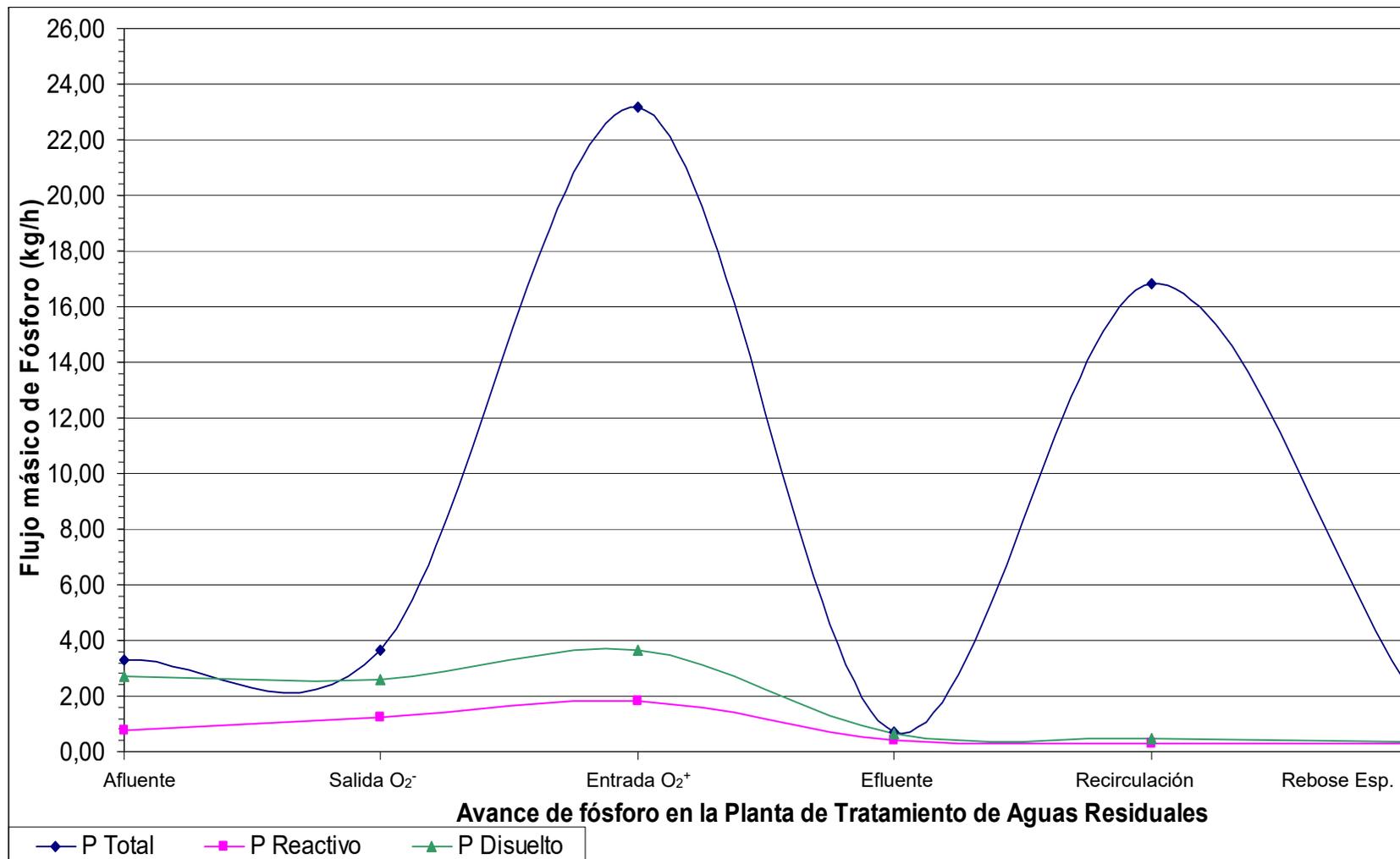


Figura 4.3: Distribución de las formas fosfatadas que describen el comportamiento de la carga de fósforo del sistema en los puntos de muestreo seleccionados de la PTAR

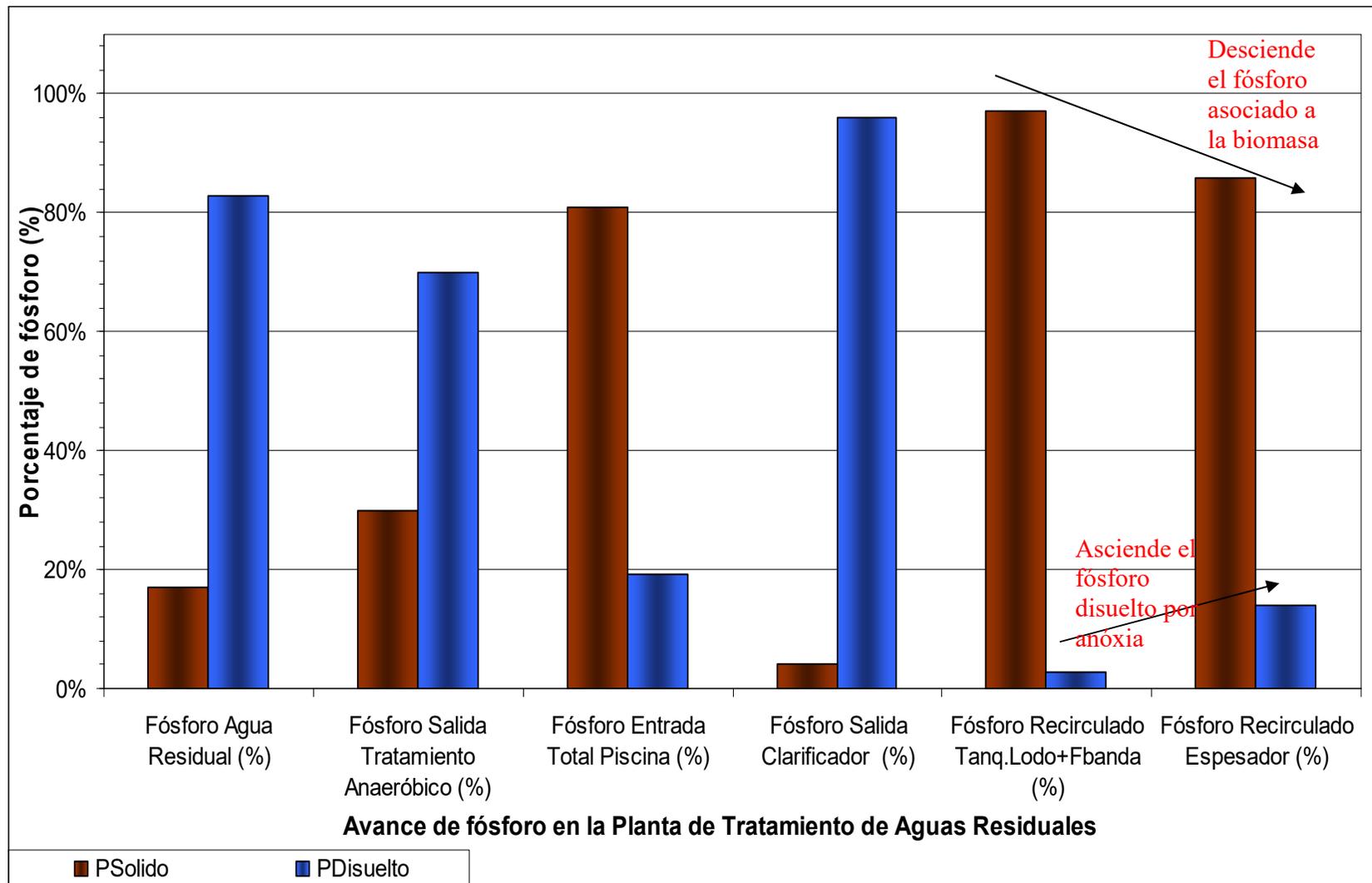


Figura 4.4: Porcentaje de fósforo asociado a sólido con respecto al fósforo disuelto total en los puntos de muestreo seleccionados de la PTAR

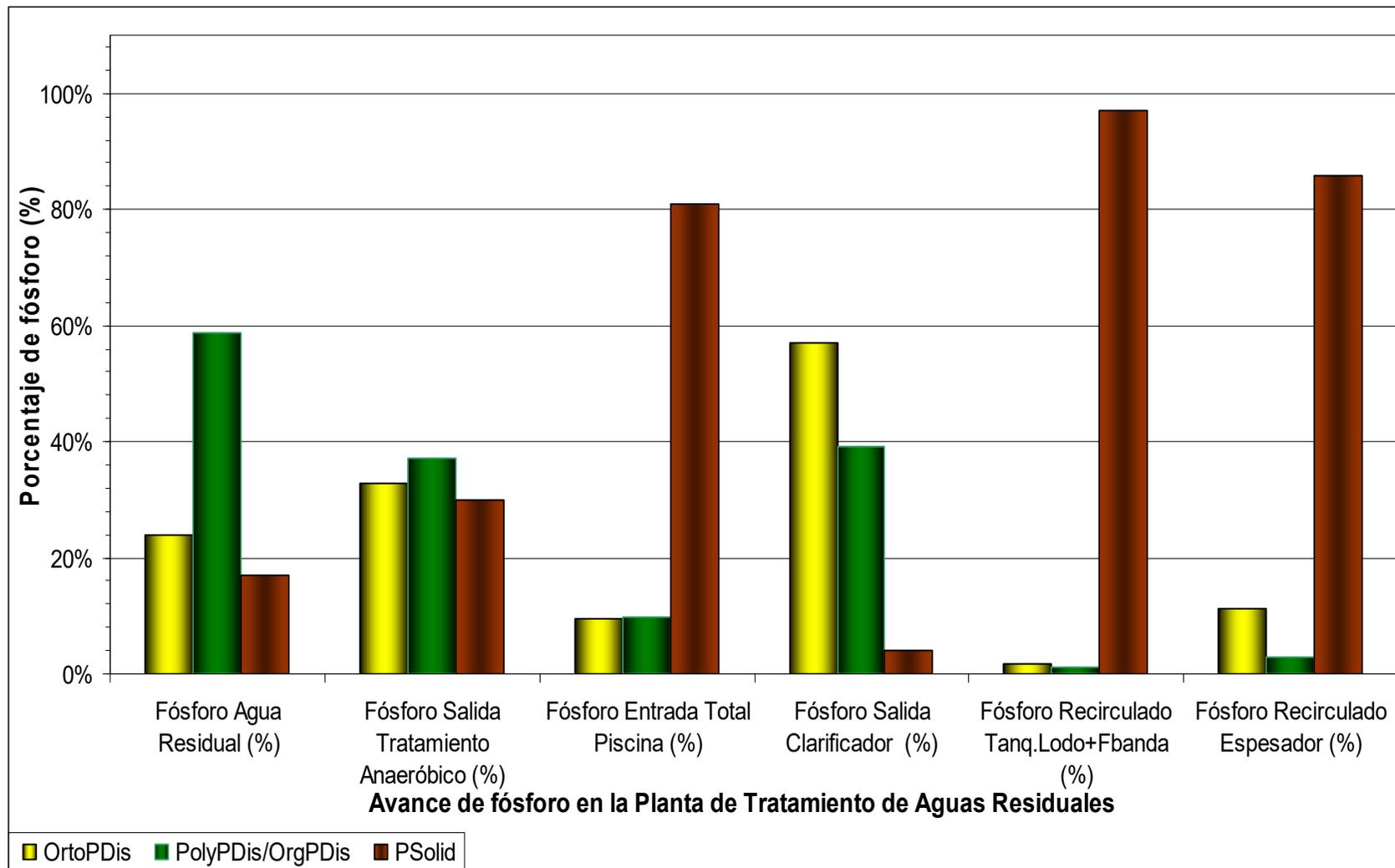


Figura 4.5: Porcentajes de fósforo reactivo, no reactivo y asociado a sólido con respecto al fósforo total en los puntos de muestreo seleccionados en la PTAR



La identificación de un punto máximo de fósforo reactivo, resultó ser crucial para la investigación presentada, ya que cuando el fósforo esta en un 50 % fuera de norma es 60 % removible; (entiendase por fósforo removible, ortofosfato). Además se logro comprobar a nivel de laboratorio que a medida que en este punto de la planta aumenta el fósforo total, aumenta hasta en un 93 % el porcentaje de fósforo reactivo, lo que demuestra, que es el ortofosfato, el consumido por las bacterias en la etapa de aireación extendida, véase la figura 4.6. Esto valida el tratamiento actual tomado por la cervecería para controlar el fósforo en el efluente, ya que desviando agua cruda a la piscina de aireación se genera $\frac{1}{2}$ kg L.M por cada kg DBO, generándose una relación alimento microorganismos baja, debido a la alta tasa de reproducción del lodo aeróbico.

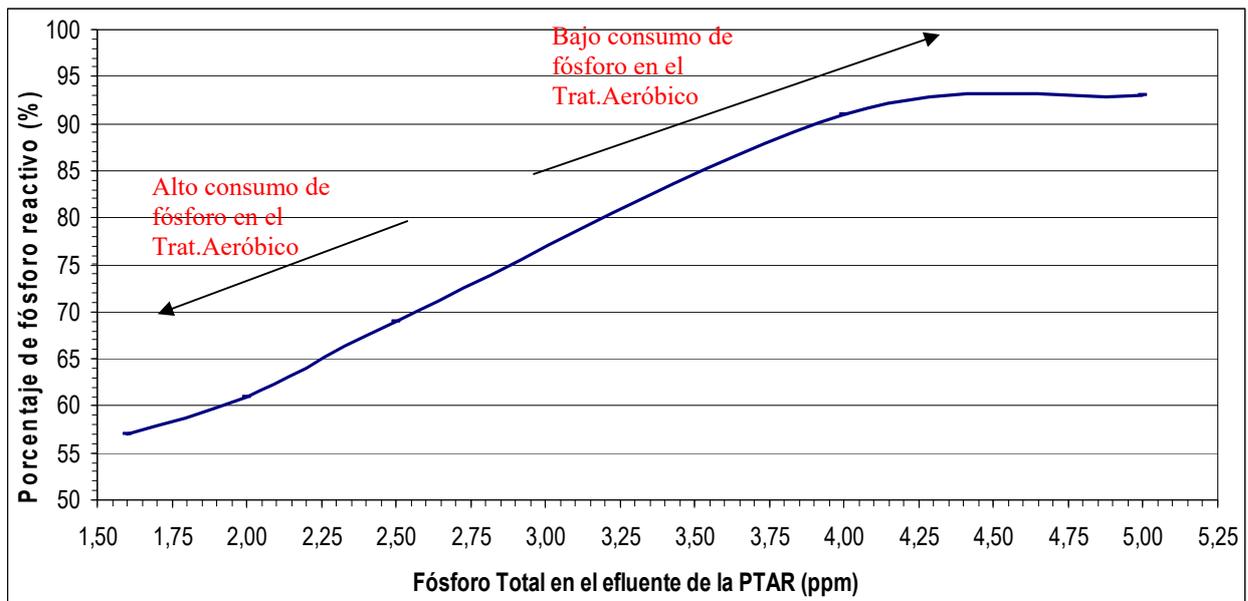


Figura 4.6: Porcentajes de fósforo reactivo en función de la concentración de fósforo presente en el efluente de la PTAR a condiciones normales de operación

Entre las maneras que existen para sintetizar fósforo complejo a ortofosfato se destacan dos tipos de tratamiento tradicionales: aireación extendida y tratamiento por bio-película (Biodisco). En el caso de la aireación extendida lo más importante es el tiempo de residencia del agua residual en las piscinas de aireación, lo que depende directamente del caudal de alimentación de la misma. Cuando se realizan los desvíos intencionales disminuye el tiempo de residencia ya que aumenta en un 50% el caudal



de operación del reactor biológico, esta condición; en conjunto a la explicada anteriormente, son los motivos por los cuales el porcentaje de fósforo reactivo disminuye al realizarse los desvíos, los cuales coinciden con los valores de fósforo total bajos o menores a 3 ppm de concentración en el efluente de la PTAR.

4.2. PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS PARA LA REDUCCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE FÓSFORO TOTAL A NIVEL DE LABORATORIO Y DE PLANTA

Inicialmente se realizó un seguimiento de la biodiversidad en el licor mixto, con respecto a los diferentes porcentajes de desvío de agua cruda a la etapa de aireación extendida; tratamiento actual, mediante la utilización de un microscopio y se encontró que, una vez iniciados los desvíos diarios de más del 20%, iba aumentando la población de microorganismos filamentosos día tras día; véase la figura 4.7, esto se debe a las variaciones en la carga poluente alimentada; -Composición inestable de las aguas residuales-, en las piscinas y a los cambios bruscos de oxígeno disuelto en las mismas, véase la figura 4.35. Los microorganismos filamentosos logran inhibir el crecimiento de las bacterias y protozoarios floculentos, experimentando altas tasas de crecimiento aunque el sustrato y las concentraciones de oxígeno sean bajas.

Para el estudio de alternativas se plantearon dos vías: Tratamientos biológicos y tratamiento fisicoquímicos. Primero se seleccionó el tratamiento biológico que aplicaba según los requerimientos, facilidades y disponibilidades del diseño actual de la planta, el cual correspondió al tratamiento Bardenpho. Posteriormente se estudiaron alternativas fisicoquímicas, las cuales podían ser evaluadas a nivel de laboratorio.

El resultado de la prueba de remoción biológica de fósforo Bardenpho muestra que la PTAR no fue diseñada para remover; de esta manera, fósforo a niveles tan bajos como 1 ppm de concentración. En los resultados de la prueba se encontró un descenso en el tiempo de sedimentación; es decir aumento del IVL, debido a la sobrecarga de microorganismos filamentosos, los cuales por su anatomía, logran almacenar menos cantidad de nutrientes que los rotíferos y por ser microorganismos fijos, requieren una cantidad de oxígeno mucho menor para su actividad; véase la figura 4.7.



TABLA 4.4: RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PRUEBA BIOLÓGICA DE REMOCIÓN DE FÓSFORO BARDENPHO EN LA PTAR

IVL antes IVLA %	IVL desp. IVLD %	Fósforo antes (PA) ppm	Fósforo después (PD) ppm	Porcentaje Remoción (%R) %
46,25	65,00	1,64	3,04	0

* Punto de muestreo: Salida de la piscina de Aireación extendida.



Figura 4.7: Biodiversidad de microorganismos luego de desvíos intencionales de agua cruda al reactor biológico y después de implementar la prueba biológica de remoción de fósforo Bardenpho



El comportamiento del fósforo obedece a lo discutido en la figura 4.6 de la investigación, que soporta que el déficit de consumo de fósforo en la etapa de aireación en la PTAR de la Cervecería Polar, C.A. Planta San Joaquín, se deba a condiciones desfavorables de los microorganismos aeróbicos. Tal como se muestra en la figura la anatomía de los microorganismos filamentosos no le permite consumir la misma cantidad de nutrientes que los protozoa mostrados, estos soportan condiciones de carga variable y bajos niveles de oxígenos, ya que los requerimiento de alimento son tan bajos para su reproducción; la cual es excesiva comparado con los rotíferos, que para ellos siempre existe alimento en exceso y por ser mas delgados fisiológicamente, necesitan mucho menos oxígeno para su actividad celular (Winkler, 1994). Todos estos indicadores resultantes mostrados, demuestran que el fracaso del tratamiento se da por: condiciones desfavorables para el licor mixto (O_2 deficiente) y que la PTAR no fue diseñada para adaptarse a este tipo de procesos debido a la falta de una verdadera zona anaeróbica en la recirculación del licor mixto que conste de ausencia de nitratos y nitritos (facilitadores de oxígeno), presencia de materia orgánica cruda y ortofosfatos, las cuales son las condiciones mínimas necesarias para que el microorganismo entre en estrés y almacene fósforo en exceso.

Entre otros problemas el medidor de oxígeno disuelto a la salida de la piscina de aireación, reportaba mediciones falsas, por la cercanía del mismo al rotor N° 8, que debía estar encendido, pero cuando este era apagado el oxígeno reportaba niveles de 0,3-0,5 ppm, véase la figura 3.4 del capítulo anterior.

Como podemos observar en la tabla 4.5, modificando las condiciones de operación del equipo espesador de lodos, se logra remover la concentración de fósforo en el recirculado del mismo en un 88%. Esto fue posible, verificando el flujo ascendente y la carga del equipo. El flujo era aproximadamente igual al de diseño, pero la carga; que viene dada por los kilogramos de sólidos suspendidos totales por metro cuadrado día, era el doble de la carga máxima permisible. Esto se verificó visualmente ya que en el rebose del equipo había de abundante lodo en el canal de recirculación del equipo, (véase la figura 4.8). En análisis químicos realizados anteriormente se demuestra que el recirculado del espesador de lodos contiene una concentración de fósforo total de 47 ppm aprox. Este lodo rico en fósforo y moribundo por ausencia prolongada de O_2 , libera



cantidades de ortofosfatos disueltos que compiten con el fósforo complejo proveniente del agua residual que debe asimilar el lodo aerobio (Winkler, 1994). Las bacterias prefieren consumir fósforo reactivo ortorrómbico que el complejo, generándose de esta manera una disminución del porcentaje de remoción de fósforo por una recirculación estacionaria del mismo en el sistema (Winkler, 1994).

TABLA 4.5: CONCENTRACIÓN DE FÓSFORO EN EL RECIRCULADO DEL ESPESADOR DE LODOS EN LA PTAR ANTES Y DESPUÉS DE MODIFICAR LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

Fósforo total antes (P_{TA}) ppm	Fósforo total después (P_{TD}) ppm	Porcentaje de Remoción (%R) %
	47,09	



Figura 4.8: Condición de operación del espesador de lodos antes de las modificaciones de carga y flujo de operación en la PTAR

En vista a los resultados obtenidos anteriormente, se deciden evaluar tratamientos fisicoquímicos para la remoción de fósforo en el efluente de la planta. Esta alternativa resulto atractiva, luego de observar que en uno de los puntos de la planta (efluente de la PTAR) el 60% del fósforo es ortofosfato reactivo; el cual es fácilmente precipitable con adición de sales metálicas, este punto de la planta posee la menor



cantidad de fósforo por litro de agua residual y el caudal de agua es bajo en comparación con otros.

Luego de realizar numerosos ensayos, se determino como dosis óptima, 300 ppm de cloruro férrico a nivel de laboratorio, para porcentaje de remoción del 90 %, de esta manera se comprueba la hipótesis planteada anteriormente, de la facilidad de remover ortofosfato del agua residual y por consiguiente fósforo total. El tiempo de sedimentación es bueno, ya que no llega a los 10 minutos, el índice de Wilcomb indica que el flóculo formado posee buen tamaño y el comparador WRA muestra el tamaño y porcentaje de los sólidos sedimentables en 7 minutos, véase la figura 4.9. La reducción de la concentración de fósforo y el pH obedece la reacción (I) mostrada a continuación:



TABLA 4.6: RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE PRUEBA DE JARRAS CON CLORURO FÉRRICO REALIZADO EN MUESTRAS DE AGUA TRATADA

Dosis de FeCl ₃ (ppm)	Tiempo de FLOC (s)	Tiempo de sediment. (min)	Índice de Wilcomb	WRA-SS (%)	pH final	Fósforo (ppm)	Porcent. remoción (%)
300,00	45,00	7,00	6	E-7,5	7,83	0,42	89,81

pH inicial de la muestra: (7,98) adim.

Concentración de fósforo inicial: (4,12) ppm.

Relación FeCl₃/P_{REMOVIDO} = 21,89

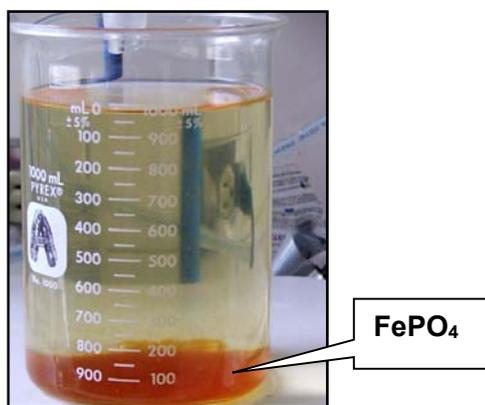


Figura 4.9: Resultados de la prueba de jarras para determinar la cantidad óptima de cloruro férrico en muestras de agua tratada de la PTAR



Vale la pena mencionar que; como se muestra en la ecuación (I), el coagulante sólo remueve ortofosfato, sin embargo es muy probable que por la clarificación que experimenta el agua, se desestabilicen sólidos coloidales y sedimenten por efecto físico y no químico.

En vista de los excelentes resultados obtenidos, se decide repetir esta prueba a nivel de laboratorio a la salida de las piscinas de aireación, ya que el sólido precipitaría en los clarificadores, buscando una fácil manera de agregar el químico en una futura implementación sin modificaciones de infraestructura, los resultados se presentan como sigue en la tabla 4.7. En vista de que la concentración de fósforo en la PTAR es variable, este efecto es apaciguado calculando la relación, dosis de coagulante por fósforo removido, con el uso de este indicador se logra comparar tratamientos fisicoquímicos, véase la figura 4.10.

Tal como se muestra en la tabla 4.7, la relación coagulante fósforo removido es mayor para muestras a la salida de la piscina de aireación, esto se debe a posibles reacciones colaterales generadas por alta alcalinidad, véase la figura 4.10. Además, para alcanzar la concentración estimada se necesitaría aproximadamente el doble de la cantidad de coagulante; ya que el efluente de la piscina esta compuesto por el agua tratada y el lodo de recirculación, siendo el flujo de coagulante directamente proporcional al flujo de agua a tratar. Por otra parte ese cuerpo de agua recirculado “ya tratado”, se retrataría una y otra vez hasta abandonar el sistema, o por un tiempo aproximadamente igual a la edad TRL del lodo aerobio de la planta.

TABLA 4.7: RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE PRUEBA DE JARRAS CON CLORURO FÉRRICO REALIZADO EN MUESTRAS A LA SALIDA DE LA PISCINA DE AIREACIÓN DE LA PTAR

Dosis de FeCl ₃ (ppm)	pH final	Fósforo (ppm)	Porcent. Remoción (%)
350,00	7,20	0,23	91,47

pH inicial de la muestra: (7,98) adim.

Concentración de fósforo inicial: (3,66) ppm.

Relación FeCl₃/P_{REMOVIDO} = 27,55



El sulfato de aluminio no fue considerado como alternativa, debido a que en la etapa de toma de datos, se produjo un descenso drástico en el pH del agua, a expensas de la producción de ácido sulfúrico en la reacción, obteniéndose pH inferiores al establecido en la normativa ambiental para lograr remover el fósforo requerido, por otra parte, incrementa la alcalinidad y genera más precipitado que los demás coagulantes debido a la baja selectividad del catión aluminio. La reacción se muestra a continuación:



Por lo tanto el segundo coagulante es el policloruro de aluminio, muy utilizado en la actualidad para la clarificación de aguas blancas ya que no deja residual de aluminio en el agua y afecta muy poco el pH de la misma, véase la tabla 4.8, 4.9 y figura 4.11.

TABLA 4.8: RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE PRUEBA DE JARRAS CON POLICLORURO DE ALUMINIO REALIZADO EN MUESTRAS DE AGUA TRATADA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Dosis de PAC (ppm)	Tiempo de FLOC (s)	Tiempo de sediment. (min)	Índice de Wilcomb	WRA-SS (%)	pH final	Fósforo (ppm)	Porcent. remoción (%)
350,00	30,00	3,50	8	F-23,0	7,68	0,29	93,79

pH inicial de la muestra: (8,30) adim.

Concentración de fósforo inicial: (4,67) ppm.

Relación PAC / P_{REMOVIDO} = 39,95

TABLA 4.9: RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE PRUEBA DE JARRAS CON POLICLORURO DE ALUMINIO REALIZADO EN MUESTRAS A LA SALIDA DE LA PISCINA DE AIREACIÓN DE LA PTAR

Dosis de PAC (ppm)	pH final	Fósforo (ppm)	Porcent. Remoción (%)
400,00	7,49	0,24	94,88

pH inicial de la muestra: (8,11) adim.

Concentración de fósforo inicial: (4,69) ppm.

Relación PAC / P_{REMOVIDO} = 44,94

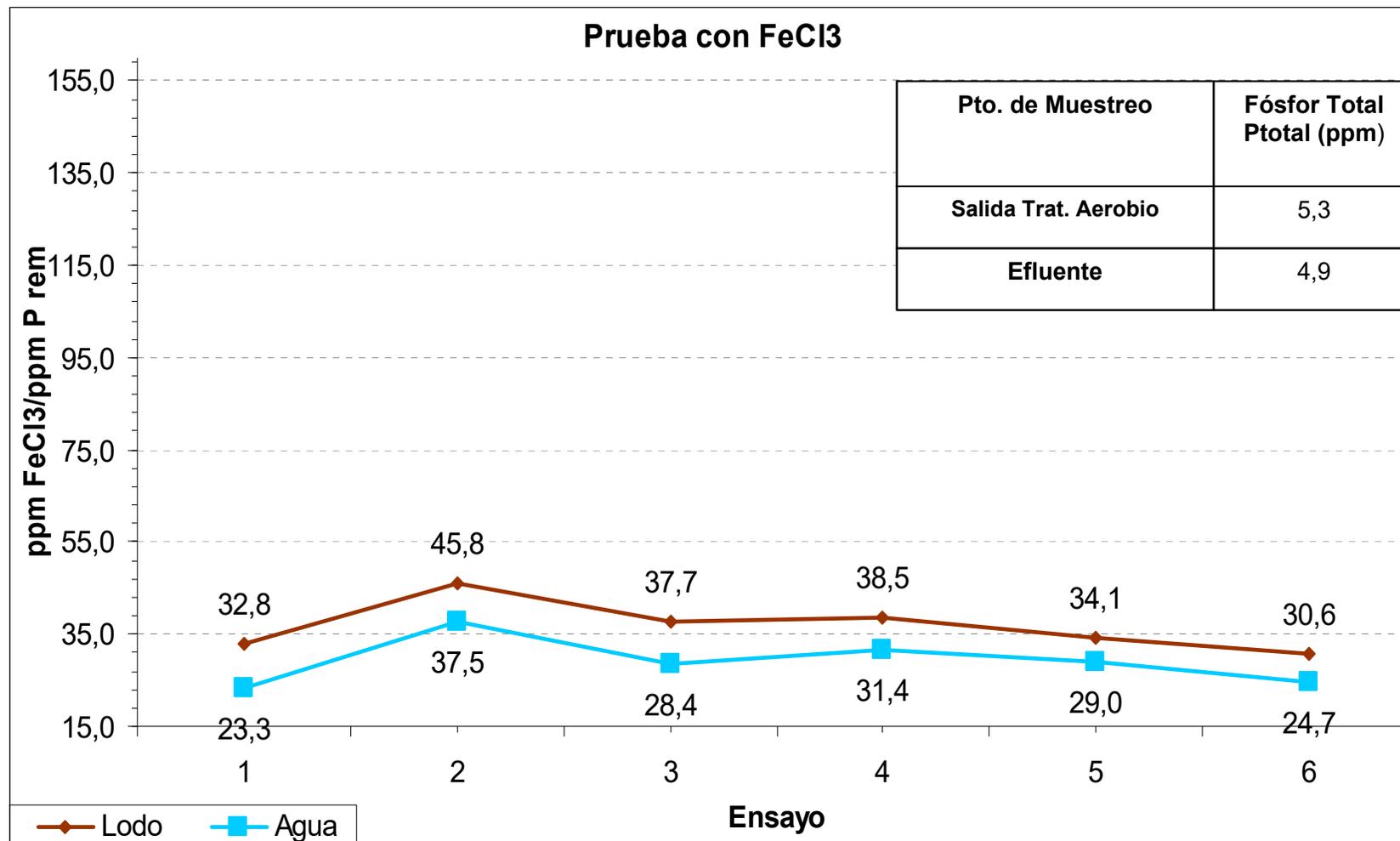


Figura 4.10. Relación experimental de cantidad de coagulante dosificado por ppm de fósforo removido con FeCl₃ en muestras a la salida del clarificador (Agua) y a la salida de la piscina (Lodo) en la PTAR

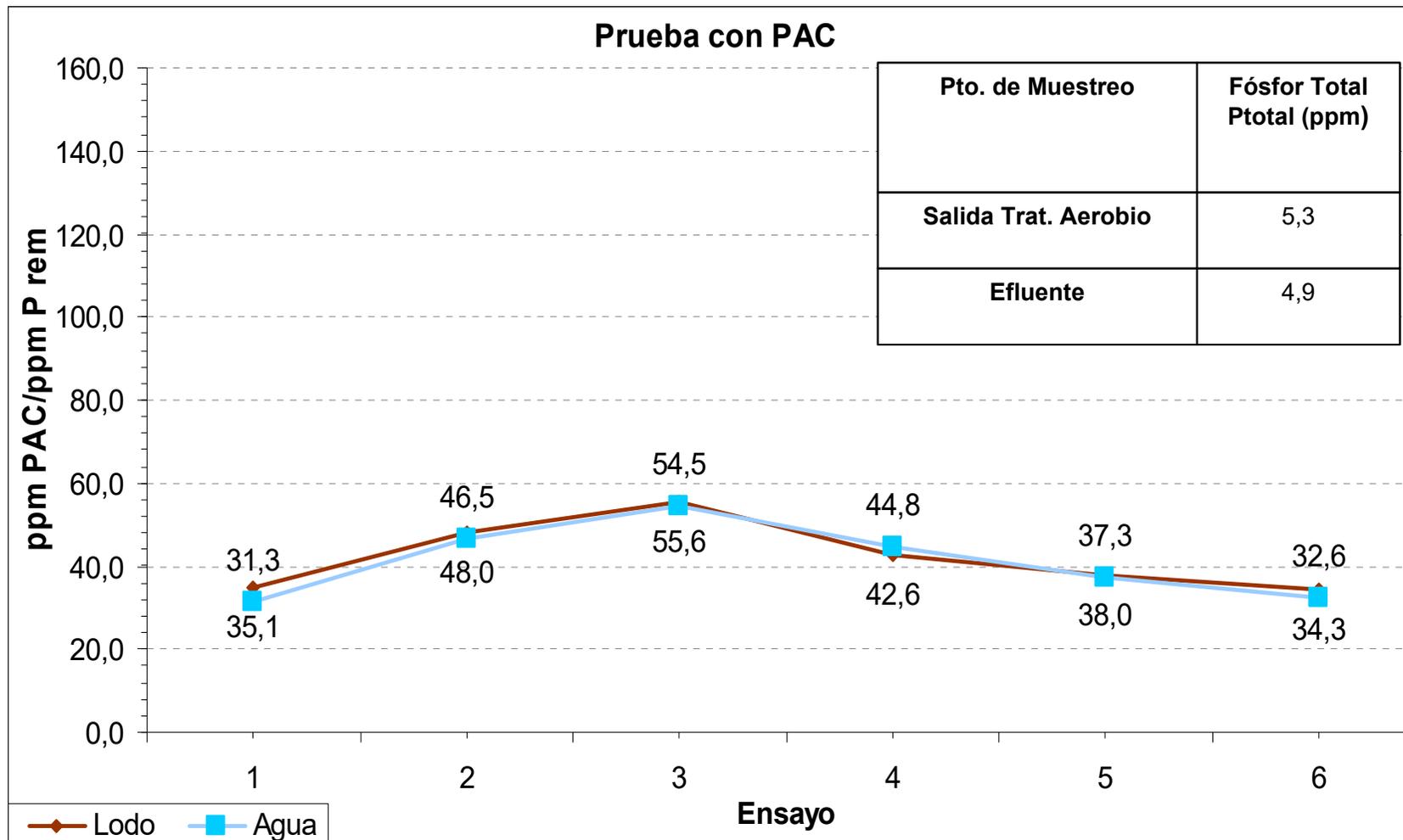


Figura 4.11. Relación experimental de cantidad de coagulante dosificado por ppm de fósforo removido con PAC en muestras a la salida del clarificador (Agua) y a la salida de la piscina (Lodo) en la PTAR

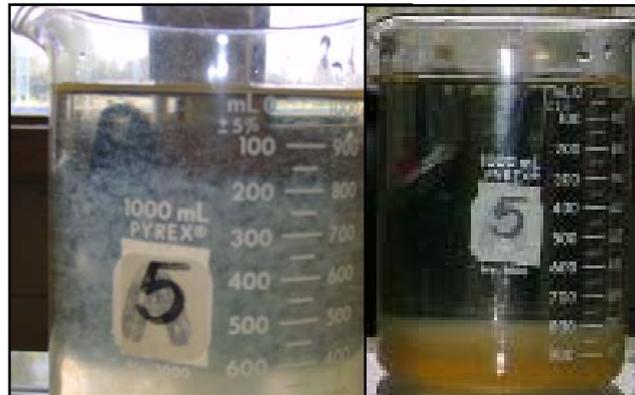


Figura 4.12: Resultados de la prueba de jarras para determinar la cantidad óptima de policloruro de aluminio en muestras de agua tratada de la PTAR

Del mismo modo que el cloruro férrico, se determinan las dosis óptimas de coagulante, obteniéndose como resultado, altos porcentajes de remoción de fósforo; más del 90 %, confirmándose una vez más, la hipótesis generada anteriormente. Adicionalmente se observó un índice de Wilcomb superior al del cloruro férrico, por ello el tiempo de floculación y sedimentación son menores, el valor del comparador WRA, indica que el floculo es de gran tamaño y la cantidad de sólido generada se triplica en comparación de las pruebas con cloruro férrico, (véase la figura 4.12), esto se debe a las características físicas de los flocs formados.

Del mismo modo se muestra en la figura 4.11, que la coagulación se ve ligeramente favorecida en agua clara, además de las ventajas ya mencionadas anteriormente, se descarta la aplicación de coagulante a la salida de la piscina de aireación, como alternativa de remoción de fósforo.

Para la selección del coagulante se procede a realizar una caracterización de los sobrenadantes de cada prueba y de la PTAR a nivel de laboratorio, para lograr evaluar eficiencia, impacto ambiental, manejo, entre otros, (véase la tabla 4.10).

En la caracterización realizada, se visualiza que la conductividad aumenta con la adición de coagulantes, esto es por la carga catiónica que poseen los mismos que se adiciona al agua (Arboleda, 2000), en el caso del cloruro férrico, la conductividad aumenta gracias al catión hierro. La alcalinidad disminuye por la precipitación de carbonatos presentes en el agua, en este caso el cloruro férrico posee ventajas de tratamiento sobre el policloruro de aluminio. En esta tabla, se observa también, las



propiedades que posee el PAC como clarificante del agua, lo que se traduce directamente como disminución de la turbidez. Entre otras ventajas del cloruro férrico se registro que es capas de remover nitrógeno. No se profundiza en esta información, ya que la caracterización se realizó con el fin de identificar el comportamiento de otras variables, con respecto al uso de los coagulantes presentados anteriormente.

TABLA 4.10: CARACTERIZACIÓN UNA VEZ REALIZADAS LAS PRUEBAS DE JARRAS A LA DOSIS ÓPTIMA ESTIMADA DE COAGULANTE EN MUESTRAS DE AGUA TRATADA DE LA PTAR

CALIDAD DEL AGUA				
Variable Característica	Sin tratamiento fisicoquímico	Tratamiento con FeCl ₃	Tratamiento con PAC	Norma del Decreto 3219
Conductividad (L) mS/cm	1539,00	1590,00	1567,00	-----
Alcalinidad (Alc) ppm	700,00	600,00	650,00	-----
Dureza Total (D _T) ppm	120,00	120,00	120,00	-----
pH adim	8,27	7,40	8,00	6,00 – 9,00
Turbidez (T) NTU	2,77	16,89	0,30	-----
Fósforo Total (P _T) ppm	5,15	0,20	0,29	1,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO) ppm	53,44	53,44	53,44	350,00
Nitrógeno Total (N _T) ppm	3,10	2,30	3,10	10,00
Hierro (Fe _T) ppm	0,15	1,41	0,43	10,00
Aluminio (Al _T) ppm	-----	-----	-----	1,00
CALIDAD DEL PRECIPITADO				
Variable Característica	Tratamiento con FeCl ₃		Tratamiento con PAC	
Tiempo de Sedim. (t _{SED}) min	7,50		4,50	
WRA-SS (%)	E-7,5		F-23	
Índice de Wilcomb	6		8	

Adicionalmente a las alternativas estudiadas anteriormente, se evaluó; mediante el uso de los históricos de la planta de un año, el comportamiento e incidencia de algunas variables del proceso de tratamiento de aguas residuales.

Después de observar el comportamiento de las variables más importantes en el afluente y efluente de la planta, piscinas de aireación y salida de los reactores, se pudo verificar la importancia de medir la concentración de fósforo reactivo en el efluente de la PTAR. Este es un indicador del comportamiento del licor mixto con respecto a la remoción del nutriente. Cuando el porcentaje de fósforo reactivo es alto con respecto al



fósforo total significa que se realizó la síntesis pero no el consumo adecuado del mismo (Winkler, 1994), ya sea por: condiciones desfavorables del licor mixto, -se deberá observar en el microscopio la diversidad de bacterias y protozoarios- ó lodo poco saludable.

Razones de la formación masiva de microorganismos filamentosos son:

- Baja carga en el lodo
- Composición inestable de las aguas residuales
- Variaciones bruscas en las características de las aguas residuales (Winkler, 1994)

Estos organismos logran inhibir el crecimiento de las bacterias y protozoarios floculentos, experimentando altas tasas de crecimiento aunque el substrato y las concentraciones de oxígeno sean bajos.

Por otra parte, es importante la verificación mensual de los parámetros de operación de la piscina de aireación extendida como lo son el TRL, F/M, t_r , la tasa de remoción de nutrientes, el flujo de salida de lodo de desecho y SSVLM en la corriente de desecho de lodo; solo para el cálculo del TRL.

Tomando en cuenta que cada PTAR tiene un F/M óptimo y que el mejor efluente de la planta se obtiene cuando la calidad del lodo es buena, se utilizó como guía el F/M de diseño; (0,05-0,15) Kg*DBO/Kg*SSV*día, y los históricos de la misma para encontrar el rango de operación óptimo del proceso aeróbico.

Otro indicador muy útil es la relación (DBO/DQO) ya que este orienta en la ingeniería conceptual del tratamiento a realizar o que se está realizando, en el caso de la PTAR se utiliza para conocer el porcentaje biodegradable en el efluente, indicando de esta manera si el proceso biológico se lleva a cabo adecuadamente ó si es necesario un tratamiento químico adicional ya que el biológico funciona correctamente.

Como base a los criterios expuestos anteriormente y con ayuda de los datos históricos de la planta desde enero del 2005 hasta la fecha, se procedió a calcular los parámetros mencionados para observar el comportamiento de la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR ante los mismos y ante otras variables del proceso.

En la Figura 4.13 se muestra que en su mayoría la relación DBO/DQO se mantiene en un rango materia biodegradable de (0,25-0,5). Esto demuestra que la calidad del proceso aerobio es aceptable y en base al comportamiento del fósforo es



necesario combinar el tratamiento biológico con un tratamiento químico, ya que para normas con un rango tan ajustado, el tratamiento biológico por mas atractivo que parezca es muy inestable debido a la dependencia de un gran número de variables y parámetros de operación. Cuando la relación es menor a 0,4 en el efluente de la PTAR, significa que el proceso biológico hizo su función satisfactoriamente y que no puede ser mas efectivo de lo que ya es. En este caso es necesario como se muestra en la tabla II. Un tratamiento químico combinado con el tratamiento biológico.

En la figura 4.14. Se muestra la importancia de operar de manera correcta los clarificadores, ya que a concentraciones de fósforo tan bajas como las requeridas es delicado el tema de la clarificación, cualquier partícula que no haya sedimentado correctamente puede aportar una cantidad de fósforo importante con respecto a la porción de agua que la contiene. En la figura se muestran como los picos de SST lo siguen pequeños aumentos de la concentración de fósforo, esto deja claro que no es el problema actual, pero también deja claro que es importante vigilar y tomar en cuenta esta variable, la cual se controla mediante la correcta operación de los sedimentadores.

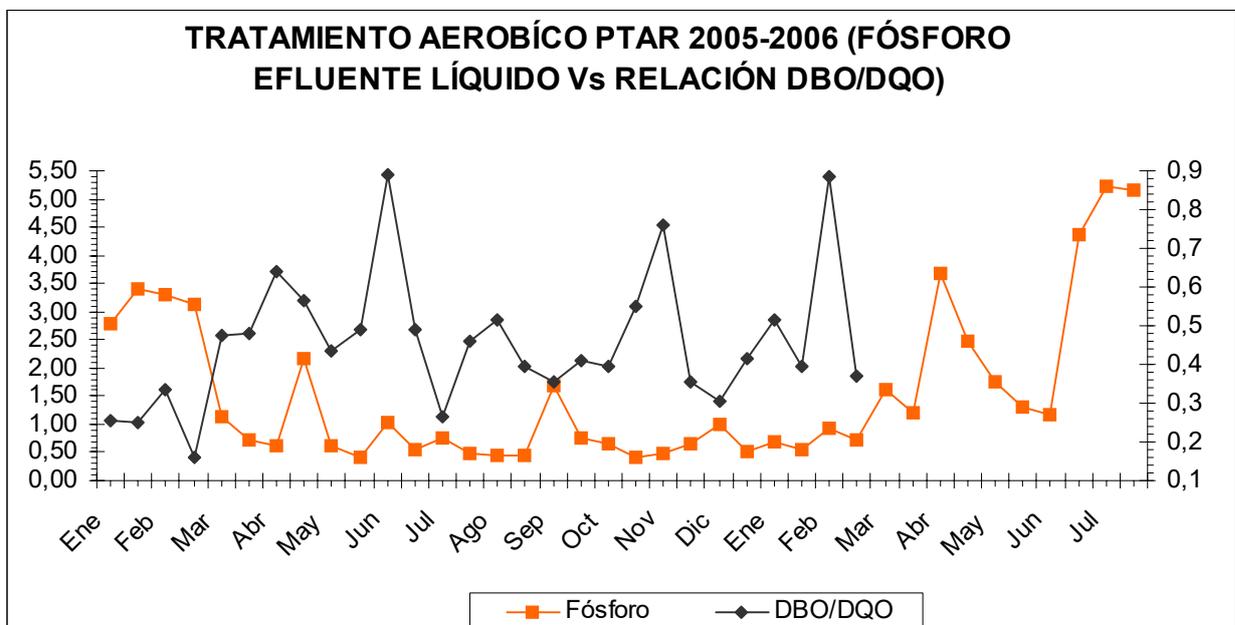


Figura 4.13: Comportamiento de la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR con respecto a la relación DBO/DQO

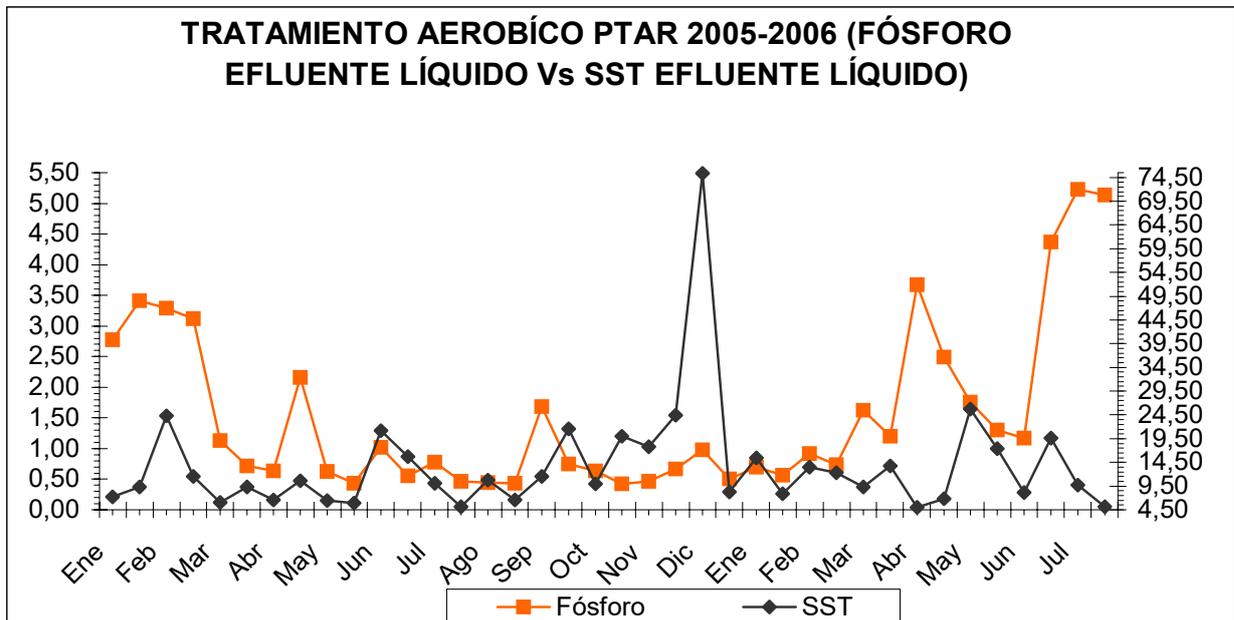


Figura 4.14: Comportamiento de la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR con respecto a los SST

En la Figura 4.15 y 4.16, Se evidencia la completa proporcionalidad entre los SSV y los SST, la relación entre ellos es 63% aproximadamente y es muy estable y constante. Por ello cuando se habla de picos de SST también se habla de picos de SSV. En la figura se muestra una relación inversamente proporcional bien marcada entre los sólidos y la concentración de fósforo, especialmente para los sólidos volátiles. Obteniéndose que para altas concentraciones de SSV el fósforo es bajo. De aquí deriva la importancia de determinar el TRL y el F/M óptimo para la PTAR. En función a esto, se considera recomendable que la concentración de sólidos volátiles en la piscina de aireación sea mayor a 2400ppm y menor a 3000ppm para evitar problemas de manejo de lodos. Esto según la relación estimada arroja una concentración de SST entre (3800-4800) aproximadamente.

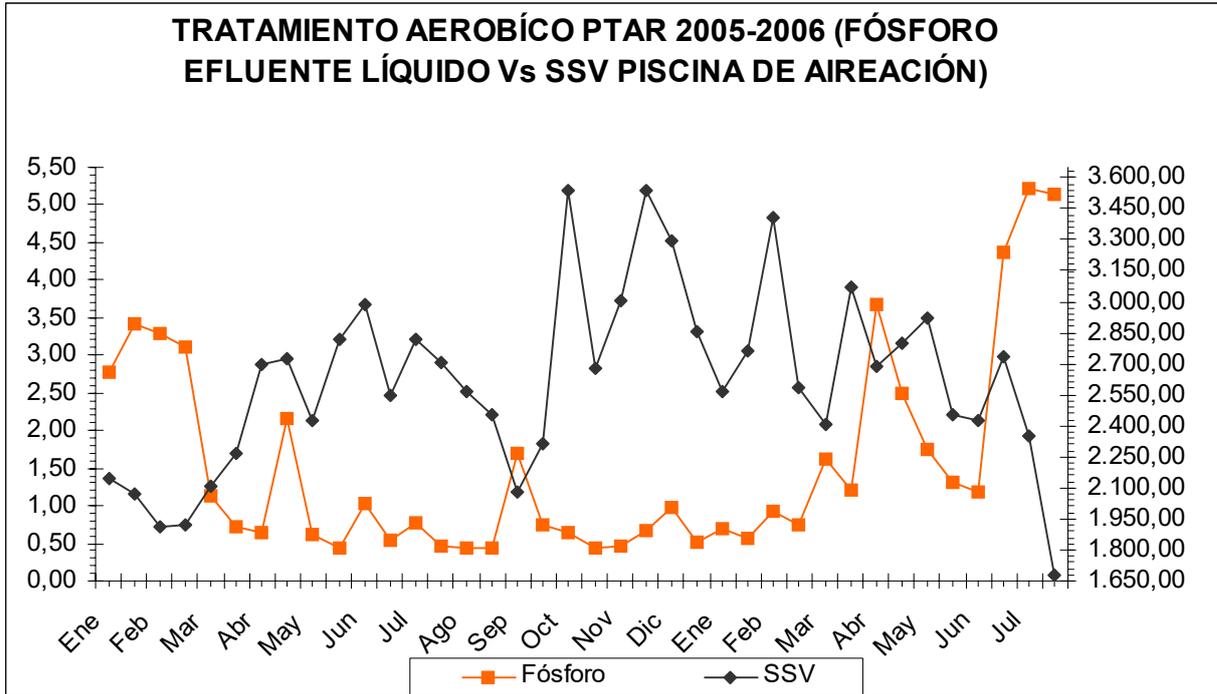


Figura 4.15: Comportamiento de la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR con respecto a los SSVLM en la piscina de aireación

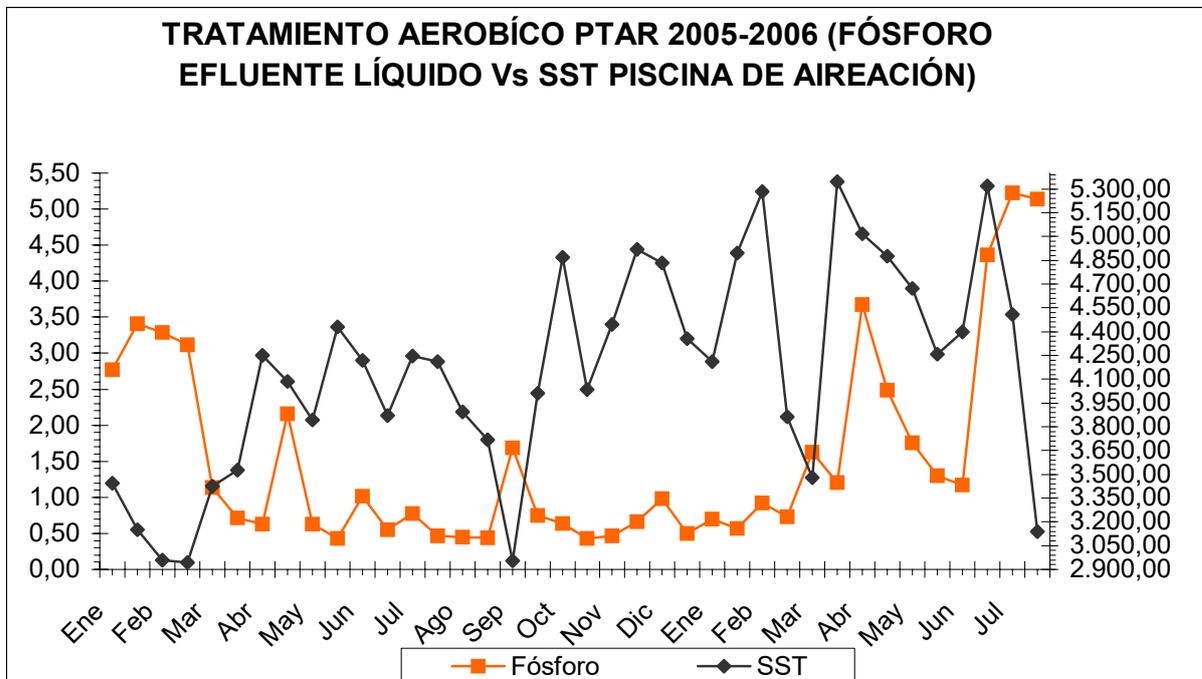


Figura 4.16: Comportamiento de la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR con respecto a los SSTLM en la piscina de aireación



La Figura 4.17 y 4.18, se construyó, con el propósito de observar el comportamiento del fósforo en el efluente de la PTAR con respecto al fósforo proveniente del proceso de elaboración, el cual aporta la mayor cantidad del mismo en Estación Bombeo, esto demuestra el comportamiento directamente proporcional entre la concentración de fósforo en Estación Bombeo y en Elaboración, picos de fósforo en este punto vienen seguidos de picos de fósforo en el punto Estación Bombeo. Esta figura muestra que la planta es capaz de manejar la concentración de fósforo alimentada, la cual es diluida por el efluente de Envasado, esto la hace una concentración relativamente baja comparada con otras plantas. Por otra parte, estas dos figuras demuestran que la alternativa de atacar las principales fuentes de fósforo sustituyendo químicos en el proceso de Elaboración no representa una alternativa efectiva, no existe ningún patrón de comportamiento aparente entre la concentración de fósforo en Estación Bombeo y el fósforo en el efluente de la planta, demostrándose que el proceso de lodos activado instalado, es capaz de manejar la concentración afluente actual y mas altas, siendo lo mas importante la salud del lodo. De aquí nace la inquietud de controlar los parámetros F/M y TRL, ya que en ocasiones la concentración de fósforo se comporta de manera inversamente proporcional a la de Estación de Bombeo.

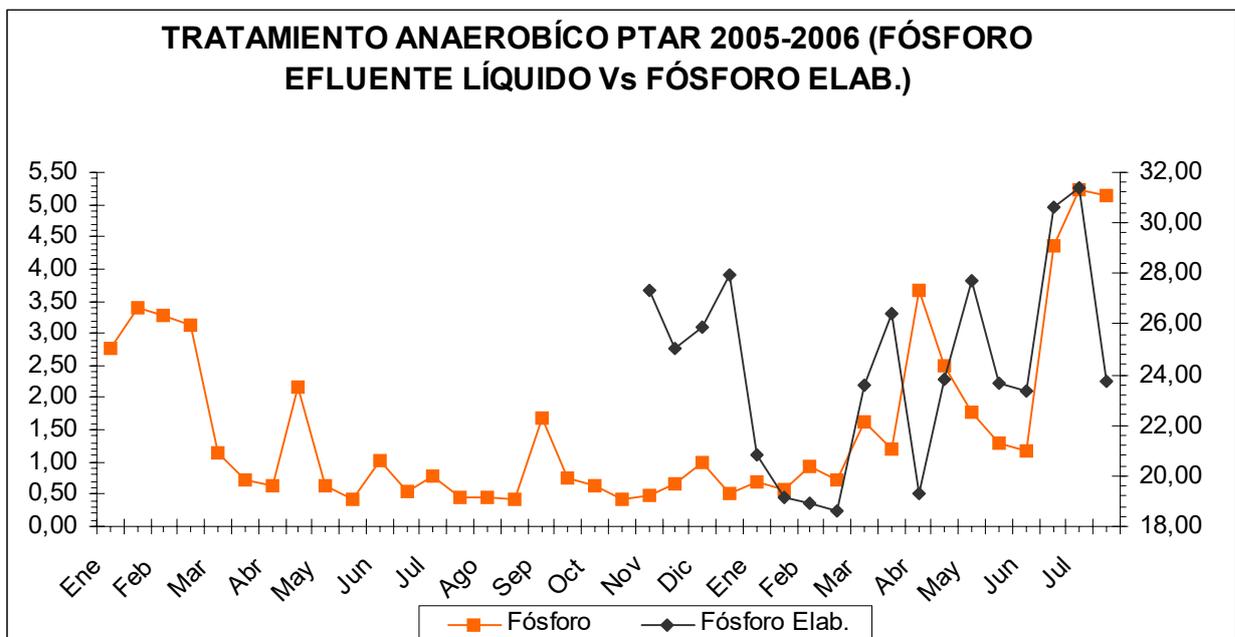


Figura 4.17: Comportamiento de la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR ante cambios en la concentración de fósforo en Elaboración

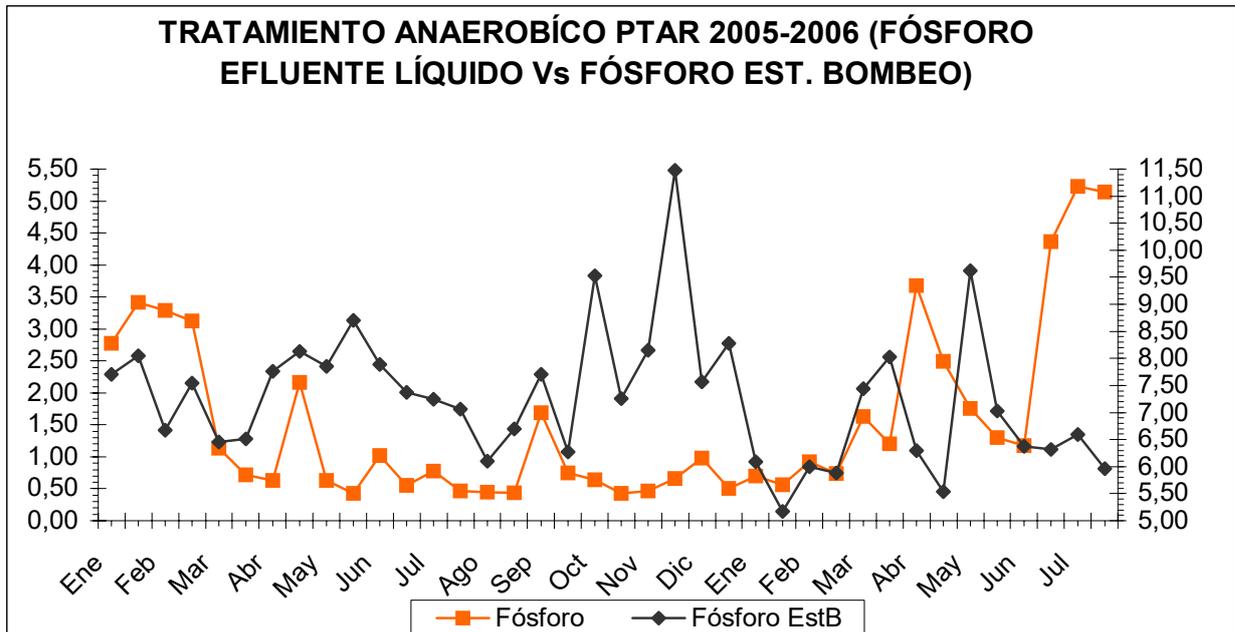


Figura 4.18: Comportamiento de la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR ante cambios en la concentración de fósforo en Estación Bombeo

En la Figura 4.19 se evidencia claramente la dependencia de la concentración de fósforo con respecto a la DQO. A bajas concentraciones de DQO el fósforo aumenta en el efluente y viceversa, esto demuestra la necesidad del fósforo por parte de los microorganismos para transportar la información genética en el proceso de reproducción de nuevas células (Winkler, 1994). Esta información le da aún más relevancia a la relación F/M que es dependiente del alimento (DQO).

La figura 4.20, muestra que los desvíos favorecen la remoción de fósforo y aumentan los sólidos en las piscinas, picos de porcentaje de desvío traen como consecuencia descenso en la concentración de fósforo y aumento en los SST.

La figura 4.21. muestra que a medida que aumenta la relación F/M, se favorece el proceso de remoción de fósforo, se debe tomar en cuenta que algunos picos de F/M se dan por SST muy bajos en la piscina de aireación esto no es favorable. Lo mas importante de esta relación es que aparentemente cuando es alta la relación el comportamiento de la concentración de fósforo en el efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales es mas estable sobre todo cuando oscila entre (0,08 y



0,20) (Metcalf & Eddy, 1972). Por otra parte el TRL es un parámetro que puede ser utilizado como una herramienta para controlar el F/M.

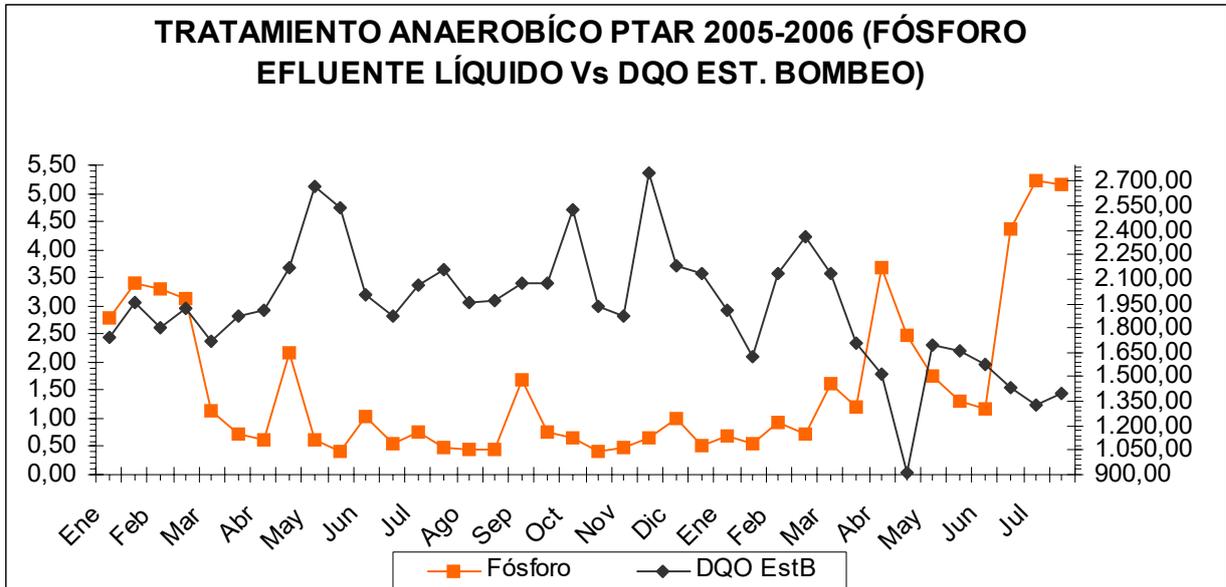


Figura 4.19: Comportamiento de la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR ante cambios en la DQO en Estación Bombeo

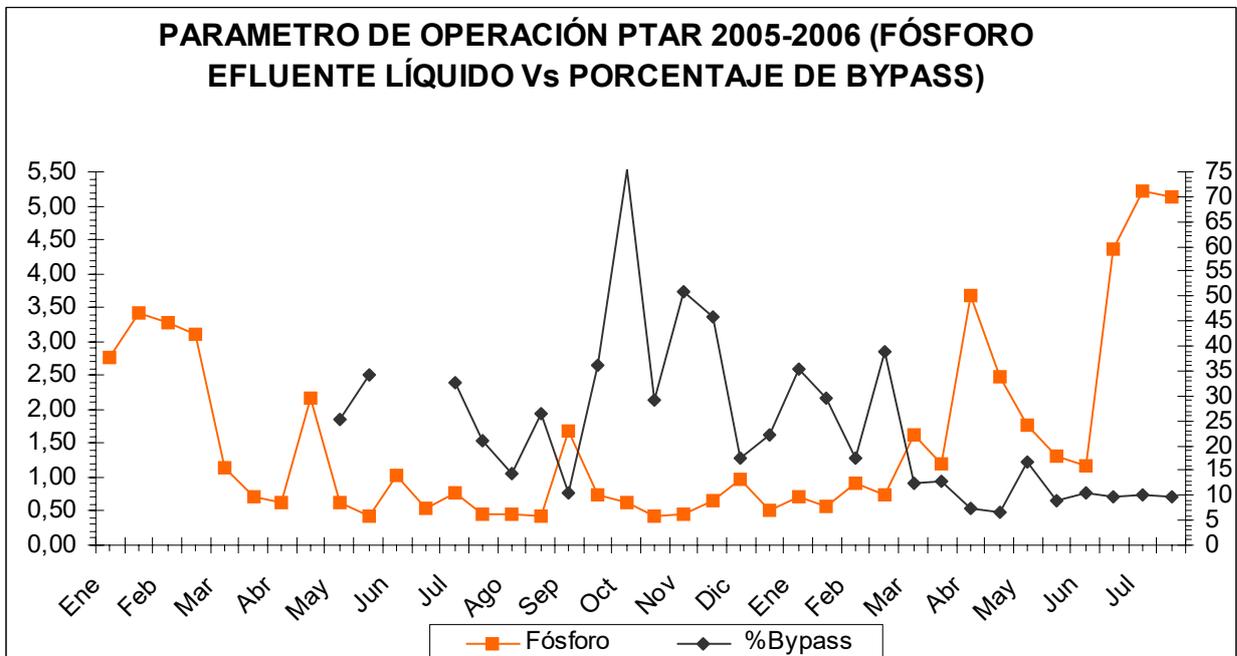


Figura 4.20: Comportamiento de la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR ante cambios en el porcentaje de agua cruda alimentada a la piscina de aireación

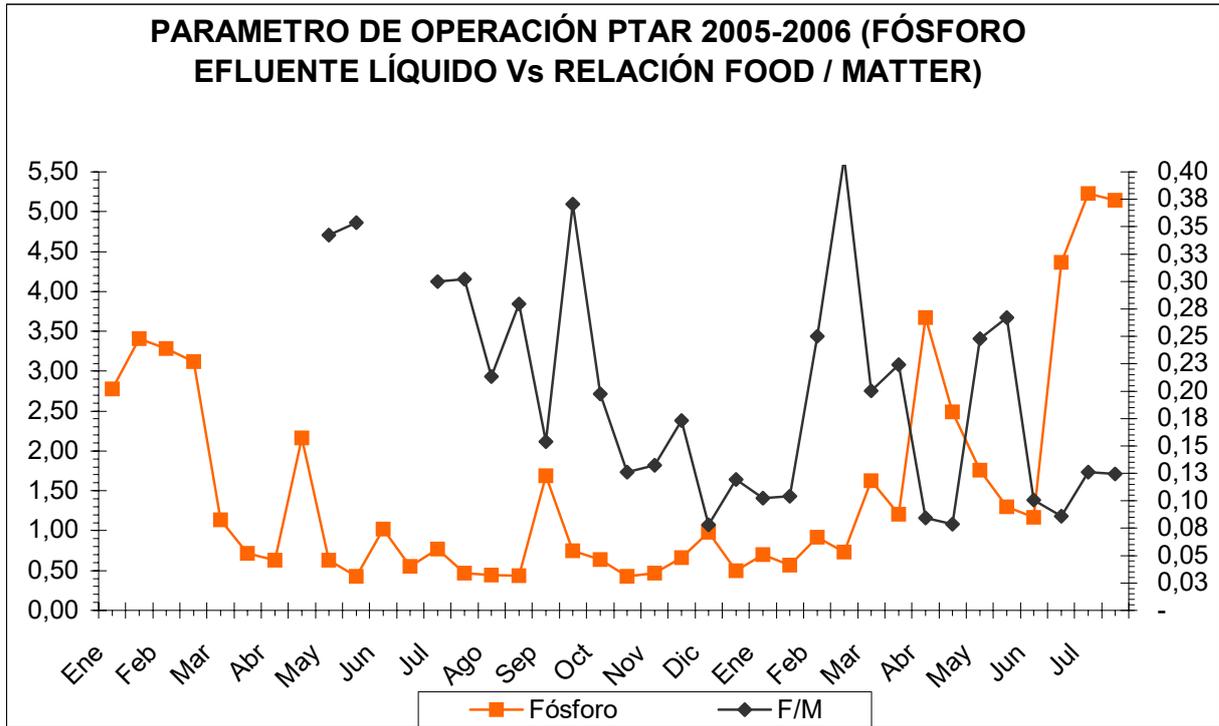


Figura 4.21: Comportamiento de la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR ante cambios en la relación F/M

Una vez culminado el análisis de los datos históricos para encontrar las mejores condiciones de operación de la PTAR y en función a los resultados obtenidos en el estudio de alternativas, se procede a construir una matriz de selección mostrada a continuación con las alternativas que proporcionaron los mejores resultados, para la selección de un tratamiento que será implementado a nivel de prueba de campo, por un mes de duración.

TABLA 4.11: MATRIZ DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS PARA REDUCIR LA CONCENTRACIÓN DE FÓSFORO TOTAL EN EL EFLUENTE DE LA PTAR

Alternativas (1-10)	Adición de FeCL ₃ en agua clarificada	Adición PAC en agua clarificada
Criterios (1-100) %		
Eficiencia (45%)	9	6
Costos (30%)	5	2
Manejo (10%)	4	9
Impacto Ambiental (15%)	9	10
Total (100%)=	7,3	5,7



La matriz de selección mostrada, fue la herramienta metodológica para determinar el mejor coagulante entre ambos (FeCl_3). La eficiencia fue evaluada según la relación de cantidad de coagulante dosificada entre la cantidad de fósforo removido, el manejo según la hoja de seguridad de ambos químicos y el impacto ambiental según la caracterización del efluente de cada prueba.

La dosis óptima de coagulante se calculó según la concentración de fósforo removido y la cantidad de FeCl_3 añadido a la muestra, véase la figura 4.22.

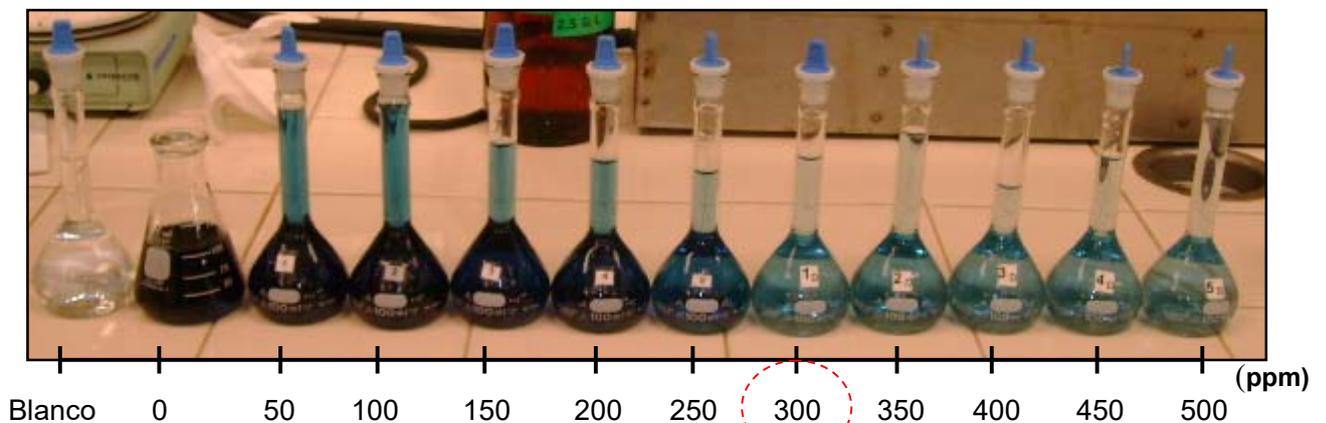


Figura 4.22: Marcha experimental de remoción de fósforo mediante la dosificación de coagulante a diferentes concentraciones para determinar dosis óptima

4.3. IMPLEMENTACIÓN DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA DE REDUCCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE FÓSFORO TOTAL A NIVEL DE PLANTA

El diseño de la implementación de la alternativa seleccionada a modo de prueba de campo, consistió; tal como se muestra en la figura 4.23, en tomar entre el 10 y el 15 % del efluente total de la planta ($60\text{-}70 \text{ m}^3/\text{h}$), para evitar impactos en el proceso y luego se le inyectó el cloruro férrico en línea a la dosis óptima encontrada (300ppm lo que equivale a 15 l/h), haciendo pasar la mezcla por un agitador estático, para finalmente ser enviado a un espesador de 1200 m^3 de capacidad fuera de servicio, el rebose descargó al canal Parshall; mediante una modificación en la tubería de recirculación, y el precipitado (FePO_4), fue enviado al filtrobanda por medio de la tubería original de servicio del equipo espesador de lodos. Vale la pena mencionar que todos los materiales para llevar a cabo la prueba, fueron recuperados y/o reutilizados a excepción



de los 84 m de tubería de retorno de PVC 8" y 4 codos del mismo diámetro nominal, lo que tuvo un costo de 1.682.700,00 Bs instalada. Otra pieza importante en el desarrollo de la prueba, fue el mezclador estático, el cual fue diseñado y construido en planta, además se logró conseguir 6.000 kg de FeCl_3 en calidad de obsequio.

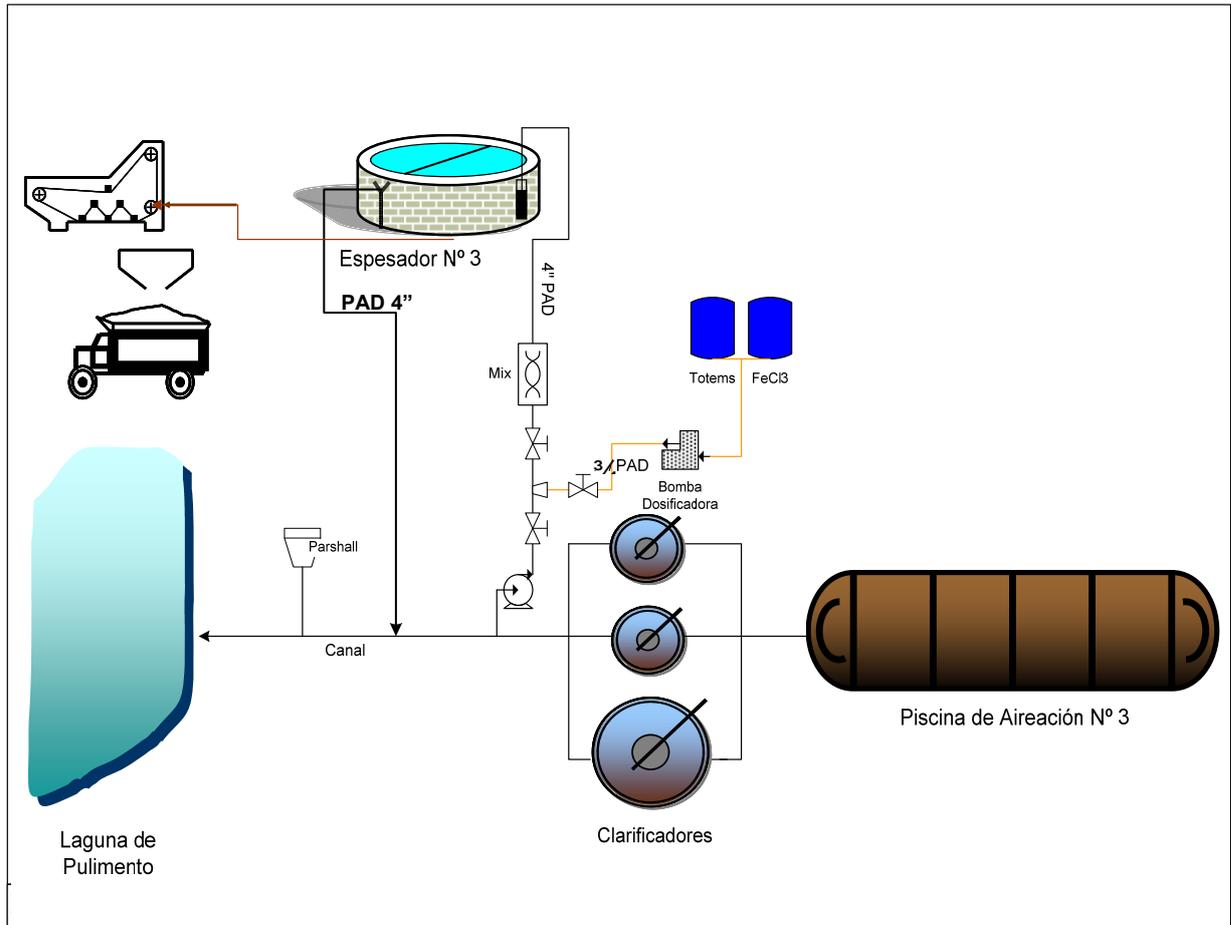


Figura 4.23. Diagrama de instrumentación y tuberías del tratamiento propuesto para la remoción de la concentración de fósforo total en el efluente de la PTAR



TABLA 4.12: ESPECIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL TRATAMIENTO PROPUESTO PARA REMOVER FÓSFORO EN LA PTAR

Condición de Operación	Punto de Ajuste
Caudal de agua a tratar (m ³ /h)	(60-70)
Dosis máxima de cloruro férrico (ppm)	300
Concentración del Cloruro Férrico (%)	27
Porcentaje de Remoción mínimo (%)	60
Período de prueba	1 mes

* Adicionalmente se deben cumplir con las garantías de calidad establecidas en la tabla 4.10.

El caudal de operación de la prueba se fijó según el flujo necesario para que sedimente el sólido generado, las tuberías fueron diseñadas para que la velocidad no superara los 2 m/s de agua residual, la dosis de cloruro férrico se fijó según lo hallado experimentalmente a nivel de laboratorio, se contó con una bomba sumergible Fly de 200 m³/h de capacidad máxima para enviar el agua tratada al tanque sedimentador y una bomba para producto químico Prominent de 240 L/h de capacidad máxima. El mezclador estático se construyó con un trozo de tubo de PAD de 6", a la cual se le colocaron ciegos perforados a la entrada y salida del mismo y se empacó con aros de PVC de 1", para garantizar una mezcla rigurosa. Adicionalmente para poder controlar y afinar la dosis de producto químico inyectado, se colocó a la descarga de la bomba sumergible un medidor de flujo electrónico Danfoss.

4.4. DETERMINACIÓN DEL EFECTO DEL TRATAMIENTO SELECCIONADO EN EL EFLUENTE DE LA PTAR

Para determinar el efecto del tratamiento planteado, se seleccionaron como punto de muestreos, los siguientes: entrada al tratamiento propuesto (efluente PTAR) y salida del tratamiento propuesto (efluente prueba). Los resultados se presentan a continuación, en la tabla 4.13. Adicionalmente, en la tabla de datos correspondiente en los anexos, se pueden visualizar, el cambio de pH, el caudal de operación, la dosis de producto químico y el fósforo en la mezcla de los dos efluentes.



Como se puede observar en la tabla 4.13, el tratamiento de remoción de fósforo propuesto, es capaz de reducir hasta en un 98 % la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR, en el transcurso de la prueba se varió la dosis de cloruro férrico entre 90 y 300 ppm, con la intención de hallar la dosis óptima de coagulante en campo, en vista de que el comportamiento de la concentración de fósforo a la entrada del proceso fue tan fluctuante, no se pudo realizar, sin embargo, una metodología empleada para conocer la dosis óptima y filtrar la inestabilidad del sistema, fue calcular la relación FeCl_3 dosificado por fósforo removido, la cual, tal como podemos observar en la tabla oscila entre 18 y 30 ppm de cloruro férrico por ppm de fósforo removido. Vale la pena mencionar que la alternativa propuesta cumplió con todas las garantías de operación y diseño, ejemplo de esto es el caudal manejado de 60,79 m^3/h aproximadamente. Otros de los beneficios cuantificados fue el descenso de pH de, 8,08 a 7,55 aprox., al prensar el sólido (FePO_4), mejoró notablemente la floculación del lodo de desecho y disminuyó en un 9% el porcentaje de humedad de la torta expulsada por el filtrobanda, esto originó un aumento en la capacidad de prensar lodo actual del equipo, véase la figura 4.1.

TABLA 4.13: COMPORTAMIENTO DEL TRATAMIENTO PROPUESTO EN LA REMOCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE FÓSFORO TOTAL

Fósforo Total Entrada (P_{Te}) ppm	Fósforo Total Salida (P_{Ts}) ppm	Porcentaje de remoción (%R) %	Relación FeCl_3/P_{rem}
2,46	0,05	98,00	23,01
4,75	0,32	93,00	18,28
1,91	0,04	98,00	28,88
2,33	0,05	98,00	29,61
4,03	0,27	93,00	17,95
2,02	0,10	95,00	28,13
3,01	0,27	91,00	20,84
1,63	0,30	82,00	19,05
2,21	0,14	94,00	23,62



TABLA 4.14: COMPORTAMIENTO DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD EN LA TORTA DE LODO DE DESECHO DEL FILTROBANDA

Porcentaje de Humedad antes %H_A (%)	Porcentaje de Humedad después %H_D (%)	Porcentaje de reducción (%R) %
82	75	9

En la figura 4.25, se observa un comportamiento muy parecido a la figura 1.1, donde se grafica el fósforo total en el efluente de la PTAR, esto se demuestra calculando el fósforo promedio de la figura 1.1 (abril-mayo), el cual es 1,64, mientras que el fósforo promedio de la figura 4.25 (octubre-noviembre), fue 1,77, estos resultados verifican la consistencia y precisión de la data manejada. Por otra parte, se observa que el comportamiento de la concentración de fósforo a la salida del tratamiento propuesto, se mantiene siempre por debajo de lo estipulado en el decreto 3219, esto es de suma importancia, ya que se cumple con la finalidad general del trabajo desarrollado. La dispersión de los datos no es tan fluctuante, es decir, tiene un comportamiento más estable y lineal, lo que le brinda al sistema confiabilidad y estabilidad en el control del nutriente.

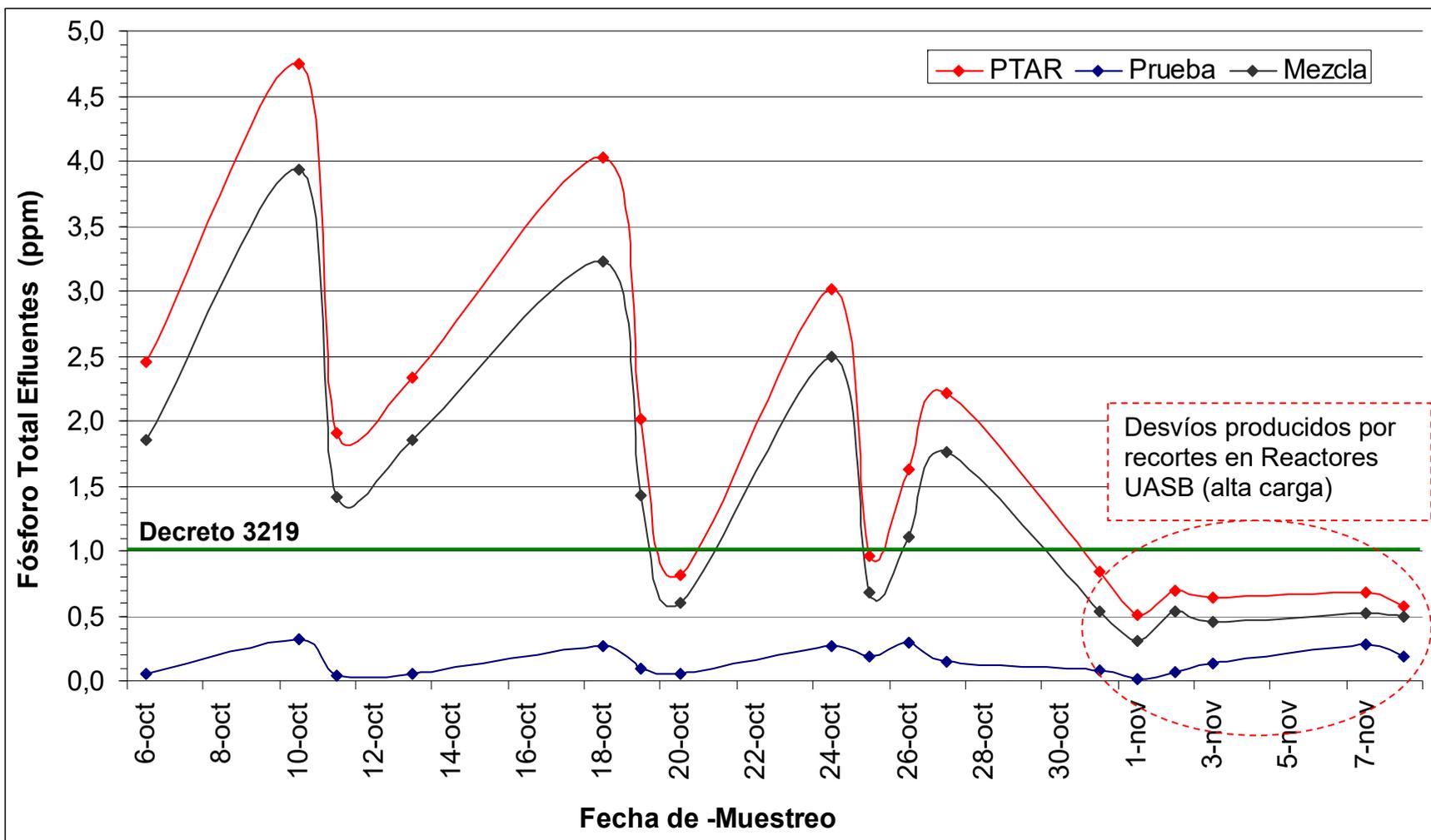


Figura 4.25: Comportamiento de la concentración de fósforo total a la salida del tratamiento propuesto contra el efluente de la PTAR

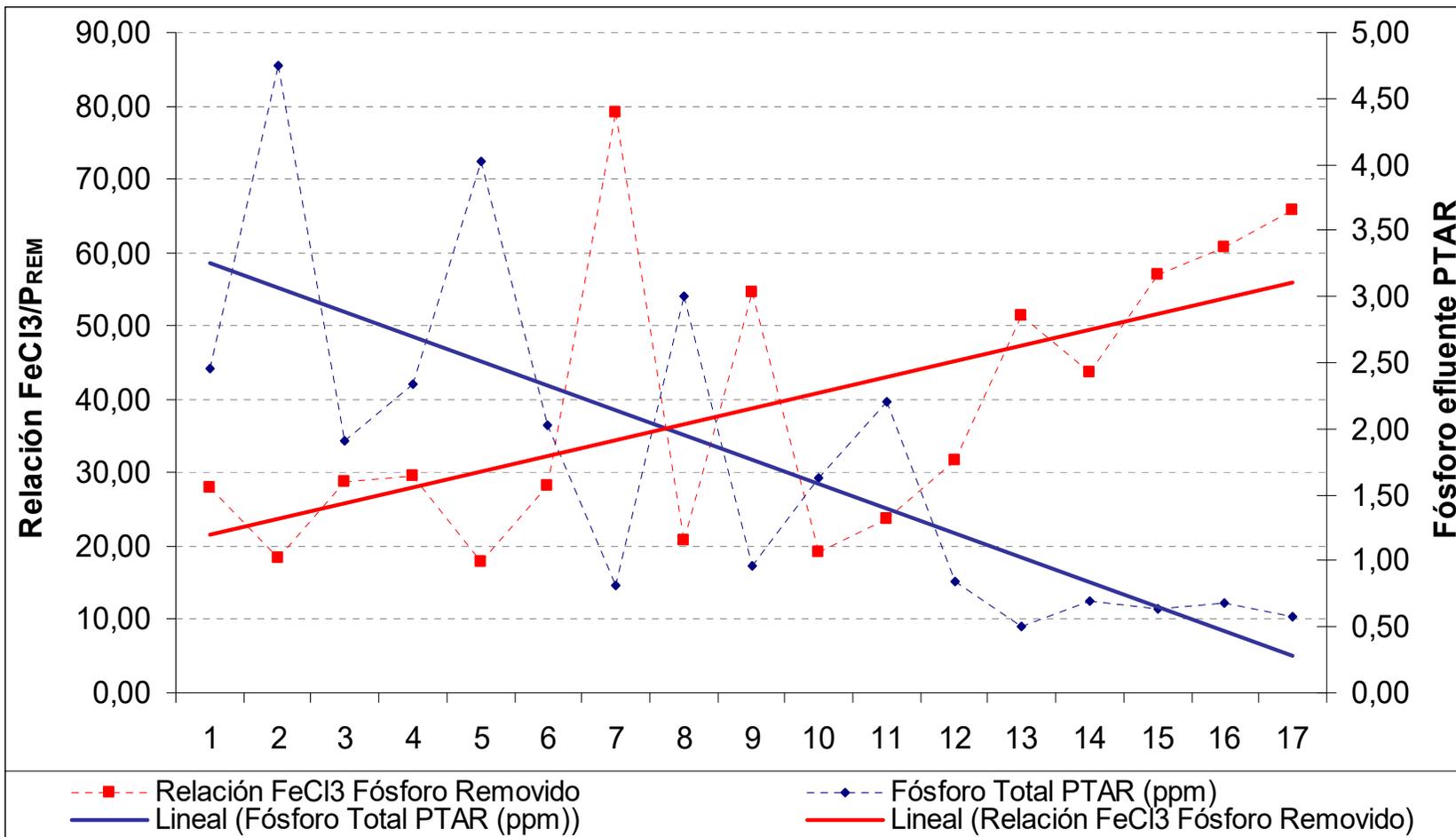


Figura 4.26: Comportamiento de la concentración de fósforo total a la entrada del tratamiento propuesto contra la relación coagulante fósforo removido



Es importante aclarar que la relación de coagulante dosificado por fósforo removido depende de la concentración de fósforo total, ya que en este punto de la planta, la concentración del mismo es dependiente del consumo de ortofosfatos por parte del licor mixto, por ello, para altas concentraciones de fósforo total ($2 < P_{total} < 5$) el porcentaje de ortofosfato aumenta de 60 % hasta 95 %, ya que el consumo del nutriente por parte de los protozoarios y bacterias fue deficiente, ya sea por condiciones inadecuadas o por recarga de microorganismos filamentosos. Por otra parte, tomando en cuenta que el reactivo límite es el ortofosfato en presencia del $FeCl_3$, a medida que va disminuyendo la cantidad de fósforo reactivo disponible, la producción de fosfato férrico requiere un exceso de cloruro férrico para compensar reacciones colaterales y mantener la tasa de reacción constante (Arboleda,2000). Del mismo modo cuando la misma cantidad de coagulante se encuentra en presencia de ortofosfato en exceso (95 %), la conversión es completa debido a que las reacciones colaterales son casi nulas. En la figura 4.26 se muestra lo mencionado anteriormente. Este análisis es importante para el proceso que se desea proponer, ya que según la gráfica mostrada, a mayor concentración de fósforo en el punto de aplicación del coagulante, más favorecida se ve la reacción de remoción del nutriente. Desde otro punto de vista, a medida que la concentración de fósforo es menor a uno y tiende a cero, la cantidad de coagulante para remover 1 ppm del nutriente tiende a infinito. El punto de intersección de las dos líneas de tendencia representa el punto óptimo de operación del sistema, lo que hace aun más atractivo el uso de un tratamiento fisicoquímico en la PTAR, ya que el fósforo promedio total, sin desvíos intencionales es 1,7 aproximadamente.

4.5. EVALUACIÓN DE LA FUNCIÓN COSTO BENEFICIO DEL PROCESO DE REDUCCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE FÓSFORO

Tomando en cuenta la recuperación de equipos sin uso en la PTAR y obras civiles, se logra desarrollar una propuesta, para el tratamiento del 100 % del efluente de la PTAR, requiriendo únicamente los equipos, tuberías y accesorios mostrados a continuación, incluyendo mano de obra para acondicionamiento físico y civil de la planta, con una inversión inicial requerida de 70.789.424,00 Bs, véase la tabla 4.15.



TABLA 4.15: ESTIMACIÓN DE COSTOS PARA EL CÁLCULO DE LA INVERSIÓN INICIAL REQUERIDA PARA IMPLEMENTAR EL TRATAMIENTO PROPUESTO

Equipos, Acc. y Horas H.	Cantidad	Costo Unitario (Bs)	Costo Total (Bs)
Bomba Peristáltica Cap.màx 20 m ³ /h	1 unid	25.000.000,00	25.000.000,00
Tubería de PAD 3" DN	200 mtrs	21.800,00	6.360.000,00
Codo PAD 3" DN	12 unid	9.800,00	117.600,00
Válvula 80 DN	2 unid	3.480.280,00	6.960.560,00
Obra Civil y Materiales	--	30.049.356,00	30.049.356,00
Instalaciones eléctricas	--	2.301.908,00	2.301.908,00
TOTAL=			70.789.424,00

Fuente: Departamento de Ingeniería y Servicios de Cervecería Polar, C.A. Planta San Joaquín, 2006.

La PTAR cuenta con dos piscinas en forma de rectángulo redondeado de 8.500 m³ de capacidad, una de ellas es de concreto y la otra posee las mismas características pero es natural (pulimento), ambas se encuentran fuera de servicio, ya que anteriormente todas las aguas sanitarias de la cervecería se trataban en ellas, primero se aireaba el agua residual en la piscina de concreto y luego rebosaba a la piscina natural, para su pulimento y descarga final. La propuesta se basa en desviar el 100 % del efluente de la PTAR, primeramente a la piscina de concreto (su forma cónica invertida trucada ayuda a la sedimentación), el químico sería agregado en el canal Parshall, al cual se le colocarían deflectores para el mezclado del coagulante con el agua. Posteriormente el rebose de la piscina de concreto, pasa a la piscina natural para ayudar a clarificar o para que actúe como pulimento y finalmente se descarga el agua tratada. El sólido generado en la piscina de concreto se extrae con una bomba peristáltica (especial para lodos corrosivos y barros en general) y se envía al sistema de lodo de desecho, para aprovechar las propiedades del FePO₄ en la deshidratación del lodo, además de desecharse un lodo mas rico en fósforo y lo mas importante, asegurar que el fósforo que se está removiendo se expulsa de la planta, véase la figura 4.27.

Para determinar los flujos monetarios aproximados para el proceso de remoción de fósforo propuesto, se determinaron los costos asociados al consumo de producto químico y al desecho del fosfato férrico. Los costos asociados a las horas hombre y mantenimiento preventivo y correctivo no se toman en cuenta por ser insignificantes en



comparación con las presentadas, por ello para efectos de una estimación no es correcto reportar este tipo de costos que a la final, no afectan la suma total (véase la tabla 4.16). Debido a que la cantidad de FeCl_3 requerido por fósforo removido, es aproximadamente igual a 23 y que el cloruro férrico comercial utilizado en la fase experimental esta al 27 %, la cantidad real de coagulante requerido por fósforo removido es 85 ppm $\text{FeCl}_3/\text{ppm } P_{\text{REM}}$ y el costo del FeCl_3 , es 365 Bs/kg.

Además de los resultados presentados en la tabla 4.16, se realizó una simulación en función de la producción de cerveza y malta, para estimar los costo operacionales a cualquier condición de operación y a distintas dosis de coagulante utilizado. Esto se pudo lograr utilizando el índice de agua residual, por hectolitro de cerveza envasado el cual es 0,51 m^3/HI .

Los costos expuestos en la tabla 4.16, fueron estimados a condiciones críticas (Producción de 70.000.000 L envasado); tanto para el fósforo en el efluente (5 ppm) como en caudal ($600\text{m}^3/\text{h}$). A condiciones normales se requiere remover 1 ppm de fósforo, ya que según el balance realizado en el objetivo 1 el fósforo del efluente de la PTAR es 1,7, con un porcentaje de desvío de 10% de agua cruda a la etapa aerobia. En ese caso los costos operacionales totales mensuales, son de **8.000.000 Bs/mesppm P_{Rem}** aprox.

TABLA 4.16: ESTIMACIÓN DE LOS COSTOS OPERACIONALES DEL TRATAMIENTO DE REMOCIÓN DE FÓSFORO PROPUESTO

Descripción	Costo (Bs/mes)
Costos por consumo de Cloruro Férrico Dosis óptima (ppm)	26.086.550,00
Costos por consumo de Energía eléctrica (ppm)	105.683,10

Costo del FeCl_3 : (365 Bs/kg)

Producción de cerveza y malta: 700.000,00 HI envasado (Capacidad máx. de planta)

Dosis de FeCl_3 : 200 ppm

Fósforo de entrada: 5 ppm

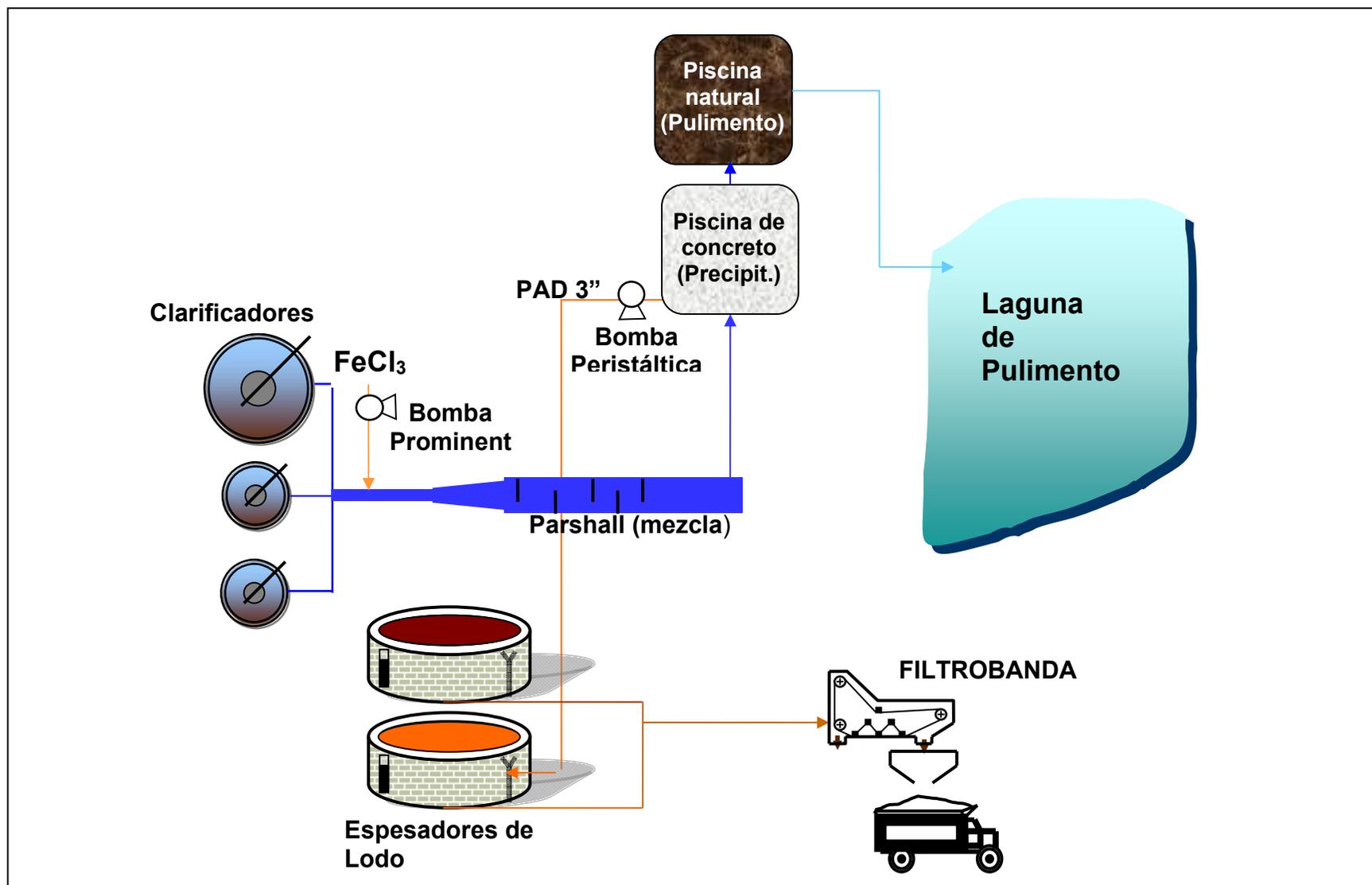


Figura 4.27: Diagrama del proceso de remoción propuesto para el tratamiento del 100 % del efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales



Los resultados de la simulación realizada, muestra que los costos aumentan con la producción, debido al aumento del caudal de agua afluyente a la PTAR, aunque la relación costo del tratamiento por Hectolitro envasado que veremos más adelante se mantiene constante. Obsérvese como los costos por compra del producto químico, son la etapa controlante en el flujo monetario de operación, por ello no se toman en cuenta los costos por horas hombres, las cuales en el desarrollo de la prueba de campo fueron prácticamente nulas, ya que por el contrario mejoraron la operación del filtrobanda, lo que hizo que el equipo requiriera menos supervisión y/o atención.

El beneficio principal de la prueba es la remoción de hasta el 98% del fósforo en el agua residual, lo demás beneficios cuantificables se muestran a continuación, a través de un estudio comparativo entre el tratamiento actual y el propuesto, ya que al cancelar en definitivo el tratamiento actual se generan una serie de beneficios económicos y operacionales.

En las tablas 4.17 y 4.18, se puede apreciar que el tratamiento de remoción propuesto, es más económico que el actual y no genera problemas operacionales, pero estas tablas deben ser analizadas en conjunto con las figuras 4.28 y 4.29. La figura 4.28; proveniente de datos históricos de la PTAR, se muestra la dispersión e inestabilidad del proceso de control y remoción del fósforo en el efluente de la planta y en la figura 4.29 se muestra el control y solidez del tratamiento propuesto, donde se encontró que además de ser más económico, es más seguro véase el valor estadístico R de las líneas de tendencia. Lo que indica que el tratamiento propuesto tiene un costo menor para remover fósforo y es mas preciso en su función, ya que una vez aplicado remueve el fósforo presente tal como lo muestra la gráfica, por el contrario el otro tratamiento, devenga mas de 35 bolívares por hectolitro envasado y probablemente no cumpla su objetivo. Adicionalmente en la figura 4.30 y 4.31 se observa de manera mas clara la función costo beneficio de ambos tratamientos.



TABLA 4.17: COMPORTAMIENTO DEL TRATAMIENTO ACTUAL EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE FÓSFORO, ASÍ COMO TAMBIÉN LOS COSTOS DEL MISMO EN FUNCIÓN DE LA PRODUCCIÓN

Porcentaje de Desvío (D) %	Relación costo/producción (R_{Polar}) Bs/HI	Fósforo total P_T (ppm)
10%	28,61	2,61
20%	35,49	1,60
30%	42,37	0,50
40%	49,25	1,05
50%	56,14	1,75

TABLA 4.18: COMPORTAMIENTO DEL TRATAMIENTO PROPUESTO EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE FÓSFORO, ASÍ COMO TAMBIÉN LOS COSTOS DEL MISMO EN FUNCIÓN DE LA PRODUCCIÓN

Dosis de $FeCl_3$ ($[FeCl_3]$) ppm	Relación costo/producción (R_{Polar}) Bs/HI	Fósforo total P_T (ppm)
100,00	18,78	2,15
150,00	28,10	1,51
200,00	37,42	0,98
250,00	46,73	0,54
300,00	56,05	0,17

* Estos datos son en caso de que el fósforo en efluente de la PTAR sea mayor a 4 ppm.

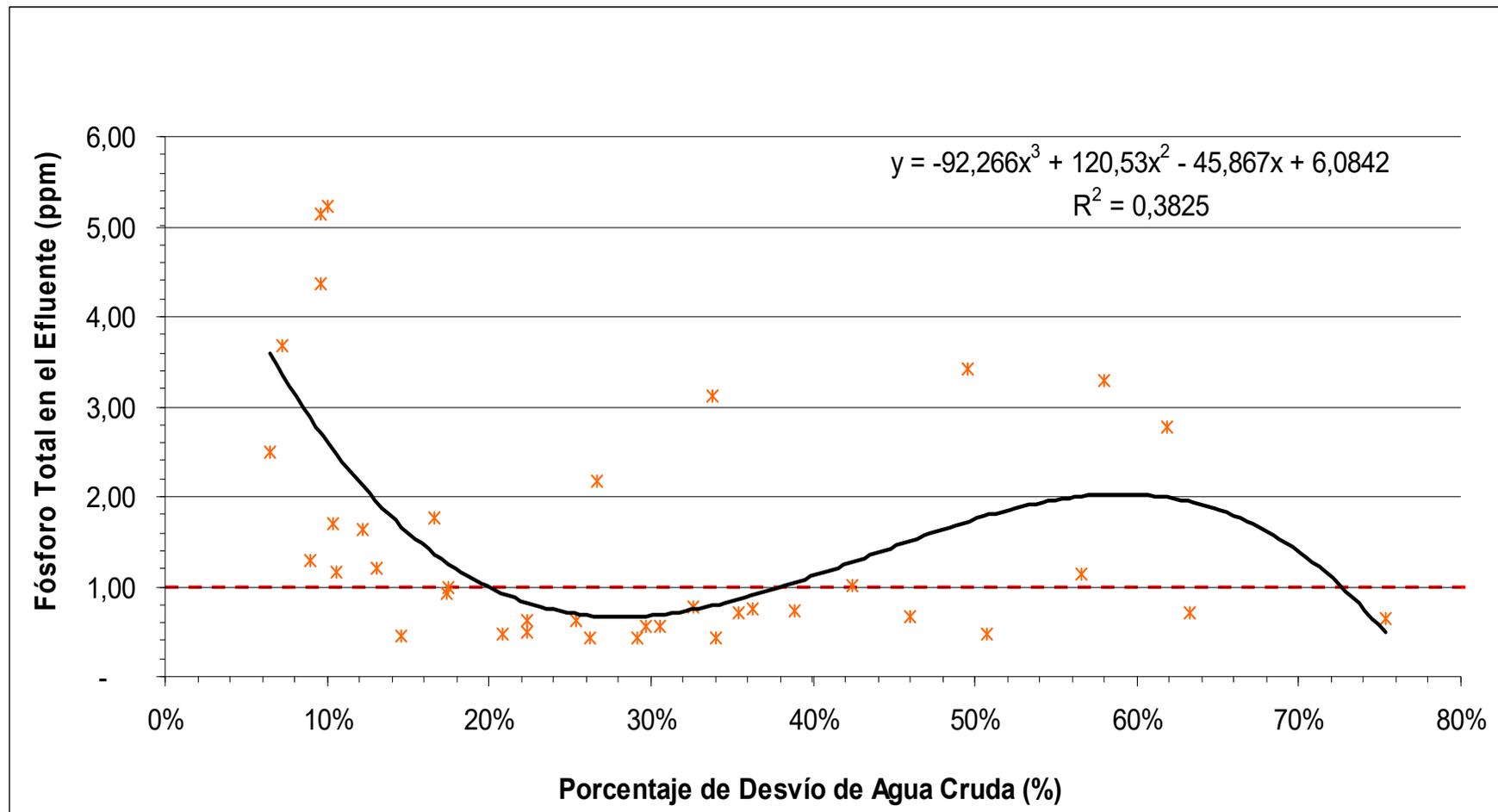


Figura 4.28: Comportamiento del fósforo en el efluente de la PTAR función al porcentaje de desvío a la etapa de aireación

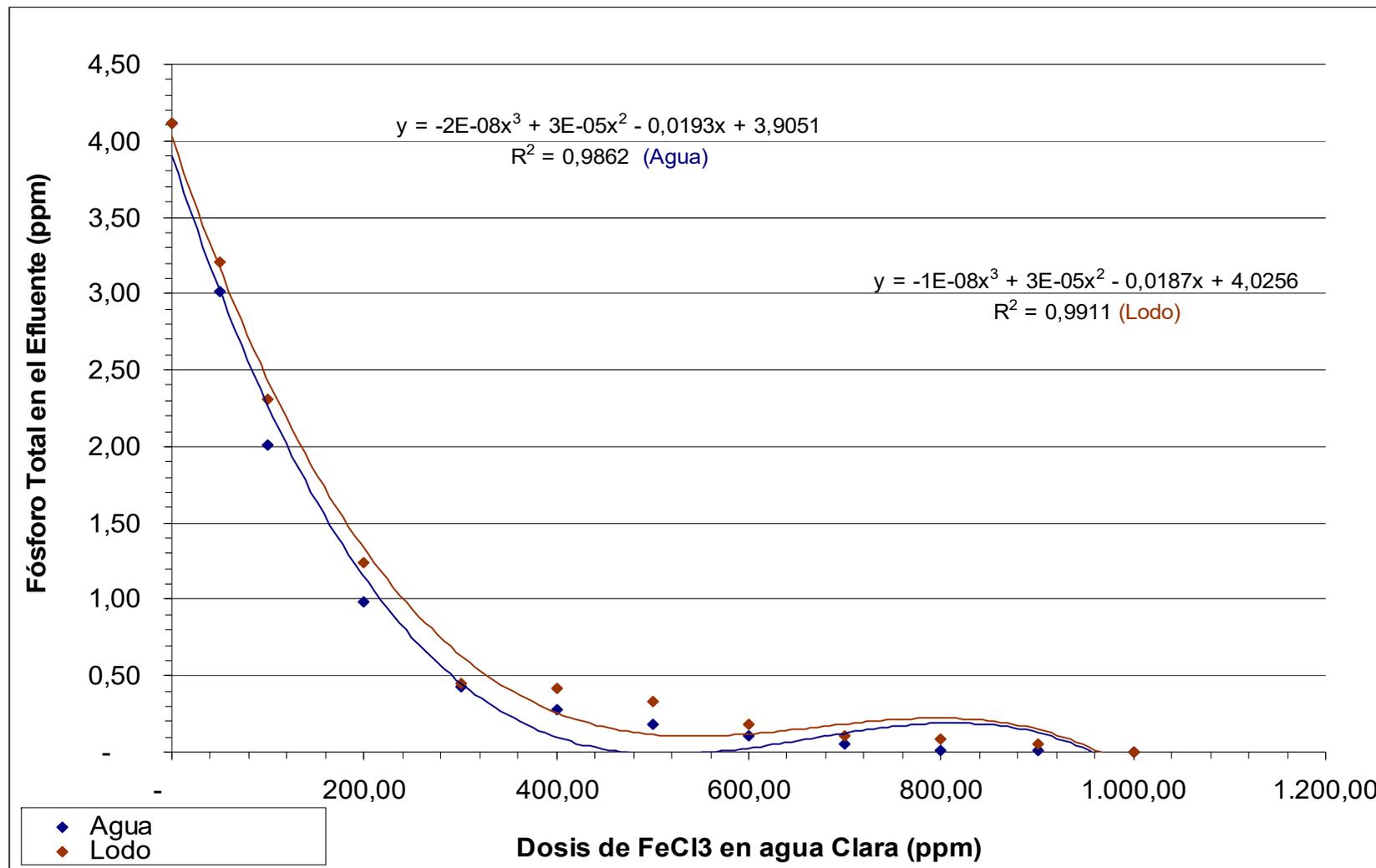


Figura 4.29: Comportamiento del fósforo en el efluente de la PTAR función al porcentaje de desvió a la etapa de aireación

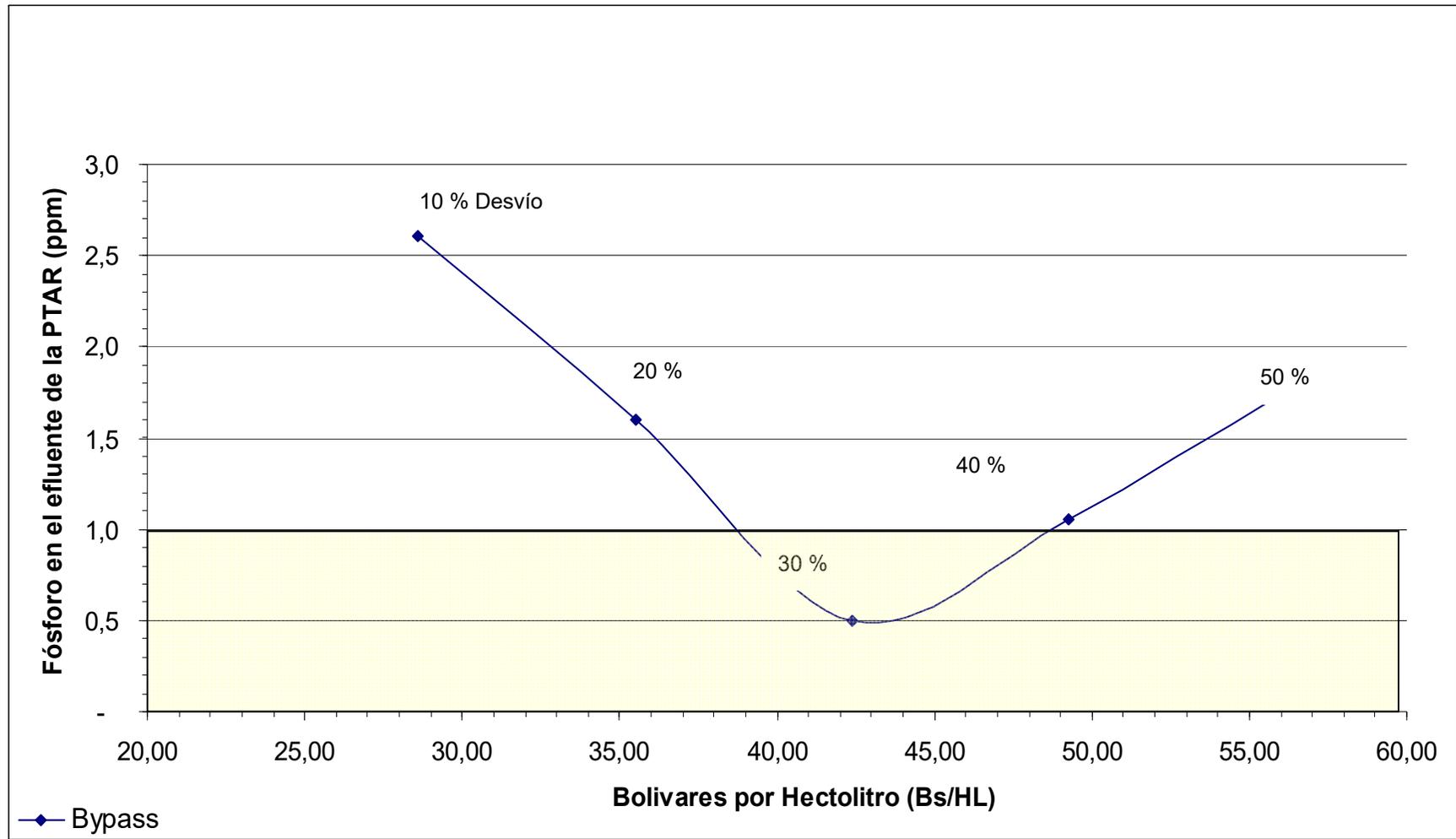


Figura 4.30: Costos del tratamiento de remoción de fósforo actual en función a la producción de cerveza y malta

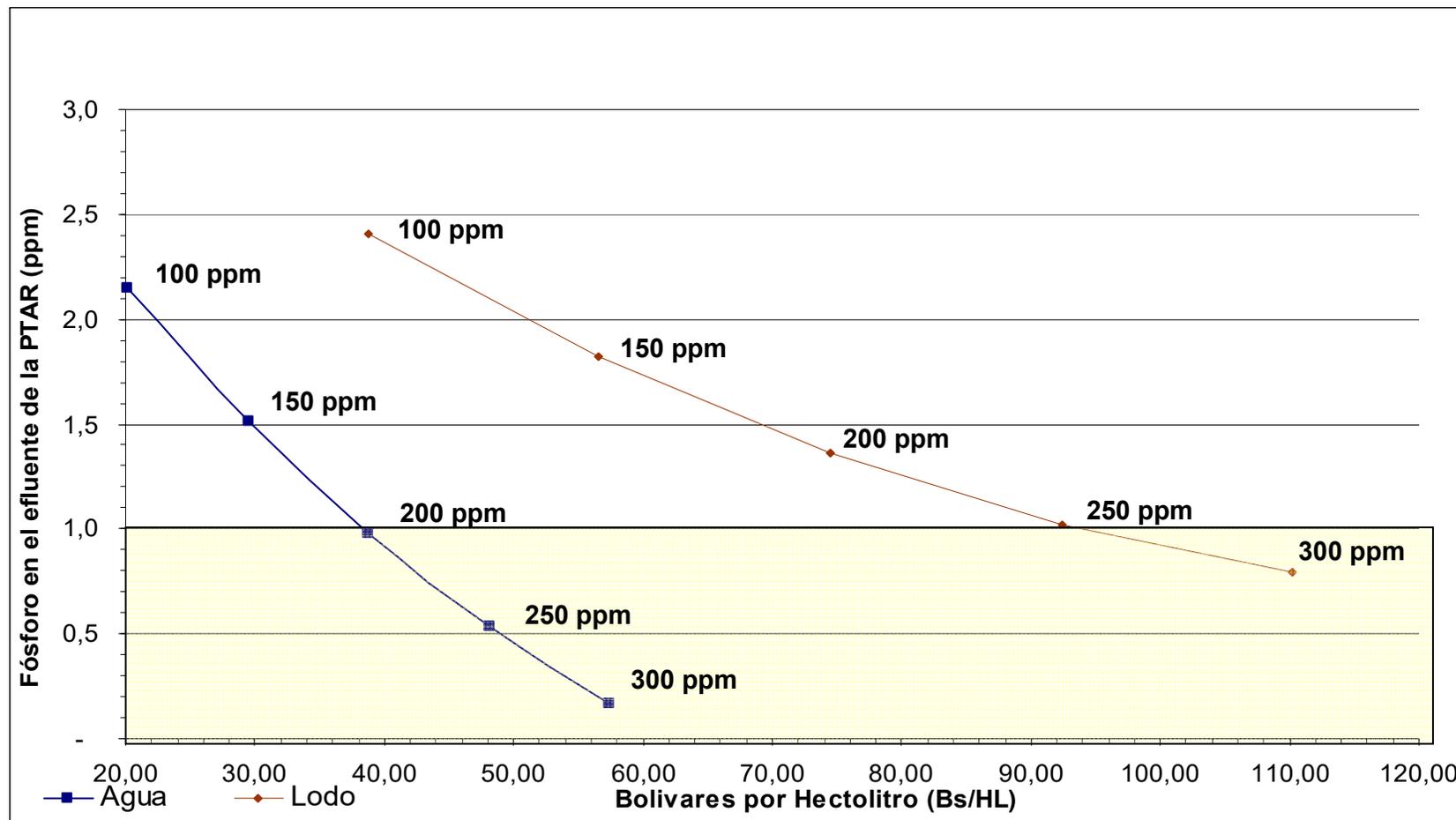


Figura 4.31: Costos del tratamiento de remoción de fósforo propuesto en el efluente de la PTAR (agua) y a la salida de las piscinas de aireación (lodo) en función a la producción de cerveza y malta



Entre los beneficios encontrados al estudiar el comportamiento de ambos tratamientos, esta el tema de la generación de lodo, en las figuras 4.32 y 4.33, se muestra la generación de lodo excesiva que experimenta la planta aerobia, a medida que aumenta el porcentaje de desvío y la producción de cerveza y malta. La PTAR no es capaz de desechar la cantidad de lodo que se genera en exceso ni los beneficiados de recibirlos, por lo que se genera dentro de la planta una acumulación de sólidos que coloca en condición de subdiseño a equipos, como los clarificadores y espesadores, sobrepasando los parámetros de carga (kg SSTLM) de operación de estos, esta condición de alta carga de sólidos, además genera problemas de taponamiento de tuberías, que hacen tediosa y delicada la operación de la planta, pérdidas de tiempo en concepto de supervisión continua de los equipos y de dinero, ya que los mantenimientos preventivos de algunos no son suficiente para el desgaste que experimentan los mismo por su mal funcionamiento. La generación de sólidos en el tratamiento propuesto es muy baja; hasta un 95% menor, estos sólidos aunque no son biológicos, enriquecen el lodo de desecho y ayudan a la floculación del mismo, según esto pueden ser identificados beneficios importantes para la operación de la planta, menor perdida de tiempo dedicado a los equipos y reducción de costos por mal funcionamiento y mantenimientos correctivos, fomentándose de esta manera una buena práctica del tratamiento del agua de las aguas residuales.

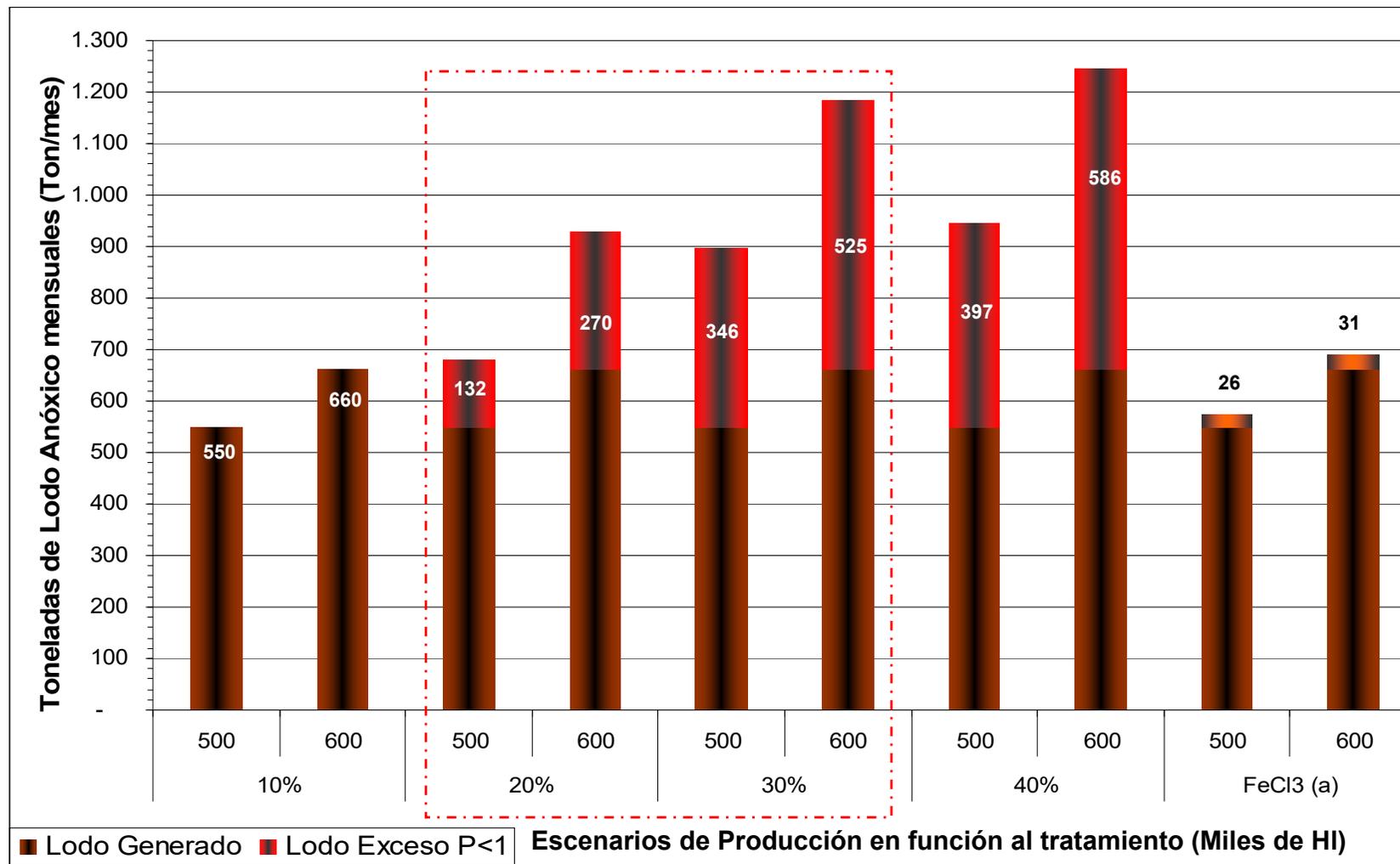


Figura 4.32: Toneladas de lodo generadas en exceso en función al tratamiento actual y propuesto para la remoción de fósforo en la PTAR a dos escenarios de producción, 500 y 600 mil hectolitros

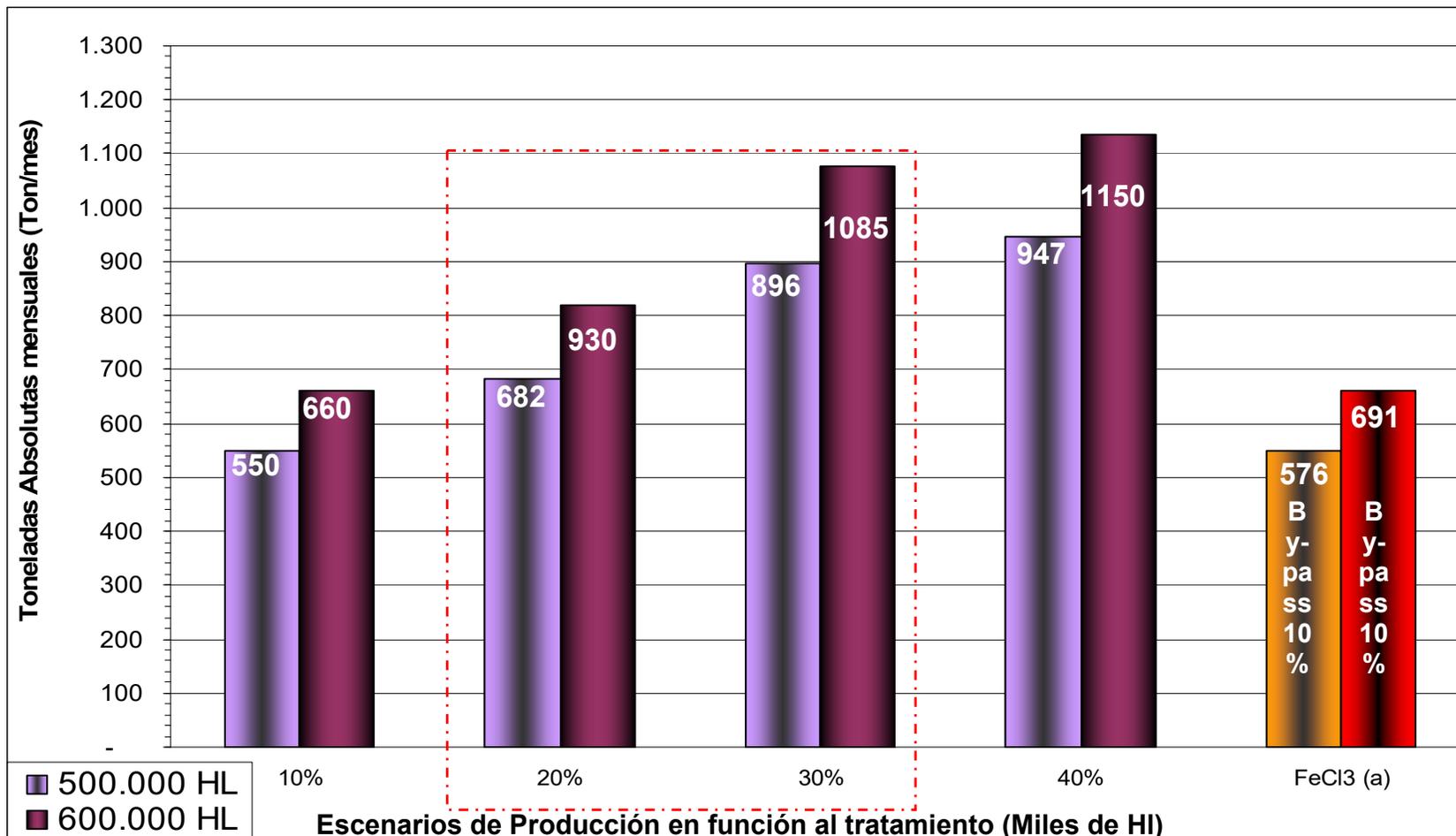


Figura 4.33: Toneladas de lodo generadas en exceso en función al tratamiento actual y propuesto para la remoción de fósforo en la PTAR a dos escenarios de producción, 500 y 600 mil hectolitros



Para la construcción de la figura 4.34, se simuló el tratamiento aeróbico ante distintas condiciones de producción de la cervecera y distintos porcentajes de desvío. Este gráfico muestra que a medida que la producción se incrementa, el desvío como alternativa para remover fósforo se hace cada vez más ineficiente, ya que la planta no logra proporcionar el oxígeno demandado por los desvíos programados. Esto realza la necesidad de considerar tratamientos alternos al practicado para la remoción de fósforo. Actualmente con una producción de más de 60.000.000 de litros mensuales y un porcentaje de desvío del 20 %, no es posible cumplir con los requerimientos de oxígeno, tal como se muestra en la figura 4.35, fomentándose así la sobrecarga de microorganismos filamentosos desfavorables para el tratamiento de las aguas. Los microorganismos necesitan el oxígeno para moverse y capturar los nutrientes, consumirlos y oxidarlos, sin el, el tratamiento no se cumple satisfactoriamente.

Por otra parte, las pérdidas que podrían generar la parada de la planta para la apertura de un proceso de auditoría por incumplimiento del Decreto 3219; el cual tiene como mínimo una duración de 3 días, podría generar pérdidas de más de 4.000.000.000 Bs/día, lo que equivaldría a más de 20 años de consumo de cloruro férrico, el cual es el gasto más influyente en los costos del tratamiento de remoción de fósforo propuesto.

Entre otras oportunidades de ahorros, solo en energía eléctrica podrían llegar a ser de hasta:

$$Ahorros_{EE} = 700.000 \cdot 42,69 - 700.000 \cdot 11,43 \cong 21.000.000 \frac{Bs}{mes}$$

Si esto se cumple, se podría recuperar la inversión inicial requerida en 4 meses aproximadamente. Y se ofrecería un proceso más estable tal y como lo muestran las gráficas y con menos problemas operacionales.

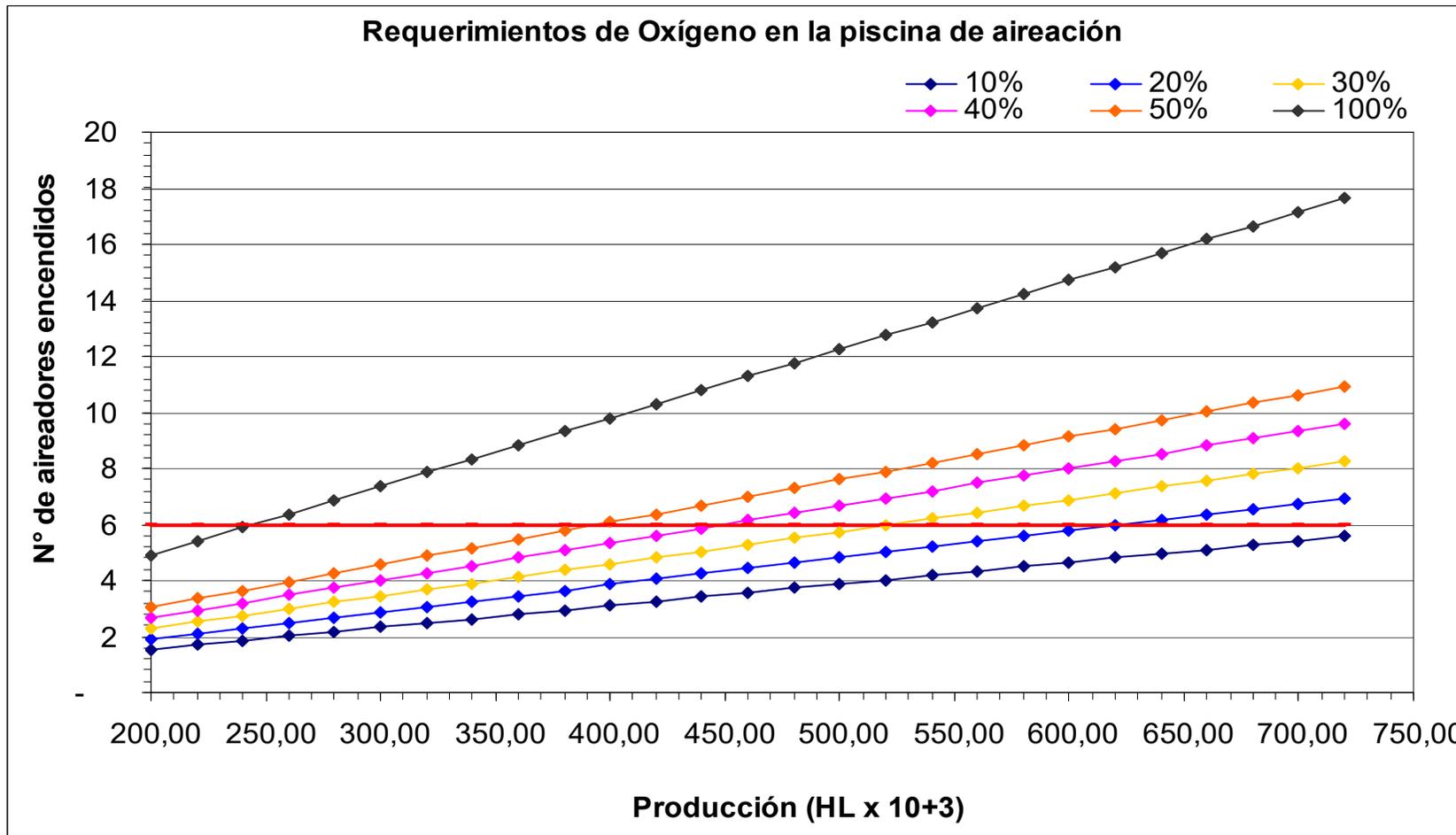


Figura 4.34: Capacidad de aireación de las piscinas en función a la producción y distintos porcentajes de desvío de agua cruda a la piscina de aireación (tratamiento actual) de la PTAR



Figura 4.35: Gráfico histórico que muestra el comportamiento del oxígeno disuelto en las piscinas al realizar un desvío intencional al tratamiento aeróbico



CONCLUSIONES

1. El 60 % del fósforo presente en el efluente de la PTAR es fósforo reactivo, cuando el fósforo es de 1,64 ppm aproximadamente.
2. A medida que el fósforo aumenta en el efluente de la PTAR aumenta la fracción de ortofosfato en el mismo.
3. Al modificar las condiciones de carga del espesador de lodos se logró reducir en un 88 % la concentración de fósforo total recirculado a la piscina de aireación.
4. La relación de dosis de cloruro férrico por ppm de fósforo removido a nivel de laboratorio es 27,55 en muestras del efluente de la PTAR.
5. El tratamiento de remoción de fósforo propuesto es capaz de reducir hasta un 98 % de la concentración de fósforo total en el efluente de la PTAR.
6. La relación de dosis de cloruro férrico por ppm de fósforo removido a nivel de planta es 21,89 en muestras del efluente de la PTAR.
7. El fosfato férrico mejora la deshidratación de la torta de lodo de desecho en un 9 % con respecto al porcentaje de humedad actual.
8. La dispersión de los datos en la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR disminuyó notablemente en la prueba de campo.
9. La relación de coagulante por fósforo removido aumenta a medida que disminuye la concentración de fósforo entrante.
10. El costo del tratamiento propuesto por hectolitro de producto envasado para remover un 1 ppm de fósforo en el efluente de la PTAR es de 12 bolívares.
11. El tratamiento actual es más costoso y no proporciona beneficios concretos.
12. El tratamiento propuesto genera; como máximo, un exceso de 30 toneladas de lodo de desecho en exceso mensualmente.
13. El tratamiento actual genera un exceso de más de 525 toneladas de lodo de desecho mensualmente con respecto a la capacidad del deshidratador de lodos.
14. Los ahorros, solo en energía eléctrica podrían llegar a ser de hasta 21 MM/mes de bolívares.



RECOMENDACIONES

- Suspender los desvíos a la etapa de aireación, ya que se generan problemas operacionales y gastos económicos excesivos a muy bajos beneficios.
- Implementar la alternativa propuesta para la remoción de la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR.
- Es recomendable que los sólidos suspendidos totales en el efluente de la PTAR no sean mayor a 15 ppm.
- Mantener la concentración de sólidos volátiles en la piscina de aireación entre 3000 y 2400 ppm, para evitar problemas de manejo de lodos.
- Tratar de garantizar una DQO de entrada a la piscina de aireación mayor a 200 ppm.
- Evitar los desvíos, modificando los set points de nivel, temperatura y pH ó capacidades de la estación de bombeo y el tanque buffer.
- Se recomienda que la relación F/M sea mas constante y alrededor de los 0,20.
- Operar el espesador a un flujo y carga menores a $10 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{día}$ y $32 \text{ kgSST}/\text{m}^2\text{día}$ respectivamente.
- Utilizar el método de digestión ácida $\text{HNO}_3 - \text{HClO}_4$, para determinar fósforo total en el efluente de la PTAR.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA, AWWA, WPCF. (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association. (20th. ed.). USA.
2. Arboleda J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. McGraw-Hill. (3ra. ed.). Colombia.
3. Broker A. (2002). [Descripción del proceso tratamiento de aguas residuales en la Cervecería Polar del Centro]. Datos no publicados.
4. Cortuelo, L. (1999). Eliminación de nutrientes en aguas residuales. *Revista Ingeniería Química*, 363, 139-145.
5. Empresas-Polar. (1999, Agosto). [Red Interna]. Disponible: <http://portal-empresas-polar/gotas/PTAR.htm>. [Consulta: 2006, Abril 05].
6. Empresas-Polar. (1999, Agosto). [Red Interna]. Disponible: http://portal-empresas-polar/gotas/PTAR/Normas_y_leyes/decreto_3219.htm. [Consulta: 2006, Abril 10].
7. Empresas-Polar. (2004). [Página Web en línea]. Disponible: http://www.empresas-polar.com/espanol/historia_c_es.html. [Consulta: 2006, Abril 15].
8. Hernández, J. (1996). *Evaluación del funcionamiento de la planta de tratamiento anaeróbica y aeróbica con respecto a los niveles de nitrógeno y fósforo*. Trabajo Especial de Grado no publicado, Universidad de Carabobo, Bárbula.
9. Hernández, R., Fernández, C., Baptista, P. (1998). *Metodología de la Investigación*. McGraw-Hill. Ciudad de México D.C. México.



10. Jones, L., Rodríguez, O. (1982). *Estudio comparativo de métodos analíticos para la determinación de ortofosfatos, fosfatos hidrolizables y fósforo total en aguas naturales y residuales*. Trabajo de Grado no publicado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
11. Kiely, G. (2001). *Ingeniería Ambiental fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. McGraw-Hill. (1a. ed.). España.
12. Manzini, S. (1996). *Evaluación y rediseño de una planta de tratamiento de aguas residuales en una industria de alimentos*. Trabajo Especial de Grado no publicado, Universidad de Carabobo, Bárbula.
13. Méndez, C. (1998). *Metodología de Diseño y Desarrollo*. McGraw-Hill. (3a. ed.). Ciudad de México D.C. México.
14. Metcalf & Eddy, Inc. (1972). *Wastewater Engineering Treatment, Disposal, Reuse*. McGraw-Hill. (2da. ed.). Boston. USA.
15. Ramírez, P., Rodríguez, L. (2003). *Evaluación a escala de laboratorio de la remoción de fósforo en la planta de tratamiento de aguas residuales La Mariposa utilizando lodos provenientes de la planta de potabilización Alejo Zuloaga*. Trabajo de grado no publicado, Universidad de Carabobo, Bárbula.
16. Sanquiz, L. (2000). *Estudio de alternativas para disminuir el contenido de fósforo presente en los efluentes de un planta de tratamiento de una empresa farmacéutica*. Trabajo Especial de Grado no publicado, Universidad de Carabobo, Bárbula.
17. Winkler, M. (1994). *Tratamiento biológico de aguas de Desecho*. Limusa. México.
18. Woods, N. (2000). Recuperación de fósforo de las aguas residuales urbanas. *Revista Ingeniería Química*, 365, 117-128.



APÉNDICES

APÉNDICE A MODELOS DE CÁLCULOS

En esta sección se presentan todos los modelos necesarios para la realización de cada uno de los objetivos. Además se presentan todos los cálculos típicos correspondientes a cada objetivo haciendo uso de los modelos matemáticos.

MODELOS MATEMÁTICOS

1. Determinación del comportamiento de la concentración de fósforo en la planta de tratamiento de aguas residuales.

1.1 Determinación de la carga hidráulica que maneja la piscina de aireación:

$$Q_{O_{2+}} = Q_{O_{2-}} + Q_{Bp} + Q_E + Q_{Tq+FB} \quad (I)$$

Donde:

$Q_{O_{2+}}$: Carga hidráulica afluente al tratamiento aeróbico (m^3/h)

$Q_{O_{2-}}$: Carga hidráulica efluente del tratamiento anaeróbico (m^3/h)

Q_{Bp} : Caudal de agua cruda desviado al tratamiento aeróbico (m^3/h)

Q_E : Carga hidráulica recirculada desde los espesadores de lodos al trat. Aerobio (m^3/h)

Q_{Tq+FB} : Carga hidráulica recirculada desde la tanquilla de lodo de los clarificadores y recirculado del filtrobanda al trat. Aerobio (m^3/h)

1.2 Determinación de la carga hidráulica recirculada desde los espesadores de lodos al trat. Aerobio:

$$Q_E = Q_{EL} - Q_{FB} \quad (II)$$

Donde:

Q_{EL} : Caudal de alimentación al espesador de lodos (m^3/h)

Q_{FB} : Caudal de alimentación al filtrobanda (m^3/h)



1.3 Determinación del porcentaje de desviación entre el fósforo de entrada y el fósforo de salida en la etapa de tratamiento evaluada:

$$\%D = \frac{Pe - Ps}{Pe} \cdot 100 \text{ (III)}$$

Donde:

$\%D$: Porcentaje de desviación entre el fósforo de entrada y el fósforo de salida (%)

Pe : Concentración de fósforo de entrada al equipo (ppm)

Ps : Concentración de fósforo de salida del equipo (ppm)

1.4 Determinación de la concentración de fósforo no reactivo:

$$P_{NR} = P_D - P_R \text{ (IV)}$$

Donde:

P_{NR} : Concentración de fósforo disuelto no reactivo (ppm)

P_D : Concentración de fósforo disuelto (ppm)

P_R : Concentración de fósforo disuelto reactivo (ppm)

1.5 Determinación de la concentración de fósforo no reactivo:

$$P_S = P_T - P_D \text{ (V)}$$

Donde:

P_S : Concentración de fósforo asociado a sólidos (ppm)

P_T : Concentración de fósforo total (ppm)

1.6 Determinación del flujo de fósforo en el punto i:

$$Fi = \frac{Pi \cdot Qi}{1000} \text{ (VI)}$$

Donde:

Fi : Flujo másico de fósforo en el punto de muestreo i (kg/h)

Pi : Concentración de fósforo en el punto de muestreo i (ppm)

Qi : Carga hidráulica en el punto de muestreo i (m^3/h)



1.7 Porcentaje de fósforo x en el punto i:

$$\%P_x = \frac{P_x}{P_T} \cdot 100 \text{ (VII) (Standard Methods, 1998)}$$

Donde:

$\%P_x$: Porcentaje de fósforo x en el punto de muestreo i (%)

P_x : Concentración de fósforo x en punto de muestreo i (ppm)

2. Planteamiento de alternativas para la reducción de la concentración de fósforo total a nivel de laboratorio y de planta.

2.1 Determinación del porcentaje de remoción de fósforo:

$$\%R = \frac{|P_A - P_D|}{P_A} \cdot 100 \text{ (VIII)}$$

Donde:

$\%R$: Porcentaje de remoción de fósforo total (%)

P_A : Concentración de fósforo total antes (ppm)

P_D : Concentración de fósforo total después (ppm)

2.2 Determinación del flujo de operación del espesador de lodos:

$$Flow_{op} = \frac{Q_{EL} \cdot fact1}{A_{transversal}} \text{ (IX) (Metcalf & Eddy, 1972)}$$

Donde:

$Flow_{op}$: Flujo de Operación del equipo ($m^3/m^2 \cdot día$)

$A_{transversal}$: Área transversal del espesador de lodos (m^2)

$fact1$: Factor de conversión (24h/1día)

2.3 Determinación del área transversal del equipo:

$$A_{transversal} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \text{ (X)}$$



Donde:

D : Diámetro del equipo (m)

2.4 Determinación de la carga del equipo espesador de lodos:

$$Carg a_{op} = [SSTLM] * fact2 * fact3 * Flow_{op} \quad (XI) \quad (\text{Metcalf \& Eddy, 1972})$$

Donde:

$Carg a_{op}$: Carga del equipo espesador de lodos (kgSST/m²·día)

$[SSTLM]$: Concentración de sólidos suspendidos totales de licor mixto (ppm)

$Fact2$: Factor de conversión (1kg/1.000.000mg)

$Fact3$: Factor de conversión (1000 L/1m³)

2.5 Determinación de la dosis de coagulante:

$$[Coag] = \frac{\rho_{coag} \cdot V_{coag} \cdot [Coag_p]}{V} (1000)^2 \quad (XII) \quad (\text{Arboleda, 2000})$$

Donde:

$[Coag]$: Dosis de coagulante (ppm)

ρ_{coag} : Densidad del coagulante (kg/L)

V_{coag} : Volumen de coagulante dosificado (mL)

V : Volumen de agua a tratar (mL)

$[Coag_p]$: Concentración de la solución de coagulante a dosificar (%v/v)

2.6 Determinación de la relación de coagulante dosificado entre ppm de fósforo removido:

$$R = \frac{[Coag]}{P_A - P_D} \cdot [C_{ACT}] \quad (XIV)$$

Donde:

R : Relación de coagulante dosificado entre fósforo removido (ppmCoag/ppmP_{remov})

$[C_{ACT}]$: Concentración activa del coagulante comercial (%v/v)



2.7 Determinación de la relación DBO/BQO:

$$R_{DBO/DQO} = \frac{DBO}{DQO} \text{ (XV) (Winkler, 1994)}$$

Donde:

DBO : Demanda bioquímica de oxígeno (ppm)

DQO : Demanda química de oxígeno (ppm)

2.8 Determinación de la relación F/M:

$$F / M = \frac{(DBO_{O_2-} \cdot Q_{O_2-} + DBO_{Bp} \cdot Q_{Bp}) \cdot fact1}{[SSVLM][Va]} \text{ (XVI) (Winkler, 1994)}$$

Donde:

F / M : Relación alimento microorganismos (kgDBO/kgSSVLM·día)

DBO_{O_2-} : Demanda bioquímica de oxígeno efluente del trat. Anaeróbico (ppm)

DBO_{Bp} : Demanda bioquímica de oxígeno del agua residual afluente a la PTAR (ppm)

$[SSVLM]$: Sólidos suspendidos volátiles de licor mixto (ppm)

$[Va]$: Volumen de la piscina de aireación extendida (m³)

3. Implementación de la alternativa seleccionada de reducción de la concentración de fósforo total a nivel de planta.

3.1 Determinación de la velocidad del fluido dentro de una tubería:

$$Vi = \frac{Qi}{A_{transversal}} \cdot fact4 \text{ (XVII)}$$

Donde:

Vi : Velocidad de operación del fluido i (m/s)

Qi : Caudal de operación del fluido i (m³/h)

$fact4$: Factor de conversión (1h/3600s)



3.2 Determinación del tiempo de retención:

$$tr = \frac{V_{TANQUE}}{Qi} \quad (\text{XVIII})$$

Donde:

tr : Tiempo de retención del agua en el equipo (h)

V_{TANQUE} : Capacidad volumétrica del equipo (m³)

3.3 Determinación de la velocidad de sedimentación del precipitado:

$$Vs = \frac{h}{ts \cdot fact5} \quad (\text{XIX}) \quad (\text{Arboleda, 2000})$$

Donde:

Vs : Velocidad de sedimentación (m/h)

h : Altura del tanque (m)

ts : Tiempo de sedimentación del precipitado (min)

$fact5$: Factor de conversión (1h/60min)

3.4 Determinación del flujo de coagulante:

$$Q_{coag} = \frac{[Coag] \cdot Qi}{1000 \cdot \rho_{coag}} \quad (\text{XX}) \quad (\text{Arboleda, 2000})$$

Donde:

Q_{coag} : Caudal de coagulante (L/h)

4. Determinación del efecto del tratamiento seleccionado en el efluente de la PTAR.

4.1 Determinación del porcentaje de humedad de la corriente de lodo de desecho:

$$\%H = \frac{(mi - mf)}{mi} \cdot 100 \quad (\text{XXI})$$



Donde:

$\%H$: Porcentaje de humedad de la torta (%)

m_i : Masa inicial de la muestra (g)

m_f : Masa final de la muestra (g)

4.2 Determinación de la concentración de fósforo teórica de la mezcla entre el efluente del tratamiento propuesto y el efluente de la PTAR:

$$P_{mix} = \frac{Q_{PTAR} \cdot P_e + Q_i \cdot P_s}{(Q_{PTAR} + Q_i)} \quad (XXII)$$

Donde:

P_{mix} : Concentración de fósforo total teórica de la mezcla (ppm)

Q_{PTAR} : Caudal del efluente de la PTAR (m³/h)

5. Evaluación de la función costo beneficio del proceso de reducción de la concentración de fósforo.

5.1 Determinación de la inversión inicial requerida:

$$C_{IITotal} = \Sigma(n \cdot C_i) + C_{IE} + C_{acc} \quad (XXIII)$$

Donde:

$C_{IITOTAL}$: Costo total de la inversión inicial requerida (Bs)

n : Cantidad de equipos, accesorios

C_i : Costo unitario de equipos, accesorios (Bs)

C_{IE} : Costos por concepto de instalaciones equipos (Bs)

C_{acc} : Costos por concepto de la obra civil, materiales de construcción e instalación de equipos y tuberías (Bs)

* Determinación de costo por concepto de instalaciones eléctricas:

$$C_{IE} = 0,05 \cdot \Sigma(n \cdot C_i) + N \cdot (n \cdot C_{HH}) \quad (XXIV) \text{ (Ray \& Jhonston, 1980)}$$

Donde:

N : Duración de la obra (días)

n : Número de personas que intervienen

C_{HH} : Costo del trabajador diario (Bs/día)



* Determinación de costos por concepto de acondicionamiento físico de la PTAR:

$$C_{acc} = 0,35 \cdot \Sigma(n \cdot C_i) + N \cdot (n \cdot C_{HH}) \text{ (XXV) (XXIV) (Ray \& Jhonston, 1980)}$$

5.2 Determinación de los costos operacionales del proceso:

$$C_{opTotal} \cong C_{PQ} \text{ (XXVII)}$$

Donde:

$C_{opTotal}$: Costos operacionales mensuales del tratamiento propuesto (Bs/mes)

C_{PQ} : Costo mensual por consumo de producto químico (Bs/mes)

* Determinación de los costos por consumo mensual de producto químico:

$$C_{PQ} = \frac{(Q_{PTAR} \cdot fact1 \cdot fact6) \cdot [Coag]}{1000} \cdot Bs_{PQ} \text{ (XXVIII)}$$

Donde:

Bs_{PQ} : Costo del producto químico por kilogramo (Bs/kg)

$fact6$: Factor de conversión (25días/1mes)

5.3 Determinación de costos por consumo de energía eléctrica:

$$C_{EE} = \frac{0,85 \cdot V_N \cdot I_N \cdot \sqrt{3}}{1000} \cdot t_{OP} \cdot Bs / KWh \text{ (XXIX) (GOTAS, 1999)}$$

Donde:

C_{EE} : Costos asociados al consumo de energía eléctrica (Bs)

Bs / KWh : Costo en bolívares del Kilovatio en una hora (Bs/KWh).

I_N : Corriente nominal del equipo; "dato de placa" (A).

V_N : Voltaje nominal del equipo; "dato de placa" (V).

t_{OP} : Tiempo de operación del equipo eléctrico (h).



5.4 Determinación de la cantidad de oxígeno requerido:

$$O_2\text{need} = \left[(1 - X_{Bp}) \cdot \left(\frac{DBO_{O_2-} \cdot Q_{PTAR}}{1000} \right) + X_{Bp} \cdot \left(\frac{DBO_{Bp} \cdot Q_{PTAR}}{1000} \right) \right] \cdot 1,6 \quad (\text{XXX}) \quad (\text{GOTAS, 1999})$$

Donde:

$O_2\text{need}$: Oxígeno requerido por el licor mixto para degradar la materia orgánica (kg/h).

X_{Bp} : Fracción de agua residual cruda desviada a la piscina de aireación.

5.5 Determinación de la cantidad de sólidos (sustancia seca) generados:

$$LMSS_{Gen} = \frac{\left[(1 - X_{Bp}) \cdot \left(\frac{DBO_{O_2-} \cdot Q_{PTAR}}{1000} \right) + X_{Bp} \cdot \left(\frac{DBO_{Bp} \cdot Q_{PTAR}}{1000} \right) \right]}{2} \quad (\text{XXXI}) \quad (\text{GOTAS, 1999})$$

Donde:

$LMSS_{Gen}$: Licor mixto reproducido como sustancia seca (kg/h)

5.6 Determinación de la relación de costo del tratamiento por hectolitro de producto envasado:

$$R_{Polar} = \frac{C_{Trat}}{Env.} \quad (\text{XXXII})$$

Donde:

R_{Polar} : Costo del tratamiento por hectolitro de cerveza y malta envasado (Bs/HL)

C_{Trat} : Costo mensual del tratamiento de remoción de fósforo (Bs/mes)

Env : Producción mensual (HL)



CÁLCULOS TÍPICOS

1. Determinación del comportamiento de la concentración de fósforo en la planta de tratamiento de aguas residuales.

1.1 Cálculo de la carga hidráulica que maneja los equipos de la PTAR.

- Aplicando el modelo matemático (I), se logra determinar flujo de entrada a la piscina de aireación:

$$Q_{O_2+} = 389,54 + 37,70 + 50,54 + 315,73 = 794,37 \frac{m^3}{h}$$

- Aplicando la ecuación (II), se calcula el caudal recirculado de los espesadores a la piscina de aireación:

$$Q_E = 68,04 - 17,50 = 50,54 \frac{m^3}{h}$$

Los caudales de los equipos restantes, fueron determinados por medio de los medidores de flujo electrónicos que posee la PTAR, así como también, se toma la lectura del porcentaje de desvío al tratamiento aeróbico diario.

1.2 Cálculos para la selección de los puntos de muestreo en la PTAR.

- Haciendo uso de la ecuación (III), se logra determinar el porcentaje de desviación entre las entradas y salidas del filtro de placas inclinadas lamella, con respecto a la concentración de fósforo total:

$$\%D = \frac{|7,31 - 7,98|}{7,31} \cdot 100 = 9,17\%$$



De igual manera se realiza el mismo cálculo para cada equipo, tomando en cuenta que, si el porcentaje es menor a 10%, puede ser descartado dicho punto de muestreo.

1.3 Cálculos para determinar el comportamiento de la concentración de fósforo en la PTAR.

- Aplicando la ecuación (IV), se logra determinar la concentración de fósforo no reactivo en el efluente de la PTAR:

$$P_{NR} = 1,57 - 0,93 = 0,64 \text{ ppm}$$

De igual manera se realiza el mismo cálculo para cada punto de muestreo.

- Aplicando la ecuación (V), se logra determinar la concentración de fósforo asociado a sólido en el efluente de la PTAR:

$$P_s = 1,64 - 1,57 = 0,07 \text{ ppm}$$

De igual manera se realiza el mismo cálculo para cada punto de muestreo.

- Haciendo uso de la ecuación (VI) se determina el flujo fósforo en el efluente de la PTAR:

$$F_T = \frac{1,64 \cdot 430,48}{1000} = 0,70 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

De igual manera se calculan los flujos de fósforo total, disuelto y reactivo en cada punto de muestreo seleccionado de la PTAR.

- Mediante la ecuación (VII) se calcula el porcentaje de fósforo reactivo, no reactivo y asociado a sólido en el efluente de la PTAR:



Para el fósforo reactivo:

$$\%Pr = \frac{0,93}{1,64} \cdot 100 = 57\%$$

Para el fósforo no reactivo:

$$\%P_{NR} = \frac{0,64}{1,64} \cdot 100 = 39\%$$

Para el fósforo asociado a sólido:

$$\%P_S = \frac{0,07}{1,64} \cdot 100 = 4\%$$

De igual manera se calculan las fracciones que conforman el fósforo total, en cada punto de muestreo seleccionado de la PTAR.

Luego de obtener todas las concentraciones, flujos y fracciones de cada tipo de fósforo, en cada punto de muestreo, se grafican estos datos a fin de analizar el comportamiento del fósforo a medida que recorre la PTAR.

2. Planteamiento alternativas para la reducción de la concentración de fósforo total a nivel de laboratorio y de planta.

2.1 Cálculos asociados a la evaluación y desarrollo de alternativas para reducir la concentración de fósforo en el efluente de la PTAR.

- La primera alternativa evaluada, fue la remoción biológica de fósforo mediante el proceso Bardenpho, y los cálculos asociados al estudio se muestran a continuación:

El ensayo a nivel de laboratorio, para el cálculo del IVL se muestra en el apéndice C. Haciendo uso de la ecuación (VIII), se logra calcular el porcentaje de remoción de fósforo de la alternativa planteada.

$$\%R = \frac{|1,64 - 3,04|}{1,64} \cdot 100 = 0\%$$



Se coloca 0% porque no hubo remoción, por el contrario, el fósforo aumento en un 85%. Esto se verificó con el mejor indicador cualitativo, los microorganismos presentes.

- Los cálculos asociados a la segunda alternativa evaluada, se relacionan con la verificación de las condiciones de operación del espesador de lodos y se muestran como sigue:

Conociendo los siguientes datos de diseño del equipo:

$$\text{Flujo máx.} = 10 \frac{m^3}{m^2 \text{ día}}$$

$$\text{Carga SSTLM máx.} = 32 \frac{kgSST}{m^2 \text{ día}}$$

$$D_{\text{Espesador}} = 10 \text{ m}$$

$$h_{\text{Espesador}} = 4 \text{ m}$$

$$\text{Capacidad} = 314 \text{ m}^3$$

Conociendo que la carga hidráulica que maneja el espesador de lodos actualmente es de 51 m³/h aproximadamente, se logra calcular el flujo y carga de operación del espesador mediante el uso de la ecuación (IX) y (X).

$$\text{Carga Hidráulica} = \text{Alimentación}_{\text{Esp}} - \text{Salida}_{\text{Esp}} = 70 - 19 = 51 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$A_{\text{transversal}} = \frac{\pi * 10^2}{4} = 78,54 \text{ m}^2$$

$$\text{Flow}_{\text{op}} = \frac{51 \cdot 24}{78,54} = 15,58 \frac{m^3}{m^2 \text{ día}}$$

Lo que evidencia que:

$$\text{Flow}_{\text{op}} > \text{Flujo}_{\text{máx.}}$$



Conociendo que la concentración de sólidos suspendidos totales de licor mixto de alimentación al equipo es de 6.000 ppm aproximadamente, se logra calcular la carga de operación del espesador mediante el uso de la ecuación (XI).

$$Carga_{op} = 6006 \cdot \frac{1}{1.000.000} \cdot \frac{1000}{1} \cdot 15,58 = 93,51 \frac{hg}{m^2 día}$$

Lo que evidencia que:

$$Carga_{op} > Carga_{SSTLM_{máx.}}$$

Esto muestra que tanto flujo como carga están fuera de la norma, la medida tomada fue reducir el flujo de alimentación a la mitad es decir 35 m³/h, dando como resultado una carga hidráulica de 16 m³/h; (Este dato proviene de la diferencia entre el caudal de alimentación y el flujo de salida de lodo hacia el filtrobanda el cual es 19 m³/h).

Empleando la ecuación (IX) y (XI) se repiten los cálculos para verificar los parámetros de diseño, a las nuevas condiciones de operación, como sigue:

$$Flow_{op} = 4,89 \frac{m^3}{m^2 día} < Flujo_{máx}$$

$$Carga_{op} = 29,33 \frac{hg}{m^2 día} < Carga_{SSTLM_{máx.}}$$

Haciendo uso de la ecuación (VIII), se logra calcular el porcentaje de remoción de fósforo de la alternativa planteada.

$$\%R = \frac{|47,09 - 5,86|}{47,09} \cdot 100 = 88\%$$



- La tercera alternativa evaluada, fue la aplicación de tratamientos fisicoquímicos (coagulación), los cálculos asociados se muestran a continuación:

Haciendo uso de la ecuación (XII) se logra determinar la dosis de coagulante en la jarra.

$$[Coag] = \frac{1,3 \frac{kg}{l} \cdot 4,6 ml \cdot [0,05]}{1000 ml} (1000)^2 = 300 ppm$$

En conjunto con el cálculo mostrado, se determino el porcentaje de remoción de fósforo mediante el uso de la ecuación (VIII) y se cálculo le relación de coagulante dosificado entre los miligramos por litro de fósforo removido haciendo uso de la ecuación (XIV).

$$R = \frac{300}{4,12 - 0,42} \cdot 0,27 = 21,89 \frac{ppmCoag}{ppmP_{remov}}$$

Estos cálculos se repiten para cada ensayo de prueba de jarras con cada tipo de muestras y coagulantes evaluados a nivel de laboratorio.

- Dentro de la evaluación de alternativas para remover fósforo en el efluente de la PTAR, estuvo analizar los parámetros operacionales de la PTAR en los últimos 2 años, (data histórica), entre los cálculos asociados para lograr procesar la información suministrada por la Dirección Técnica de Empresas Polar, se encuentra lo siguiente:

Mediante la ecuación (XV) se logra determinar la fracción de materia orgánica biodegradable en el efluente de la PTAR.

$$R_{DBO/DQO} = \frac{27,22}{61,77} = 0,4$$

Haciendo uso de la ecuación (XVI), se logra determinar la relación alimento – microorganismos.



$$F / M = \frac{(400 \text{ ppm} \cdot 250,11 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} + 2130 \text{ ppm} \cdot 35 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}) \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}}}{2400 \text{ ppm} \cdot 9000 \text{ m}^3} = 0,2 \frac{\text{kgDBO}}{\text{kgSSVLM} \cdot \text{día}}$$

Los cálculos mostrados anteriormente se repitieron para cada uno de los datos y se graficaron con respecto al fósforo en el efluente de la PTAR.

3. Implementación de la alternativa seleccionada de reducción de la concentración de fósforo total a nivel de planta.

3.1 Cálculos asociados a las condiciones de operación requeridas, para la remoción de fósforo mediante la dosificación de FeCl_3 .

- El caudal de operación fue establecido según la bomba disponible para la realización de la prueba, y el diámetro de la tubería de estableció como sigue:

Mediante la ecuación (XVII), se determina la velocidad del fluido en la tubería, con respecto al caudal de operación y el diámetro de la misma (PAD 3”).

$$v = \frac{60 \cdot \frac{1}{3600}}{\frac{\pi \cdot (0,1016)^2}{4}} = 2,05 \text{ m/s}$$

Esto demuestra que la tubería mas económica que se puede utilizar, para el correcto desarrollo de la prueba, es de 0,1016 m \cong 4 pulg.

- El tiempo de retención de la mezcla, en el tanque de sedimentación, fue una variable importante para realizar el tratamiento correctamente, esto estuvo ligado a la velocidad de sedimentación del precipitado y a la velocidad del flujo ascendente:

Conociendo los siguientes datos de diseño del tanque para precipitar el fósforo:

$$D_{\text{Espesador}} = 18 \text{ m}$$

$$h_{\text{Espesador}} = 4,8 \text{ m}$$



$$\text{Capacidad} = 1200 \text{ m}^3$$

En vista de que el tiempo de sedimentación en el tanque debe ser menor al tiempo de sedimentación, se emplea la ecuación (XVIII).

$$tr = \frac{1200}{60} = 20h$$

Adicionalmente se calcula el flujo ascendente en el tanque utilizando la ecuación (XVII).

$$\text{Flow} = \frac{60}{\frac{\pi \cdot (18)^2}{4}} = 0,24 \text{ m/h}$$

Sabiendo que la velocidad de sedimentación del precipitado es de 1,02 m/h (Determinado en las pruebas de jarras mediante la ecuación (XIX)), se calcula el tiempo necesario para que sedimente el precipitado y se compara con el tiempo de retención (20h).

Velocidad de sedimentación en la prueba de jarra:

$$vs = \frac{0,12}{7 \cdot \frac{1}{60}} = 1,02 \frac{m}{h}$$

Tiempo de sedimentación en el tanque:

$$ts = \frac{4,8}{1,02} = 4,70h < tr$$

- El flujo de coagulante fue determinado según la dosis que se deseaba aplicar y se muestra el cálculo del mismo como sigue:



Utilizando la ecuación (XX) se conoce el flujo de coagulante a dosificar en línea.

$$Q_{FeCl_3} = \frac{[300] \cdot 60}{1000 \cdot 1,29} = 14 \frac{l_{FeCl_3}}{h}$$

Este cálculo fue realizado para afinar la dosis de cloruro férrico a inyectar variando el caudal de la bomba Prominent utilizada.

4. Determinación el efecto del tratamiento seleccionado en el efluente de la PTAR.

4.1 Determinación del comportamiento de la concentración de fósforo en el efluente del tratamiento propuesto con respecto al efluente de la PTAR.

- Se determinó la concentración de fósforo en el efluente del tanque sedimentador diariamente, para ser comparado con el efluente de la PTAR (alimentación a la prueba):

Utilizando la ecuación (VIII) se logra determinar el porcentaje de remoción de fósforo en el efluente de la PTAR.

$$\%R = \frac{2,71 - 0,17}{2,71} \cdot 100 = 94\%$$

Del mismo modo se realiza este cálculo para todas las mediciones de fósforo total a la entrada (efluente de la PTAR) y salida de la prueba implementada.

- Con la dosis aplicada de cloruro férrico y los miligramos por litro de fósforo reducido se determina la relación coagulante – fósforo removido:

Haciendo uso de la ecuación (XIV) se calculó la relación de cloruro férrico dosificado entre los miligramos por litro de fósforo removido.

$$R = \frac{200}{2,71 - 0,17} \cdot 0,27 = 21,25 \frac{ppm_{FeCl_3}}{ppm_{P_{remov}}}$$



- Para estudiar el impacto de descargar los efluentes clarificados del tanque de precipitación en el canal Parshall, por donde fluye el efluente total de la PTAR se cálculo experimentalmente el fósforo en dicho punto y teóricamente como se muestra a continuación:

Utilizando la ecuación (XXII) se calcula la concentración de fósforo teórica en la mezcla del efluente de la PTAR y el efluente de la prueba.

$$P_{mix} = \frac{380 \cdot 2,71 + 60 \cdot 0,17}{440} = 2,36 \text{ ppm}$$

4.1 Determinación del efecto de adicionar el fosfato férrico sólido (precipitado) al sistema de deshidratación de lodo de desecho.

- Se determino el porcentaje de humedad en la torta de lodo de desecho para ser comparado con la cantidad de agua presente, antes de adicionar el precipitado.

Mediante el uso de la ecuación (XXI) se logra determinar el porcentaje de humedad en la corriente de lodo de desecho.

$$\%H = \frac{1,0112 - 0,2498}{1,0112} \cdot 100 = 75\%$$

Este cálculo se repitió los días en los que se prensó, el fosfato férrico precipitado en el fondo del tanque (sedimentador terciario).

- Utilizando el porcentaje de humedad sin adicionar el FePO_4 , y el resultado obtenido en el punto anterior, se logra identificar la reducción del agua presente en la corriente de desecho de lodo:

Mediante la ecuación (III), se logra el fin planteado.

$$\%D = \frac{82 - 75}{85} \cdot 100 = 9\%$$



5. Evaluación la función costo beneficio del proceso de reducción de la concentración de fósforo.

5.1 Cálculo asociado a la estimación de la inversión inicial requerida para implementar la alternativa propuesta.

- Basado en la prueba industrial llevada a cabo en el objetivo 3 y 4 de la investigación se estiman los costos para el tratamiento del 100% del efluente de la PTAR.

Aplicando la ecuación (XXIV) se determinan los costos por concepto de instalaciones eléctricas y automatización del sistema propuesto.

$$C_{IE} = 0,05 \cdot (25.000.000 \cdot (1) + 21.800 \cdot (200) + 9.800 \cdot (12) + 3.480.280 \cdot (2)) + 2 \cdot (2 \cdot 95.000) = \dots$$
$$\dots C_{IE} = 2.301.908Bs$$

Mediante la aplicación de la ecuación (XXV) se determinan los costos por acondicionamiento físico o civil del la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

$$C_{ACC} = 0,35 \cdot (25.000.000 \cdot (1) + 21.800 \cdot (200) + 9.800 \cdot (12) + 3.480.280 \cdot (2)) + 45 \cdot (4 \cdot 92.200) = \dots$$
$$\dots C_{ACC} = 30.049.356Bs$$

Utilizando la ecuación (XXIII) se determina el costo de la inversión inicial requerida.

$$C_{IITotal} = (25.000.000 \cdot (1) + 21.800 \cdot (200) + 9.800 \cdot (12) + 3.480.280 \cdot (2)) + 30.049.356 + 2.301.908 = \dots$$
$$\dots C_{IITotal} \cong 70.789.424Bs$$

Es importante mencionar que los costos mostrados fueron proporcionados por el centro de coste que maneja la cervecería con sus suplidores y contratistas civiles que operan en planta.



5.2 Cálculos asociados a los costos operacionales del proceso de propuesto.

- En vista de que el sistema no utilizará si no una bomba peristáltica adicional y el prensado del precipitado se realizará a través del equipo filtrobanda de la planta, los costos operacionales se ven controlados por gastos en compra de cloruro férrico, cuyo precio es 365 Bs/kg.

Mediante las ecuaciones (XXVII) y (XXVIII) se logra estimar los costos operativos una vez implementado el proceso.

$$C_{opTotal} = \frac{(600 \cdot 24 \cdot 25) \cdot 200}{1000} \cdot 365 = 26.280.000 \frac{Bs}{mes}$$

Este monto es en caso de que el fósforo en el efluente de la PTAR sea mayor a 4 ppm durante un mes completo, pero como esto no ocurre de esta manera y el fósforo es variable, preferiblemente se calculó de esta manera:

$$C_{opTotal} = \frac{(600 \cdot 24 \cdot 25) \cdot 77,77}{1000} \cdot 365 \cong 8.094.000 \frac{Bs}{mes \cdot ppm P_{Remov}}$$

5.3 Cálculos asociados a la estimación de los beneficios de implementar el tratamiento de remoción de fósforo recomendado.

- Realizando un estudio comparativo entre el capital invertido por la empresa para lograr que el fósforo en el efluente de la PTAR sea menor a 1ppm y los costos del tratamiento propuesto se logran identificar los beneficios económicos, del tratamiento propuesto:

Para comenzar se estiman los costos asociados al desvío de agua cruda a la etapa de aireación. Utilizando el índice de agua residual por hectolitro de producto,

$5,1 \frac{m^3 \text{ Agua Residual}}{Hl \text{ cerveza - malta}}$, se calculan la carga hidráulica que maneja la PTAR ante distintos

escenarios de producción.

Mediante los modelos matemáticos (XXX) y (XXXI) se estiman la cantidad de oxígeno requerida y los kilogramos de sólidos generados, que deben ser desechados al mismo tiempo para mantener los SSTLM en la piscinas de aireación constante, con un



porcentaje de desvío del **30 %** (necesario actual para alcanzar fósforo menor 1ppm) y una producción de **700.000** hectolitros de cerveza y malta mensual.

$$O_2\text{need} = \left[(1 - 0,3) \cdot \frac{(360 \cdot 600)}{1000} + (0,3) \cdot \frac{(1500 \cdot 600)}{1000} \right] \cdot 1,6 = 673,92 \frac{\text{kg}O_2}{h}$$

Generación de sólidos volátiles por reproducción aerobia.

$$LMSS_{Gen} = \left[(1 - 0,3) \cdot \frac{(360 \cdot 600)}{1000} + (0,3) \cdot \frac{(1500 \cdot 600)}{1000} \right] \cdot 0,5 = 210,60 \frac{\text{kg}SSTLM_{Gen}}{h} Sust.Seca$$

Conociendo la cantidad de oxígeno requerido y la capacidad de cada rotor de la piscina de suministrar oxígeno (83,33 kgO₂/h), se calcula el número de rotores necesarios operando.

$$N^{\circ}_{\text{rotores}} \text{ Re queridos} = \frac{673,92}{83,33} = 8 \text{ rotores} - \text{encendidos}$$

Vale la pena mencionar que actualmente la piscina de aireación utilizada posee 6 rotores de 7 en servicio.

Con esta información se calculan los costos asociados al consumo de energía eléctrica mensual para satisfacer el oxígeno demandado por los microorganismos presentes en el licor mixto. Utilizando la ecuación (XXIX) y sabiendo que el KWh tiene un costo de 45,65 Bs para la cervecería.

$$C_{EE} = \frac{(0,85 \cdot 460 \cdot 174 \cdot \sqrt{3}) \cdot 8}{1000} \cdot 24 \cdot 25 \cdot 45,65 = 25.820.738,08 \frac{Bs}{mes}$$



Conociendo la cantidad de sólidos generados y asumiendo que los sólidos en la piscina de aireación están dentro de los parámetros de diseño se calcula el número de horas que debe operar el filtrobanda para desechar una cantidad igual de sólidos al día.

Sabiendo que el filtrobanda es capaz de desechar 336,27 kgLodoSust.Seca/h.

$$N^{\circ} \text{ horas}_{ope} \text{FBanda} = \frac{210,60}{336,27} \cdot 24 = 15 \frac{\text{horas}}{\text{día}}$$

Con esta información se calculan los costos asociados al consumo de energía eléctrica mensual desechar el lodo en exceso. Utilizando la ecuación (XXIX) y sabiendo que el KWh tiene un costo de 45,65 Bs para la cervecería.

Conociendo que el sistema de filtrobanda consta con los siguientes motores:

Equipo	Corriente A	Voltaje V	Kwh
Batch	3,05	220,00	3,95
Pump (x3)	8,60	440,00	16,71
Fbanda	4,50	440,00	8,75

$$C_{EE} (3,95 + 16,71 + 8,75) \cdot 24 \cdot 25 \cdot 45,65 = 805.539,9 \frac{Bs}{mes}$$

Otro consumo es el del polielectrolito utilizado (Poliamida) para la deshidratación del lodo el cual tiene un costo de 15.000Bs/kg y el índice de consumo del mismo es 0,584kg/h.

$$C_{PQ} = 0,58 \cdot 15 \cdot 25 \cdot 15000 = 3.262.500Bs/mes$$

Considerando que estos son los costos mas significativos del tratamiento actual utilizado por la cervecería se calculan los costos totales para remover el fósforo por debajo de 1 ppm, con una producción de 700.000 Hl/mes de cerveza y malta y un porcentaje de desvió de agua cruda a la etapa de aireación de 30%.



$$C_{Desvio} = 3.262.500 + 805.539 + 25.820.738 \cong 29.888.777 \frac{Bs}{mes}$$

Estos cálculos se realizaron de la misma manera para una producción de 200.000 a 720.000 Hl/mes de cerveza y malta, y a diferentes porcentajes de desvío de agua cruda a la piscina de aireación (10 a 50) %.

“Vale la pena mencionar que el tratamiento es inestable y es probable que requiera la suma citada y no se obtenga un fósforo menor a 1ppm en el efluente de la PTAR”.

Finalmente mediante el uso de la ecuación (XXXII) se calcula la relación de bolívares por hectolitro envasado gastado mensualmente por la planta para “controlar” el fósforo.

$$R_{Polar} = \frac{29.888.777}{700.000} = 42,69 \frac{Bs}{Hl}$$

Finalmente mediante el uso de la ecuación (XXXII) se calcula la relación de bolívares por hectolitro de cerveza envasado, del tratamiento propuesto.

$$R_{propuesta} = \frac{26.280.000}{700.000} = 37,42 \frac{Bs}{Hl}$$

Si P_{Teflu} > 4 ppm

La concentración de fósforo total mas alta registrada en el efluente de la PTAR es 4ppm, por ello se puede estimar de la siguiente manera:

$$R_{propuesta} = \frac{8.000.000}{700.000} = 11,43 \frac{Bs}{Hl \cdot ppm P_{Remov}}$$

Los ahorros, solo en energía eléctrica podrían llegar a ser de hasta:

$$Ahorros_{EE} = 700.000 \cdot 42,69 - 700.000 \cdot 11,43 \cong 21.000.000 \frac{Bs}{mes}$$



- Para el cálculo de la cantidad de sólido generado ($FePO_4$), se estimó según el comparador WRA véase apéndices B hallando a nivel de laboratorio la siguiente correlación:

$$FePO_{4Gen} = 0,1 \cdot Q_{PTAR} = 0,1 \cdot 600 = 60 \text{ kg / h}$$

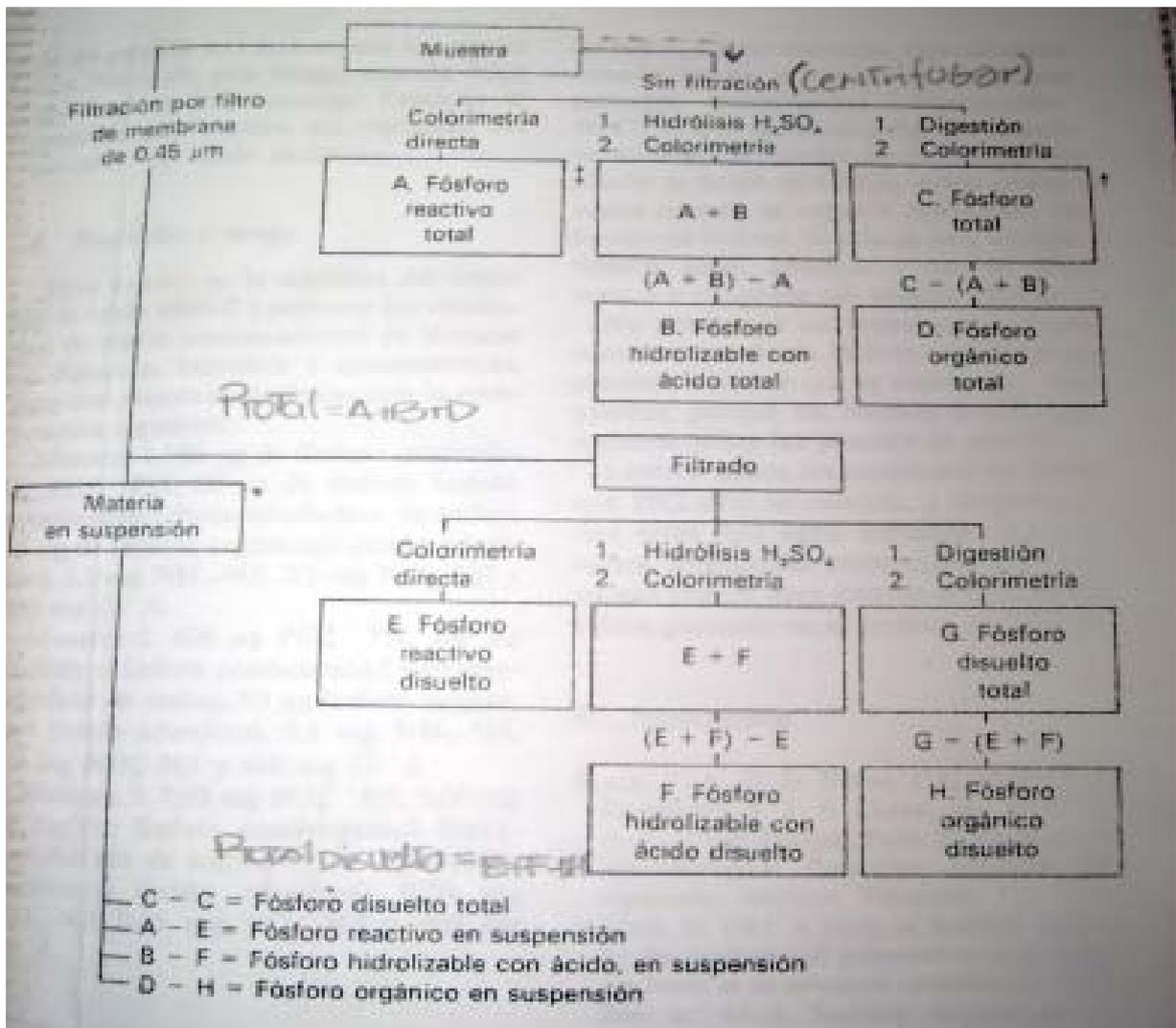
Los costos asociados al tratamiento del fosfato de hierro sólido son nulos, ya que:

- 1.- Son insignificantes.
- 2.- Se puede tratar al mismo tiempo que el lodo en exceso.
- 3.- Mejora el proceso de deshidratación de lodo.



APÉNDICE B TABLAS Y FIGURAS BIBLIOGRÁFICAS

En esta sección se muestran las tablas y/o figuras bibliográficas utilizadas para realizar los cálculos matemáticos.



Fuente: Standard Methods, 1998.

Figura B.1: Pasos del análisis de fosfato en agua residual

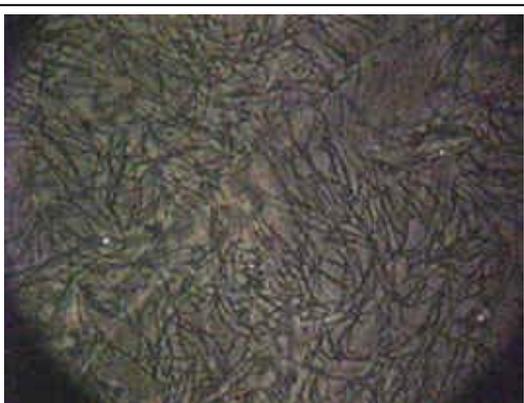


Figura 1. Lodo enfermo con recarga de microorganismos filamentosos.

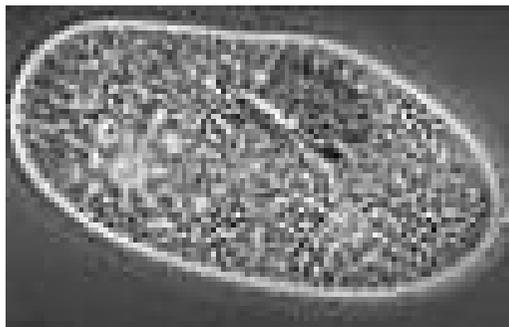


Figura 2. Paramecium - protozoa



Figura 3. Nemátodo - protozoa

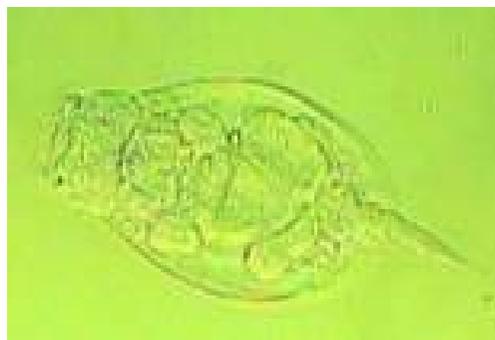


Figura 4. Rotífero - protozoa



Figura 5. Ciliado - protozoa



Figura 6. Acinetobacter

Fuente: Guía operacional de Tratamiento de Aguas, 1999.

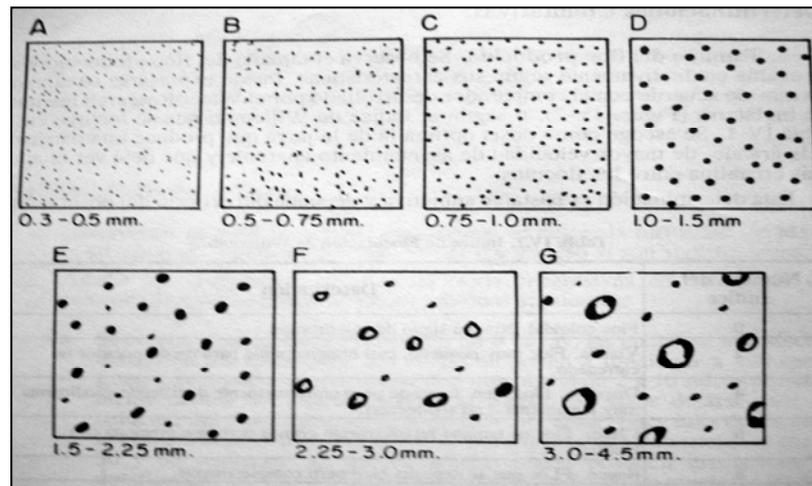
Figura B.2 Microorganismos presentes en los lodos activados aerobios



Tabla B.1: Índice de Floculación de Wilcomb

Índice	Descripción
0	Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación
2	Visible. Floc muy pequeño, casi impredecible para un observador no entrenado.
4	Disperso. Floc bien formado pero uniformemente distribuido. (sedimenta muy lentamente o no sedimenta)
6	Claro. Flor de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud.
8	Bueno. Floc que se deposita fácil pero completamente.
10	Excelente. Floc que se deposita todo dejando el agua cristalina.

Fuente: Teoría y práctica de la purificación del agua, Arboleda 2000.



Fuente: Teoría y práctica de la purificación del agua, Arboleda 2000.

Figura B.3: Comparador para estimar el tamaño de floc producido en la coagulación según el WRA



APÉNDICE C

MATERIAL EXPERIMENTAL ADICIONAL

En esta sección se muestran el diagrama de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, el método operatorio así como los instrumentos de recolección de datos.

TABLAS DE DATOS

TABLA C.1: CAUDAL DE OPERACIÓN DIARIO DE LOS PRINCIPALES EQUIPOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Caudal de Operación (m ³ /h) ↓ / Fecha →	07-May	08-May	09-May	11-May
Afluente PTAR	402,8333	435,0417	416,7708	415,9167
Desvío al tratamiento aeróbico	23,8750	0,0000	0,0000	0,0000
Tanque buffer	378,9583	446,0000	419,0625	440,9583
Tanques de preacidificación	189,4792	223,0000	209,5313	220,4792
Reactores Anaeróbicos	380,4583	447,5000	420,5625	442,4583
Piscina Aeróbica	770,5953	802,8037	784,5328	783,6787
Efluente PTAR	402,8333	435,0416	416,7708	415,9166
Recirculado tanquilla de lodo	299,7260	299,7260	299,7260	299,7260
Espesador de lodos	68,0360	68,0360	68,0360	68,0360
Recirculado Espesador de lodos	50,5360	50,5360	50,5360	50,5360
Filtrobanda	19,5000	19,5000	19,5000	19,5000
Recirculado Filtrobanda	16,0000	16,0000	16,0000	16,0000

* Dos bombas de recirculación y una bomba de exceso de lodo encendidas.

TABLA C.1: CAUDAL DE OPERACIÓN DIARIO DE LOS PRINCIPALES EQUIPOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (CONT.)

Caudal de Operación (m ³ /h) ↓ / Fecha →	12-May	15-May	16-May	18-May
Afluente PTAR	417,2917	423,7500	413,5833	476,1250
Desvío al tratamiento aeróbico	71,9583	37,8750	48,4167	0,0000
Tanque buffer	345,3333	385,8750	365,1667	481,0000
Tanques de preacidificación	172,6667	192,9375	182,5833	240,5000
Reactores Anaeróbicos	346,8333	387,3750	366,6667	482,5000
Piscina Aeróbica	785,0537	791,5120	781,3453	843,8870
Efluente PTAR	417,2917	423,7500	413,5833	476,1250
Recirculado tanquilla de lodo	299,7260	299,7260	299,7260	299,7260
Espesador de lodos	68,0360	68,0360	68,0360	68,0360
Recirculado Espesador de lodos	50,5360	50,5360	50,5360	50,5360
Filtrobanda	19,5000	19,5000	19,5000	19,5000
Recirculado Filtrobanda	16,0000	16,0000	16,0000	16,0000

* Dos bombas de recirculación y una bomba de exceso de lodo encendidas.



TABLA C.1: CAUDAL DE OPERACIÓN DIARIO DE LOS PRINCIPALES EQUIPOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (CONT.)

Caudal de Operación (m ³ /h) ↓ / Fecha →	19-May	22-May	23-May	25-May
Afluente PTAR	423,4167	442,0417	464,3750	330,9167
Desvío al tratamiento aeróbico	62,9167	90,0000	120,1667	0,0000
Tanque buffer	360,5000	352,0417	344,2083	410,2083
Tanques de preacidificación	180,2500	176,0208	172,1042	205,1042
Reactores Anaeróbicos	362,0000	353,5417	345,7083	411,7083
Piscina Aeróbica	791,1787	809,8037	832,1370	698,6787
Efluente PTAR	423,4167	442,0417	464,3750	330,9167
Recirculado tanquilla de lodo	299,7260	299,7260	299,7260	299,7260
Espesador de lodos	68,0360	68,0360	68,0360	68,0360
Recirculado Espesador de lodos	50,5360	50,5360	50,5360	50,5360
Filtrobanda	19,5000	19,5000	19,5000	19,5000
Recirculado Filtrobanda	16,0000	16,0000	16,0000	16,0000

* Dos bombas de recirculación y una bomba de exceso de lodo encendidas.

TABLA C.1: CAUDAL DE OPERACIÓN DIARIO DE LOS PRINCIPALES EQUIPOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (CONT.)

Caudal de Operación (m ³ /h) ↓ / Fecha →	26-May	29-May	Promedio
Afluente PTAR	466,7083	439,0417	428,0753
Desvío al tratamiento aeróbico	80,7083	81,7500	36,2564
Tanque buffer	386,0000	357,2917	391,8189
Tanques de preacidificación	193,0000	178,6458	195,9095
Reactores Anaeróbicos	387,5000	358,7917	393,3189
Piscina Aeróbica	834,4703	806,8037	795,8373
Efluente PTAR	466,7083	439,0417	428,0753
Recirculado tanquilla de lodo	299,7260	299,7260	299,7260
Espesador de lodos	68,0360	68,0360	68,0360
Recirculado Espesador de lodos	50,5360	50,5360	50,5360
Filtrobanda	19,5000	19,5000	19,5000
Recirculado Filtrobanda	16,0000	16,0000	16,0000

* Dos bombas de recirculación y una bomba de exceso de lodo encendidas.



TABLA C.2: CONCENTRACIÓN DE FÓSFORO REACTIVO, DISUELTO Y TOTAL DIARIA EN MUESTRAS COMPUESTAS DE 24 HORAS EN LA PTAR

Punto de Muestreo ↘ / Fecha →		03-May	03-May	05-May
Concentración de fósforo afluente PTAR (ppm)	Reactivo	1,3870	1,4631	1,1033
	Disuelto	4,1612	4,3893	3,3099
	Total	6,9354	7,3156	5,5165
Concentración de fósforo salida lamella (ppm)	Reactivo	1,1302	1,4530	0,9516
	Disuelto	4,6538	5,9830	3,9184
	Total	6,6484	8,5472	5,5978
Concentración de fósforo salida preácidos (ppm)	Reactivo	2,1416	2,3931	1,6673
	Disuelto	4,2831	4,7861	3,3346
	Total	7,1385	7,9769	5,5577
Concentración de fósforo salida T. anaerobico (ppm)	Reactivo	2,4910	2,7904	2,0484
	Disuelto	3,9144	4,3849	3,2190
	Total	7,1171	7,9725	5,8527
Concentración de fósforo entrada T. aerobico (ppm)	Reactivo	2,8891	2,7790	3,1630
	Disuelto	7,2226	6,9474	7,9075
	Total	28,8905	27,7896	31,6300
Concentración de fósforo salida T. aerobico (ppm)	Reactivo	2,1338	1,8742	0,1395
	Disuelto	4,0009	3,5141	4,0575
	Total	26,6727	23,4276	27,0501
Concentración de fósforo efluente PTAR (ppm)	Reactivo	2,1921	2,0849	0,2512
	Disuelto	0,8768	0,8340	0,1407
	Total	3,1315	2,9784	0,5024
Concentración de fósforo recirculado de la tanquilla de lodo (ppm)	Reactivo	1,2460	1,0263	1,3667
	Disuelto	6,9779	5,7475	7,6532
	Total	24,9209	20,5269	27,3330
Concentración de fósforo recirculado del espesador de lodos (ppm)	Reactivo	4,2048	3,7211	4,3866
	Disuelto	7,8489	6,9460	8,1883
	Total	28,0317	24,8070	29,2440
Concentración de fósforo licor recirculado del filtrobanda (ppm)	Reactivo	4,7549	5,6585	7,3410
	Disuelto	3,9941	4,7531	6,1664
	Total	9,5098	11,3170	14,6820



**TABLA C.3: CONCENTRACIÓN DE FÓSFORO REACTIVO, DISUELTO Y TOTAL DIARIA EN MUESTRAS
COMPUESTAS DE 24 HORAS EN LA PTAR**

Punto de Muestreo ↓	Fecha →	08-May	09-May	11-May	12-May	15-May	16-May	18-May	19-May	22-May	23-May	25-May	26-May	29-May
Concentración de fósforo afluente PTAR (ppm)	Reactivo	2,23	1,68	0,96	1,59	4,03	1,44	1,81	2,21	2,47	2,11	2,30	1,57	1,94
	Disuelto	7,70	5,81	3,31	5,47	13,90	4,95	6,23	7,63	8,51	7,29	7,94	5,41	6,68
	Total	9,29	7,01	3,99	6,60	16,77	5,97	7,52	9,21	10,27	8,80	9,58	6,53	8,06
Concentración de fósforo salida T. anaerobico (ppm)	Reactivo	3,33	2,45	1,27	2,26	6,74	3,11	2,39	2,89	3,78	3,24	3,53	2,41	2,97
	Disuelto	7,09	5,20	2,69	4,82	14,33	6,63	5,09	6,15	8,05	6,89	7,51	5,12	6,31
	Total	10,13	7,43	3,85	6,88	20,47	9,46	7,27	8,79	11,49	9,85	10,73	7,31	9,02
Concentración de fósforo entrada T. aerobico (ppm)	Reactivo	2,05	1,62	0,92	1,59	3,83	1,99	1,78	2,03	3,22	2,82	3,33	2,55	2,17
	Disuelto	4,17	3,24	1,76	3,29	8,17	4,06	3,50	4,21	6,40	5,69	5,78	4,81	4,62
	Total	12,25	14,23	8,94	18,62	20,94	18,32	17,76	22,60	50,74	47,75	56,34	47,40	43,62
Concentración de fósforo efluente PTAR (ppm)	Reactivo	1,69	0,29	0,86	1,29	0,68	0,56	1,71	1,68	0,55	0,57	0,84	0,70	0,69
	Disuelto	2,86	0,48	1,44	2,17	1,15	0,94	2,89	2,83	0,93	0,96	1,42	1,18	1,16
	Total	2,98	0,50	1,50	2,26	1,20	0,98	3,01	2,95	0,97	1,00	1,48	1,23	1,21
Concentración de fósforo recirculado de la tanquilla de lodo + FBanda (ppm)	Reactivo	0,23	0,35	0,23	0,53	0,34	0,45	0,51	0,63	1,62	1,61	1,59	1,62	1,61
	Disuelto	0,40	0,62	0,40	0,91	0,59	0,79	0,88	1,10	2,82	2,81	2,77	2,82	2,81
	Total	14,15	21,67	13,93	32,06	20,84	27,72	30,85	38,56	98,99	98,51	97,32	98,81	98,51
Concentración de fósforo recirculado del espesador de lodos (ppm)	Reactivo	2,06	2,68	2,21	3,60	3,15	3,97	3,92	4,29	10,70	9,20	10,97	11,02	0,44
	Disuelto	2,61	3,39	2,80	4,55	3,98	5,03	4,96	5,43	13,54	11,64	13,89	13,95	0,56
	Total	18,51	24,06	19,88	32,29	28,24	35,65	35,16	38,52	96,00	82,54	98,50	98,93	3,97

**TABLA C.4: DATOS DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN EN FUNCIÓN DE LA ABSORBANCIA Y LA
CONCENTRACIÓN DE FÓSFORO DEL ESPECTROFOTÓMETRO AGILENT 8453**

Absorbancia (nm)	Concentración de fósforo conocida (ppm)
0,00000	0,00000
0,18801	0,23150
0,44032	0,54217
0,83766	1,03141
1,59840	1,96811

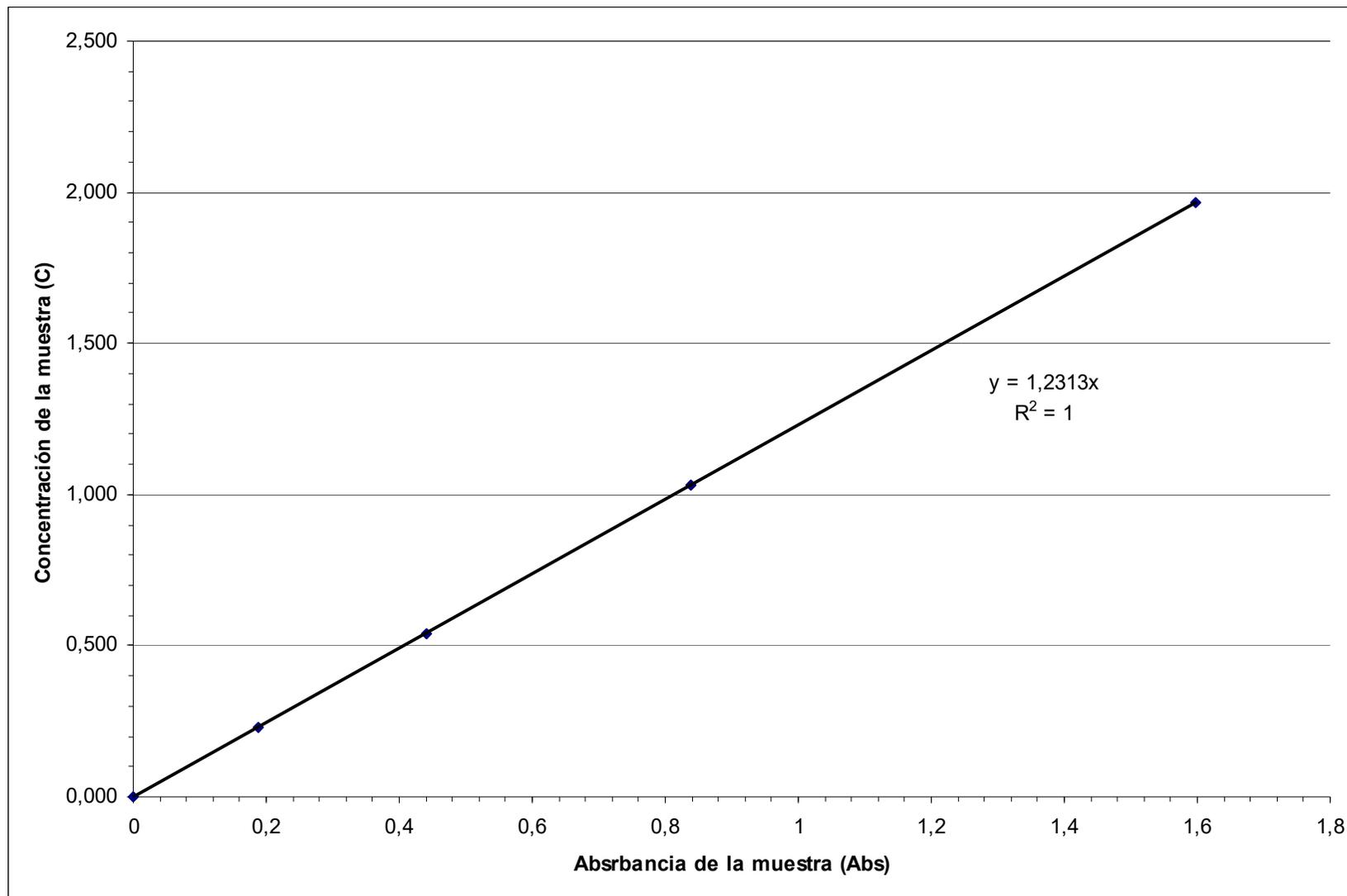


Figura C.1: Curva de calibración de absorbancia en función de la concentración de fósforo de la muestra del espectrofotómetro utilizado en el Laboratorio Central



TABLA C.5: PROPUESTA DE EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA ELIMINAR FÓSFORO EN AL EFLUENTE DE LA PTAR MEDIANTE TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS

Tratamiento Biológico	Ventajas Aparentes	Desventajas Aparentes
Bardenpho: Se fermenta el licor mixto primeramente y en la fase de aireación extendida se combinan etapas anóxicas y aeróbicas.	<ul style="list-style-type: none">* Elimina fósforo y nitrógeno 85%* Ahorro en productos químicos* Ahorro de energía por aireación* Incorporable a la planta	<ul style="list-style-type: none">* El desecho de Lodo debe ser deshidratado rápidamente antes del inicio de condiciones anaeróbicas. No puede ser probado previamente a nivel de laboratorio.* Depende de la alta relación DBO/P.
Phostrip: Se utilizan lodos activados como un análogo biológico del solvente en un proceso de extracción por solventes.	<ul style="list-style-type: none">* Alta eficiencia para la remoción de fósforo y nitrógeno 90 y 70%* No depende de la R=DBO/P* Incorporable a la planta	<ul style="list-style-type: none">* Uso de un tratamiento químico con cal* Problemas de incrustaciones por la adición de cal como coagulante. No puede ser probado previamente a nivel de laboratorio.
A/O: Sistema de cultivo en suspensión de fango único que combina secuencialmente etapas aerobias y anaerobias.	<ul style="list-style-type: none">* La operación es relativamente sencilla en comparación con los otros procesos	<ul style="list-style-type: none">* Necesita disponer de una relación DBO/P elevada. No puede ser probado previamente a nivel de laboratorio.



TABLA C.6: PROPUESTA DE EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA ELIMINAR FÓSFORO EN AL EFLUENTE DE LA PTAR MEDIANTE TRATAMIENTOS QUÍMICOS

Tratamiento Químico	Ventajas Aparentes	Desventajas Aparentes
Coagulación con cal: La reacción ocurre más fácilmente con los fosfatos solubles. Los iones de calcio forman hidroxapatito, agua y grupos oxidrilos.	<ul style="list-style-type: none"> * No se introducen solutos indeseables al sistema * Coagulante económico * Aumenta el pH del agua residual * Permite su prueba a nivel de laboratorio * Acondiciona el lodo para su deshidratación 	<ul style="list-style-type: none"> * Eficiencia baja * Incrementa los SSTLM
Coagulación con sales metálicas: Puede ser Hierro o Aluminio (sulfatos)	<ul style="list-style-type: none"> * Permite su prueba a nivel de laboratorio * Son mas eficientes que la cal 	<ul style="list-style-type: none"> * Descenso del pH, corrosión * Introducción al sistema de sulfatos * Lodo químico
Coagulación con sales metálicas: Puede ser Hierro o Aluminio (cloruros)	<ul style="list-style-type: none"> * Permite su prueba a nivel de laboratorio * Son mas eficientes que la cal * Introducen cloro al sistema 	<ul style="list-style-type: none"> * Descenso del pH, corrosión se produce ácido clorhídrico *Lodo químico

* Actualmente existen coagulantes poliméricos para eliminar fósforo. Ej: Clarair 1173 (BETZ)

TABLA C.7: PROPUESTA DE EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA ELIMINAR FÓSFORO EN AL EFLUENTE DE LA PTAR MEDIANTE TRATAMIENTOS ALTERNOS

Tratamiento alternativo	Ventajas Aparentes	Desventajas Aparentes
Combinación de la cal con sales metálicas	<ul style="list-style-type: none"> * Se mejora las características de sedimentabilidad lo que acondiciona el lodo para su deshidratación * Se podría corregir los problemas asociados al descenso del pH * Permite su prueba a nivel de laboratorio 	<ul style="list-style-type: none"> * Costos adicionales por dosificación de químicos * La cal aumenta los SSTLM
Ubicación y tratamiento de fuentes importantes de fósforo en planta	<ul style="list-style-type: none"> * Minimización del uso de químicos coagulantes * En caso de que exista un sustituto, podría estudiarse dicho cambio en función de su efecto en el proceso 	<ul style="list-style-type: none"> * En caso de que no sean reactivos deben ser hidrolizados para ser precipitado
Filtración del agua clarificada:	Estudiar como afecta el filtrado del agua clarificada en la concentración de fósforo	



TABLA C.8: DATOS OBTENIDOS EN LA PRUEBA BIOLÓGICA DE REMOCIÓN DE FÓSFORO BARDENPHO EN LA PTAR

IVL antes I_{VLA} %	IVL después I_{VL}D %	Fósforo antes (P_A) ppm	Fósforo después (P_D) ppm
40	60	1,64	3,02
50	70		3,89
45	73		3,60
43	65		2,90
44	67		2,45
47	70		2,40
55	60		2,60
49	63		3,60
40	61		2,90
49	62		3,00

TABLA C.9: DATOS OBTENIDOS DE LA CONCENTRACIÓN DE FÓSFORO EN EL RECIRCULADO DEL ESPESADOR DE LODOS DE LA PTAR

Fósforo total antes (ppm)	Fósforo total después (ppm)
47,09	5,40
	5,78
	5,60
	5,36
	5,90
	5,89
	5,86
	6,18
	6,38
	6,28



**TABLA C.10: DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE PRUEBA DE JARRAS CON CLORURO FÉRRICO
REALIZADO EN MUESTRAS DE AGUA TRATADA DE LA PTAR**

pH inicial (pH _o)	Fòsforo inicial (P _o) ppm	Concentración del coagulante ([FeCl ₃) ppm	Tiempo de FLOC (t _{FLOC}) s	Tiempo de sedimentación (t _{SED}) min	Índice de Wilcomb	WRA-SS (%)	pH final (pH _F)	Fòsforo final (P _F) ppm
7,98	4,12	50,00	60,00	20,00	4	D-0,5	7,70	2,96
			60,00	20,00	4	D-0,5	7,70	3,07
		100,00	50,00	15,00	4	E-2,5	7,48	2,02
			50,00	15,00	4	E-2,5	7,48	2,00
		200,00	45,00	10,00	6	E-5,0	7,17	0,96
			45,00	10,00	6	E-5,0	7,17	1,00
		300,00	45,00	7,00	6	E-7,5	7,84	0,43
			45,00	7,00	6	E-7,5	7,83	0,42
		400,00	40,00	7,00	8	F-10,0	7,68	0,27
			40,00	7,00	8	F-10,0	7,67	0,28
		500,00	40,00	7,00	8	F-10,0	7,49	0,17
			40,00	7,00	8	F-10,0	7,49	0,19
		600,00	35,00	6,00	8	F-10,5	6,40	0,10
			35,00	6,00	8	F-10,5	6,40	0,12
		700,00	35,00	6,00	10	F-10,5	6,37	0,05
			35,00	6,00	10	F-10,5	6,37	0,05
		800,00	30,00	6,00	10	F-11,0	6,29	0,01
			30,00	6,00	10	F-11,0	6,29	0,01
		900,00	30,00	5,00	10	G-12,0	6,10	0,01
			30,00	5,00	10	G-12,0	6,10	0,01
1000,00	25,00	5,00	10	G-12,5	5,92	0,00		
	25,00	5,00	10	G-12,5	5,92	0,00		

* Los ensayos se realizaron por duplicado.



**TABLA C.11: DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE PRUEBA DE JARRAS CON CLORURO FÉRRICO
REALIZADO EN MUESTRAS DE AGUA TRATADA DE LA PTAR**

pH inicial (pH_o)	Fòsforo inicial (P_o) ppm	Concentración del coagulante ([FeCl₃]) ppm	Tiempo de FLOC (t_{FLOC}) s	Tiempo de sedimentación (t_{SED}) min	Índice de Wilcomb	WRA-SS (%)	pH final (pH_F)	Fòsforo final (P_F) ppm
8,15	3,75	300,00	45,00	7,50	6	E-7,5	7,07	0,54
			45,00	7,50	6	E-7,5	7,07	0,54
		325,00	45,00	7,50	6	E-7,5	7,02	0,51
			45,00	7,50	6	E-7,5	7,02	0,51
		350,00	40,00	7,50	6	E-7,5	6,98	0,51
			40,00	7,50	6	E-7,5	6,99	0,50
		375,00	40,00	7,00	8	E-10,0	6,94	0,49
			40,00	7,00	8	E-10,0	6,94	0,44
		400,00	40,00	6,50	8	F-10,0	6,91	0,43
			40,00	6,50	8	F-10,0	6,91	0,42

* Los ensayos se realizaron por duplicado.



TABLA C.12: DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE PRUEBA DE JARRAS CON CLORURO FÉRRICO REALIZADO EN MUESTRAS DE LODO A LA SALIDA DE LA PISCINA DE AIREACIÓN DE LA PTAR

pH inicial (pH_o)	Fósforo inicial (P_o) ppm	Concentración del coagulante ([FeCl₃]) ppm	Ph final (pH_f)	Fósforo final (P_f) ppm
8,10	3,66	300,00	7,26	0,40
			7,26	0,39
		325,00	7,23	0,32
			7,23	0,31
		350,00	7,20	0,22
			7,20	0,23
		375,00	7,17	0,26
			7,17	0,26
		400,00	7,15	0,23
			7,15	0,23

* Los ensayos se realizaron por duplicado.



TABLA C.13: DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE PRUEBA DE JARRAS CON CLORURO FÉRRICO Y LECHADA DE CAL REALIZADO EN MUESTRAS DE AGUA TRATADA DE LA PTAR

pH inicial (pH_o)	Fósforo inicial (P_o) ppm	Concentración del coagulante ([FeCl₃]) ppm	Concentración del coagulante ([Ca(OH)₂] ppm	Índice de Wilcomb	Tiempo de sedimentación (t_{SED}) min	WRA-SS (%)	pH final (pH_F)	Fósforo final (P_F) ppm
8,10	4,79	300,00	50,00	6	7,00	E-10,0	7,06	0,45
			100,00	6	7,00	E-10,0	7,22	0,33
			150,00	6	6,00	E-10,0	7,39	0,31
			200,00	6	6,00	E-10,0	7,50	0,30
		325,00	50,00	6	7,00	E-10,0	7,02	0,32
			100,00	6	7,00	E-10,0	7,19	0,28
			150,00	6	5,00	E-10,0	7,36	0,29
			200,00	6	5,00	E-10,0	7,47	0,29
		350,00	50,00	6	7,00	E-10,0	6,99	0,27
			100,00	6	7,00	E-10,0	7,14	0,25
			150,00	6	6,00	E-10,0	7,31	0,26
			200,00	6	6,00	E-10,0	7,43	0,22



TABLA C.14: DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE PRUEBA DE JARRAS CON CLORURO FÉRRICO Y UN POLÍMERO DE ALTO PM REALIZADO EN MUESTRAS DE AGUA TRATADA DE LA PTAR

pH inicial (pH _o)	Fósforo inicial (P _o) ppm	Concentración del coagulante ([FeCl ₃]) ppm	Concentración del coagulante ([Polímero]) ppm	Indice de Wilcomb	Tiempo de sedimentación (t _{SED}) min	WRA-SS (%)	pH final (pH _F)	Fósforo final (P _F) ppm
8,25	4,69	300,00	1	6	5,00	F-10,0	6,91	0,34
			2	8	4,00	E-12,5	6,93	0,26
		325,00	1	6	5,00	F-10,0	6,88	0,28
			2	8	4,00	E-12,5	6,90	0,40
		350,00	1	8	4,00	E-12,5	6,84	0,37
			2	8	3,00	E-12,5	6,86	0,36

TABLA C.15: DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE PRUEBA DE JARRAS CON POLICLORURO DE ALUMINIO REALIZADO EN MUESTRAS DE AGUA TRATADA DE LA PTAR

pH inicial (pH _o)	Fósforo inicial (P _o) ppm	Concentración del coagulante ([PAC]) ppm	Tiempo de FLOC (t _{FLOC}) s	Tiempo de sedimentación (t _{SED}) min	Indice de Wilcomb	WRA-SS (%)	pH final (pH _F)	Fósforo final (P _F) ppm
8,11	4,28	50,00	60,00	7,00	4	E-7,5	8,08	3,30
		100,00	60,00	5,00	6	F-10,0	7,97	2,20
		150,00	50,00	4,00	6	F-15,0	7,85	1,45
		200,00	45,00	4,00	8	F-17,0	7,76	0,88
		250,00	40,00	3,50	8	F-20,0	7,65	0,57
		300,00	35,00	3,50	8	F-21,0	7,57	0,34
		350,00	35,00	3,00	8	F-22,5	7,46	0,25
		400,00	30,00	3,00	8	F-25,0	7,34	0,19



TABLA C.16: DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE PRUEBA DE JARRAS CON POLICLORURO DE ALUMINIO REALIZADO EN MUESTRAS DE AGUA TRATADA DE LA PTAR

pH inicial (pH _o)	Fósforo inicial (P _o) ppm	Concentración del coagulante ([PAC]) ppm	Tiempo de FLOC (t _{FLOC}) s	Tiempo de sedimentación (t _{SED}) min	Indice de Wilcomb	WRA-SS (%)	pH final (pH _F)	Fósforo final (P _F) ppm
8,30	4,67	300,00	35,00	4,00	8	F-21,0	7,74	0,41
		325,00	35,00	3,50	8	F-22,5	7,71	0,34
		350,00	30,00	3,50	8	F-23,0	7,68	0,29
		375,00	30,00	3,00	8	F-25,0	7,64	0,27
		400,00	30,00	3,00	8	F-25,0	7,60	0,23

TABLA C.17: DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE PRUEBA DE JARRAS CON POLICLORURO DE ALUMINIO REALIZADO EN MUESTRAS DE LODO A LA SALIDA DE LA PISCINA DE AIREACIÓN DE LA PTAR

pH inicial (pH _o)	Fósforo inicial (P _o) ppm	Concentración del coagulante ([PAC]) ppm	pH final (pH _F)	Fósforo final (P _F) ppm
8,11	4,69	300,00	7,65	0,44
		325,00	7,60	0,33
		350,00	7,57	0,32
		375,00	7,53	0,31
		400,00	7,49	0,24



TABLA C.18: CARACTERIZACIÓN UNA VEZ REALIZADAS LAS PRUEBAS DE JARRAS A LA DOSIS ÓPTIMA ESTIMADA DE COAGULANTE EN MUESTRAS DE AGUA TRATADA DE LA PTAR

CALIDAD DEL AGUA				
Variable Característica	Sin tratamiento fisicoquímico	Tratamiento con FeCl₃	Tratamiento con PAC	Norma del Decreto 3219
Conductividad (L) mS/cm	1539,00	1590,00	1567,00	-----
Alcalinidad (Alc) ppm	700,00	600,00	650,00	-----
Dureza Total (D _T) ppm	120,00	120,00	120,00	-----
pH adim	8,27	7,40	8,00	6,00 – 9,00
Turbidez (T) NTU	2,77	16,89	0,30	-----
Fósforo Total (P _T) ppm	5,15	0,20	0,29	1,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO) ppm	53,44	53,44	53,44	350,00
Nitrógeno Total (N _T) ppm	3,10	2,30	3,10	10,00
Hierro (Fe _T) ppm	0,15	1,41	0,43	10,00
Aluminio (Al _T) ppm	-----	-----	-----	1,00
CALIDAD DEL PRECIPITADO				
Variable Característica	Tratamiento con FeCl₃		Tratamiento con PAC	
Tiempo de Sedim. (t _{SED}) min	7,50		4,50	
WRA-SS (%)	E-7,5		F-23	
Índice de Wilcomb	6		8	



TABLA C.19: CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN Y DATOS DE CALIDAD DEL AGUA TRATADA MEDIANTE EL TRATAMIENTO DE REMOCIÓN DE FÓSFORO IMPLEMENTADO EN LA PTAR

Punto de Muestreo ↓ / Fecha →	06-Oct	10-Oct	11-Oct	13-Oct	18-Oct	19-Oct	20-Oct	24-Oct	25-Oct
Caudal de Operación (m3/h)	60,88	66,57	63,67	60,88	61,43	60,57	58,01	61,00	57,95
Dosis de coagulante (ppm)	250,00	300,00	200,00	250,00	250,00	200,00	220,00	211,48	155,69
pH efluente PTAR	8,14	8,12	8,00	7,99	8,02	7,98	8,12	7,92	8,21
pH efluente Pba.Campo	7,41	7,37	7,52	7,40	7,57	7,61	7,72	7,39	7,62
Fósforo Total PTAR (ppm)	2,46	4,75	1,91	2,33	4,03	2,02	0,81	3,01	0,96
Fósforo Total Pba. Campo (ppm)	0,05	0,32	0,04	0,05	0,27	0,10	0,06	0,27	0,19
Porcentaje de Remoción (%R)	98%	93%	98%	98%	93%	95%	93%	91%	80%
Relación FeCl ₃ FósforoRemovido	28,01	18,28	28,88	29,61	17,95	28,13	79,20	20,84	54,59

TABLA C.19: CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN Y DATOS DE CALIDAD DEL AGUA TRATADA MEDIANTE EL TRATAMIENTO DE REMOCIÓN DE FÓSFORO IMPLEMENTADO EN LA PTAR (CONTINUACIÓN)

Punto de Muestreo ↓ / Fecha →	26-Oct	27-Oct	31-Oct	01-Nov	02-Nov	03-Nov	07-Nov	08-Nov
Caudal de Operación (m3/h)	54,88	57,23	68,00	60,00	60,00	60,00	66,00	64,00
Dosis de coagulante (ppm)	93,82	181,05	90,00	94,85	100,00	107,50	90,00	95,00
pH efluente PTAR	8,14	8,41	8,06	8,10	8,06	8,31	8,03	8,00
pH efluente Pba.Campo	7,68	7,98	7,91	7,94	7,95	8,15	7,92	7,91
Fósforo Total PTAR (ppm)	1,63	2,21	0,84	0,51	0,69	0,64	0,68	0,58
Fósforo Total Pba. Campo (ppm)	0,30	0,14	0,08	0,01	0,07	0,13	0,28	0,19
Porcentaje de Remoción (%R)	82%	94%	91%	98%	90%	80%	59%	67%
Relación FeCl ₃ FósforoRemovido	19,05	23,62	31,76	51,43	43,76	56,91	60,75	65,77



TABLA C.20: COSTOS PARA EL CÁLCULO DE LA INVERSIÓN INICIAL REQUERIDA PARA IMPLEMENTAR EL TRATAMIENTO PROPUESTO

Equipos, Acc. y Horas H.	Cantidad	Costo Unitario (Bs)
Bomba Peristáltica Cap.màx 20 m ³ /h	1 unid	25.000.000,00
Tubería de PAD 3" DN	200 mtrs	21.800,00
Codo PAD 3" DN	12 unid	9.800,00
Válvula 80 DN	2 unid	3.480.280,00
Obra Civil y Materiales	--	30.049.356,00
Instalaciones eléctricas	--	2.301.908,00

TABLA C.21: DATOS DE PLACA DE LOS EQUIPOS QUE CONFORMAN LA PISCINA DE AIREACIÓN Y EL SISTEMA DE DESHIDRATACIÓN DE LODOS DE LA PTAR

Equipo	Corriente A	Voltaje V	Kwh
Motor Aireador	174,00	460,00	117,84
Motores Batch Polímero	3,05	220,00	3,95
Bombas Fbanda (x3)	8,60	440,00	16,71
Motores del Filtrobanda	4,50	440,00	8,75
Bomba peristáltica Lodo	11,21	440,00	21,79

Capacidad de Inyección de oxígeno disuelto de cada rotor: (83,333) kgO₂/h

Capacidad de desecho del filtrobanda: (336,27) kgSST/h (Sust.Seca)

Costo del kilovatio por hora: (45,65) KWh

TABLA C.22: DATOS DEL COMPORTAMIENTO DEL FÓSFORO EN FUNCIÓN A LA CANTIDAD DE CLORURO FÉRRICO DOSIFICADO A NIVEL DE LABORATORIO

Concentración del coagulante ([FeCl ₃]) ppm	Concentración de Fósforo (Pt) ppm
0,00	4,12
50,00	3,015
100,00	2,01
200,00	0,98
300,00	0,425
400,00	0,275
500,00	0,18
600,00	0,11
700,00	0,05
800,00	0,01
900,00	0,01
1.000,00	0,00



TABLA C.23: DATOS DEL COMPORTAMIENTO DEL FÓSFORO EN FUNCIÓN AL PORCENTAJE DE DESVIADO DE AGUA CRUDA AL TRATAMIENTO AEROBIO

Porcentaje de Desvío (%Desv) %	Concentración de Fósforo (Pt) ppm
62	2,78
50	3,41
58	3,29
34	3,12
57	1,14
63	0,72
22	0,63
27	2,16
25	0,63
34	0,43
42	1,02
31	0,55
33	0,77
21	0,47
15	0,44
26	0,44
10	1,69
36	0,75
75	0,64
29	0,43
51	0,47
46	0,66
17	0,98
22	0,50
35	0,70
30	0,56
17	0,92
39	0,74
12	1,63
13	1,20
7	3,68
6	2,49
17	1,76
9	1,30
11	1,17
10	4,37
10	5,23
10	5,14

Datos Históricos de la PTAR.



TABLA C.24: DATOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN DE LA PTAR A DIFERENTES ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN EN FUNCIÓN A UN DESVÍO DE AGUA CRUDA A LA ETAPA DE AIREACIÓN DEL 10%

Producción (HI)	Afluyente PAR (m³/mes)	Afluyente PAR (m³/h)	DBO Afluyente (kg/h)	DBO Reactores (kg/h)	Oxígeno requerido (kg/h)	Sólidos Generados (kg/h)	Energía Piscinas (KW/mes)	Energía FBanda (KW/mes)	Consumo Poliamida (kg/mes)	Gasto Mensual (Bs/mes)
200000,00	102.100,00	170,17	255,25	61,26	129,05	40,33	109.494,41	629,29	41,98	5.722.236,03
220000,00	112.310,00	187,18	280,78	67,39	141,96	44,36	120.443,85	692,22	46,17	6.294.459,64
240000,00	122.520,00	204,20	306,30	73,51	154,87	48,40	131.393,29	755,15	50,37	6.866.683,24
260000,00	132.730,00	221,22	331,83	79,64	167,77	52,43	142.342,73	818,08	54,57	7.438.906,84
280000,00	142.940,00	238,23	357,35	85,76	180,68	56,46	153.292,17	881,01	58,77	8.011.130,45
300000,00	153.150,00	255,25	382,88	91,89	193,58	60,49	164.241,61	943,94	62,96	8.583.354,05
320000,00	163.360,00	272,27	408,40	98,02	206,49	64,53	175.191,06	1.006,87	67,16	9.155.577,65
340000,00	173.570,00	289,28	433,93	104,14	219,39	68,56	186.140,50	1.069,80	71,36	9.727.801,26
360000,00	183.780,00	306,30	459,45	110,27	232,30	72,59	197.089,94	1.132,72	75,56	10.300.024,86
380000,00	193.990,00	323,32	484,98	116,39	245,20	76,63	208.039,38	1.195,65	79,75	10.872.248,46
400000,00	204.200,00	340,33	510,50	122,52	258,11	80,66	218.988,82	1.258,58	83,95	11.444.472,07
420000,00	214.410,00	357,35	536,03	128,65	271,01	84,69	229.938,26	1.321,51	88,15	12.016.695,67
440000,00	224.620,00	374,37	561,55	134,77	283,92	88,72	240.887,70	1.384,44	92,35	12.588.919,27
460000,00	234.830,00	391,38	587,08	140,90	296,83	92,76	251.837,14	1.447,37	96,55	13.161.142,88
480000,00	245.040,00	408,40	612,60	147,02	309,73	96,79	262.786,58	1.510,30	100,74	13.733.366,48
500000,00	255.250,00	425,42	638,13	153,15	322,64	100,82	273.736,02	1.573,23	104,94	14.305.590,08
520000,00	265.460,00	442,43	663,65	159,28	335,54	104,86	284.685,46	1.636,16	109,14	14.877.813,69
540000,00	275.670,00	459,45	689,18	165,40	348,45	108,89	295.634,91	1.699,09	113,34	15.450.037,29
560000,00	285.880,00	476,47	714,70	171,53	361,35	112,92	306.584,35	1.762,02	117,53	16.022.260,90
580000,00	296.090,00	493,48	740,23	177,65	374,26	116,96	317.533,79	1.824,95	121,73	16.594.484,50
600000,00	306.300,00	510,50	765,75	183,78	387,16	120,99	328.483,23	1.887,87	125,93	17.166.708,10
620000,00	316.510,00	527,52	791,28	189,91	400,07	125,02	339.432,67	1.950,80	130,13	17.738.931,71
640000,00	326.720,00	544,53	816,80	196,03	412,97	129,05	350.382,11	2.013,73	134,32	18.311.155,31
660000,00	336.930,00	561,55	842,33	202,16	425,88	133,09	361.331,55	2.076,66	138,52	18.883.378,91
680000,00	347.140,00	578,57	867,85	208,28	438,78	137,12	372.280,99	2.139,59	142,72	19.455.602,52
700000,00	357.350,00	595,58	893,38	214,41	451,69	141,15	383.230,43	2.202,52	146,92	20.027.826,12
720000,00	367.560,00	612,60	918,90	220,54	464,60	145,19	394.179,87	2.265,45	151,11	20.600.049,72

Índice de agua PTAR: (0,51) m³AguaResidual/Hlenvasado

Costo de la poliamida para deshidratar el lodo: (15.000) Bs/kg

Índice de consumo de la poliamida: (0,58) kg/h



TABLA C.25: DATOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN DE LA PTAR A DIFERENTES ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN EN FUNCIÓN A UN DESVÍO DE AGUA CRUDA A LA ETAPA DE AIREACIÓN DEL 20%

Producción (HI)	Afluente PAR (m³/mes)	Afluente PAR (m³/h)	DBO Afluente (kg/h)	DBO Reactores (kg/h)	Oxígeno requerido (kg/h)	Sólidos Generados (kg/h)	Energía Piscinas (KW/mes)	Energía FBanda (KW/mes)	Consumo Poliamida (kg/mes)	Gasto Mensual (Bs/mes)
200000,00	102.100,00	170,17	255,25	61,26	160,09	50,03	135.828,51	780,64	52,07	7.098.470,02
220000,00	112.310,00	187,18	280,78	67,39	176,10	55,03	149.411,36	858,70	57,28	7.808.317,02
240000,00	122.520,00	204,20	306,30	73,51	192,11	60,03	162.994,21	936,77	62,49	8.518.164,02
260000,00	132.730,00	221,22	331,83	79,64	208,12	65,04	176.577,06	1.014,83	67,69	9.228.011,02
280000,00	142.940,00	238,23	357,35	85,76	224,13	70,04	190.159,91	1.092,90	72,90	9.937.858,02
300000,00	153.150,00	255,25	382,88	91,89	240,14	75,04	203.742,76	1.170,96	78,11	10.647.705,03
320000,00	163.360,00	272,27	408,40	98,02	256,15	80,05	217.325,61	1.249,02	83,31	11.357.552,03
340000,00	173.570,00	289,28	433,93	104,14	272,16	85,05	230.908,46	1.327,09	88,52	12.067.399,03
360000,00	183.780,00	306,30	459,45	110,27	288,17	90,05	244.491,31	1.405,15	93,73	12.777.246,03
380000,00	193.990,00	323,32	484,98	116,39	304,18	95,06	258.074,17	1.483,22	98,94	13.487.093,03
400000,00	204.200,00	340,33	510,50	122,52	320,19	100,06	271.657,02	1.561,28	104,14	14.196.940,03
420000,00	214.410,00	357,35	536,03	128,65	336,19	105,06	285.239,87	1.639,34	109,35	14.906.787,04
440000,00	224.620,00	374,37	561,55	134,77	352,20	110,06	298.822,72	1.717,41	114,56	15.616.634,04
460000,00	234.830,00	391,38	587,08	140,90	368,21	115,07	312.405,57	1.795,47	119,76	16.326.481,04
480000,00	245.040,00	408,40	612,60	147,02	384,22	120,07	325.988,42	1.873,54	124,97	17.036.328,04
500000,00	255.250,00	425,42	638,13	153,15	400,23	125,07	339.571,27	1.951,60	130,18	17.746.175,04
520000,00	265.460,00	442,43	663,65	159,28	416,24	130,08	353.154,12	2.029,66	135,39	18.456.022,04
540000,00	275.670,00	459,45	689,18	165,40	432,25	135,08	366.736,97	2.107,73	140,59	19.165.869,05
560000,00	285.880,00	476,47	714,70	171,53	448,26	140,08	380.319,82	2.185,79	145,80	19.875.716,05
580000,00	296.090,00	493,48	740,23	177,65	464,27	145,08	393.902,67	2.263,86	151,01	20.585.563,05
600000,00	306.300,00	510,50	765,75	183,78	480,28	150,09	407.485,52	2.341,92	156,22	21.295.410,05
620000,00	316.510,00	527,52	791,28	189,91	496,29	155,09	421.068,37	2.419,98	161,42	22.005.257,05
640000,00	326.720,00	544,53	816,80	196,03	512,30	160,09	434.651,23	2.498,05	166,63	22.715.104,05
660000,00	336.930,00	561,55	842,33	202,16	528,31	165,10	448.234,08	2.576,11	171,84	23.424.951,06
680000,00	347.140,00	578,57	867,85	208,28	544,32	170,10	461.816,93	2.654,18	177,04	24.134.798,06
700000,00	357.350,00	595,58	893,38	214,41	560,32	175,10	475.399,78	2.732,24	182,25	24.844.645,06
720000,00	367.560,00	612,60	918,90	220,54	576,33	180,10	488.982,63	2.810,30	187,46	25.554.492,06

Índice de agua PTAR: (0,51) m³AguaResidual/Hlenvasado

Costo de la poliamida para deshidratar el lodo: (15.000) Bs/kg

Índice de consumo de la poliamida: (0,58) kg/h



TABLA C.26: DATOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN DE LA PTAR A DIFERENTES ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN EN FUNCIÓN A UN DESVÍO DE AGUA CRUDA A LA ETAPA DE AIREACIÓN DEL 30%

Producción (HI)	Afluente PAR (m³/mes)	Afluente PAR (m³/h)	DBO Afluente (kg/h)	DBO Reactores (kg/h)	Oxígeno requerido (kg/h)	Sólidos Generados (kg/h)	Energía Piscinas (KW/mes)	Energía FBanda (KW/mes)	Consumo Poliamida (kg/mes)	Gasto Mensual (Bs/mes)
200000,00	102.100,00	170,17	255,25	61,26	191,13	59,73	62.162,61	931,99	62,17	8.474.704,00
220000,00	112.310,00	187,18	280,78	67,39	210,24	65,70	178.378,87	1.025,19	68,38	9.322.174,40
240000,00	122.520,00	204,20	306,30	73,51	229,36	71,67	194.595,13	1.118,39	74,60	10.169.644,80
260000,00	132.730,00	221,22	331,83	79,64	248,47	77,65	210.811,39	1.211,59	80,82	11.017.115,20
280000,00	142.940,00	238,23	357,35	85,76	267,58	83,62	227.027,65	1.304,78	87,03	11.864.585,60
300000,00	153.150,00	255,25	382,88	91,89	286,70	89,59	243.243,91	1.397,98	93,25	12.712.056,00
320000,00	163.360,00	272,27	408,40	98,02	305,81	95,57	259.460,17	1.491,18	99,47	13.559.526,40
340000,00	173.570,00	289,28	433,93	104,14	324,92	101,54	275.676,43	1.584,38	105,68	14.406.996,80
360000,00	183.780,00	306,30	459,45	110,27	344,04	107,51	291.892,69	1.677,58	111,90	15.254.467,20
380000,00	193.990,00	323,32	484,98	116,39	363,15	113,48	308.108,95	1.770,78	118,12	16.101.937,60
400000,00	204.200,00	340,33	510,50	122,52	382,26	119,46	324.325,21	1.863,98	124,33	16.949.408,00
420000,00	214.410,00	357,35	536,03	128,65	401,38	125,43	340.541,47	1.957,18	130,55	17.796.878,40
440000,00	224.620,00	374,37	561,55	134,77	420,49	131,40	356.757,73	2.050,38	136,77	18.644.348,80
460000,00	234.830,00	391,38	587,08	140,90	439,60	137,38	372.973,99	2.143,57	142,98	19.491.819,20
480000,00	245.040,00	408,40	612,60	147,02	458,71	143,35	389.190,26	2.236,77	149,20	20.339.289,60
500000,00	255.250,00	425,42	638,13	153,15	477,83	149,32	405.406,52	2.329,97	155,42	21.186.760,00
520000,00	265.460,00	442,43	663,65	159,28	496,94	155,29	421.622,78	2.423,17	161,63	22.034.230,40
540000,00	275.670,00	459,45	689,18	165,40	516,05	161,27	437.839,04	2.516,37	167,85	22.881.700,80
560000,00	285.880,00	476,47	714,70	171,53	535,17	167,24	454.055,30	2.609,57	174,07	23.729.171,20
580000,00	296.090,00	493,48	740,23	177,65	554,28	173,21	470.271,56	2.702,77	180,28	24.576.641,60
600000,00	306.300,00	510,50	765,75	183,78	573,39	179,19	486.487,82	2.795,97	186,50	25.424.112,00
620000,00	316.510,00	527,52	791,28	189,91	592,51	185,16	502.704,08	2.889,17	192,72	26.271.582,40
640000,00	326.720,00	544,53	816,80	196,03	611,62	191,13	518.920,34	2.982,36	198,94	27.119.052,80
660000,00	336.930,00	561,55	842,33	202,16	630,73	197,10	535.136,60	3.075,56	205,15	27.966.523,20
680000,00	347.140,00	578,57	867,85	208,28	649,85	203,08	551.352,86	3.168,76	211,37	28.813.993,60
700000,00	357.350,00	595,58	893,38	214,41	668,96	209,05	567.569,12	3.261,96	217,59	29.661.464,00
720000,00	367.560,00	612,60	918,90	220,54	688,07	215,02	583.785,38	3.355,16	223,80	30.508.934,40

Índice de agua PTAR: (0,51) m³AguaResidual/Hlenvasado

Costo de la poliamida para deshidratar el lodo: (15.000) Bs/kg

Índice de consumo de la poliamida: (0,58) kg/h



TABLA C.27: DATOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN DE LA PTAR A DIFERENTES ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN EN FUNCIÓN A UN DESVÍO DE AGUA CRUDA A LA ETAPA DE AIREACIÓN DEL 40%

Producción (HI)	Afluyente PAR (m³/mes)	Afluyente PAR (m³/h)	DBO Afluyente (kg/h)	DBO Reactores (kg/h)	Oxígeno requerido (kg/h)	Sólidos Generados (kg/h)	Energía Piscinas (KW/mes)	Energía FBanda (KW/mes)	Consumo Poliamida (kg/mes)	Gasto Mensual (Bs/mes)
200000,00	102.100,00	170,17	255,25	61,26	222,17	69,43	188.496,70	1.083,34	72,26	9.850.937,98
220000,00	112.310,00	187,18	280,78	67,39	244,39	76,37	207.346,38	1.191,67	79,49	10.836.031,78
240000,00	122.520,00	204,20	306,30	73,51	266,60	83,31	226.196,05	1.300,01	86,72	11.821.125,58
260000,00	132.730,00	221,22	331,83	79,64	288,82	90,26	245.045,72	1.408,34	93,94	12.806.219,38
280000,00	142.940,00	238,23	357,35	85,76	311,04	97,20	263.895,39	1.516,67	101,17	13.791.313,18
300000,00	153.150,00	255,25	382,88	91,89	333,25	104,14	282.745,06	1.625,01	108,39	14.776.406,97
320000,00	163.360,00	272,27	408,40	98,02	355,47	111,08	301.594,73	1.733,34	115,62	15.761.500,77
340000,00	173.570,00	289,28	433,93	104,14	377,69	118,03	320.444,40	1.841,67	122,85	16.746.594,57
360000,00	183.780,00	306,30	459,45	110,27	399,91	124,97	339.294,07	1.950,01	130,07	17.731.688,37
380000,00	193.990,00	323,32	484,98	116,39	422,12	131,91	358.143,74	2.058,34	137,30	18.716.782,17
400000,00	204.200,00	340,33	510,50	122,52	444,34	138,86	376.993,41	2.166,68	144,53	19.701.875,97
420000,00	214.410,00	357,35	536,03	128,65	466,56	145,80	395.843,08	2.275,01	151,75	20.686.969,76
440000,00	224.620,00	374,37	561,55	134,77	488,77	152,74	414.692,75	2.383,34	158,98	21.672.063,56
460000,00	234.830,00	391,38	587,08	140,90	510,99	159,68	433.542,42	2.491,68	166,20	22.657.157,36
480000,00	245.040,00	408,40	612,60	147,02	533,21	166,63	452.392,09	2.600,01	173,43	23.642.251,16
500000,00	255.250,00	425,42	638,13	153,15	555,42	173,57	471.241,76	2.708,34	180,66	24.627.344,96
520000,00	265.460,00	442,43	663,65	159,28	577,64	180,51	490.091,43	2.816,68	187,88	25.612.438,75
540000,00	275.670,00	459,45	689,18	165,40	599,86	187,46	508.941,10	2.925,01	195,11	26.597.532,55
560000,00	285.880,00	476,47	714,70	171,53	622,07	194,40	527.790,77	3.033,35	202,34	27.582.626,35
580000,00	296.090,00	493,48	740,23	177,65	644,29	201,34	546.640,44	3.141,68	209,56	28.567.720,15
600000,00	306.300,00	510,50	765,75	183,78	666,51	208,28	565.490,11	3.250,01	216,79	29.552.813,95
620000,00	316.510,00	527,52	791,28	189,91	688,73	215,23	584.339,78	3.358,35	224,01	30.537.907,75
640000,00	326.720,00	544,53	816,80	196,03	710,94	222,17	603.189,46	3.466,68	231,24	31.523.001,54
660000,00	336.930,00	561,55	842,33	202,16	733,16	229,11	622.039,13	3.575,01	238,47	32.508.095,34
680000,00	347.140,00	578,57	867,85	208,28	755,38	236,06	640.888,80	3.683,35	245,69	33.493.189,14
700000,00	357.350,00	595,58	893,38	214,41	777,59	243,00	659.738,47	3.791,68	252,92	34.478.282,94
720000,00	367.560,00	612,60	918,90	220,54	799,81	249,94	678.588,14	3.900,02	260,15	35.463.376,74

Índice de agua PTAR: (0,51) m³AguaResidual/Hlenvasado

Costo de la poliamida para deshidratar el lodo: (15.000) Bs/kg

Índice de consumo de la poliamida: (0,58) kg/h



TABLA C.28: DATOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN DE LA PTAR A DIFERENTES ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN EN FUNCIÓN A UN DESVÍO DE AGUA CRUDA A LA ETAPA DE AIREACIÓN DEL 50%

Producción (HI)	Afluyente PAR (m³/mes)	Afluyente PAR (m³/h)	DBO Afluyente (kg/h)	DBO Reactores (kg/h)	Oxígeno requerido (kg/h)	Sólidos Generados (kg/h)	Energía Piscinas (KW/mes)	Energía FBanda (KW/mes)	Consumo Poliamida (kg/mes)	Gasto Mensual (Bs/mes)
200000,00	102.100,00	170,17	255,25	61,26	253,21	79,13	214.830,80	1.234,69	82,36	11.227.171,97
220000,00	112.310,00	187,18	280,78	67,39	278,53	87,04	236.313,88	1.358,15	90,59	12.349.889,16
240000,00	122.520,00	204,20	306,30	73,51	303,85	94,95	257.796,96	1.481,62	98,83	13.472.606,36
260000,00	132.730,00	221,22	331,83	79,64	329,17	102,87	279.280,04	1.605,09	107,07	14.595.323,56
280000,00	142.940,00	238,23	357,35	85,76	354,49	110,78	300.763,12	1.728,56	115,30	15.718.040,75
300000,00	153.150,00	255,25	382,88	91,89	379,81	118,69	322.246,20	1.852,03	123,54	16.840.757,95
320000,00	163.360,00	272,27	408,40	98,02	405,13	126,60	343.729,29	1.975,50	131,77	17.963.475,14
340000,00	173.570,00	289,28	433,93	104,14	430,45	134,52	365.212,37	2.098,97	140,01	19.086.192,34
360000,00	183.780,00	306,30	459,45	110,27	455,77	142,43	386.695,45	2.222,44	148,24	20.208.909,54
380000,00	193.990,00	323,32	484,98	116,39	481,10	150,34	408.178,53	2.345,90	156,48	21.331.626,73
400000,00	204.200,00	340,33	510,50	122,52	506,42	158,26	429.661,61	2.469,37	164,72	22.454.343,93
420000,00	214.410,00	357,35	536,03	128,65	531,74	166,17	451.144,69	2.592,84	172,95	23.577.061,13
440000,00	224.620,00	374,37	561,55	134,77	557,06	174,08	472.627,77	2.716,31	181,19	24.699.778,32
460000,00	234.830,00	391,38	587,08	140,90	582,38	181,99	494.110,85	2.839,78	189,42	25.822.495,52
480000,00	245.040,00	408,40	612,60	147,02	607,70	189,91	515.593,93	2.963,25	197,66	26.945.212,72
500000,00	255.250,00	425,42	638,13	153,15	633,02	197,82	537.077,01	3.086,72	205,90	28.067.929,91
520000,00	265.460,00	442,43	663,65	159,28	658,34	205,73	558.560,09	3.210,18	214,13	29.190.647,11
540000,00	275.670,00	459,45	689,18	165,40	683,66	213,64	580.043,17	3.333,65	222,37	30.313.364,31
560000,00	285.880,00	476,47	714,70	171,53	708,98	221,56	601.526,25	3.457,12	230,60	31.436.081,50
580000,00	296.090,00	493,48	740,23	177,65	734,30	229,47	623.009,33	3.580,59	238,84	32.558.798,70
600000,00	306.300,00	510,50	765,75	183,78	759,62	237,38	644.492,41	3.704,06	247,07	33.681.515,90
620000,00	316.510,00	527,52	791,28	189,91	784,94	245,30	665.975,49	3.827,53	255,31	34.804.233,09
640000,00	326.720,00	544,53	816,80	196,03	810,27	253,21	687.458,57	3.951,00	263,55	35.926.950,29
660000,00	336.930,00	561,55	842,33	202,16	835,59	261,12	708.941,65	4.074,46	271,78	37.049.667,49
680000,00	347.140,00	578,57	867,85	208,28	860,91	269,03	730.424,73	4.197,93	280,02	38.172.384,68
700000,00	357.350,00	595,58	893,38	214,41	886,23	276,95	751.907,81	4.321,40	288,25	39.295.101,88
720000,00	367.560,00	612,60	918,90	220,54	911,55	284,86	773.390,89	4.444,87	296,49	40.417.819,08

Índice de agua PTAR: (0,51) m³AguaResidual/Hlenvasado

Costo de la poliamida para deshidratar el lodo: (15.000) Bs/kg

Índice de consumo de la poliamida: (0,58) kg/h



TABLA C.29: DATOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN DE LA PTAR A DIFERENTES ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN EN FUNCIÓN A DIFERENTES DOSIS DE CLORURO FÉRRICO EN EL EFLUENTE PLANTA

Producción (HI)	Afluyente PAR (m³/mes)	Afluyente PAR (m³/h)	DBO Afluyente (kg/h)	DBO Reactores (kg/h)	100 ppm FeCl ₃		150 ppm FeCl ₃	
					Consumo (kg/mes)	Gasto (Bs/mes)	Consumo (kg/mes)	Gasto (Bs/mes)
200000,00	102.100,00	170,17	255,25	61,26	10.210,00	3.756.845,17	5.315,00	5.620.170,17
220000,00	112.310,00	187,18	280,78	67,39	11.231,00	4.132.529,69	6.846,50	6.182.187,19
240000,00	122.520,00	204,20	306,30	73,51	12.252,00	4.508.214,21	18.378,00	6.744.204,21
260000,00	132.730,00	221,22	331,83	79,64	13.273,00	4.883.898,72	19.909,50	7.306.221,22
280000,00	142.940,00	238,23	357,35	85,76	14.294,00	5.259.583,24	21.441,00	7.868.238,24
300000,00	153.150,00	255,25	382,88	91,89	15.315,00	5.635.267,76	22.972,50	8.430.255,26
320000,00	163.360,00	272,27	408,40	98,02	16.336,00	6.010.952,27	24.504,00	8.992.272,27
340000,00	173.570,00	289,28	433,93	104,14	17.357,00	6.386.636,79	26.035,50	9.554.289,29
360000,00	183.780,00	306,30	459,45	110,27	18.378,00	6.762.321,31	27.567,00	10.116.306,31
380000,00	193.990,00	323,32	484,98	116,39	19.399,00	7.138.005,83	29.098,50	10.678.323,33
400000,00	204.200,00	340,33	510,50	122,52	20.420,00	7.513.690,34	30.630,00	11.240.340,34
420000,00	214.410,00	357,35	536,03	128,65	21.441,00	7.889.374,86	32.161,50	11.802.357,36
440000,00	224.620,00	374,37	561,55	134,77	22.462,00	8.265.059,38	33.693,00	12.364.374,38
460000,00	234.830,00	391,38	587,08	140,90	23.483,00	8.640.743,89	35.224,50	12.926.391,39
480000,00	245.040,00	408,40	612,60	147,02	24.504,00	9.016.428,41	36.756,00	13.488.408,41
500000,00	255.250,00	425,42	638,13	153,15	25.525,00	9.392.112,93	38.287,50	14.050.425,43
520000,00	265.460,00	442,43	663,65	159,28	26.546,00	9.767.797,45	39.819,00	14.612.442,45
540000,00	275.670,00	459,45	689,18	165,40	27.567,00	10.143.481,96	41.350,50	15.174.459,46
560000,00	285.880,00	476,47	714,70	171,53	28.588,00	10.519.166,48	42.882,00	15.736.476,48
580000,00	296.090,00	493,48	740,23	177,65	29.609,00	10.894.851,00	44.413,50	16.298.493,50
600000,00	306.300,00	510,50	765,75	183,78	30.630,00	11.270.535,51	45.945,00	16.860.510,51
620000,00	316.510,00	527,52	791,28	189,91	31.651,00	11.646.220,03	47.476,50	17.422.527,53
640000,00	326.720,00	544,53	816,80	196,03	32.672,00	12.021.904,55	49.008,00	17.984.544,55
660000,00	336.930,00	561,55	842,33	202,16	33.693,00	12.397.589,07	50.539,50	18.546.561,57
680000,00	347.140,00	578,57	867,85	208,28	34.714,00	12.773.273,58	52.071,00	19.108.578,58
700000,00	357.350,00	595,58	893,38	214,41	35.735,00	13.148.958,10	53.602,50	19.670.595,60
720000,00	367.560,00	612,60	918,90	220,54	36.756,00	13.524.642,62	55.134,00	20.232.612,62

Índice de agua PTAR: (0,51) m³AguaResidual/Hlenvasado

Costo de la poliamida para deshidratar el lodo: (15.000) Bs/kg

Costo de cloruro férrico (365,00) Bs/kg



TABLA C.30: DATOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN DE LA PTAR A DIFERENTES ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN EN FUNCIÓN A DIFERENTES DOSIS DE CLORURO FÉRRICO EN EL EFLUENTE PLANTA

Producción (HI)	Afluyente PAR (m³/mes)	Afluyente PAR (m³/h)	DBO Afluyente (kg/h)	DBO Reactores (kg/h)	200 ppm FeCl ₃		250 ppm FeCl ₃	
					Consumo (kg/mes)	Gasto (Bs/mes)	Consumo (kg/mes)	Gasto (Bs/mes)
200000,00	102.100,00	170,17	255,25	61,26	20.420,00	7.483.495,17	25.525,00	9.346.820,17
220000,00	112.310,00	187,18	280,78	67,39	22.462,00	8.231.844,69	28.077,50	10.281.502,19
240000,00	122.520,00	204,20	306,30	73,51	24.504,00	8.980.194,21	30.630,00	11.216.184,21
260000,00	132.730,00	221,22	331,83	79,64	26.546,00	9.728.543,72	33.182,50	12.150.866,22
280000,00	142.940,00	238,23	357,35	85,76	28.588,00	10.476.893,24	35.735,00	13.085.548,24
300000,00	153.150,00	255,25	382,88	91,89	30.630,00	11.225.242,76	38.287,50	14.020.230,26
320000,00	163.360,00	272,27	408,40	98,02	32.672,00	11.973.592,27	40.840,00	14.954.912,27
340000,00	173.570,00	289,28	433,93	104,14	34.714,00	12.721.941,79	43.392,50	15.889.594,29
360000,00	183.780,00	306,30	459,45	110,27	36.756,00	13.470.291,31	45.945,00	16.824.276,31
380000,00	193.990,00	323,32	484,98	116,39	38.798,00	14.218.640,83	48.497,50	17.758.958,33
400000,00	204.200,00	340,33	510,50	122,52	40.840,00	14.966.990,34	51.050,00	18.693.640,34
420000,00	214.410,00	357,35	536,03	128,65	42.882,00	15.715.339,86	53.602,50	19.628.322,36
440000,00	224.620,00	374,37	561,55	134,77	44.924,00	16.463.689,38	56.155,00	20.563.004,38
460000,00	234.830,00	391,38	587,08	140,90	46.966,00	17.212.038,89	58.707,50	21.497.686,39
480000,00	245.040,00	408,40	612,60	147,02	49.008,00	17.960.388,41	61.260,00	22.432.368,41
500000,00	255.250,00	425,42	638,13	153,15	51.050,00	18.708.737,93	63.812,50	23.367.050,43
520000,00	265.460,00	442,43	663,65	159,28	53.092,00	19.457.087,45	66.365,00	24.301.732,45
540000,00	275.670,00	459,45	689,18	165,40	55.134,00	20.205.436,96	68.917,50	25.236.414,46
560000,00	285.880,00	476,47	714,70	171,53	57.176,00	20.953.786,48	71.470,00	26.171.096,48
580000,00	296.090,00	493,48	740,23	177,65	59.218,00	21.702.136,00	74.022,50	27.105.778,50
600000,00	306.300,00	510,50	765,75	183,78	61.260,00	22.450.485,51	76.575,00	28.040.460,51
620000,00	316.510,00	527,52	791,28	189,91	63.302,00	23.198.835,03	79.127,50	28.975.142,53
640000,00	326.720,00	544,53	816,80	196,03	65.344,00	23.947.184,55	81.680,00	29.909.824,55
660000,00	336.930,00	561,55	842,33	202,16	67.386,00	24.695.534,07	84.232,50	30.844.506,57
680000,00	347.140,00	578,57	867,85	208,28	69.428,00	25.443.883,58	86.785,00	31.779.188,58
700000,00	357.350,00	595,58	893,38	214,41	71.470,00	26.192.233,10	89.337,50	32.713.870,60
720000,00	367.560,00	612,60	918,90	220,54	73.512,00	26.940.582,62	91.890,00	33.648.552,62

Índice de agua PTAR: (0,51) m³AguaResidual/Hlenvasado

Costo de la poliamida para deshidratar el lodo: (15.000) Bs/kg

Costo de cloruro férrico (365,00) Bs/kg



TABLA C.31: DATOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN DE LA PTAR A DIFERENTES ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN EN FUNCIÓN A DIFERENTES DOSIS DE CLORURO FÉRRICO EN EL EFLUENTE PLANTA

Producción (HI)	Afluente PAR (m³/mes)	Afluente PAR (m³/h)	DBO Afluente (kg/h)	DBO Reactores (kg/h)	300 ppm FeCl ₃		PARA TODAS LAS DOSIS DE FeCl ₃	
					Consumo (kg/mes)	Gasto (Bs/mes)	FePO ₄ Gener. (kg/h)	Gasto (Bs/mes)
200000,00	102.100,00	170,17	255,25	61,26	30.630,00	11.210.145,17	17,02	30.195,17
220000,00	112.310,00	187,18	280,78	67,39	33.693,00	12.331.159,69	18,72	33.214,69
240000,00	122.520,00	204,20	306,30	73,51	36.756,00	13.452.174,21	20,42	36.234,21
260000,00	132.730,00	221,22	331,83	79,64	39.819,00	14.573.188,72	22,12	39.253,72
280000,00	142.940,00	238,23	357,35	85,76	42.882,00	15.694.203,24	23,82	42.273,24
300000,00	153.150,00	255,25	382,88	91,89	45.945,00	16.815.217,76	25,53	45.292,76
320000,00	163.360,00	272,27	408,40	98,02	49.008,00	17.936.232,27	27,23	48.312,27
340000,00	173.570,00	289,28	433,93	104,14	52.071,00	19.057.246,79	28,93	51.331,79
360000,00	183.780,00	306,30	459,45	110,27	55.134,00	20.178.261,31	30,63	54.351,31
380000,00	193.990,00	323,32	484,98	116,39	58.197,00	21.299.275,83	32,33	57.370,83
400000,00	204.200,00	340,33	510,50	122,52	61.260,00	22.420.290,34	34,03	60.390,34
420000,00	214.410,00	357,35	536,03	128,65	64.323,00	23.541.304,86	35,74	63.409,86
440000,00	224.620,00	374,37	561,55	134,77	67.386,00	24.662.319,38	37,44	66.429,38
460000,00	234.830,00	391,38	587,08	140,90	70.449,00	25.783.333,89	39,14	69.448,89
480000,00	245.040,00	408,40	612,60	147,02	73.512,00	26.904.348,41	40,84	72.468,41
500000,00	255.250,00	425,42	638,13	153,15	76.575,00	28.025.362,93	42,54	75.487,93
520000,00	265.460,00	442,43	663,65	159,28	79.638,00	29.146.377,45	44,24	78.507,45
540000,00	275.670,00	459,45	689,18	165,40	82.701,00	30.267.391,96	45,95	81.526,96
560000,00	285.880,00	476,47	714,70	171,53	85.764,00	31.388.406,48	47,65	84.546,48
580000,00	296.090,00	493,48	740,23	177,65	88.827,00	32.509.421,00	49,35	87.566,00
600000,00	306.300,00	510,50	765,75	183,78	91.890,00	33.630.435,51	51,05	90.585,51
620000,00	316.510,00	527,52	791,28	189,91	94.953,00	34.751.450,03	52,75	93.605,03
640000,00	326.720,00	544,53	816,80	196,03	98.016,00	35.872.464,55	54,45	96.624,55
660000,00	336.930,00	561,55	842,33	202,16	101.079,00	36.993.479,07	56,16	99.644,07
680000,00	347.140,00	578,57	867,85	208,28	104.142,00	38.114.493,58	57,86	102.663,58
700000,00	357.350,00	595,58	893,38	214,41	107.205,00	39.235.508,10	59,56	105.683,10
720000,00	367.560,00	612,60	918,90	220,54	110.268,00	40.356.522,62	61,26	108.702,62

Índice de agua PTAR: (0,51) m³AguaResidual/Hlenvasado

Costo de la poliamida para deshidratar el lodo: (15.000) Bs/kg

Costo de cloruro férrico (365,00) Bs/kg



METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

MÉTODO OPERATORIO DE CLORURO ESTAGNOSO UTILIZADO ACTUALMENTE PARA EL ANÁLISIS DE FÓSFORO POR HIDRÓLISIS ÁCIDA EN AGUAS

(Fuente: Laboratorio Central de la Cervecería Polar, C.A. Planta San Joaquín)

Nota: Nunca utilice detergentes para la vidriería y procure utilizar siempre el mismo equipo para cada procedimiento.

1. Tomar fioles de 125 mL previamente curados con HCl tibio, agua fresca y agua destilada en ese orden. Identificando cada una.
2. Tomar 50 mL de la muestra con una pipeta previamente enjuagada y curada y se coloca en su respectiva fiola para muestras con una concentración de fósforo esperada ≤ 4 ppm.
3. Tomar 10 mL de la muestra con una pipeta previamente enjuagada y curada y se coloca en su respectiva fiola para muestras con una concentración de fósforo esperada ≥ 4 ppm.
4. Filtrar con filtro de membrana de $0,45 \mu\text{m}$ y continuar con el paso 14 para medir fósforo reactivo disuelto.
5. Filtrar con filtro de membrana de $0,45 \mu\text{m}$ para medir fósforo disuelto hidrolizable.
6. Completar con agua destilada la diferencia de 100 mL para cada muestra.
7. Agregar 100 mL de agua destilada a la fiola blank.
8. Tomar tres perlas de ebullición y colocarlas a cada fiola.
9. Encender la plancha y colocar el termostato en un poco mas de $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ó HI.
10. Agregar a cada fiola 0,5 g (aprox. una cucharadita) de peroxidisulfato de potasio $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$.
11. Agregar a cada fiola 5 mL de H_2SO_4 1 N.
12. Agitar manualmente y colocarlas en la plancha con la campana extractora y la luz encendida hasta que se evapore el 50% (aprox. 50 mL).
13. Deja reposar dentro de la campana extractora hasta alcanzar temperatura ambiente aproximadamente.



14. Agregar 2 gotas de fenolftaleína a cada fiola.
15. Titular con NaOH 6 N hasta obtener un rosa intenso para neutralizar.
16. Agregar gota a gota H_2SO_4 1 N para acidificar hasta el punto de viraje.
17. Filtrar las muestras que contengan sólidos de manera coloidal o en suspensión o muestras turbias con filtro de membrana de 0,45 μm para medir fósforo total, lavar con abundante agua destilada el filtro.
18. Tomar balones aforados de 100 mL previamente curados con HCl tibio, agua fresca y agua destilada en ese orden. Identificando cada uno.
19. Transferir el contenido de cada fiola con su respectivo balón arrastrando los equivalentes que queden en la fiola con agua destilada sin sobrepasar el aforo, luego aforar con agua destilada.
20. Agregar 4 mL de molibdato de amonio 2,5 g/L a cada balón, esto se realiza colocando el dispensador graduado en 4 mL, recuerda tapar los balones.
21. Agitar de manera invertida los balones y espera 2 min exactos.
22. Luego de cumplirse el paso 21, agrego 0,5 mL de cloruro estagnoso a cada balón y se debe verificar que el blank no cambie a color azul.
23. Esperar 10 min para generar el color azul.
24. En el espectrofotómetro Agilent 8453, abrir el archivo FOSFORO5.
25. En la ventana de información oprimir DISCARD para mantener los patrones preestablecidos.
26. Tomar la celda de vidrio y no la de cuarzo, curar con el blank para luego llenar a $\frac{3}{4}$ y seco la celda externamente para luego introducirla con la parte traslucida para que atravesase el haz de luz.
27. Oprimir el botón blank y verifico el gráfico.
28. Repetir el paso 26 para cada muestra enjuagando y curando la celda.
29. Oprimir el botón sample y anotar la concentración.
30. Multiplicar cada concentración obtenida por su respectivo factor de alícuota para obtener la concentración de fósforo presente en la muestra.



MÉTODO OPERATORIO DE CLORURO ESTAGNOSO PROPUESTO PARA EL ANÁLISIS DE FÓSFORO POR DIGESTIÓN ÁCIDA EN AGUAS

(Fuente: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1998)

Nota: Nunca utilice detergentes para la vidriería y procure utilizar siempre el mismo equipo para cada procedimiento.

Precaución!: Las mezclas calentadas de HClO_4 y materia orgánica pueden explotar violentamente. Evitar ese riesgo tomando las precauciones siguientes:

- * No añadir HClO_4 a una solución caliente que pueda contener materia orgánica.
- * Iniciar siempre la digestión de las muestras que contengan materia orgánica con HNO_3 ; completar la digestión usando la mezcla de HNO_3 y HClO_4 .
- * No producir humos con HClO_4 en campanas de extracción.
- * No permitir nunca que las muestras digeridas con HClO_4 se evaporen a sequedad.

1. Tomar fioles de 125 mL previamente curados con HCl tibio, agua fresca y agua destilada en ese orden. Identificando cada una.
2. Tomar 50 mL de la muestra con una pipeta previamente enjuagada y curada y se coloca en su respectiva fiola para muestras con una concentración de fósforo esperada ≤ 4 ppm.
3. Tomar 10 mL de la muestra con una pipeta previamente enjuagada y curada y se coloca en su respectiva fiola para muestras con una concentración de fósforo esperada ≥ 4 ppm.
4. Filtrar con filtro de membrana de $0,45 \mu\text{m}$ y continuar con el paso 14 para medir fósforo reactivo disuelto.
5. Filtrar con filtro de membrana de $0,45 \mu\text{m}$ para medir fósforo disuelto digestible.
6. NO se adiciona agua para diluir ninguna muestra.
7. Agregar 100 mL de agua destilada a la fiola blank.
8. Tomar tres perlas de ebullición y colocarlas a cada fiola.
9. Encender la plancha y colocar el termostato en un poco mas de 100°C ó HI.
10. Agregar a cada fiola 5 mL de HNO_3 conc. y 5 mL de HClO_4 conc. de manera conjugada y enfriando entre cada adición de ácido.
11. Agitar manualmente y colocarlas en la plancha con la campana extractora y la luz encendida, evaporando casi a sequedad, se comenzará a observar de manera



- violenta, humos de color blanco intenso, tapar con vidrio de reloj para aclarar la muestra.
12. Si la solución no es totalmente incolora y traslúcida agregar 2 mL de HNO₃ conc. para ayudar la oxidación.
 13. Deja reposar dentro de la campana extractora hasta alcanzar temperatura ambiente aproximadamente.
 14. Agregar 2 gotas de fenolftaleína a cada fiola, las muestras a excepción del blank y fósforo reactivo deberían virar a naranja de metilo, esto indica que se evaporó de manera correcta la muestra (a sequedad), como indica el método.
 15. Agregar gota a gota agua destilada hasta observar el cambio de naranja a incoloro.
 16. Titular con NaOH 6 N hasta obtener un rosa intenso para neutralizar.
 17. Agregar gota a gota HNO₃ 1 N para acidificar hasta el punto de viraje.
 18. Tomar balones aforados de 100 mL previamente curados con HCl tibio, agua fresca y agua destilada en ese orden. Identificando cada uno.
 19. Transferir el contenido de cada fiola con su respectivo balón arrastrando los equivalentes que queden en la fiola con agua destilada sin sobrepasar el aforo, luego aforar con agua destilada.
 20. Agregar 4 mL de molibdato de amonio 2,5 g/L a cada balón, esto se realiza colocando el dispensador graduado en 4 mL, recuerda tapar los balones.
 21. Agitar de manera invertida los balones y espera 2 min exactos.
 22. Luego de cumplirse el paso 21, agrego 0,5 mL de cloruro estagnoso a cada balón y se debe verificar que el blank no cambie a color azul.
 23. Esperar 10 min para generar el color azul.
 24. En el espectrofotómetro Agilent 8453, abrir el archivo FOSFORO5.
 25. En la ventana de información oprimir DISCARD para mantener los patrones preestablecidos.
 26. Tomar la celda de vidrio y no la de cuarzo, curar con el blank para luego llenar a $\frac{3}{4}$ y seco la celda externamente para luego introducirla con la parte traslúcida para que atraviese el haz de luz.
 27. Oprimir el botón blank y verifico el gráfico.



28. Repetir el paso 26 para cada muestra enjuagando y curando la celda.
29. Oprimir el botón sample y anotar la concentración.
30. Multiplicar cada concentración obtenida por su respectivo factor de alícuota para obtener la concentración de fósforo presente en la muestra.

MÉTODO OPERATORIO PARA LA REALIZACIÓN DE PRUEBAS DE JARRAS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

(Fuente: Guía Operacional de Tratamiento de Aguas, 1999)

1. Para la utilización de cloruro férrico líquido al 27% como coagulante, preparar una solución madre al 5%.
 - 1.1. Tomar 5 mL de solución coagulante concentrada con una pipeta.
 - 1.2. Añadir a un balón aforado de 100mL.
 - 1.3. Aforar el balón con agua destilada y mezclar bien.
2. Para la utilización de policloruro de aluminio líquido al 50% como coagulante, preparar una solución madre al 1%.
 - 2.1. Tomar 1 mL de solución coagulante concentrada con una pipeta.
 - 2.2. Añadir a un balón aforado de 100mL.
 - 2.3. Aforar el balón con agua destilada y mezclar bien.
3. Para la utilización de sulfato de aluminio líquido al 38 % como coagulante, preparar una solución madre al 5%.
 - 3.1. Tomar 5 mL de solución coagulante concentrada con una pipeta.
 - 3.2. Añadir a un balón aforado de 100mL.
 - 3.3. Aforar el balón con agua destilada y mezclar bien.
4. Para la utilización de hidróxido de calcio líquido al 10% como coagulante o floculante, preparar una solución madre al 5%.
 - 4.1. Tomar 5 mL de solución coagulante concentrada con una pipeta.
 - 4.2. Añadir a un balón aforado de 100mL.
 - 4.3. Aforar el balón con agua destilada y mezclar bien.
5. Tomar en una jarra previamente curada 1000mL de muestra.



6. Ajustar el agitador del equipo tratando de simular la agitación en el punto de dosificación del químico en planta o en su defecto ajustar a 100 rpm.
7. Añadir la dosis deseada de químico según sea el caso.
8. Una vez cumplido el paso 7 medir inmediatamente el tiempo de formación de los FLOCS ó en su defecto agitar por un minuto a mezcla rápida (100 rpm).
9. Una vez cumplido el paso 8; en caso de que se vaya a realizar la dosificación de un floculante, disminuir la agitación a 50 rpm y mezclar por 3 minutos.
10. Detener la agitación y tomar el tiempo de sedimentación de los sólidos suspendidos en intervalos de 10 minutos.
11. Luego de cumplirse el paso 10 se extrae de cada una de las jarras una alícuota de sobrenadante clarificado.
12. Ejecutar la metodología experimental para medir fósforo.
13. Anotar observaciones.

