



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN
PARA EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
UNIDAD DURANGO
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN GESTIÓN AMBIENTAL

USO DE HUMEDALES COMO ALTERNATIVA EN EL
TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE LA INDUSTRIA
LÁCTEA

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
MAESTRO EN GESTIÓN AMBIENTAL

Presenta:

Mayra Edith Burciaga Siqueiros

Dirigida por:

M. en C. María Elena Pérez López



Durango, Dgo., 5 de Diciembre 2008



COMITÉ TUTORIAL

Director: M. en C. María Elena Pérez López

Asesor: M. en C. María Guadalupe Vicencio de la Rosa

Asesor: Dra. M. Socorro González Elizondo

Asesor externo: Dra. María Adriana Martínez Prado

REVISORES

Dra. M. Socorro González Elizondo

Dra. María Adriana Martínez Prado

M. en C. María Elena Pérez López

Dr. Joaquín Pinto Espinoza

M. en C. María Guadalupe Vicencio de la Rosa

Dr. Ignacio Villanueva Fierro



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

*ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS
Y DESIGNACIÓN DE DIRECTOR DE TESIS*

México, D.F. a 30 de noviembre del 2008

El Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIIDIR-IPN en su sesión Unidad Durango ordinaria No. 11 celebrada el día 4 del mes de noviembre conoció la solicitud presentada por el(la) alumno(a):

BURCIAGA

SIQUEIROS

MAYRA EDITH

Apellido paterno

Apellido materno

Nombre (s)

Con registro:

B	0	6	0	9	9	3
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante de: MAESTRIA EN CIENCIAS EN GESTION AMBIENTAL

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:
Uso de humedales como alternativa de tratamiento de efluentes de la industria láctea

De manera general el tema abarcará los siguientes aspectos:
Caracterización del efluente; determinar el uso que se le va a dar al agua tratada y con ello seleccionar
Los componentes del humedal (especies de plantas acuáticas, soporte e hidráulica del sistema)

2.- Se designa como Director de Tesis al C. Profesor:
M. en C. Maria Elena Pérez López

3.- El trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesis será elaborado por el alumno en:
Laboratorio de la Academia Ambiental del CIIDIR-IPN Unidad Durango
que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente hasta la aceptación de la tesis por la Comisión Revisora correspondiente:

El Director de Tesis

M. en C. Maria Elena Pérez López

El Aspirante

Mayra Edith Burciaga Siqueiros

El Presidente del Colegio

Dr. José B. Proal Najera

GRUPO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACION PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.I.D.I.R.
UNIDAD DURANGO



*INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO*

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Durango, Dgo el día 3 del mes Diciembre del año 2008, el (la) que suscribe Mayra Edith Burciaga Siqueiros alumno (a) del Programa de Maestría en Ciencias en Gestión Ambiental con número de registro B060993, adscrito a CIIDIR-IPN Unidad Durango, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de M. en C. María Elena Pérez López y cede los derechos del trabajo intitulado Uso de humedales como alternativa de tratamiento de efluentes de la industria láctea, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección mayra_edith21@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Mayra Edith Burciaga Siqueiros
Nombre y firma



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Durango, Dgo. siendo las 12:00 horas del día 2 del mes de Diciembre del 2008 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIIDIR-IPN Unidad Durango

para examinar la tesis titulada:

Uso de humedales como alternativa de tratamiento de efluentes de la industria láctea

Presentada por el alumno:

BURCIAGA

Apellido paterno

SIQUEIROS

Apellido materno

MAYRA EDITH

Nombre(s)

Con registro:

B	0	6	0	9	9	3
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN GESTIÓN AMBIENTAL

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director de tesis

M. en C. Maria Elena Pérez López

M. en C. Maria Guadalupe Vicencio de la Rosa

Dra. Socorro González Elizondo

Dra. Ma. Adriana Martínez Prado

Dr. Joaquín Pinto Espinoza

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

Dr. José B. Prada Najera



El presente trabajo fue desarrollado en el Laboratorio de Ciencias Ambientales del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Durango del Instituto Politécnico Nacional, como parte del proyecto “PLAN DE MANEJO DE RESIDUOS EN LAS QUESERÍAS MENONITAS DE NUEVO IDEAL, DURANGO, CON LA APLICACIÓN DEL CONCEPTO DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA” con clave FOMIX DGO-2007-C01-67972 a cargo de la M. en C. María Elena Pérez López.

El prototipo a nivel planta piloto se instaló en la Planta Campo Hermoso de la Sociedad Cooperativa de Producción “Quesería Holanda”, en el municipio de Nuevo Ideal, Dgo.



DEDICATORIA

A DIOS

A MI ESPOSO (ODÍN)

A MIS PADRES (ANA MARÍA Y HUGO)

A MI HERMANA (YURIDIA)

Y A TODA MI FAMILIA Y AMIGOS



AGRADECIMIENTOS

Al CIIDIR-IPN Unidad Durango por las facilidades prestadas para la realización de este trabajo.

A la Academia de Ciencias Ambientales por el material, reactivos y asesoría otorgados.

A la Sociedad Cooperativa de Producción “Quesería Holanda”, en el municipio de Nuevo Ideal, Dgo., por ayudarnos con el financiamiento del prototipo y facilitarnos el espacio para la instalación del mismo.

A la M en C. María Elena Pérez López y la Dra. María Adriana Martínez Prado por su amistad, conocimientos, ayuda y apoyo.

Al Dr. Joaquín Pinto Espinoza, ya que sin su ayuda la instalación del prototipo se hubiera llevado más tiempo.

A Lupita, Liz, Juan Manuel, Nacho y Sarahi por las aportaciones, colaboraciones al trabajo y por su apoyo.

A mis amigos y compañeros de generación, Aby, Noelia, Karina, Dora, Luly, Alfonso, Daniel, Oscar, Adan y Moni, por hacer esta etapa de mi vida agradable; así como a los maestros que amablemente compartieron sus experiencias y conocimientos.

A todos aquellos que de manera directa e indirecta participaron y ayudaron para que este trabajo de investigación haya llegado a feliz término.

A TODOS GRACIAS



ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xviii
RESUMEN	xxii
ABSTRACT	xxiii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II. ANTECEDENTES	3
II.1. Generalidades de los humedales	4
II.2. Componentes	7
a) Plantas	7
b) Microorganismos	8
c) Soporte	9
II.3. Generalidades de la Empresa	10
CAPÍTULO III. JUSTIFICACIÓN	12
CAPÍTULO IV. OBJETIVOS	14
IV.1. General	14
IV.2. Específicos	14
CAPÍTULO V. MATERIALES Y MÉTODOS	15
V.1. Área de estudio	15
V.2. Métodos analíticos empleados	15
V.3. Afluente	16
V.3.1. Introducción	16
V.3.2. Composición y características	17



V.4. Estructuración del humedal	18
V.4.1 Selección de la especie	18
V.4.2. Evaluación del soporte	19
V.4.3. Evaluación del prototipo de humedal	25
V.3.4.1. Diseño del equipo experimental	25
V.3.4.2. Diseño de las unidades experimentales	26
V.3.4.3. Conformación del sistema	26
V.3.4.4. Determinación del flujo	28
V.3.4.5. Hidráulica	29
V.5. Análisis de la información	31
CAPÍTULO VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
a) Selección de la especie	39
b) Evaluación del soporte	41
c) Evaluación del prototipo	44
CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES	48
a) Selección de la especie	48
b) Evaluación del soporte	48
c) Evaluación del prototipo	48
CAPÍTULO VIII. RECOMENDACIONES	51
CAPÍTULO IX. BIBLIOGRAFÍA	52
CAPÍTULO X. ANEXOS	54
X.1. ANEXO 1. Datos obtenidos durante el desarrollo del ensayo de susceptibilidad	55
X.2. ANEXO 2. Datos obtenidos en el desarrollo de la primera fase del experimento con los soportes.	57



X.2.1. GRAVA DE NUEVO IDEAL	57
X.2.1.1. Ecuaciones de Langmuir	59
X.2.2. GRAVA DE DURANGO	68
X.2.2.1. Ecuaciones de Langmuir	70
X.2.3. ZEOLITA	79
X.2.3.1. Ecuaciones de Langmuir	81
X.3. ANEXO 3. Datos de la segunda fase del experimento con los soportes	90



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla V.1.	Características del afluente.	17
Tabla V.2.	Descripción de los tratamientos empleados para seleccionar la planta acuática.	19
Tabla V.3.	Descripción de los tratamientos contemplados para evaluar los soportes.	24
Tabla V.4.	Descripción de los tratamientos de la segunda fase de evaluación del soporte.	25
Tabla VI.5.	Sobrevivencia de las plantas.	40
Tabla VI.6.	Prueba de medias Newman Keuls para la variable pH a un $\alpha=0.05$.	40
Tabla VI.7.	Prueba de medias Newman Keuls para la variable CE (mS cm^{-1}), a un $\alpha=0.05$.	41
Tabla VI.8.	Granulometría de los tres tipos de soportes (% en peso).	41
Tabla VI.9.	Porosidad y densidad de los tres tipos de soporte.	42
Tabla VI.10.	Constantes determinadas de las ecuaciones de Langmuir.	42
Tabla VI.11.	Prueba de medias Newman Keuls para pH a un $\alpha=0.05$.	43
Tabla VI.12.	Prueba de medias Newman Keuls para la variable CE (mS cm^{-1}), a un $\alpha=0.05$.	44
Tabla VI.13.	Resultados estadísticos de los tratamientos.	47
Tabla X.14.	Promedio de pH, por tratamiento, obtenidos del ensayo de susceptibilidad.	56
Tabla X.15.	Promedios de CE en mS cm^{-1} por tratamiento, obtenidos del ensayo de susceptibilidad.	56



Tabla X.16.	Valores de pH y fósforo soluble obtenidos en la Fase 1 de las selección del soporte.	57
Tabla X.17.	Valores de CE obtenidos en la Fase 1 de la selección del soporte.	58
Tabla X.18.	Resultados de la primera corrida del ensayo de adsorción del soporte NI, tamaño A.	59
Tabla X.19.	Cálculo de las constantes de la Figura X.36.	59
Tabla X.20.	Resultados de la segunda corrida del ensayo de adsorción del soporte NI, tamaño A.	60
Tabla X.21	Cálculo de las constantes para la Figura X.37.	60
Tabla X.22.	Resultados de la tercera corrida del ensayo de adsorción del soporte NI, tamaño A.	61
Tabla X.23.	Cálculo de las constantes de la Figura X.38.	61
Tabla X.24.	Resultados de la primera corrida del ensayo de adsorción del soporte NI, tamaño B.	62
Tabla X.25.	Cálculo de las constantes para la Figura X.39	62
Tabla X.26.	Resultados de la segunda corrida del ensayo de adsorción del soporte NI, tamaño B.	63
Tabla X.27	Cálculo de las constantes para la Figura X.40.	63
Tabla X.28.	Resultados de la tercera corrida del ensayo de adsorción del soporte NI, tamaño B.	64
Tabla X.29.	Cálculo de las constantes para la Figura X.41.	64
Tabla X.30.	Resultados de la primera corrida del ensayo de adsorción del	65



	soporte NI, tamaño C.	
Tabla X.31.	Cálculo de las constantes para la Figura X.42.	65
Tabla X.32.	Resultados de la segunda corrida del ensayo de adsorción del soporte NI, tamaño C	66
Tabla X.33.	Cálculo de las constantes para la Figura X.43	66
Tabla X.34.	Resultados de la tercera corrida del ensayo de adsorción del soporte NI, tamaño C.	67
Tabla X.35.	Cálculo de las constantes para la Figura X.44.	67
Tabla X.36.	Valores pH y fósforo soluble obtenidos en la Fase 1 de las selecciones del soporte.	68
Tabla X.37.	Valores de CE (mS cm^{-1}) obtenidos en la Fase 1 de la selección del soporte.	68
Tabla X.38.	Resultados de la primera corrida del ensayo de adsorción del soporte D, tamaño A.	70
Tabla X.39.	Cálculo de las constantes para la Figura X.45.	70
Tabla X.40.	Resultados de la tercera corrida del ensayo de adsorción del soporte D, tamaño A.	71
Tabla X.41.	Cálculo de las constantes para la Figura X.46.	71
Tabla X.42.	Resultados de la tercera corrida del ensayo de adsorción del soporte D, tamaño A.	72
Tabla X.43.	Cálculo de las constantes para la Figura X.47	72
Tabla X.44.	Resultados de la primera corrida del ensayo de adsorción del	73



	soporte D, tamaño B.	
Tabla X.45.	Cálculo de las constantes para la Figura X.48.	73
Tabla X.46.	Resultados de la segunda corrida del ensayo de adsorción del soporte D, tamaño B.	74
Tabla X.47.	Cálculo de las constantes para la Figura X.49.	74
Tabla X.48.	Resultados de la tercera corrida del ensayo de adsorción del soporte D, tamaño B.	75
Tabla X.49.	Cálculo de las constantes para la Figura X.50.	75
Tabla X.50.	Resultados de la primera corrida del ensayo de adsorción del soporte D, tamaño C.	76
Tabla X.51.	Cálculo de las constantes para la Figura X.51.	76
Tabla X.52.	Resultados de la segunda corrida del ensayo de adsorción del soporte D, tamaño C.	77
Tabla X.53.	Cálculo de las constantes para la Figura X.52	77
Tabla X.54.	Resultados de la tercera corrida del ensayo de adsorción del soporte D, tamaño C.	78
Tabla X.55.	Cálculo de las constantes para la Figura X.53	78
Tabla X.56.	Valores de pH y fósforo soluble obtenidos en la Fase 1 de la selección del soporte.	79
Tabla X.57.	Valores de CE (mS cm^{-1}) obtenidos en la Fase 1 de la selección del soporte.	80
Tabla X.58.	Resultados de la primera corrida del ensayo de adsorción del	81



	soporte Z, tamaño A.	
Tabla X.59.	Cálculo de las constantes para la Figura X.54.	81
Tabla X.60.	Resultados de la segunda corrida del ensayo de adsorción del soporte Z, tamaño A.	82
Tabla X.61.	Cálculo de las constantes para la Figura X.55.	82
Tabla X.62.	Resultados de la tercera corrida del ensayo de adsorción del soporte Z, tamaño A.	83
Tabla X.63.	Cálculo de las constantes para la Figura X.56.	83
Tabla X.64.	Resultados de la primera corrida del ensayo de adsorción del soporte Z, tamaño B.	84
Tabla X.65.	Cálculo de las constantes para la Figura X.57.	84
Tabla X.66.	Resultados de la segunda corrida del ensayo de adsorción del soporte Z, tamaño B.	85
Tabla X.67.	Cálculo de las constantes para la Figura X.58.	85
Tabla X.68.	Resultados de la tercera corrida del ensayo de adsorción del soporte Z, tamaño B.	86
Tabla X.69.	Cálculo de las constantes para la Figura X.59.	86
Tabla X.70.	Resultados de la primera corrida del ensayo de adsorción del soporte Z, tamaño C.	87
Tabla X.71.	Cálculo de las constantes para la Figura X.60.	87
Tabla X.72.	Resultados de la segunda corrida del ensayo de adsorción del soporte Z, tamaño C.	88



Tabla X.73.	Cálculo de las constantes para la Figura X.61.	88
Tabla X.74.	Resultados de la tercera corrida del ensayo de adsorción del soporte Z, tamaño C.	89
Tabla X.75.	Cálculo de las constantes para la Figura X.62	89
Tabla X.76.	Valores de pH obtenidos en la 2 ^a . Fase del experimento para la selección del soporte.	90
Tabla X.77.	Valores de CE (mS cm^{-1}) de la 2 ^a . Fase del experimento para seleccionar el soporte.	90



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura II.1.	Interacciones presentes en un humedal	5
Figura II.2.	Humedales naturales	6
Figura II.3.	Humedales artificiales	7
Figura II.4.	Humedal de flujo libre	8
Figura II.5.	Humedal de flujo subsuperficial	9
Figura II.6.	Componentes principales de un humedal	11
Figura II.7.	Planta Campo Hermoso	12
Figura III.8.	Impacto negativo en área circundante a la planta	14
Figura V.9.	Ubicación de la Planta Campo Hermoso, Nuevo Ideal, Dgo. y la Laguna de Santiaguillo	16
Figura V.10.	Especies nativas seleccionadas	19
Figura V.11.	Zeolita sometida a experimentación	20
Figura V.12.	Grava de Nuevo Ideal sometida a experimentación	21
Figura V.13.	Grava de Durango sometida a experimentación	22
Figura V.14.	Dimensiones de las unidades experimentales	27
Figura V.15.	Unidades construidas	28
Figura V.16.	Grava tamaño mediano 3-5 cm	29



Figura V.17.	Grava tamaño pequeño 2-6 mm	30
Figura V.18.	Distribución de las gravas en las unidades experimentales	30
Figura V.19.	Unidad utilizada como blanco	31
Figura V.20.	Conformación de las unidades con soporte	33
Figura V.21.	Distribución de los estolones en el humedal	34
Figura V.22.	Estolones antes de ser plantados	34
Figura V.23.	Estolones plantados a 15 cm de profundidad	35
Figura V.24.	Humedal establecido	35
Figura V.25.	Componentes iniciales del sistema	36
Figura V.26.	Regaderas de distribución al humedal	36
Figura V.27.	Regadera en función	37
Figura V.28.	Instalación del sistema de venoclisis	37
Figura V.29.	Prototipo instalado	38
Figura VI.30.	<i>Schoenoplectus americanus</i> en el Puente San Carlos	39
Figura VI.31.	Gráficos de resultados de la variable pH	44
Figura VI.32.	Gráfico de resultados con respecto a la variable CE	46
Figura VI.33.	Gráfico de resultados para ST	47
Figura VI.34.	Resultados de los tres parámetros evaluados	48
Figura VI.35.	Efluente tratado de las unidades blanco (izquierda) y planta 2	48



(derecha)

Figura VI.36.	Primera ecuación de Langmuir para grava NI en tamaño A	59
Figura VI.37.	Segunda ecuación de Langmuir para grava NI en tamaño A	60
Figura VI.38.	Tercera ecuación de Langmuir para grava NI en tamaño A	61
Figura VI.39.	Primera ecuación de Langmuir para grava NI en tamaño B	62
Figura VI.40.	Segunda ecuación de Langmuir para grava NI en tamaño B	63
Figura VI.41.	Tercera ecuación de Langmuir para grava NI en tamaño B	64
Figura VI.42.	Primera ecuación de Langmuir para grava NI en tamaño C	65
Figura VI.43.	Segunda ecuación de Langmuir para grava NI en tamaño C	66
Figura VI.44.	Tercera ecuación de Langmuir para grava NI en tamaño C	67
Figura VI.45.	Primera ecuación de Langmuir para grava D en tamaño A	70
Figura VI.46.	Segunda ecuación de Langmuir para grava D en tamaño A	71
Figura VI.47.	Tercera ecuación de Langmuir para grava D en tamaño A	72
Figura VI.48.	Primera ecuación de Langmuir para grava D en tamaño B	73
Figura VI.49.	Segunda ecuación de Langmuir para grava D en tamaño B	74
Figura VI.50.	Tercera ecuación de Langmuir para grava D en tamaño B	75
Figura VI.51.	Primera ecuación de Langmuir para grava D en tamaño C	76
Figura VI.52.	Segunda ecuación de Langmuir para grava D en tamaño C	77
Figura VI.53.	Tercera ecuación de Langmuir para grava D en tamaño C	78



Figura VI.54.	Primera ecuación de Langmuir para grava Z en tamaño A	81
Figura VI.55.	Segunda ecuación de Langmuir para grava Z en tamaño A	82
Figura VI.56.	Tercera ecuación de Langmuir para grava Z en tamaño A	83
Figura VI.57.	Primera ecuación de Langmuir para grava Z en tamaño B	84
Figura VI.58.	Segunda ecuación de Langmuir para grava Z en tamaño B	85
Figura VI.59.	Tercera ecuación de Langmuir para grava Z en tamaño B	86
Figura VI.60.	Primera ecuación de Langmuir para grava Z en tamaño C	87
Figura VI.61.	Segunda ecuación de Langmuir para grava Z en tamaño C	88
Figura VI.62.	Tercera ecuación de Langmuir para grava Z en tamaño C	89



RESUMEN

Uno de los principales problemas a los que se enfrenta la industria láctea es el manejo de sus aguas residuales, ya que se vierten al suelo sin tratamiento previo, generando un grave problema de contaminación. En la presente investigación se consideró un humedal como el sistema de tratamiento biológico viable para dar solución al problema. Se construyó un sistema de tratamiento a nivel planta piloto en donde los parámetros considerados fueron, de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996, pH (5-10 unidades), grasas y aceites (15 mg L^{-1}), coliformes fecales (1,000 Número más probable (NMP) en 100 mL^{-1}) y aunque no se incluye en la norma, conductividad eléctrica ($< 0.75 \text{ mS cm}^{-1}$), ya que se desea usar el agua para riego de árboles que se emplearán como cortina rompe vientos. Primero se seleccionó, mediante un ensayo de susceptibilidad, una de dos plantas acuáticas nativas propuestas (*Schoenoplectus americanus* y *Eleocharis densa*) y se evaluaron tres soportes nativos (grava triturada de Durango, Zeolita y grava triturada de río de Nuevo Ideal) con potencial para disminuir sales disueltas y aumentar el pH. La especie seleccionada fue *Schoenoplectus americanus* y el mejor soporte fue la grava de Nuevo Ideal con un tamaño de partícula de 2 a 6 mm. El prototipo se construyó con una capacidad de 2 m^3 , incluyendo operaciones como flotación y sedimentación, y procesos como humedales y lagunas de oxidación. El tiempo de retención hidráulico fue de 3 días y se evaluaron las eficiencias en la flotación y sedimentación, además de los cambios físicos, químicos y biológicos ocurridos en los procesos. La eficiencia de la flotación fue de 65%; en cuanto al pH y la CE los mejores tratamientos fueron grava y planta probablemente por su exposición a los rayos del sol.



ABSTRACT

One of the main problems that faces the milk industry is the handling of its wastewaters, since they are discharged directly to the soil without previous treatment; generating a serious problem of contamination. In the present investigation a wetland was selected to be the viable system as a biological treatment to provide solution to this pollution problem. A pilot level treatment was constructed and the considered parameters were, according to the NOM-001-SEMARNAT-1996, pH (5-10 units), grease and oils (15 mgs L^{-1}), fecal coliforms, 1,000 Most Probable Number (MPN) per 100 ml^{-1} and although it is not included in the legislation, electrical conductivity ($< 0.75 \text{ mS cm}^{-1}$), since it is desired to use the water for irrigation of trees to be used as a wall to break winds in the area. First, one of two suggested native aquatic plants (*Schoenoplectus americanus* and *Eleocharis densa*) was selected, by means of a susceptibility test, and three native supports were evaluated (crushed gravel of Durango, a Zeolite and a crushed river gravel of Nuevo Ideal) with potential to diminish dissolved salts and to increase pH. The selected species was *Schoenoplectus americanus* and the best support was the gravel of Nuevo Ideal with a particle size of 2 to 6 mm. The prototype was constructed with a capacity of 2 m^3 , including operations, as flotation and sedimentation and processes like wetlands and oxidation lagoons. The hydraulic retention time was 3 days. The efficiency in the flotation and sedimentation were evaluated, besides the physical, chemical and biological changes occurred in the processes. The efficiency of the flotation was 65%; as for the pH and the CE the best treatments were gravel and plants, probably due to its exposure to the sun's rays.



USO DE HUMEDALES COMO ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE LA INDUSTRIA LÁCTEA

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad ha cobrado importancia el tratamiento del agua residual generada como consecuencia de las actividades económicas realizadas por la sociedad, por el negativo impacto ambiental que produce.

En respuesta se han generado técnicas y procesos de depuración; algunos son complejos y costosos, otros por el contrario son fáciles de instalar, manejar y mantener.

La elección del tipo de sistema de tratamiento se hace principalmente con base al uso que se le vaya a dar al agua tratada y debe ser acorde a la disponibilidad de recursos humanos, tecnológicos y financieros.

Entre los sistemas más fáciles de mantener y operar están los conformados por humedales artificiales, los cuales son usados como tratamientos secundario y/o terciario dentro del tren de operación de depuración; ya que presentan ventajas en cuanto a los costos de instalación, mantenimiento y operación, ayudan a mejorar el paisaje y tienen una alta probabilidad de convertirse en un espacio adecuado para el desarrollo de la biodiversidad (Mitsch & Gosselink, 2000; France, 2003).

En el municipio de Nuevo Ideal, Dgo., se encuentra una comunidad Menonita dedicada desde hace más de 30 años a la elaboración de queso. Derivado de su proceso productivo éste genera residuos líquidos (provenientes de la producción y del lavado de las instalaciones) y desafortunadamente la empresa no cuenta con un sistema de tratamiento para sus aguas residuales.

El agua residual se vierte con diferentes grados de contaminación, debido a que en ocasiones contiene lactosuero, además de pequeñas aportaciones de lactosuero salado que resulta del prensado del queso, aumentando la cantidad de materia orgánica y sales, llegando a alcanzar valores de hasta 14 mS cm^{-1} de conductividad eléctrica (CE). Comparando este valor de CE con la del agua de mar tiene aprox. 53



mS cm⁻¹ a 20 °C (valor medio mundial¹), resulta un contenido excesivo de sales que encarece cualquier sistema de tratamiento. A la fecha se trabaja en la optimización de la materia prima, con lo que se espera una reducción en la sal usada en el proceso y en los desechos en general, dentro del proyecto “PLAN DE MANEJO DE RESIDUOS EN LAS QUESERÍAS MENONITAS DE NUEVO IDEAL, DURANGO, CON LA APLICACIÓN DEL CONCEPTO DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA” con clave FOMIX DGO-2007-C01-67972.

A pesar de estas modificaciones los residuos resultantes tienen alta conductividad y grandes cantidades de materia orgánica. Por lo anterior es necesaria la implementación de una planta de tratamiento donde se propone utilizar a los humedales artificiales de tipo sub-superficial como parte del sistema. Donde el objetivo de este trabajo fue evaluar la eficiencia que los procesos físico-químico-biológicos, presentan en la depuración de las aguas residuales de esta industria quesera.

¹ <http://webs.uvigo.es/servicios/biblioteca/uit/rec/P/R-REC-P.527-3-199203-III!PDF-S.pdf>



CAPÍTULO II. ANTECEDENTES

En general los sistemas de tratamiento contemplan operaciones físicas como desnatado, sedimentación y/o cribado, para luego seguir con procesos biológicos como lagunas aireadas, lodos activados, humedales, biofiltros, lagunas de oxidación y por último pasar por un proceso de pulimento.

Los humedales pueden ser empleados como proceso biológico y/o proceso de pulimento dentro de un sistema de tratamiento, dependiendo de las características del agua a tratar y del uso posterior que se le va a dar al efluente.

Ahora bien, cuando se compara a los humedales con otros sistemas de tratamiento, el orden en la velocidad de tratamiento sería: lodos activados de alta velocidad, procesos de película adherida de alta velocidad, lodos activados convencionales, lodos activados de aireación extendida, lagunas aireadas de alta velocidad, lagunas parcialmente mezcladas, lagunas facultativas y finalmente humedales. Los costos de tratamiento se comportan de manera similar, entre más rápido, más caro, la diferencia entre los lodos activados y los humedales es de hasta 2.5 veces (Pérez, 2006;).

El uso de humedales como parte del tratamiento de efluentes de la industria láctea es relativamente nuevo en nuestro país, aunque son ampliamente aceptados y empleados en el tratamiento de aguas residuales domésticas en muchas regiones del mundo. La importancia de llevar a cabo este trabajo aumenta, si se emplean plantas nativas de la localidad y el soporte se elige de entre los materiales locales que presentan un alto potencial depurador.

Un humedal, además de ayudar a depurar el agua, le da una mejor vista al paisaje, ya que combina la estética con la funcionalidad ecológica (France, 2003); también puede ser un lugar de descanso para aves migratorias y los residuos que se obtienen de la poda de las plantas pueden ser sometidos a un proceso de composteo, originando así un producto capaz de mejorar las características físicas y químicas del suelo que además es totalmente compatible con el medio ambiente.



II.1. Generalidades de los humedales

Los humedales son considerados una herramienta útil en la mitigación del deterioro ambiental, ya que por sus características ayuda a mejorar las condiciones ambientales del lugar donde se instala (France, 2003). Aunque no existe una definición única, el concepto de humedal, es resultado de la necesidad de comprender y valorar la importancia de cada uno de los diferentes tipos de ecosistemas existentes. Se han propuesto algunos criterios para identificar a un humedal como tal (Farhina *et al.*, 1996), entre ellos:

- **Hidrología.** Intervalos de tiempo en los que el terreno permanece anegado.
- **Suelo.** Presencia de suelos inadecuadamente drenados (suelos hídricos) y en los que el perfil hasta aproximadamente 45 cm, o inferior, se encuentra saturado con agua por un periodo considerable, durante la estación de crecimiento de la vegetación natural.
- **Vegetación.** Predominan las hidrófitas genuinas, es decir, todas aquellas plantas capaces de llevar a cabo su ciclo regenerativo cuando la parte vegetativa se encuentra sumergida o sostenida por el agua o que se encuentran usualmente sumergidas y que son inducidas a la reproducción sexual cuando su parte vegetativa muere como consecuencia del desecamiento por emersión (Den Hartog & Segal, 1964 en Schmidt-Mumm, 1998).

A pesar de las discrepancias, la mayoría de los autores concuerdan en que los humedales son áreas que presentan una elevada humedad relativa, el tiempo suficiente para crear condiciones propicias para el establecimiento y la permanencia de plantas, animales y microorganismos, que gracias a su interacción con el medio (acuoso y filtrante) originan un sistema complejo, rico y con alto potencial depurador (Lara, 1999; Sánchez y García, 1999; Stottmeister *et al.*, 2003) capaces de eliminar grandes cantidades de materia orgánica, sólidos, nitrógeno, fósforo y en algunos casos químicos tóxicos; gracias a estas características son llamados los “riñones del planeta”(Lahora, 2001; **Figura II.1**).

Los humedales son considerados los ecosistemas más ricos ya que presentan una gran cantidad de organismos invertebrados, principalmente crustáceos e insectos (bentónicos, limnéticos y litorales), que son la base alimenticia de una compleja red trófica en la que participan anfibios, aves, reptiles y una gran variedad de herbívoros².

Los humedales pueden ser naturales o artificiales. Los naturales (**Figura II.2**) se encuentran en el paisaje como áreas transicionales entre los sistemas acuáticos y las zonas altas del terreno. Cuando la morfología es plana y de pobre drenaje, los humedales ocupan grandes extensiones de terreno, mientras que están ausentes en sitios de topografía agreste.

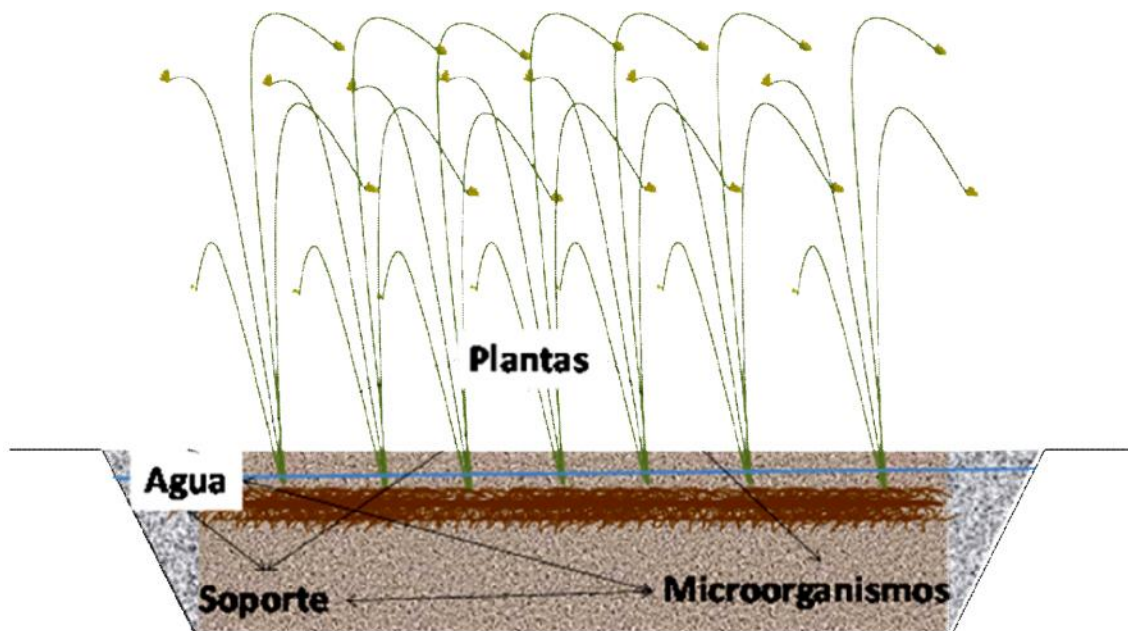


Figura II.1. Interacciones presentes en un Humedal

Los humedales artificiales (**Figura II.3**) son definidos por el hombre y pretenden simular los procesos de depuración que ocurren en estos sistemas de manera

² Secretaría de ambiente y desarrollo sustentable. República de Argentina
<http://www2.medioambiente.gov.ar/fac/humedales/default.htm>

natural; gracias a esto su construcción, manejo y operación es relativamente simple y con bajos costos, en comparación con otros sistemas de tratamiento (Lesikar y Enciso, 2002).

De acuerdo a la columna de agua, se clasifican en humedales de flujo libre (HFL) donde la capa de agua está por encima del soporte y de flujo subsuperficial (HFS) donde la columna de agua no sobrepasa al soporte, la dirección del flujo puede ser vertical, horizontal y/o mixto.



Figura II.2. Humedales naturales

Los humedales HFL (**Figura II.4**) generalmente consisten en lagunas o estanques, se emplean para proporcionar un tratamiento secundario avanzado a las aguas residuales domésticas. La columna de agua suele ser poco profunda (0.1 a 0.6 m) para permitir un adecuado intercambio de oxígeno entre la atmósfera y la columna de agua.

Por otro lado los humedales HFS (**Figura II.5**) se caracterizan por ser canales excavados, rellenos de material granular, generalmente grava o gravilla. Tienen la ventaja de evitar la proliferación de mosquitos, la grava sirve como medio filtrante para la fase acuosa, aumenta el área disponible para la fijación de la película microbiana y es más estable a los cambios bruscos de temperatura.

Los componentes principales de los humedales son: las plantas, los microorganismos, el soporte y la matriz acuosa (**Figura II.6**).

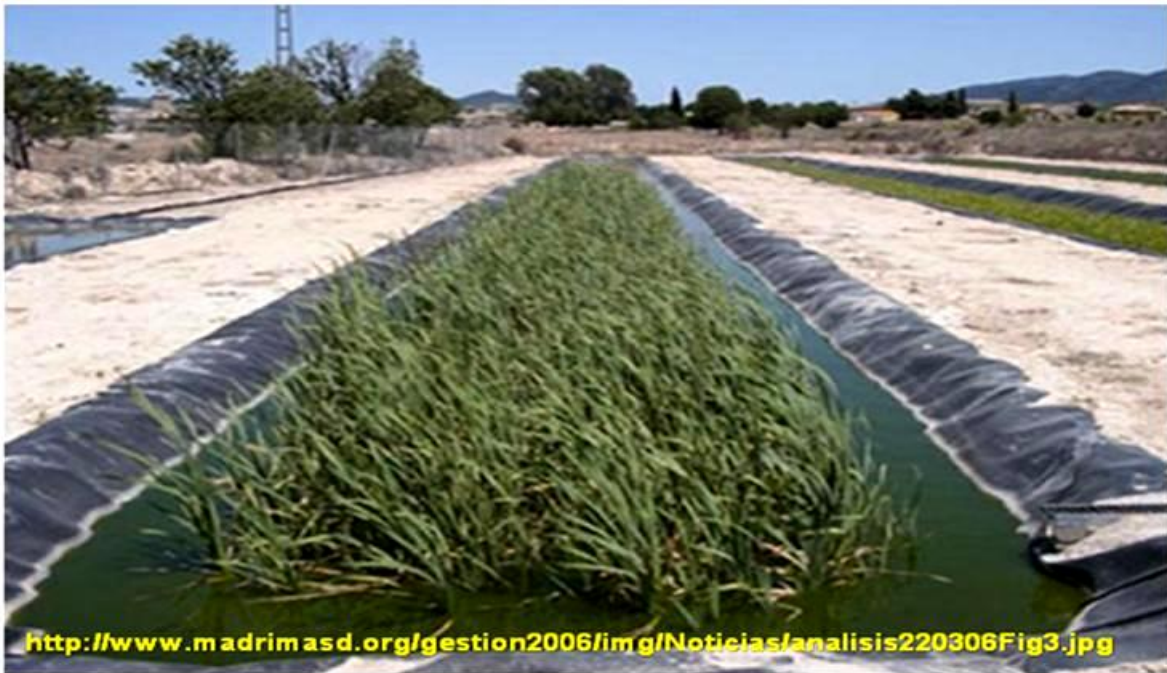


Figura II.3. Humedales artificiales

II.2. Componentes

a) Plantas

Las plantas pueden ser emergentes, flotantes y/o sumergidas, estas permiten que se establezca la película microbiana, por medio de las raíces inyectan aire al soporte y a la fase acuosa; esto origina que existan, dentro del humedal, secciones aerobias y otras anaerobias favoreciendo así la existencia de una mayor variedad de microorganismos. Además toman una parte de los nutrientes disueltos en el agua

para la producción de biomasa (Pérez, 2006) y al regular el paso de los rayos solares a través de la columna de agua limitan el crecimiento de la algas (Lara, 1999; DeKeser, 2003).

Es recomendable que las plantas utilizadas en la implementación del humedal sean nativas de la localidad donde se vaya a establecer, para evitar introducir especies exóticas que puedan modificar de manera negativa la distribución y la abundancia de la flora y fauna local.

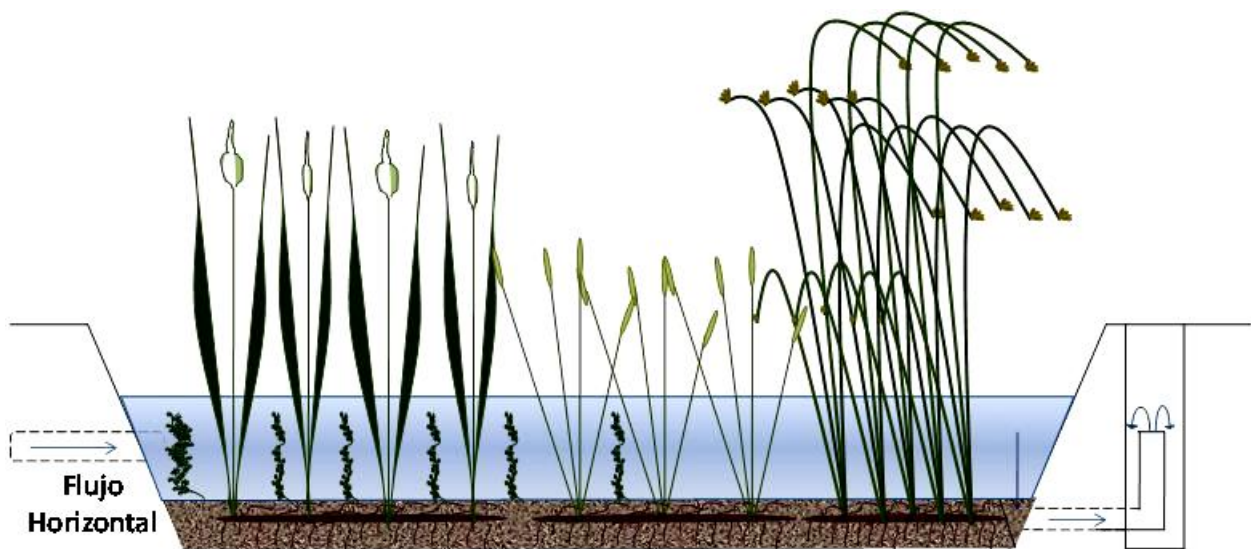


Figura II.4. Humedal de flujo libre

b) *Microorganismos*

Los microorganismos son un elemento fundamental dentro del humedal, forman la película microbiana que se adhiere al soporte y/o a las raíces de las plantas, llevan a cabo la mayor parte de la degradación de la materia orgánica, al consumir grandes cantidades del carbón orgánico y de los nutrientes que ingresan al sistema.

Algunos procesos microbianos requieren la presencia de oxígeno (aeróbicos) para poder llevarse a cabo, mientras que otros no (anaeróbicos). Muchas bacterias son capaces de funcionar en condiciones aeróbicas y anaeróbicas en respuesta a las

condiciones del ambiente (Lara, 1999) asegurando que en ambas fases se lleven a cabo procesos microbianos.

Cuando las características del agua que entra al sistema presentan pocas variaciones bruscas, las poblaciones de microorganismos pueden ajustarse a los cambios y seguir extendiéndose. En cambio, cuando son muy cambiantes o no son favorables, muchos microorganismos se inactivan y pueden permanecer en ese estado por algunos años. Gracias a esta plasticidad se asegura que existan reservas de microorganismos en el sistema, incluso en condiciones ambientales adversas y que el tiempo de arranque del sistema, después de un paro temporal, sea reducido (Ibekwe *et al*, 2003;)

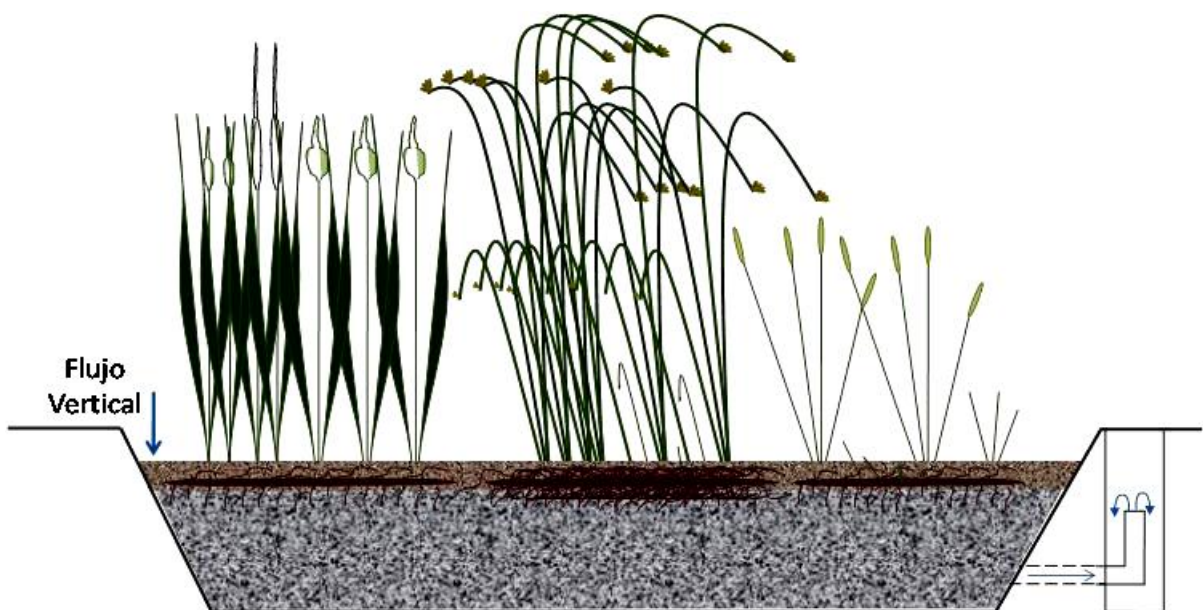


Figura II.5. Humedal de flujo subsuperficial

c) Soporte

La elección de un soporte adecuado es muy importante, ya que dentro de él se llevan a cabo procesos físicos, como filtración y sedimentación; también pueden observarse procesos químicos, como el intercambio iónico, la precipitación, fenómenos de



oxidación y/o reducción, adsorción, sorción, entre otros. Puede ser un material inerte o puede elegirse entre algunos materiales locales, con potencial, como grava, gravilla y arena (Crites y Tchobanoglus, 1998).

El tamaño de las partículas también es importante, ya que modifica la hidráulica del sistema y pueden existir variaciones considerables en el área de contacto que posiblemente altere el efecto del soporte sobre la matriz acuosa.

Con la finalidad de encontrar un tamaño de partícula óptimo, es decir, que no perjudique la conductividad hidráulica del sistema, pero que cumpla eficientemente con el objetivo planteado para esta fase, se realizó una búsqueda bibliográfica. Sin embargo se encontraron bastantes discrepancias, ya que su selección depende en gran medida de las características del afluente y del uso del efluente: pueden ir de 3-32 mm (Crites & Tchobanoglus, 1998), 0.5-1.0 mm (Luna y Ramírez, 2004), 1-2 mm (Martínez Cruz *et al*, 2006), etc.

Además debe considerarse la disponibilidad del material elegido como soporte, el costo de adquisición del mismo y el área para el establecimiento del humedal.

II.3. Generalidades de la Empresa

La principal fuente de ingresos de los menonitas es la agricultura, seguida de la ganadería y después la comercialización de productos caseros y los elaborados en sus microempresas, como calentones, moldes en fundidores de aluminio, máquinas perforadoras de pozos y queso. En el municipio de Nuevo Ideal, existen alrededor de 20 queserías, que procesan aproximadamente 100,000 L de leche diarios para producir queso tipo Cheddar, mejor conocido en esta región como "Menonita" (Pérez, 2006). Una de las empresas más grandes del municipio es la Sociedad Cooperativa de Producción "Quesería Holanda" S. C. L. que elabora el queso marca Excélsior y cuya planta de producción principal es la Planta Campo Hermoso (**Figura II.7**).

Entre los desechos generados en la producción de queso se encuentra el Lactosuero (L, aproximadamente 85% del total de la leche procesada), con un contenido

aproximado del 50-60% de los sólidos originales de la propia leche; Lactosuero salado (LS), obtenido en la formación de la pieza de queso; Agua Residual (AR) generada en el lavado de los moldes y las instalaciones de la planta; además del Agua residual obtenida de los Sanitarios (ARS).

Los efluentes generados por la industria menonita tienen una conductividad eléctrica de 10.4 mS cm^{-1} , 16.9 g L^{-1} de sólidos totales y 2.2 g L^{-1} de grasa (Saucedo, 2007). El alto contenido de sólidos, especialmente de sales, hacen que sea uno de los efluentes más difíciles y caros de tratar en un sistema de depuración convencional (Pérez, 2006).

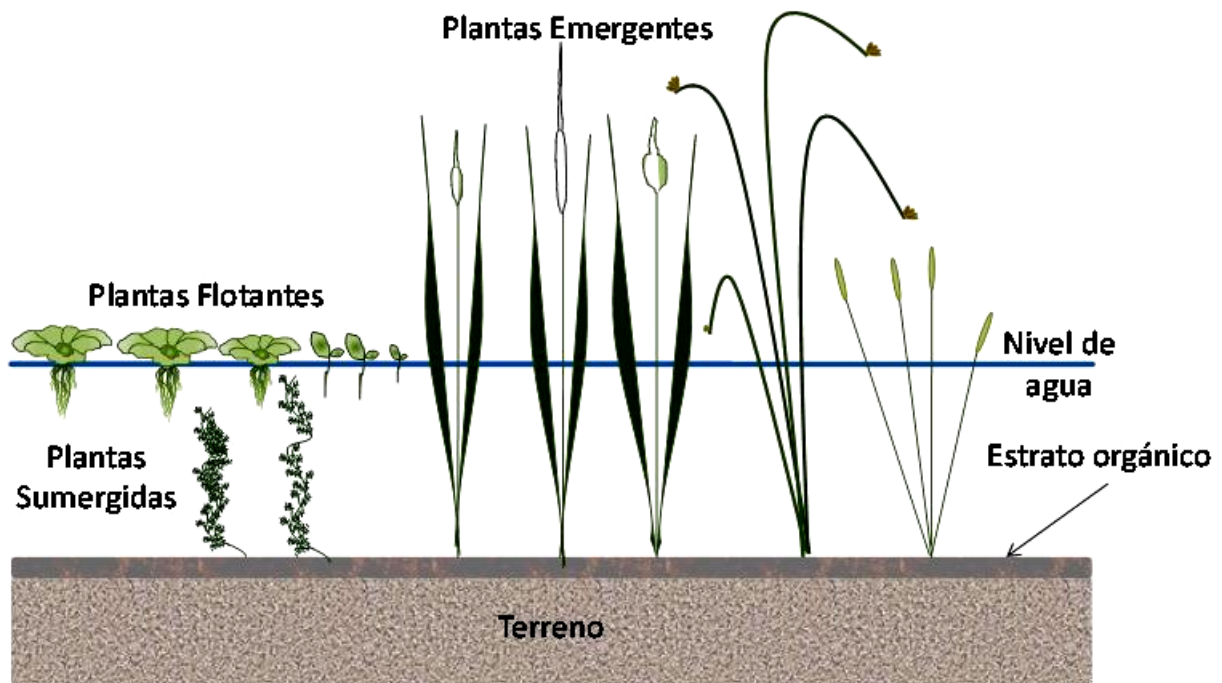


Figura II.6. Componentes principales de un humedal

CAPÍTULO III. JUSTIFICACIÓN

Una de las principales empresas productoras de queso del Estado de Durango, se encuentra dentro de la comunidad Menonita del municipio de Nuevo Ideal. La inadecuada disposición de sus residuos ha modificado negativamente el ambiente (Villagrana, 2007; Talamantes, 2008, **Figura III.8**); incumpliendo de ésta manera con los lineamientos de la NOM-001-SEMARNAT-1996, razón por la cual fue multada por la Comisión Nacional del Agua (CNA). Dicha situación obligó a la empresa a buscar ayuda para diseñar e implementar un sistema de tratamiento que les permita cumplir con la normatividad vigente.



Figura II.7. Planta Campo Hermoso



Considerando lo anterior, se eligió la implementación de un humedal de tipo subsuperficial como parte del tren de tratamiento del efluente por las ventajas, económicas, ecológicas, de diseño, mantenimiento, funcionamiento y regionales, que presenta frente a las demás opciones. El diseño de la planta se realizó con base a los parámetros de descarga para uso en riego de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996, pH (5-10 unidades), grasas y aceites (15 mg L^{-1}), materia flotante ausente y aunque no se incluye en la norma, conductividad eléctrica (CE) que según Crites y Tchobanoglus (1998) y Evangelou (1998), el valor de referencia es 0.75 mS cm^{-1} .

CAPÍTULO IV. OBJETIVOS

IV.1. General

Evaluar el potencial depurador de un humedal subsuperficial como parte del tren de tratamiento de las aguas residuales del proceso de producción de queso Excélsior en la Planta Campo Hermoso en el Municipio de Nuevo Ideal, Durango.

IV.2. Específicos

- Seleccionar las plantas acuáticas y semiacuáticas, de la región de Nuevo Ideal, con potencial de depuración para ser usadas en humedales artificiales.
- Evaluar materiales regionales que presentan potencial para ser usados como soportes en la instalación de humedales artificiales.
- Evaluar la eficiencia de un humedal artificial subsuperficial en la depuración del agua residual de la quesería, mediante un prototipo a nivel planta piloto.



Figura III.8. Impacto negativo en área circundante a la planta



CAPÍTULO V. MATERIALES Y MÉTODOS

V.1. Área de estudio

En el Estado de Durango se localiza una comunidad menonita, formada por 32 colonias, 30 de ellas se encuentran ubicadas en el municipio de Nuevo Ideal, Dgo., y las otras dos en Santiago Papatzi. El área está situada a 130 km al noroeste de la capital del Estado; en las coordenadas 24° 57' 04.5" latitud norte y 105° 03' 39.4" de longitud oeste a una altitud de 1981 msnm. En Nuevo Ideal las colonias, se encuentran asentadas sobre el Valle de Guatimape, la topografía es plana, con una pendiente suave y se encuentran cerca de la Laguna de Santiaguillo (**Figura V.9**), lugar de gran importancia como área de descanso de las aves migratorias procedentes del norte del continente.

V.2. Métodos analíticos empleados

Los parámetros que se midieron, para cumplir con los objetivos planteados fueron: pH, CE, grasas y aceites, sólidos sedimentables, sólidos totales, sólidos totales volátiles y fósforo soluble reactivo.

Para las mediciones de pH se empleó un potenciómetro marca Orión modelo 230A, calibrado con soluciones buffer de pH 4 y 10 marca J. T. Baker; para la CE se utilizó un conductímetro marca Orión modelo 162, calibrado con una solución estándar de 12.88 mS cm⁻¹ marca Hanna Instruments. Los equipos se calibraron según especificaciones del fabricante.

Los sólidos totales, totales volátiles y sedimentables, así como grasas y aceites se determinaron según las técnicas descritas en el Métodos Estándar (APHA, 1995) y la normatividad mexicana (NMX-AA-SCFI-2001).

Las mediciones de Fósforo Soluble (FS) se realizaron por el Método Olsen (Etchevers, 1992), en donde se utilizó un espectrofotómetro de luz visible, Spectronic® 20 Genesys™ y se hizo una curva tipo con soluciones estándar.

La confiabilidad de los resultados se aseguró a través del uso de estándares, medición de blancos y análisis por duplicado.



Figura V.9. Ubicación de la Planta Campo Hermoso, Nuevo ideal, Dgo. y la Laguna de Santiaguillo

V.3.Afluente

V.3.1.Introducción

Uno de los aspectos más importantes a conocer es el afluente, porque es necesario saber con qué se está trabajando, esto engloba la información más relevante del agua que se estará tratando, en donde se incluyen las características generales y específicas de la misma.

Es de suma importancia contar con esta información para hacer la elección correcta de los componentes del tren de tratamiento pero muy en especial, de los elementos que conformarán el humedal, garantizando con esto el buen funcionamiento del



sistema y por ende una agua residual con la condiciones para verterse de manera adecuada.

V.3.2. Composición y características

El efluente de la quesería está compuesto en gran parte por lactosuero, que este a su vez se compone en mayor proporción de lactosuero dulce y una pequeña ración de lactosuero salado, así mismo conserva aún algunos de los contenidos de la leche como proteínas y grasas.

Algunas de las partes del residuo líquido a tratar es el agua que se utiliza para el lavado, con pequeños contenidos de detergentes, sanitizantes, disoluciones de sosa, agua condensada, agua de enfriamiento, entre otros.

Otro componente de gran peso es el flujo que viene de la clarificadora, que se compone por todas las impurezas que se retiran de la leche.

Para tener una visión más completa del origen y componentes del afluente, en la Figura 2, se muestran las diferentes corrientes que conforman el flujo total de agua residual.

Las características principales del efluente se muestran en la **Tabla V.1**

Tabla V.1. Características del afluente.	
Color	Lechoso
Olor	Fuerte y desagradable
Conductividad	10.4 mS/cm
Sólidos totales	16.9 g/L
Grasa	2.2 g/L
pH	4.30
Fuente: Saucedo, 2006	

Para conocer la eficiencia de los humedales de tipo subsuperficial, en la depuración del agua residual de la industria láctea, es necesario conocer primero las plantas nativas de la localidad, elegir dos y someterlas a una prueba de susceptibilidad para



saber cuál sobrevive; además elegir el soporte nativo que ayude a aumentar el pH y bajar la CE y por último evaluar el funcionamiento del humedal subsuperficial a través de un prototipo.

Para cada objetivo se utilizaron metodologías diferentes; para en su conjunto lograr el establecimiento adecuado del humedal subsuperficial en su fase de prototipo y evaluarlo, como parte de la solución de la problemática encontrada en la empresa.

V.4. Estructuración del humedal

Se enfocó en estructurar en lo que es el humedal, en lo referente a las partes básicas que lo forman:

V.4.1. Selección de la especie.

En la selección de las especies se tomo como base el trabajo realizado por Pérez *et al.* (2008) sobre plantas acuáticas nativas tolerantes a aguas residuales, cuyo registro se encuentra en el inventario del Herbario del IPN-CIIDIR Unidad Durango. De ésta revisión se seleccionaron dos especies emergentes, *Eleocharis densa* (ED) y *Schoenoplectus americanus* (SA), ver **Figura V.10**, posteriormente se hizo un ensayo de susceptibilidad a nivel de laboratorio para seleccionar la planta con mejor desempeño.

Ensayo de susceptibilidad. Cada unidad experimental estuvo formada de un recipiente de polietileno transparente de un litro con 100 mL de los diferentes líquidos a evaluar, un estolón de 5 cm de la planta y 100 mL de grava triturada de río (GTR) del municipio de Durango. En cada unidad se midió el pH, conductividad eléctrica (CE) y temperatura a los 0, 1, 2, 3, 4, 6 y 45 días, a la par se observó si la planta sobrevivía.

Los líquidos evaluados consistieron en:

- a) Lactosuero puro (LP)
- b) Una mezcla 1:3 de lactosuero: agua destilada (L-AD)
- c) Agua destilada, como testigo (B).

Además se contemplaron unidades sin plantas. Así pues, el número de tratamientos fue 9 (3²). En el **Tabla V.2** se hace una descripción de los mismos.



Figura V.10. Especies nativas seleccionadas.

V.4.2. Evaluación del soporte.

En la selección del soporte se evaluaron tres materiales nativos del Estado de Durango: una zeolita (**Figura V.11**) del municipio de Durango (Z), grava triturada de río, una del municipio de Nuevo Ideal (NI; **Figura V.12**) y grava triturada de río del municipio de Durango (D; **Figura V.13**).

Tabla V.2. Descripción de los tratamientos empleados para seleccionar la planta acuática.			
Líquido	Lactosuero puro (LP)	Mezcla agua destilada lactosuero (L-AD)	Agua destilada (B)
Planta			
S. a.	SA-C*	SA-M	SA-B
E. d.	ED-C	ED-M	ED-B
Grava sola	B-C	B-M	B

*Claves designadas para identificación de los tratamientos. C. Lactosuero concentrado; M. Mezcla 1:3 lactosuero: agua y B. Unidades designadas como blancos, sólo agua destilada.



Figura V.11. Zeolita sometida a experimentación

El criterio que se consideró en la evaluación del soporte fue ver su capacidad para disminuir la cantidad de sales y aumentar el pH del líquido, ya que el efluente por tratar contiene una gran cantidad de sales y un pH bajo.

Además se consideró el tamaño de partícula del soporte, el cual influye en la conductividad hidráulica del sistema y por ende modifica las características del líquido que está en contacto con ellos. De acuerdo a esto, se evaluaron 3 tamaños: 2-6 (A), 6-8 (B), 8-10 mm (C).

Para evaluar la capacidad de adsorción, de cada uno de los soportes, se realizó un experimento basado en la metodología explicada por Metcalf & Eddy (2003), dividido

en dos fases, donde los coeficientes de adsorción fueron obtenidos y validadas sus diferencias con el uso de un ANOVA.



Figura V.12. Grava de Nuevo Ideal sometida a experimentación

En los soportes también se estableció su granulometría, porosidad y su capacidad de adsorber los iones. Los métodos usados para determinar cada parámetro se detallan a continuación:

Granulometría: El tamaño de partícula se obtuvo al hacer pasar la grava por tamices de diferente número de malla y cada fracción fue pesada para calcular la proporción en peso de los diferentes tamaños que la componen.

Porosidad: En una probeta se colocaron 250 mL de grava y se midió el volumen de agua requerida para ocupar los espacios vacíos.



Figura V.13. Grava de Durango sometida a experimentación

Capacidad de Adsorción: La capacidad de sorción y de intercambio iónico que afectan la remoción de fosfatos se evaluó con ayuda de las ecuaciones de Freundlich y de Langmuir (según Metcalf & Eddy, 2003). Con una solución sintética de agua residual de la industria láctea, según Nemerow & Dasgupta (1998) de CE de 8.18 mS cm^{-1} y pH de 4.86; se determinó la isoterma de adsorción, única para cada sustancia; la cual representa la cantidad de adsorbato (iones) retenido por el adsorbente (grava) de acuerdo a sus características químicas y la concentración a una temperatura constante.

La ecuación de Freundlich viene dada por la Ec. 1



$$q_e = \frac{x}{m} = K_f C_e^{1/n} \quad \text{Ec. 1}$$

Sin embargo, para obtener las constantes se rescribe la ecuación en forma logarítmica:

$$\log\left(\frac{x}{m}\right)_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

q_e = Masa de material adsorbido (x) por unidad de masa de adsorbente (m) en equilibrio.

$\frac{x}{m}$ = Masa de adsorbato (iones) por unidad de adsorbente (soporte).

K_f = Factor de capacidad de Freundlich.

C_e = Concentración en equilibrio del adsorbido en la fase líquida después de la adsorción.

$1/n$ = Parámetro de intensidad de Freundlich.

El modelo de Langmuir está dado por la ecuación 3

$$\frac{x}{m} = \frac{abC_e}{1 + bC_e} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

$\frac{x}{m}$ = Masa de adsorbato (iones) por unidad de adsorbente (soporte).

a = La fuerza de retención de los iones.

b = Capacidad de adsorción de iones por parte del material.

C_e = Concentración en equilibrio del adsorbato en la fase líquida después de la adsorción.



La isoterma de adsorción de Langmuir fue desarrollada asumiendo que un número fijo de sitios son accesibles sobre la superficie del adsorbente, todos tienen la misma energía y la adsorción es reversible. Para obtener las constantes, la ecuación 3 se reescribe como:

$$\frac{C_e}{(x/m)} = \frac{1}{ab} + \frac{1}{b}C_e \quad \text{Ec. 4}$$

Una vez determinadas las constantes se desarrolló el modelo que más se correlacionó con los datos y con él se estableció la isoterma de adsorción; dicha isoterma permite establecer la cantidad de material adsorbido por unidad de adsorbente a una concentración inicial dada y a una temperatura constante.

Para determinar las constantes y desarrollar el modelo de adsorción, se pesaron 0, 5, 10, 15 y 20 g de cada uno de los soportes y tamaños de partícula (**Tabla V.3**), se les agregó 100 mL de la solución sintética, se mantuvieron a 20 °C y se dejaron reposar durante 7 días, para después determinar la cantidad de FS, por duplicado.

El experimento se realizó por triplicado los datos obtenidos se graficaron y se estableció cuál modelo representó mejor el comportamiento, la ecuación de Langmuir ó la de Freundlich.

Posteriormente se considero el volumen de soporte utilizado en los humedales de tipo subsuperficial y se valoraron los cambios que dichas gravas ejercieron sobre el pH, la CE y el FS de la solución sintética en 6 días de contacto.

Tabla V.3. Descripción de los tratamientos contemplados para evaluar los soportes.			
Tamaño de partícula (mm)	Tipo de soporte		
	<i>Grava de Nuevo Ideal (NI)</i>	<i>Grava de Durango (D)</i>	<i>Zeolita (Z)</i>
2-6 (A)	NI-A	D-A	Z-A
6-8 (B)	NI-B	D-B	Z-B
8-10 (C)	NI-C	D-C	Z-C

*Claves asignadas a los tratamientos, tipo de soporte-cantidad de grava. B. Unidad empleada como blanco.



A 40 y 80 g de cada uno de los tipos de material, con tamaño de partícula de 2-6 mm (Tabla V.4), por triplicado, se agregó 100 mL de una solución sintética con un pH de 4.72 y una CE de 7.28 mS cm^{-1} , se dejaron reposar a temperatura constante ($20 \text{ }^\circ\text{C}$). Las mediciones de pH y CE se realizaron a los 0, 1, 2, 5 y 6 días, el FS se determinó al inicio y al final del experimento.

Tabla V.4. Descripción de los tratamientos de la segunda fase de la evaluación del soporte.

Cantidad de grava (g)	Tipos de soporte		
	<i>NI</i>	<i>D</i>	<i>Z</i>
40	NI-40*	D-40	Z-40
80	NI-80	D-80	Z-80
0	B		

*Claves asignadas a los tratamientos, tipo de soporte-cantidad de grava. B. Unidad empleada como blanco.

V.4.3. Evaluación del prototipo de humedal.

V.4.3.1. Diseño del equipo experimental

Se montó un prototipo compuesto por cuatro unidades experimentales constituidas por agua residual sola, grava y agua residual y dos humedales (planta 1 y planta 2). Los parámetros elegidos, para la evaluación tienen su fundamento legal en la norma NOM-001-SEMARNAT-1996, que estipula los límites máximos permisibles de las aguas residuales, dependiendo del lugar al cual van a ser descargadas y para que van a ser utilizadas posteriormente. Por lo tanto se contempló evaluar las unidades en cuanto a sólidos totales (ST), pH, conductividad eléctrica (CE) y grasas y aceites. Los parámetros se determinaron con base al Métodos Estándar (APHA, 1995) y la normatividad mexicana (NMX-AA-SCFI-2001).

La confiabilidad de los datos se aseguró a través de la estandarización de las técnicas, medición de blancos y realizando los análisis por duplicado.

V.4.3.2. *Diseño de las unidades experimentales*

Para el volumen de las unidades se consideró el volumen de agua necesaria para realizar los análisis, la tasa de evaporación del lugar y la porosidad de la grava y con un volumen de 191 L se hizo el cálculo de las dimensiones del prototipo en donde la altura no debe ser mayor de 60 cm y el largo aproximadamente 3 veces el ancho.

$$V = 191 \text{ L} = 0.191 \text{ m}^3 \quad A = ? \quad L = 3A \quad H = 0.468 \text{ m}$$

Si $V = L \times A \times H$ sustituyendo los datos que se tienen:

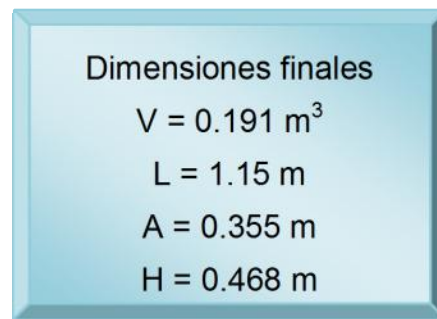
$$0.191 \text{ m}^3 = 3A^2 \times 0.468 \text{ m} \therefore 3A^2 = 0.4081 \text{ m}^2$$

Entonces

$$A^2 = 0.1360 \text{ m}^2 \therefore A = 0.36 \text{ m}$$

$$\text{Si } L = 3A = 3(0.36 \text{ m}) = 1.08 \text{ m}$$

Con base en los cálculos anteriores se obtuvieron las dimensiones de las unidades:



Dimensiones finales

$$V = 0.191 \text{ m}^3$$
$$L = 1.15 \text{ m}$$
$$A = 0.355 \text{ m}$$
$$H = 0.468 \text{ m}$$

Finalmente las unidades quedaron como se muestra en la **Figura V.14**:

El medio impermeabilizante utilizado fue hule para silo, se optó por esta alternativa por la disponibilidad del mismo, en la **Figura V.15** se observan las unidades ya impermeabilizadas.

V.4.3.3. *Conformación del sistema*

Una vez construidas las unidades se procedió a determinar el volumen que ocuparía la grava:

🚩 *Volumen de grava*

$L=1.15$ m $A=0.355$ m $H=0.40$ m Porosidad de 50%

Por lo tanto el volumen de grava (V_G) y el volumen de espacios vacios en la grava (V_E) fueron:

$$V_G=163 \text{ L} \qquad V_E=80 \text{ L}$$

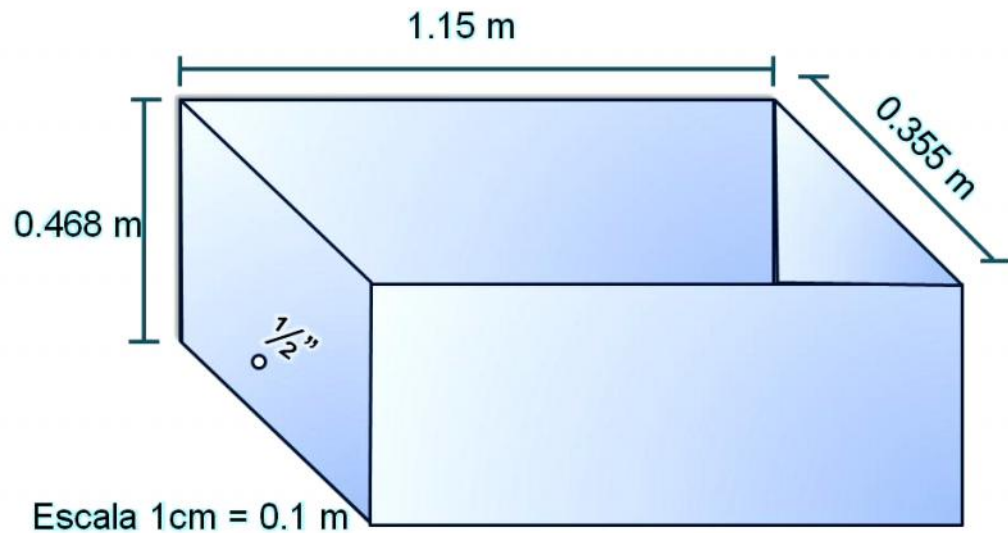


Figura V.14. Dimensiones de las unidades experimentales.

Tres de las unidades quedaron compuestas por 163 L de grava de Nuevo Ideal, dos de las secciones (#1), fueron con grava de tamaño de partícula 3-5 cm, (**Figura V.16**), y la grava de la sección #2 de tamaño de partícula chico (2-6 mm, **Figura V.17**). La grava con tamaño de partícula de 3-5 cm fue empleada con la finalidad de favorecer la conductividad hidráulica, evitar taponamientos dentro del sistema y aumentar así la vida útil del soporte. El diagrama de distribución de las gravas se muestra en la **Figura V.18**. La cuarta unidad se lleno sólo con agua residual y fue utilizada como blanco (**Figura V.19**), para evaluar el efecto de autodepuración de esta.



Figura V.15. Unidades construidas.

El llenado de las unidades con la grava se aprecia en la **Figura V.20**. El siguiente paso fue llenar con agua para humedecer el soporte y plantar los 8 estolones de aproximadamente 20 cm de longitud (**Figura V.21**), la separación de los estolones con respecto a lo largo de la unidad experimental fue de 20 cm aproximadamente, después de la capa de grava mediana, con respecto al ancho fue de 10 cm y una profundidad inicial de 15 cm (**Figura V.22** y **Figura V.23**). En la **Figura V.24** se aprecia el humedal establecido.

V.4.3.4. *Determinación del flujo*

El cálculo del flujo se hizo a partir del volumen de espacio libre en la grava, y con un tiempo de retención hidráulico (TRH) de tres días:

$$\text{TRH}=3 \text{ d} \quad \text{TRH} = V/Q = 18 \text{ mL min}^{-1}$$

Los volúmenes que se manejaron fueron los siguientes:

Volumen total disponible (V_R)=2500 L

Volumen real, dando un margen, para los sedimentos, (V_{ER})=2000 L

Volumen requerido por corrida (V_C)=80 Lx4 unidades= 320 L



Figura V.16. Grava tamaño mediano 3-5 cm

V.4.3.5. Hidráulica

Para la construcción de este sistema se hizo necesario un pequeño diseño hidráulico para proveer de agua a los humedales, tomando en cuenta que el humedal implementado fue de tipo sub-superficial y que el tiempo de retención fue de tres días.

En la construcción del sistema hidráulico se emplearon: tramos de tubería de PVC de $\frac{3}{4}$ ", un contenedor (rotoplas) de 2,500 L soportado, en una base de 1.5 x 1.0 x 1.2 m y un área de aproximadamente 25 m². En la **Figura V.25** se aprecian algunos de los componentes iniciales del sistema.

Inicialmente se planteó establecer regaderas como sistema de distribución del agua residual hacia el humedal, pero al momento de realizar la primera corrida experimental fue notable la variación del flujo, sólo permanecía constante por unas horas (**Figuras V.26 y V.27**). Por lo que se optó por adaptar un sistema

de venoclisis, para controlar el flujo, de 18 mL/min, propiamente un sistema de riego por goteo.



Figura V.17. Grava tamaño pequeño 2-6 mm

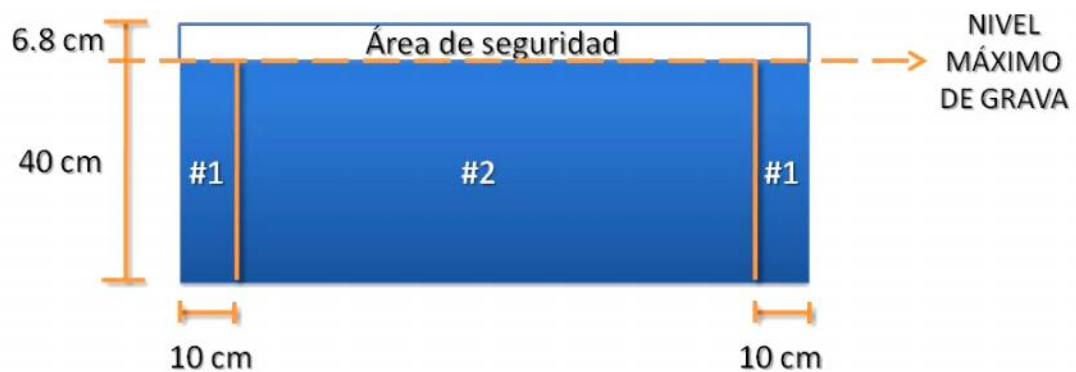


Figura V.18. Distribución de las gravas en las unidades experimentales



Figura V.19. Unidad utilizada como blanco

La válvula del sistema fue abierta proporcionalmente, para lograr que pasara la cantidad de agua necesaria por día (**Figura V.28**). En la **Figura V.29** se observa el sistema de tratamiento instalado.

V.5. Análisis de la información

Con este prototipo se evaluó la eficiencia del humedal en la depuración del agua residual semitratada de la industria láctea, en comparación con la eficiencia de la grava y la capacidad autodepuradora de este tipo de agua residual. Para determinar



si los tratamientos fueron estadísticamente diferentes, se aplicó un análisis de ANOVA. Posteriormente con la finalidad de comparar las medias de los tratamientos y ponderar si sus diferencias son significativas cuando existe variación en uno o más factores se aplicó la prueba de medias Newman-Keuls, ambas a un α de 0.05.

Previo al análisis estadístico se estandarizaron los datos para que fueran comparables. En este caso se trabajó con pH, CE, ST y grasas y aceites, por lo tanto se utilizaron los logaritmos en base 10 para normalizar los datos. Las pruebas estadísticas se realizaron mediante el programa STATISTICA versión 7 (Pérez López, 2006).

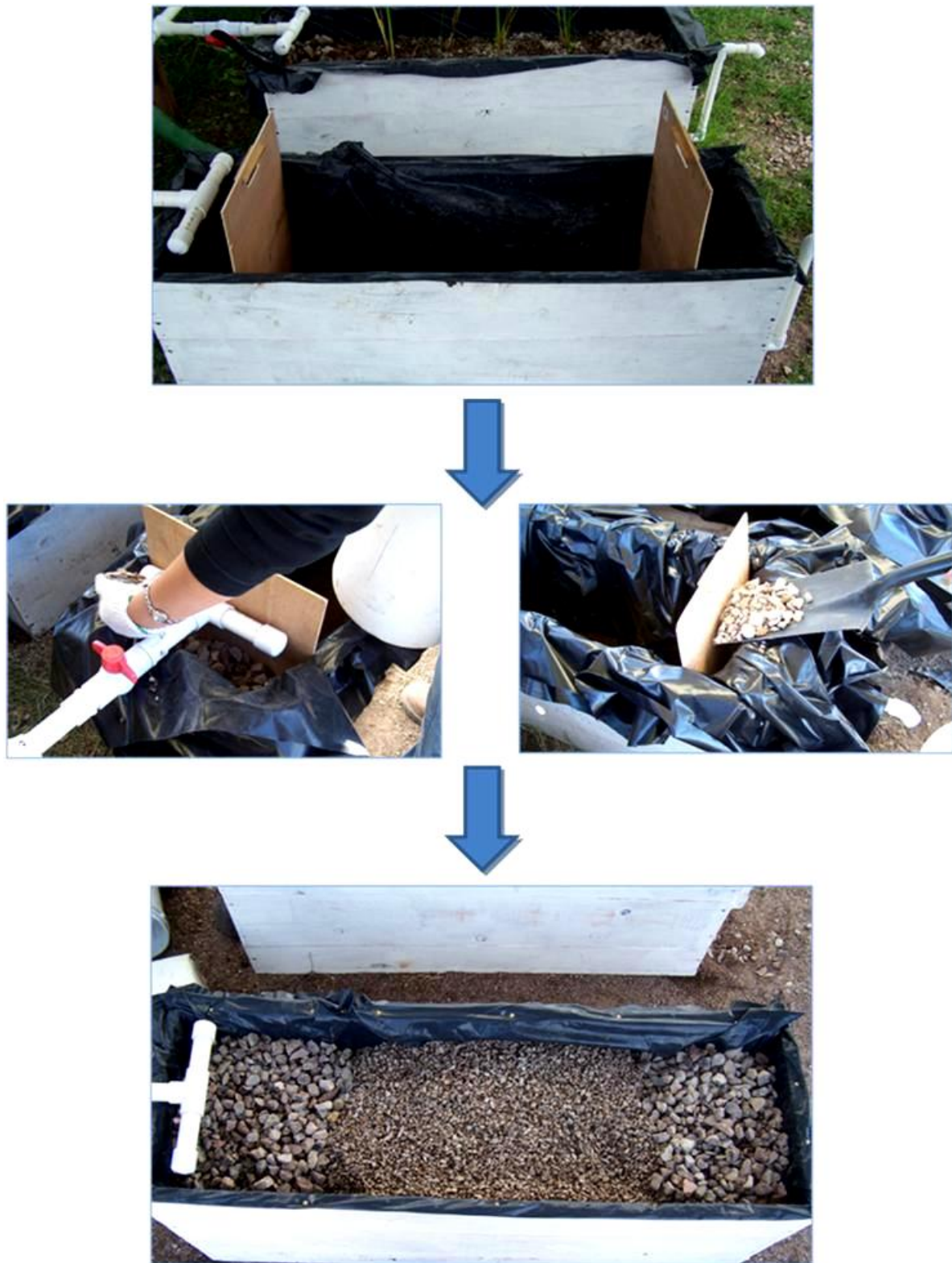


Figura V.20. Conformación de las unidades con soporte

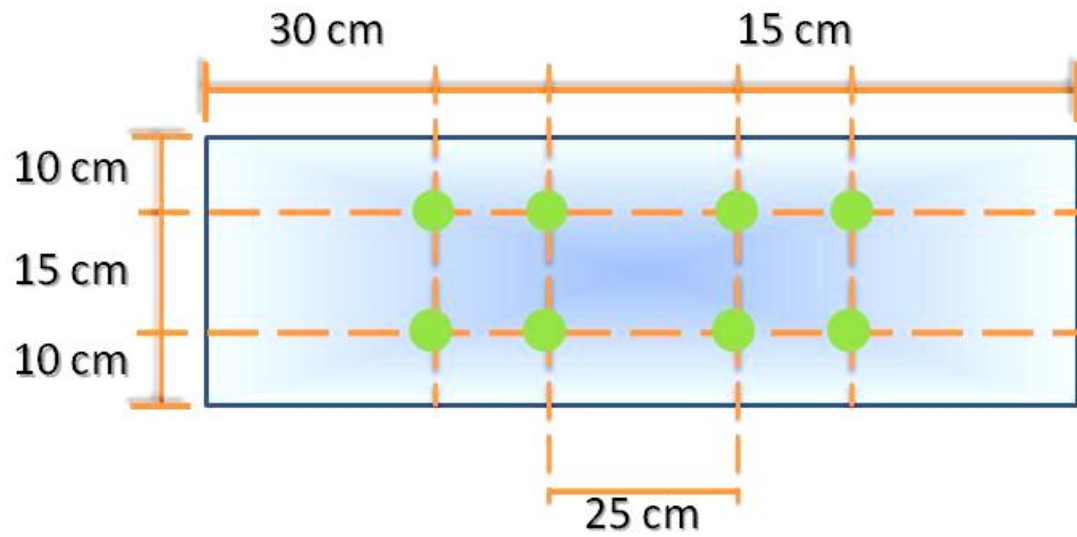


Figura V.21. Distribución de los estolones en el humedal



Figura V.22. Estolones antes de ser plantados



Figura V.23. Estolones plantados a 15 cm de profundidad



Figura V.24. Humedal establecido



Figura V.25. Componentes iniciales del sistema



Figura V.26. Regaderas de distribución al humedal



Figura V.27. Regadera en función



Figura V.28. Instalación del sistema de venocllisis



Figura V.29. Prototipo instalado

CAPÍTULO VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

a) Selección de la especie.

Las unidades experimentales, presentaron modificaciones en la coloración de la matriz acuosa, de un blanco lechoso al inicio del experimento, a un tono rojizo y finalmente a una tonalidad verdosa, conforme pasó el tiempo.

Eleocharis densa no sobrevivió (**Tabla VI.5**) a las condiciones experimentales, en cambio *Schoenoplectus americanus* sí, aún bajo condiciones extremas como lo es el lactosuero (**Figura VI.30**).



Figura VI.30. *Schoenoplectus americanus* en el Puente San Carlos

De acuerdo a los análisis estadísticos, el pH no mostró diferencias significativas ($F=0.35$ y $p=0.9355$); entre los tratamientos, **Tabla VI.6**, solo cambios temporales producto de la degradación natural del lactosuero, como faltó un blanco sin grava, no se sabe si estos cambios los ocasionó la grava, lo que queda claro es que las plantas no tuvieron ningún efecto sobre los cambios de pH en el tiempo.

Tabla VI.5. Supervivencia de las plantas

Planta	LP	L-AD	B
Schoenoplectus A.	SOBREVIVIÓ	SOBREVIVIÓ	SOBREVIVIÓ
Eleocharis D.	NO SOBREVIVIÓ	NO SOBREVIVIÓ	SOBREVIVIÓ

Tabla VI. 6. Prueba de medias Newman-Keuls para la variable pH, a un $\alpha=0.05$.

Líquido Planta	LP	L-AD	B
Schoenoplectus A.	4.1 (± 0.25) a	3.96 (± 0.31) a	1.07 (± 0.08) a
Eleocharis D.	4.15 (± 0.27) a	4.57 (± 0.23) a	1.65 (± 0.23) a
Grava sola	4.45 a	4.06 a	2 a

Se evaluaron las diferencias entre el pH inicial y el pH final.
 Media (\pm Desviación estándar), donde no se indica, es porque es despreciable la diferencia.
 Letras iguales indican que las diferencias no son significativas

Las diferencias encontradas para CE, fueron significativas ($F=4$), fue menor en las unidades con *Schoenoplectus americanus* y en los tratamientos sin planta la disminución fue mayor, lo cual se observa en el **Tabla VI. 7**, con un promedio de 0.9, 0.1 y 2.24 mS cm^{-1} para los tratamientos SAC, SAM y BC respectivamente (para ver la descripción de los tratamiento ver **Tabla V.1**). Los datos originales se encuentran en el **Anexo X.1**



Tabla VI. 7. Prueba de medias Newman-Keuls para la variable CE, en mS cm^{-1} , a un $\alpha=0.05$.

Líquido Planta	LP	L-AD	B
Schoenoplectus A.	0.87 (± 2) a	-0.12 (± 0.25) a	173 (± 55) ab
Eleocharis D.	4 (± 3.5) b	1.8 (± 1320) ab	140 (± 1) ab
Grava sola	-2.24 a	931 (± 1) ab	8 (± 1) ab

Se evaluaron las diferencias entre el pH inicial y el pH final.
Media (\pm Desviación estándar), donde no se indica, es porque es despreciable la diferencia.
Letras iguales indican que las diferencias no son significativas

b) Evaluación del soporte.

Granulometría. Los resultados se encuentran en el **Tabla VI.8**. Los materiales presentan fracciones que van de <2.5 a 10.5 mm, donde la fracción dominante fue el tamaño 6.5.

Tabla VI.8. Granulometría de los tres tipos de soportes (% en peso)			
Tamaño (mm)	NI	D	Z
<2.5	1	-	1
2.5	44	34	10
6.5	51	60	54
8.5	3	4	15
10.5	1	2	20

Porosidad. Los tres tipos de soporte presentan una porosidad que está entre el 50 y 60% (**Tabla VI.9**). Con respecto a la densidad, ambas gravas trituradas de río la presentan por encima de 1g mL^{-1} , en cambio la zeolita presenta valores de 0.7-0.8 g mL^{-1} .

Tabla VI.9. Porosidad y densidad de los tres tipos de soporte

Tamaño (mm)	NI		D		Z	
	Densidad g/mL	Porosidad %	Densidad g/mL	Porosidad %	Densidad g/mL	Porosidad %
2.5	1.12	51	1.21	52	0.78	60
6.5	1.23	50	1.24	5	0.82	58
8.5	1.23	51	1.22	51	0.81	59

Capacidad de adsorción. Las constantes obtenidas de la construcción de las ecuaciones de Langmuir, se encuentran en la **Tabla VI.10**. Los valores de $x m^{-1}$, fueron calculados a través de las Ec. 3, considerado como valor C_e 20 mg L⁻¹ de fósforo soluble (FS), que corresponde al límite máximo permisible para descarga en ríos que son usados para riego agrícola según lo marcado por la NOM-001-SEMARNAT-1996, ya que para descarga en suelo este parámetro no aplica.

Tabla VI.10. Constantes determinadas de las ecuaciones de Langmuir.

Tamaños	Tipos de soporte								
	NI			D			Z		
	a	b	$x m^{-1}$	a	b	$x m^{-1}$	a	b	$x m^{-1}$
A	0.0120	-0.0115	-0.0036	-0.0065	-0.0081	0.0013	0.5687	0.2275	0.4663
	0.0090	-0.0110	-0.0025	-0.0098	-0.0084	0.0020	0.1165	-0.0489	-5.2219
	0.0024	-0.0102	-0.0006	0.0132	-0.0177	-0.0073	0.0805	-0.0462	-0.9667
B	0.0110	-0.0117	-0.0033	0.0010	0.0095	0.0002	1.2280	0.0342	0.4989
	0.0061	-0.0105	-0.0016	-0.0011	-0.0092	0.0003	0.5939	0.2529	0.4958
	0.0026	-0.0100	-0.0006	0.0062	0.0112	0.0011	1.1030	0.0346	0.4514
C	0.0044	-0.0102	-0.0011	-0.0109	-0.0101	0.0028	0.1814	-0.0460	-2.0868
	0.0566	-0.0216	-0.0432	-0.0038	-0.0124	0.0012	0.1657	-0.0456	-1.6969
	-0.2246	-0.0029	0.0141	-0.0067	-0.0081	0.0013	0.1148	-0.0646	0.5079

a = fuerza de atracción, entre el sorbato y el adsorbente; b = capacidad de retención de adsorbente por el sorbato.

De acuerdo a los valores obtenidos, el soporte que presenta la mayor capacidad de retención de FS es la zeolita, en el tamaño C (0.5079); que transformado a mg Kg⁻¹ da un valor de 507.9 mg de FS por Kg de zeolita



Las diferencias encontradas no son estadísticamente significativas para la relación $x \text{ m}^{-1}$ [cantidad de adsorbato (FS) por unidad de adsorbente (soporte)]. Esto puede deberse, a que la concentración de sales en la solución, saturó rápidamente los espacios disponibles del soporte, derivando en un baja o nula tasa de remoción de fósforo. Los datos originales se encuentran en el **Anexo X.2**

Diferencias en pH, la CE y el FS para las relaciones 0.66:1 y 0.33:1 entre agua y grava NI y D, para Z fue de 0.5:1 y de 1:1. Estas se realizaron considerando los volúmenes utilizados en los humedales de tipo subsuperficial que son dos de grava por uno de agua.

Las diferencias en pH, fueron significativas ($F=155$), al igual que para CE ($F=72$) y FS ($F=22534$); lo cual indica que bajo las condiciones que se realizó el experimento, las respuestas de estos parámetros se ven afectadas por el tipo de soporte. Donde la Z fue la de mejor resultado (mayor pH), ver **Tabla VI. 11**. Con respecto a la CE, el soporte que presentó el mejor resultado fue la NI (menor CE, **Tabla VI.12**).

Por otro lado, con respecto a la cantidad de soporte, las diferencias sólo fueron significativas para FS ($F=7717$), es decir, la modificación en la concentración de FS en la solución, fue afectada también por la cantidad de soporte que se empleó. En el cual, la que presentó mejor resultado fue el tratamiento 80g.

Tabla VI.11. Prueba de medias Newman-Keuls para pH, a un $\alpha=0.05$.			
Cantidad de grava (g)	Tipos de soporte		
	<i>NI</i>	<i>D</i>	<i>Z</i>
40	6.3 a	5.9 c	7.2 (± 0.23) b
80	6.4 (± 0.17) a	6.1 a	7.3 (± 0.14) b

Media (\pm Desviación estándar), donde no se indica, es porque es despreciable la diferencia. Letras iguales indican que las diferencias no son significativas.

Los datos originales se encuentran en el **Anexo X.3**

Tabla VI.12. Prueba de medias Newman-Keuls para la variable CE (mS cm^{-1}), a un $\alpha=0.05$.			
Cantidad de grava (g)	Tipos de soporte		
	<i>NI</i>	<i>D</i>	<i>Z</i>
40	7.3 a	7.5 a	7.7 b
80	7.2 (± 0.12) c	7.5 a	7.7 b

Media (\pm Desviación estándar), donde no se indica, es porque es despreciable la diferencia. Letras iguales indican que las diferencias no son significativas.

c) Evaluación del prototipo

En la instalación del sistema se emplearon la planta y el soporte seleccionados en las secciones anteriores. Los resultados en eficiencia y funcionalidad son variados, de acuerdo a la base que se utilizó para evaluarlo, a continuación se describen algunas de las justificaciones empíricas de las condiciones dadas y los datos arrojados

pH (Figura 31): Se observó que tanto en el afluente como el blanco no existió una variación significativa estadísticamente, esto comprueba que una laguna de oxidación no sería un método adecuado para tratar este tipo de agua residual debido a la cantidad de lactosuero que contiene. En cambio en lo que corresponde a la grava y la planta 1, los resultados fueron favorables, ya que se elevó el pH favoreciendo la degradación de los contaminantes del agua residual. Al evaluar las condiciones que persistieron, se deduce que probablemente lo que originó estos cambios, en las últimas 2 unidades, fue la exposición al sol: ya que al ubicar el sistema la orientación quedo de manera que a estas unidades recibieron más energía solar.

El comportamiento del pH, para los 3 tiempos fue similar sólo que fue descendiendo. En estos sistemas es común que pase esto, porque el afluente con que se trabajó se

encontraba almacenado y con el paso del tiempo, el pH bajó y se mantuvo ácido, debido a la descomposición de la lactosa en ácido láctico, entre otros productos.

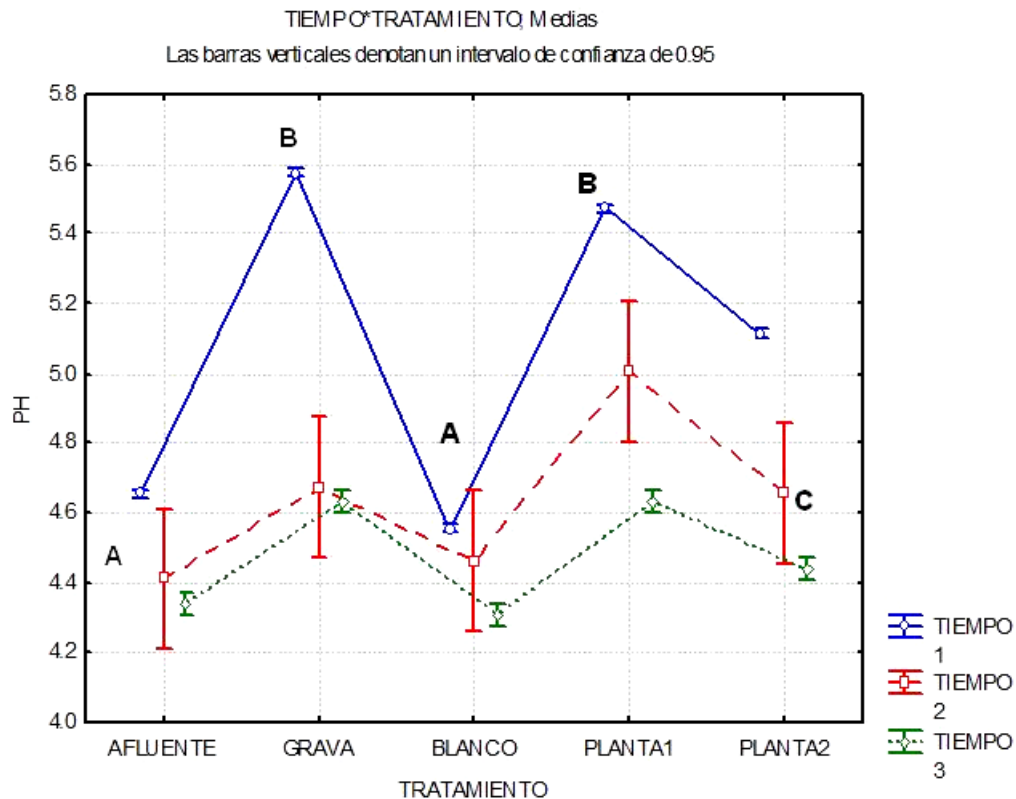


Figura VI.31. Gráfico de resultados de la variable pH

C.E. (Figura 32): El comportamiento de la C.E., en los tres tiempos fue similar, las unidades con grava y la planta 1 tendieron a aumentar en mayor proporción. Lo que pudo estar ocasionando este suceso la exposición al sol de estas 2 unidades.

S.T. (Figura 33): La respuesta de la unidad de grava en relación a sólidos totales se puede fundamentar en la hipótesis de que existió crecimiento de algas que elevaron los S.T. Para el tratamiento planta 1 se esperaba un comportamiento similar, no lo fue, por tal motivo se sugiere que se realizaran más corridas experimentales para corroborar la información y afianzar la veracidad de la hipótesis que se formuló.

Grasas y aceites: La eficiencia promedio del desnatador fue del 65%. Las eficiencias de remoción de las unidades experimentales, no mostraron diferencias significativas, esto pudo deberse a que los sistemas empleados y el tiempo de retención hidráulico del sistema favorecieron la flotación de las grasas.

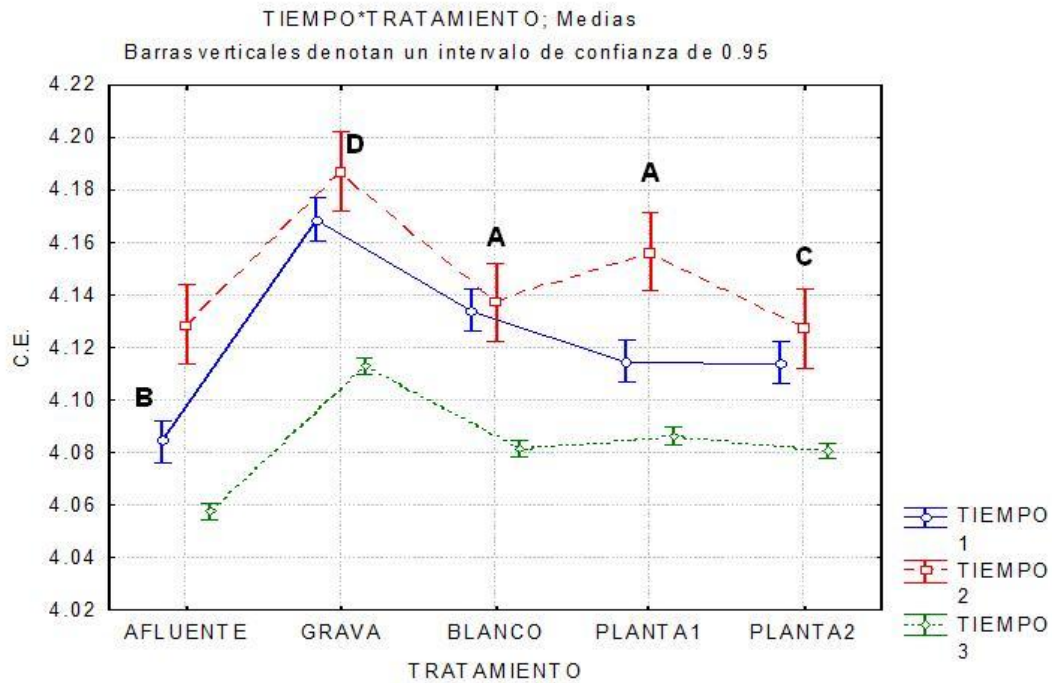


Figura VI.32. Gráfico de resultados con respecto a la variable CE

Resultados generales (Figura 34): Se muestra una panorámica general del comportamiento del sistema, con relación a tiempo de evaluación, tratamientos y parámetros evaluados. Donde claramente se observa que el parámetro que más rango de variabilidad tuvo fue el pH.

La diferencia entre los tres tiempos fue solo que el pH va disminuyendo conforme pasa el tiempo.

Los tiempos 1, 2 y 3 se refieren a las fechas de muestreo que son: TIEMPO1: 12 de Nov., TIEMPO 2: 16 de Nov. y TIEMPO 3: 20 de Nov.

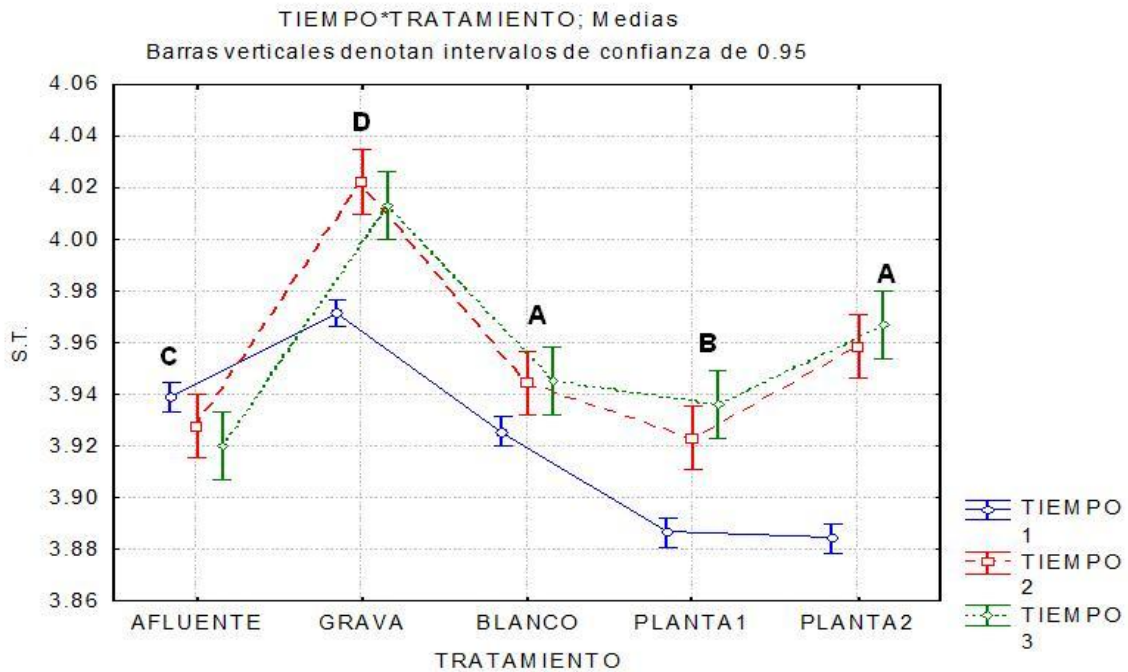


Figura VI.33. Gráfico de resultados para ST

En la **Tabla VI.13** se resumen los resultados de los tratamientos, en base a sus diferencias significativas estadísticamente, que se representan con las diferentes literales que se ilustraron en los gráficos.

Tabla VI.13. Resultados estadísticos de los tratamientos.						
Tratamiento	pH	Clasificación	C.E.	Clasificación	S.T.	Clasificación
AFLUENTE	4.46	A	4.09	B	3.928	C
GRAVA	4.96	B	4.156	D	4.002	D
PLANTA 1	5.03	B	4.119	A	3.915	B
PLANTA 2	4.73	C	4.117	C	3.938	A
BLANCO	4.44	A	4.107	A	3.936	A

Letras iguales indican que las diferencias no son significativas.

En la **Figura VI.35** se aprecia el cambio notable en la coloración del agua, al comparar el efluente del blanco con el de planta 2.

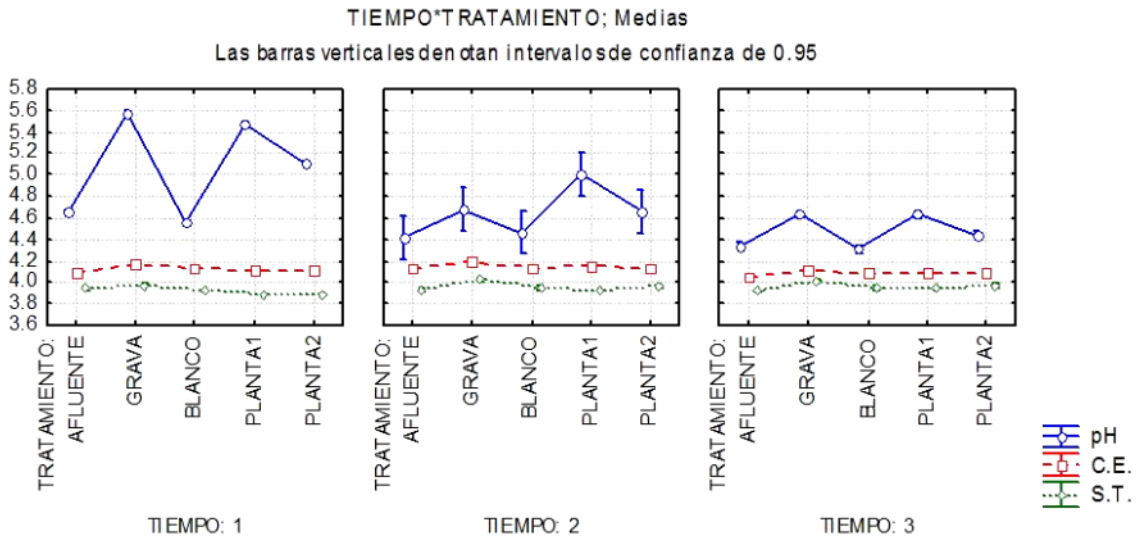


Figura VI.34. Resultados de los tres parámetros evaluados



Figura VI.35. Efluente tratado de las unidades blanco (izquierda) y planta 2 (derecha).



CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES

Con base a los resultados alcanzados se obtuvieron las siguientes conclusiones

a) Selección de la planta.

La mejor opción fue *Schoenoplectus americanus*, ya que fue la que sobrevivió a los tratamientos a los que fue sometida. Presentó una disminución en la CE aunque no tan favorable como la de la grava sola.

b) Soporte.

De acuerdo con los resultados obtenidos y los costos que se tendrían en el transporte del soporte de un municipio a otro, se concluye que la grava triturada de río del municipio de Nuevo Ideal (NI) es la adecuada para el establecimiento de humedales artificiales.

c) Humedal subsuperficial a nivel Prototipo

Se considera que el sistema de humedales es una alternativa viable para el tratamiento de efluentes de la industria láctea, ya que es un sistema económico, práctico y funcional, además da una mejor apariencia al paisaje, con la mínima modificación del ambiente.

- Con respecto a pH y CE los tratamientos con mejor respuesta fueron grava y planta 1, se deduce que posiblemente se debe a la exposición a la luz solar en mayor proporción que los demás tratamiento.
- El parámetro con más rango de variabilidad significativa fue el pH, por el tipo de sistema que se utiliza y el comportamiento que refleja con respecto al tiempo de almacenamiento, cuando se trata de este tipo de agua residual.
- En cuanto a grasas y aceites, la eficiencia del desnatador (65%) es similar a la obtenida por Saucedo (57%) en 2007. Con respecto a las unidades experimentales, las eficiencias no mostraron diferencias significativas, esto



pudo deberse a que el tiempo que permanece el agua en las unidades experimentales (3 días) y el tipo de sistemas empleados, favorece la flotación de las grasas que restantes.



CAPÍTULO VIII. RECOMENDACIONES

- Se recomienda el uso de la zeolita en una pequeña sección, al inicio del humedal, siempre y cuando se encuentren yacimientos de este material, con características similares, cerca del lugar donde se pretende instalar el humedal.
- Utilizar geomembrana³ como medio impermeabilizante, ya que es más resistente al trato rudo.
- Que las unidades no sean construidas con madera ya que si por algún motivo existen fugas, éstos tenderán a deformarse con mayor facilidad y su vida útil será menor.
- El implementar mangueras de venoclisis es una buena opción para el control de flujos pequeños y es una de las alternativas más precisas que existen.
- El uso de bombas sumergibles para aligerar el trabajo de desalojo de los recipientes que contienen el efluente.
- Es importante no pasar por alto lo referente a la nivelación del sistema, ya que si no se cuenta con un sistema nivelado se verá seriamente reflejado en los resultados.
- Otra opción para mantener la presión en el sistema podría ser la adaptación de un contenedor antes de distribuir el agua a las unidades. En el cual se añadiría un flotador para mantener el nivel del contenedor y por ende la velocidad.
- Para obtener mejores resultados se recomienda aumentar el tiempo de retención hidráulica.

³ Geomembrana: es un tipo de plástico muy resistente que se utiliza para impermeabilizar los rellenos sanitarios.



CAPÍTULO IX. BIBLIOGRAFÍA

CRITES, R.; Tchobanoglus G. 1998. Wetlands and Aquatic Treatment Systems en Small and Decentralized Wastewater Management Systems. McGraw-Hill. Estados Unidos de América. p p 563-640 p 666.

DEKESER, E. S., Kirby, D. R., Ell M. J. 2003. An index of plant community integrity: development of the methodology for assessing prairie wetland plant communities. ELSERVIER. Ecological Indicators 3 119-133.

ETCHEVERS, B. J. D. 1992. Manual de Métodos para análisis de suelos, plantas, aguas fertilizantes. Análisis rutinarios en estudios y programas de fertilidad. Laboratorio de Fertilidad, Centro de Edafología. Colegio de Posgraduados en Ciencias Agrícolas, Montecillo, Estado de México. p. 50

EVANGELOU, V. P. 1998. Environmental soil and water chemistry. Principles and Applications. Wiley Inter-Science. 605 Third Avenue Nex York, N. Y. p 483.

FARHINA, J. C., Costa, L. T. Zalidis G., Mantzave A., Fitoka, N., Hecker N. & Tomàs Vives P. 1996. Mediterranean Wetland Inventory: Habitat Description System. Volume III. Instituto da Conservacao da Natureza, Wetlands International, Greek Biotope / Wetland Center.

FRANCE, R. L. 2003. Wetland design Ed. W. W: Norton. pp 11-23.

IBEKWE, A. M., Grieve, C. M., Lyon, S. R. 2003. Characterization of microbial communities and composition in constructed dairy wetland wastewater effluent. Applied and Environmental microbiology. September. p. 5059-5060. Vol. 69, No. 9

LARA, B., J. A. 1999. Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales. Tesis para obtener el grado de máster de la Universidad Politécnica de Cataluña y el Instituto Catalán de Tecnología 114. Capítulo 2, pp.6-17

LAHORA, A. 2001 "Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La Edar de los Gallardos (Almería)". Gestión de Aguas del Levante Almeriense, S. A. GALASA. www.almeidam.org/PDF/humedales_17.pdf



LESIKAR B. y Enciso J. 2002. Sistemas individuales para el tratamiento de aguas negras. Cooperativa de Texas. Extensión. El Sistema Universitario Texas A&M. L-5230S 4-02.

LUNA P., V. M y Ramírez C., H. F. 2004. Medios de soporte alternativos para la remoción de fósforo en humedales artificiales. Revista de la Contaminación Ambiental. Enero-marzo año/vol. 20, número 001. Universidad Autónoma de México, D. F., México. pp 31-38.

MARTÍNEZ C., P.; Hernández M., A.; Soto C., R.; Esquivel H., A.; Rangel L., J. 2006. Use of constructed wetlands for the treatment of water from an experimental channel at Xochimilco, Mexico. Hidrobiológica. Diciembre, año/vol. 16, número 003. Universidad Autónoma Metropolitana- Iztapalapa. D. F. México. pp. 211-218.

METCALF & EDDY. 2003. *Wastewater Engineering @ Treatment and Reuse*; 4a edition. McGraw-Hill. pp 1138-1149.

NEMEROW, N. L.; Dasgupta, A. 1998. Tratamiento de Vertidos Industriales y Peligrosos. Editorial Días de Santos. pp 447-452.

NMX-AA-SCFI-2001. Normas mexicanas que especifican las técnicas de determinación de algunos parámetros fisicoquímicos necesarios para evaluar la calidad del agua.

NOM-001-SEMARNAT-1996. Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de Enero de 1997. D. F.

PÉREZ L., M. E. 2006. Selección de plantas acuáticas para establecer humedales en el Estado de Durango. Tesis doctoral del Centro de Investigación en Materiales Avanzados.

PÉREZ L., M. E. 2008. "Selection of waste-water tolerant aquatic native macrophytes of Durango, México, for the construction of artificial wetlands". Conocimiento botánico en la Gestión Ambiental y el Manejo de Ecosistemas y 2° Simposio Botánico del



Norte de México. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional. Durango, Dgo. México, del 13 al 15 de Septiembre.

SÁNCHEZ, S. C., A y García, R. 1999. Biomonitorio de Ríos en la Gestión de Cuencas.; Una aproximación introductoria. IX Congreso Nacional de Irrigación. Simposio 4 Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas. Culiacán, Sinaloa, del 27 al 29 de octubre de 1999. pp. 63-71

SAUCEDO, C. G. L. 2007. Dimensionamientos de un tanque de amortiguamiento para separar sólidos sedimentables y grasa del agua residual de una quesería menonita. Residencia Profesional del Instituto Tecnológico de Durango.

SHMIDT-MUMM, U. 1998. Vegetación acuática y palustre de la sabana de Bogotá y plano inundable del río Ubaté: Ecología y taxonomía de la flora acuática y semiacuática. Trabajo de grado para optar por al título de Magíster en Biología, Universidad Nacional de Colombia, 181p.

Standard Methods for examination of water and wastewater. 1995. Edited by Eaton A. D., Clesceri L. S., Greenberg A. E. 19th edition. APHA, AWWA, WEF.

STOTTMEISTER U., Wießner A., Kusch P., Kappelmeyer U., Kästner M., Bederski O., Müller R. A., Moormann H. 2003. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. ELSEVIER. Biotechnology Advances 22 93-117

TALAMANTES, E. N. G. 2008. Alternativas de remediación de un suelo contaminado con ácidos grasos de origen lácteo. Residencia Profesional del Instituto Tecnológico de Durango.

VILLAGRANA, A. C. A. 2007. Evaluación del impacto ocasionado al suelo por la descarga del agua residual de la Industria Quesera Menonita. Residencia Profesional del Instituto Tecnológico de Durango.



CAPÍTULO X. ANEXOS



X.1.ANEXO 1. Datos obtenidos durante el desarrollo del ensayo de susceptibilidad.

Tabla X. 14. Promedio de pH, por tratamiento, obtenidos del ensayo de susceptibilidad							
Tratamientos	Día 0	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 6	Día 45
B	6.90	7.18	6.89	7.29	7.40	7.91	8.90
B-M	3.99	4.06	4.14	4.23	4.35	4.69	8.05
B-C	3.78	3.80	3.86	4.61	3.98	4.03	8.23
SA-B	7.13	7.19	7.25	7.58	7.22	7.83	8.20
ED-B	7.07	7.01	7.20	7.56	7.24	7.88	8.72
SA-M	3.97	4.08	4.25	4.94	4.82	5.64	7.93
ED-M	3.95	3.94	4.16	4.61	4.43	4.87	8.51
SA-C	3.79	3.73	3.99	4.23	4.04	4.17	7.89
ED-C	3.81	3.76	3.95	4.05	3.99	4.06	7.96

Tabla X.15. Promedio de CE en mS cm^{-1} por tratamiento, obtenidos del ensayo de susceptibilidad							
Tratamientos	Día 0	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 6	Día 45
B	0.35	0.35	0.35	0.35	0.34	0.38	0.43
B-M	4.63	4.88	4.73	4.80	4.80	5.66	5.56
B-C	13.25	13.85	13.57	13.84	13.81	16.58	11.01
SA-B	0.36	0.39	0.40	0.43	0.45	0.51	0.53
ED-B	0.35	0.37	0.36	0.35	0.35	0.38	0.49
SA-M	5.12	5.43	5.40	5.52	5.54	6.58	5.00
ED-M	5.09	5.39	5.34	5.36	5.40	6.26	6.90
SA-C	13.19	14.04	13.65	14.05	13.71	16.48	12.32
ED-C	13.28	13.94	13.54	14.06	13.88	16.10	17.26



X.2.ANEXO 2. Datos obtenidos en el desarrollo de la primera fase del experimento con los soportes. Ecuaciones de Langmuir.

X.2.1. GRAVA DE NUEVO IDEAL

Tabla X.16. Valores de pH y fósforo soluble obtenidos en la Fase 1 de las selección del soporte.

Tamaño de grava	Cantidad de grava (g)	# ID	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 7	FS
A	5	1	5.29	5.31	5.44	5.34	5.42	114.12
	10	2	5.48	5.5	5.63	5.53	5.63	111.63
	15	3	5.57	5.64	5.72	5.65	5.73	104.38
	20	4	5.67	5.74	5.83	5.78	5.85	98.92
	5	5	5.39	5.47	5.57	5.54	5.58	114.36
	10	6	5.43	5.46	5.56	5.49	5.55	112.41
	15	7	5.54	5.59	5.7	5.61	5.7	101.26
	20	8	5.59	5.65	5.75	5.67	5.74	100.56
	5	9	5.27	5.34	5.44	5.36	5.41	107.81
	10	10	5.43	5.47	5.59	5.49	5.57	116.07
	15	11	5.51	5.58	5.68	5.58	5.67	99.70
	20	12	5.63	5.7	5.79	5.73	5.8	96.98
B	5	13	5.28	5.34	5.4	5.32	5.35	114.43
	10	14	5.41	5.43	5.55	5.41	5.53	112.72
	15	15	5.63	5.69	5.82	5.74	5.84	103.68
	20	16	5.54	5.6	5.69	5.62	5.69	91.36
	5	17	5.27	5.35	5.45	5.36	5.43	115.06
	10	18	5.47	5.54	5.66	5.54	5.67	104.54
	15	19	5.53	5.57	5.71	5.62	5.71	101.42
	20	20	5.61	5.7	5.81	5.71	5.79	98.85
	5	21	5.29	5.35	5.45	5.37	5.43	115.92
	10	22	5.41	5.48	5.61	5.48	5.59	114.33
	15	23	5.45	5.5	5.62	5.5	5.6	109.45
	20	24	5.56	5.58	5.67	5.59	5.68	101.73
C	5	25	5.15	5.2	5.26	5.17	5.22	115.29
	10	26	5.27	5.25	5.39	5.26	5.5	105.32
	15	27	5.36	5.37	5.49	5.39	5.55	104.15
	20	28	5.44	5.45	5.56	5.47	5.2	101.34
	5	29	5.13	5.14	5.27	5.15	5.21	110.77
	10	30	5.26	5.25	5.4	5.25	5.4	107.89
	15	31	5.38	5.36	5.53	5.44	5.5	103.21
	20	32	5.48	5.51	5.66	5.56	5.64	91.37
	5	33	5.14	5.16	5.3	5.21	5.27	109.63
	10	34	5.32	5.32	5.47	5.37	5.45	108.43
	15	35	5.32	5.36	5.49	5.41	5.51	100.17
	20	36	5.34	5.38	5.52	5.39	5.5	99.78



Tabla X.17. Valores de CE obtenidos en la Fase 1 de la selección del soporte.

Tamaño de grava	Cantidad de grava (g)	# ID	Día 0	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 7
A	5	1	8.18	8.03	8.05	7.88	7.98	7.9
	10	2	8.18	8.06	8.1	7.91	7.94	7.94
	15	3	8.18	8.7	8.11	7.97	7.82	7.97
	20	4	8.18	8.16	8.12	7.95	7.92	7.98
	5	5	8.18	8.16	8.03	7.99	7.87	8.05
	10	6	8.18	8.14	8.12	7.99	7.83	8.02
	15	7	8.18	8.06	7.84	7.7	7.75	7.67
	20	8	8.18	8.22	8.22	8.18	8.15	8.18
	5	9	8.18	8.12	8.04	8.05	7.95	8.06
	10	10	8.18	8.11	8.07	8.01	7.94	8.03
	15	11	8.18	8.09	8.05	7.98	7.9	8.01
	20	12	8.18	8.11	8.02	7.97	7.89	8
B	5	13	8.18	8.13	8.11	8.04	7.95	8
	10	14	8.18	8.15	8.09	8.04	7.93	8.05
	15	15	8.18	8.14	8.07	8.02	7.9	8
	20	16	8.18	8.16	8.12	8.08	7.97	8.06
	5	17	8.18	8.15	8.05	7.99	7.92	8.05
	10	18	8.18	8.08	8.03	7.98	7.9	7.99
	15	19	8.18	8.1	8.04	8.02	7.98	8.05
	20	20	8.18	8.16	8.1	8.01	7.96	8.02
	5	21	8.18	8.15	8.08	8.04	7.96	8.02
	10	22	8.18	8.15	8.08	8.01	7.98	8
	15	23	8.18	8.1	8.08	7.98	7.98	7.96
	20	24	8.18	8.1	8.08	7.99	8	7.97
C	5	25	8.18	8.11	8.13	8.04	7.95	8.08
	10	26	8.18	8.11	8.05	7.96	7.91	7.96
	15	27	8.18	8.13	8.08	7.95	7.95	7.97
	20	28	8.18	8.11	8.07	7.96	7.97	7.96
	5	29	8.18	8.1	8.11	8.02	8	8.08
	10	30	8.18	8.1	8.07	7.99	7.95	7.96
	15	31	8.18	8.11	8.08	7.97	7.91	7.96
	20	32	8.18	8.13	8.07	7.96	7.92	7.99
	5	33	8.18	8.12	8.11	7.98	7.95	8.01
	10	34	8.18	8.09	8.09	7.98	7.99	7.99
	15	35	8.18	8.1	8.06	7.97	7.93	8.01
	20	36	8.18	8.13	8.06	7.94	7.9	7.92

X.2.1.1. Ecuaciones de Langmuir

Tamaño de partícula: A

Corrida # 1

Tabla X.18. Resultados de la primera corrida del ensayo de adsorción del soporte NI, tamaño A.

Co	Ce	x (Co-Ce)	m grava (g)	x m ⁻¹ (mg g ⁻¹)	Ce (x/m) ⁻¹
116.681338	116.681338	0	0	-	-
116.681338	114.123149	2.55818916	5	0.05116378	2230.54555
116.681338	111.628995	5.05234348	10	0.05052343	2209.44983
116.681338	104.380359	12.3009795	15	0.08200653	1272.82984
116.681338	98.9243959	17.7569421	20	0.08878471	1114.20531

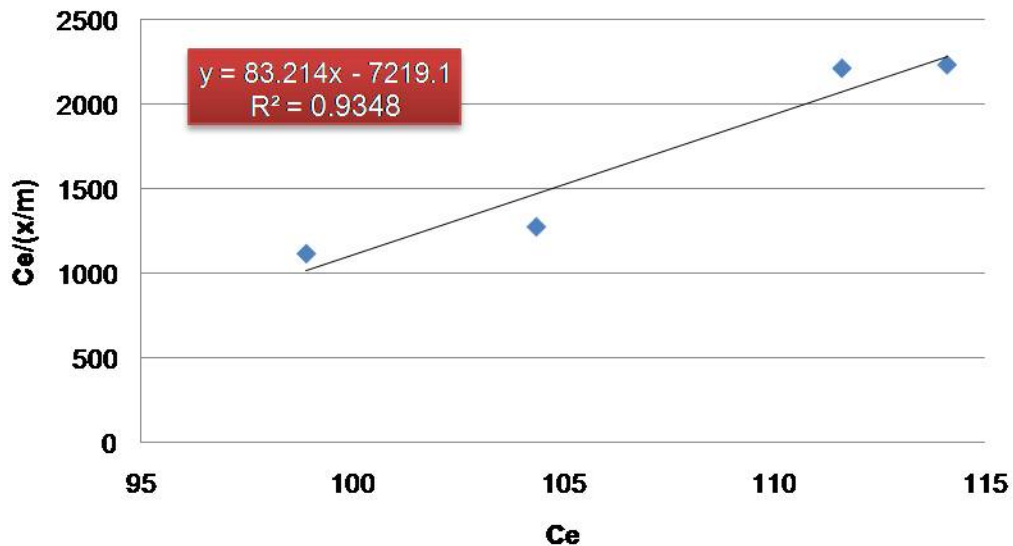


Figura X.36. Primera ecuación de Langmuir para grava NI en tamaño A

Tabla X. 19. Cálculo de las constantes de la Figura X.36.

$y = Ce/(x/m)$	
$1/ab = -7219.1$	$b = -0.01152692$
$1/a = 83.214$	$a = 0.01201721$

Corrida # 2

Tabla X.20. Resultados de la segunda corrida del ensayo de adsorción del soporte NI, tamaño A.

Co	Ce	x (Co-Ce)	m grava (g)	$x m^{-1} (mg g^{-1})$	$Ce (x/m)^{-1}$
116.681338	116.681338	0	0	-	-
116.681338	114.356976	2.32436219	5	0.04648724	2459.96464
116.681338	112.408418	4.27292026	10	0.0427292	2630.71649
116.681338	101.262666	15.4186724	15	0.10279115	985.130201
116.681338	100.561185	16.1201533	20	0.08060077	1247.64551

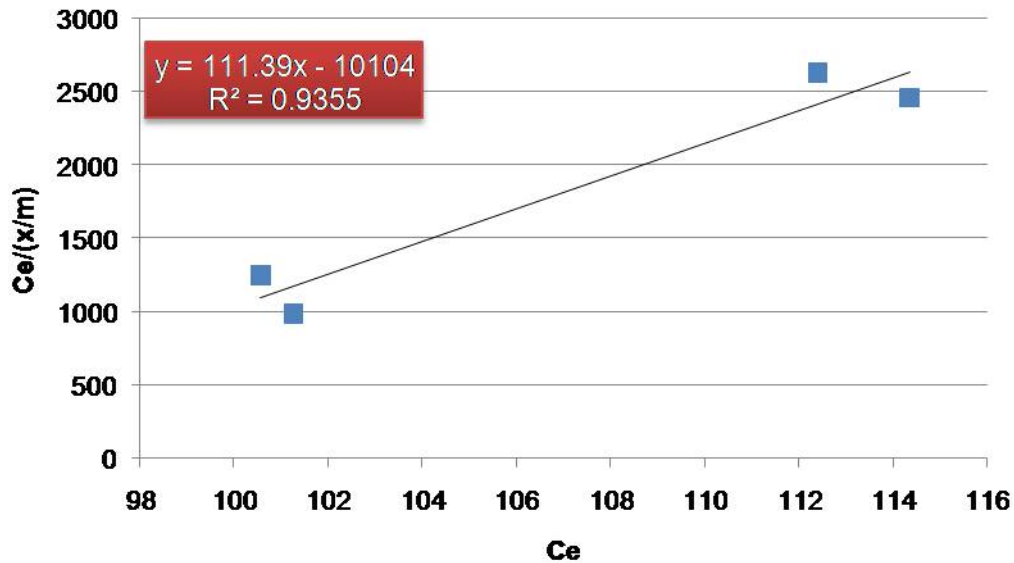


Figura X.37. Segunda ecuación de Langmuir para grava NI en tamaño A

Tabla X.21. Cálculo de las constantes de la Figura X.37.

$$y = Ce/(x/m)$$

$1/ab = -10104$	$b = -0.01102435$
$1/a = 111.39$	$a = 0.00897747$

Corrida # 3

Tabla X.22. Resultados de la tercera corrida del ensayo de adsorción del soporte NI, tamaño A.

Co	Ce	x (Co-Ce)	m grava (g)	x m ⁻¹ (mg g ⁻¹)	Ce (x/m) ⁻¹
116.681338	116.681338	0	0	-	-
116.681338	116.071707	0.60963109	5	0.01219262	9519.83163
116.681338	107.809821	8.8715173	10	0.08871517	1215.23542
116.681338	99.7038192	16.9775189	15	0.11318346	880.904507
116.681338	96.9758379	19.7055001	20	0.0985275	984.251474

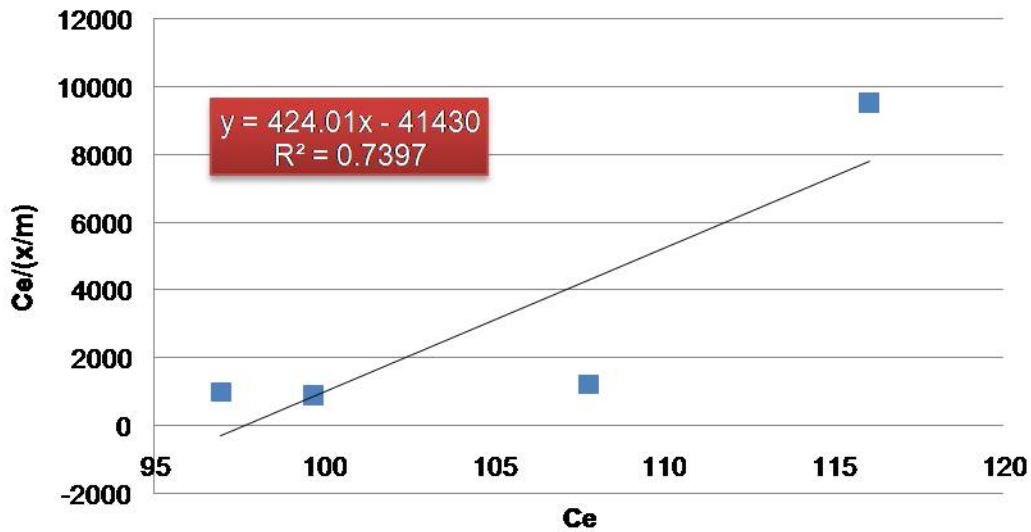


Figura X.38. Tercera ecuación de Langmuir para grava NI en tamaño A

Tabla X.23. Cálculo de las constantes de la Figura X.38.

$y = Ce/(x/m)$

$1/ab = -41430$	$b = -0.01023437$
$1/a = 424.01$	$a = 0.00235843$



Tamaño de partícula: B

Corrida # 1

Tabla X.24. Resultados de la primera corrida del ensayo de adsorción del soporte NI, tamaño B.

Co	Ce	x (Co-Ce)	m grava (g)	x m ⁻¹ (mg g ⁻¹)	Ce (x/m) ⁻¹
116.681338	116.681338	0	0	-	-
116.681338	114.434918	2.24641987	5	0.0449284	2547.05097
116.681338	112.720187	3.96115097	10	0.03961151	2845.64229
116.681338	103.678878	13.0024604	15	0.08668307	1196.06837
116.681338	91.3639906	25.3173474	20	0.12658674	721.750105

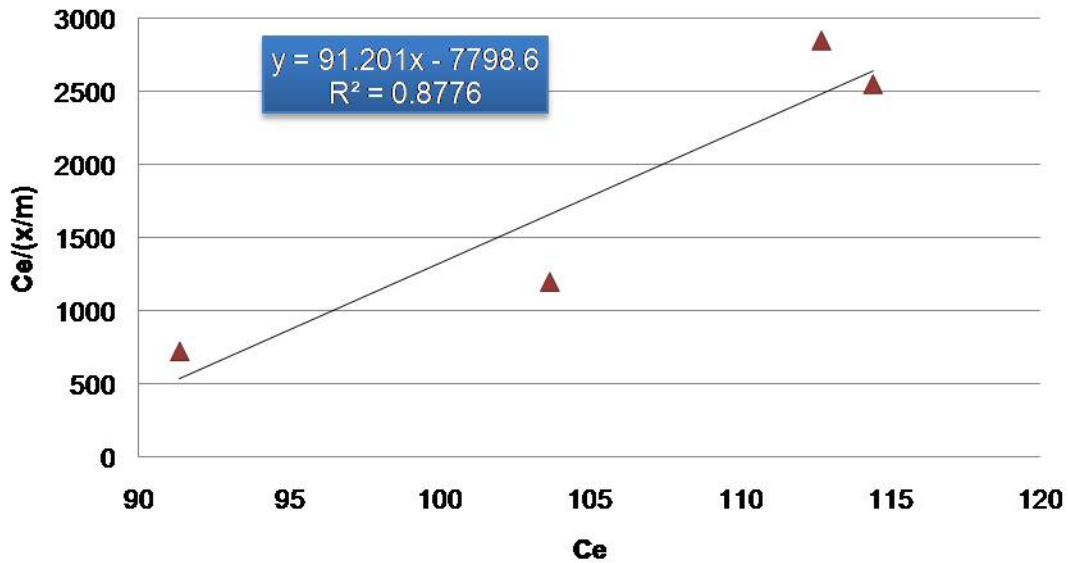


Figura X.39. Primera ecuación de Langmuir para grava NI en tamaño B

Tabla X.25. Cálculo de las constantes de la Figura X.39.

$y = \frac{Ce}{(x/m)}$

$1/ab = -7798.6$	$b = -0.01169453$
$1/a = 91.201$	$a = 0.01096479$

Corrida # 2

Tabla X.26. Resultados de la segunda corrida del ensayo de adsorción del soporte NI, tamaño B.

Co	Ce	x (Co-Ce)	m grava (g)	$x m^{-1}$ (mg g ⁻¹)	$Ce (x/m)^{-1}$
116.681338	116.681338	0	0	-	-
116.681338	115.055852	1.62548567	5	0.03250971	3539.12232
116.681338	104.536243	12.1450948	10	0.12145095	860.728092
116.681338	101.41855	15.2627878	15	0.10175192	996.723717
116.681338	98.8464536	17.8348844	20	0.08917442	1108.46195

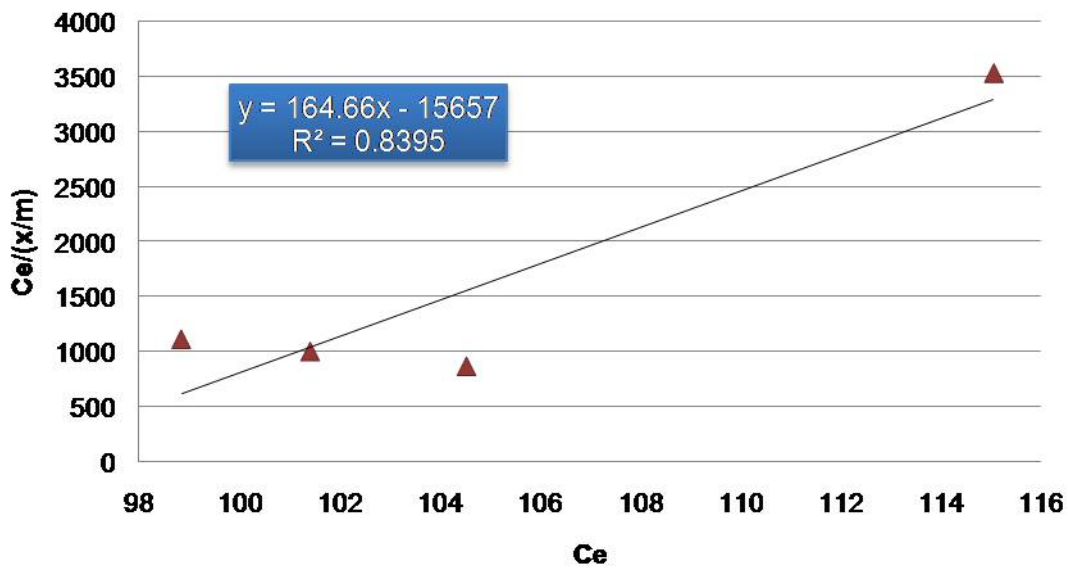


Figura X.40. Segunda ecuación de Langmuir para grava NI en tamaño B

Tabla X.27. Cálculo de las constantes de la Figura X.40.

$y = Ce/(x/m)$

$1/ab = -15657$	$b = -0.0105167$
$1/a = 164.66$	$a = 0.00607312$



Corrida # 3

Tabla X.28. Resultados de la tercera corrida del ensayo de adsorción del soporte NI, tamaño B.

Co	Ce	x (Co-Ce)	m grava (g)	x m ⁻¹ (mg g ⁻¹)	Ce (x/m) ⁻¹
116.681338	116.681338	0	0	-	-
116.681338	115.915822	0.76551574	5	0.01531031	7571.09336
116.681338	114.327343	2.35399466	10	0.02353995	4856.73759
116.681338	109.44661	7.23472852	15	0.04823152	2269.19246
116.681338	101.73032	14.9510185	20	0.07475509	1360.84802

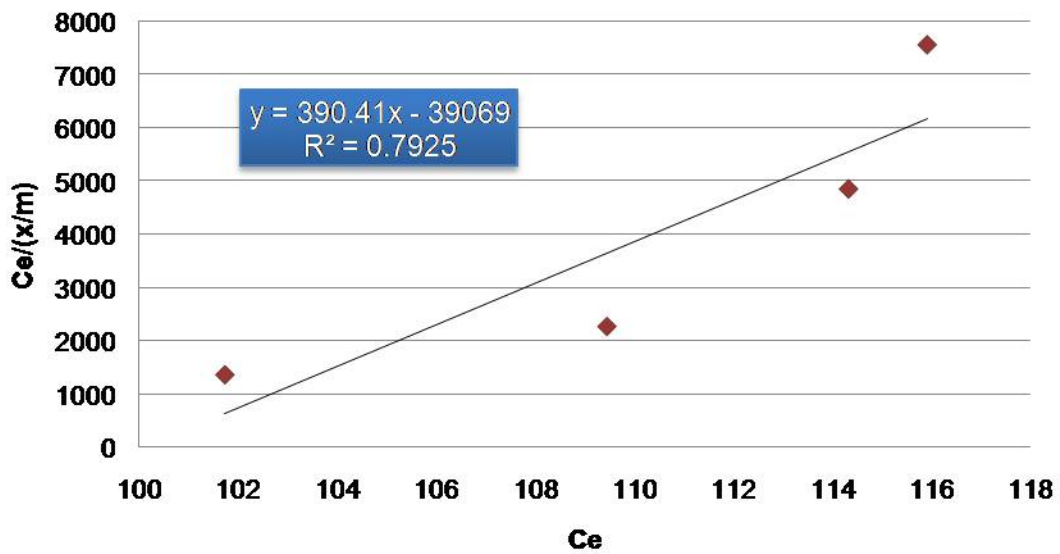


Figura X.41. Tercera ecuación de Langmuir para grava NI en tamaño B

Tabla X.29. Cálculo de las constantes de la Figura X.41.

$y = Ce/(x/m)$

$1/ab = -39069$	$b = -0.00999283$
$1/a = 390.41$	$a = 0.00256141$





Tamaño de partícula: C

Corrida # 1

Tabla X.30. Resultados de la primera corrida del ensayo de adsorción del soporte NI, tamaño C.

Co	Ce	x (Co-Ce)	m grava (g)	$x m^{-1} (mg g^{-1})$	$Ce (x/m)^{-1}$
116.681338	116.681338	0	0	-	-
116.681338	115.292284	1.38905432	5	0.02778109	4150.02791
116.681338	105.315666	11.3656716	10	0.11365672	926.611906
116.681338	104.146532	12.5348065	15	0.08356538	1246.28807
116.681338	101.340608	15.3407301	20	0.07670365	1321.19668

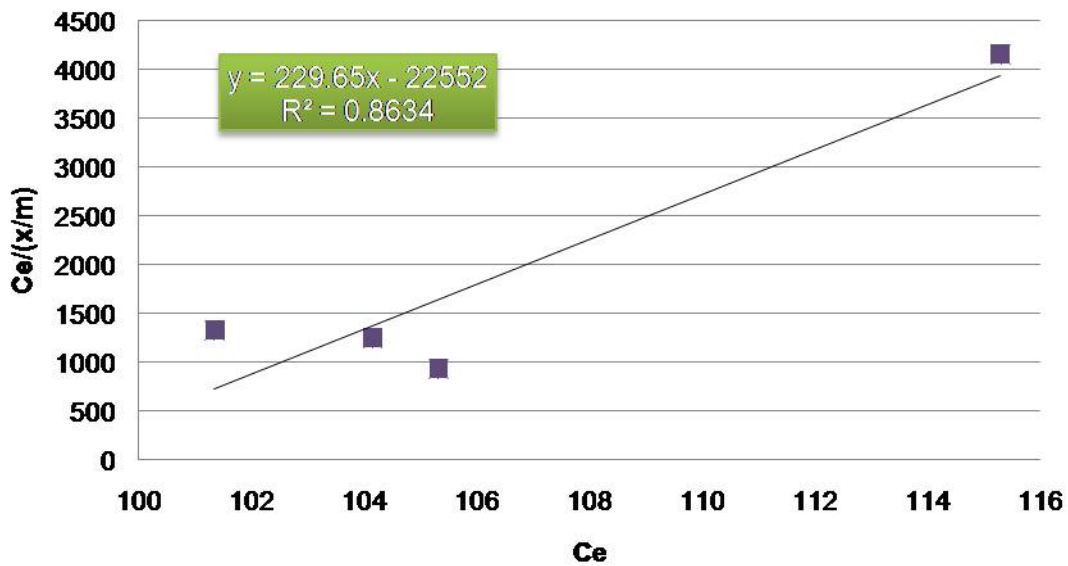


Figura X.42. Primera ecuación de Langmuir para grava NI en tamaño C

Tabla X.31. Cálculo de las constantes de la Figura X.42.

$y = Ce/(x/m)$

$1/ab = -22552$	$b = -0.01018313$
$1/a = 229.65$	$a = 0.00435445$

Corrida # 2

Tabla X.32. Resultados de la segunda corrida del ensayo de adsorción del soporte NI, tamaño C.

Co	Ce	x (Co-Ce)	m grava (g)	x m ⁻¹ (mg g ⁻¹)	Ce (x/m) ⁻¹
116.681338	116.681338	0	0	-	-
116.681338	110.771629	5.90970903	5	0.11819418	937.200363
116.681338	107.887763	8.79357497	10	0.08793575	1226.89308
116.681338	103.211224	13.4701143	15	0.08980076	1149.33572
116.681338	91.3732394	25.3080986	20	0.12654049	722.086957

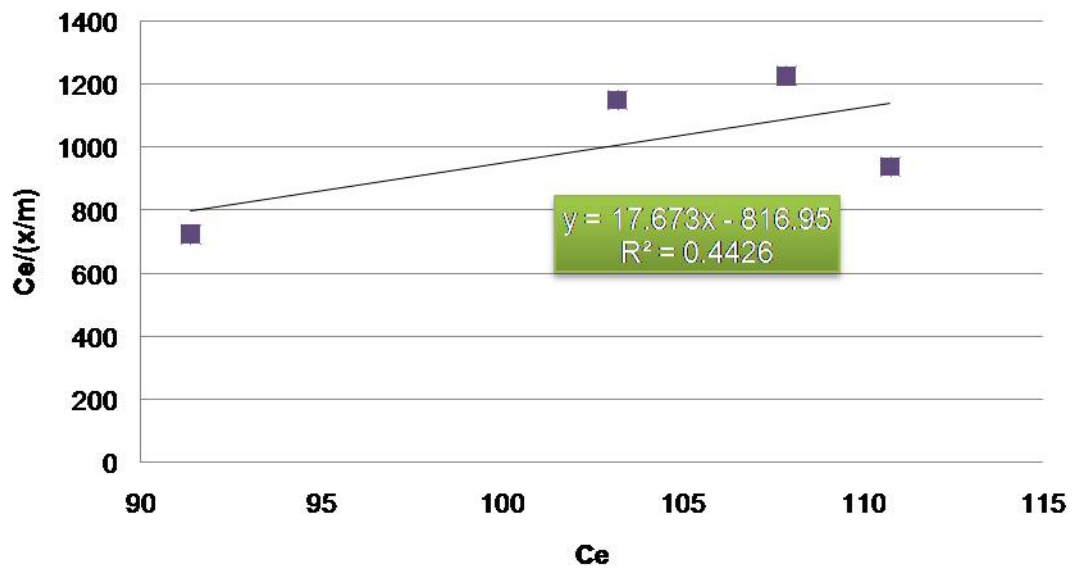


Figura X.43. Segunda ecuación de Langmuir para grava NI en tamaño C

Tabla X.33. Cálculo de las constantes de la Figura X.43.

$y = Ce/(x/m)$

$1/ab = -816.95$	$b = -0.0216329$
$1/a = 17.673$	$a = 0.05658349$



Corrida # 3

Co	Ce	x (Co-Ce)	m grava (g)	x m ⁻¹ (mg g ⁻¹)	Ce (x/m) ⁻¹
116.681338	116.681338	0	0	-	-
116.681338	109.632508	7.04883034	5	0.14097661	777.664537
116.681338	108.433359	8.24797871	10	0.08247979	1314.66585
116.681338	100.171473	16.5098649	15	0.11006577	910.105627
116.681338	99.7817615	16.8995765	20	0.08449788	1180.87884

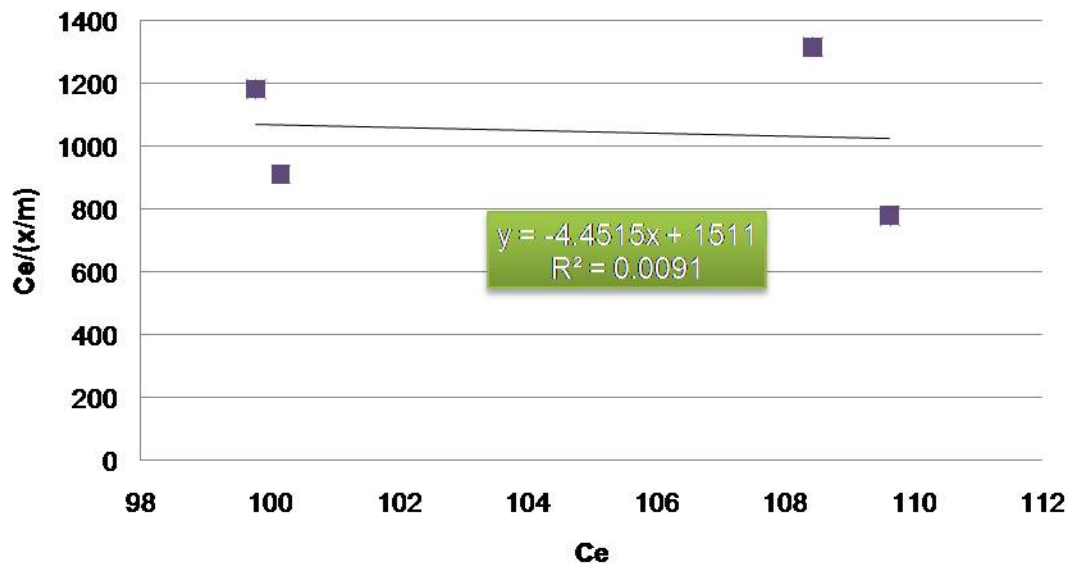


Figura X.44. Tercera ecuación de Langmuir para grava NI en tamaño C

$y = Ce/(x/m)$	
$1/ab = 1511$	$b = -0.00294606$
$1/a = -4.4515$	$a = -0.22464338$



X.2.2. GRAVA DE DURANGO

Tabla X.36. Valores de pH y fósforo soluble obtenidos en la Fase 1 de las selección del soporte.

Tamaño de grava	Cantidad de grava (g)	# ID	Día 0	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 7	FS
A	5	37	4.86	5.15	5.23	5.36	5.22	5.31	127.04
	10	38	4.86	5.25	5.3	5.44	5.31	5.4	112.06
	15	39	4.86	5.33	5.42	5.53	5.43	5.52	108.74
	20	40	4.86	5.36	5.43	5.54	5.44	5.5	108.18
	5	41	4.86	5.14	5.21	5.29	5.18	5.25	125.66
	10	42	4.86	5.28	5.31	5.44	5.32	5.45	108.98
	15	43	4.86	5.35	5.4	5.54	5.42	5.53	104.10
	20	44	4.86	5.43	5.48	5.59	5.48	5.59	104.30
	5	45	4.86	5.17	5.21	5.32	5.21	5.27	128.09
	10	46	4.86	5.24	5.26	5.4	5.26	5.37	116.67
	15	47	4.86	5.35	5.41	5.52	5.41	5.51	108.12
	20	48	4.86	5.38	5.44	5.55	5.45	5.53	89.88
B	5	49	4.86	5.13	5.17	5.27	5.18	5.25	117.08
	10	50	4.86	5.2	5.19	5.34	5.2	5.31	112.41
	15	51	4.86	5.3	5.3	5.45	5.35	5.45	107.11
	20	52	4.86	5.32	5.36	5.5	5.4	5.47	104.22
	5	53	4.86	5.13	5.14	5.24	5.11	5.22	117.97
	10	54	4.86	5.23	5.25	5.38	5.26	5.37	112.38
	15	55	4.86	5.25	5.26	5.39	5.29	5.41	105.55
	20	56	4.86	5.34	5.38	5.51	5.42	5.5	104.94
	5	57	4.86	5.1	5.13	5.24	5.13	5.2	115.60
	10	58	4.86	5.21	5.22	5.35	5.2	5.34	115.54
	15	59	4.86	5.24	5.26	5.39	5.28	5.38	111.98
	20	60	4.86	5.29	5.33	5.45	5.28	5.43	93.20
C	5	61	4.86	5.07	5.1	5.17	5.35	5.14	128.25
	10	62	4.86	5.11	5.14	5.24	5.09	5.21	119.18
	15	63	4.86	5.23	5.26	5.38	5.25	5.38	110.46
	20	64	4.86	5.28	5.36	5.41	5.32	5.41	88.53
	5	65	4.86	5.11	5.14	5.28	5.32	5.25	125.38
	10	66	4.86	5.16	5.12	5.31	5.16	5.29	119.63
	15	67	4.86	5.27	5.17	5.43	5.32	5.44	118.10
	20	68	4.86	5.26	5.26	5.38	5.28	5.36	90.17
	5	69	4.86	5.11	5.12	5.23	5.1	5.22	122.50
	10	70	4.86	5.19	5.15	5.29	5.14	5.31	120.07
	15	71	4.86	5.25	5.22	5.44	5.25	5.442	115.76
	20	72	4.86	5.33	5.28	5.48	5.28	5.42	101.11

Tabla X.37 Valores de CE (mS cm^{-1}) obtenidos en la Fase 1 de la selección del soporte.

Tamaño de grava	Cantidad de grava (g)	# ID	Día 0	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 7
A	5	37	8.18	8.13	8.10	7.98	7.95	7.97
	10	38	8.18	8.07	8.09	7.91	7.91	7.97
	15	39	8.18	8.05	8.10	7.90	7.92	7.97
	20	40	8.18	8.04	8.06	7.90	7.97	7.96
	5	41	8.18	8.1	8.09	7.94	8.00	8.05
	10	42	8.18	8.1	8.08	7.94	7.99	8.03
	15	43	8.18	8.11	8.08	7.91	7.93	7.99
	20	44	8.18	8.06	8.05	7.99	7.95	7.96
	5	45	8.18	8.07	8.09	7.94	7.99	8.00
	10	46	8.18	8.08	8.10	7.96	7.98	7.99
	15	47	8.18	8.11	8.09	7.96	7.96	8.00
	20	48	8.18	8.10	8.08	7.94	7.96	7.95
B	5	49	8.18	8.14	8.12	7.99	7.99	8.00
	10	50	8.18	8.1	8.09	7.96	7.99	8.02
	15	51	8.18	8.1	8.07	7.98	7.97	7.99
	20	52	8.18	8.11	8.05	8.00	7.94	7.99
	5	53	8.18	8.13	8.07	7.96	7.97	8.03
	10	54	8.18	8.12	8.06	7.96	7.91	8.01
	15	55	8.18	8.12	8.12	7.96	7.95	8.00
	20	56	8.18	8.09	8.09	7.94	7.92	7.99
	5	57	8.18	8.12	8.11	7.99	8.01	8.02
	10	58	8.18	8.12	8.08	8.00	7.97	8.00
	15	59	8.18	8.14	8.08	7.98	7.96	8.02
	20	60	8.18	8.12	8.08	7.96	7.97	7.97
C	5	61	8.18	8.14	8.14	7.98	8	8.01
	10	62	8.18	8.12	8.14	7.92	7.95	8.00
	15	63	8.18	8.1	8.12	7.95	7.95	7.97
	20	64	8.18	8.08	8.08	7.96	7.97	7.99
	5	65	8.18	8.14	8.13	7.98	8.00	8.05
	10	66	8.18	8.12	8.15	8.00	7.97	8.00
	15	67	8.18	8.12	8.13	7.99	8.00	7.99
	20	68	8.18	8.12	8.13	7.93	7.96	7.96
	5	69	8.18	8.1	8.17	7.97	8.00	8.00
	10	70	8.18	8.09	8.13	7.97	7.99	8.01
	15	71	8.18	8.1	8.12	7.93	8.00	8.00
	20	72	8.18	8.1	8.15	7.95	7.99	8.02

X.2.2.1. Ecuaciones de Langmuir

Tamaño de partícula: A

Corrida # 1

Tabla X.38. Resultados de la primera corrida del ensayo de adsorción del soporte D, tamaño A.					
Co	Ce	x (Co-Ce)	m grava (g)	x m ⁻¹ (mg g ⁻¹)	Ce (x/m) ⁻¹
117.474669	117.474669	0	0	-	-
117.474669	127.035778	-9.56110914	5	-0.19122218	-664.335989
117.474669	112.060871	5.41379777	10	0.05413798	2069.91239
117.474669	108.742108	8.73256093	15	0.05821707	1867.87316
117.474669	108.17549	9.29917903	20	0.0464959	2326.56

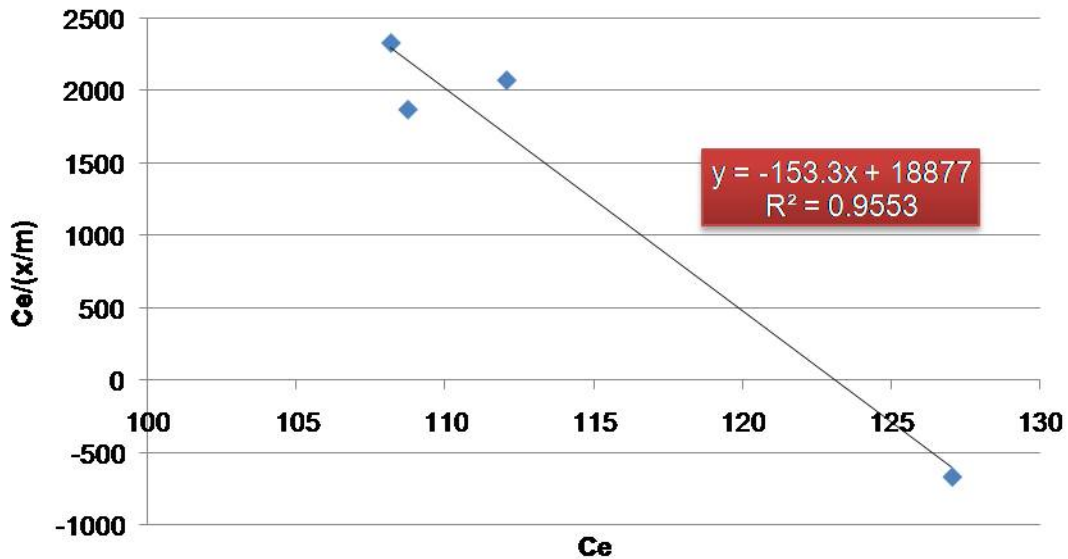


Figura X.45. Primera ecuación de Langmuir para grava D en tamaño A

Tabla X.39. Cálculo de las constantes de la Figura X.45.		
$y = \bar{C}_e / (x/m)$		
1/ab= 18877.00	b= -0.00812099	
1/a= -153.3	a= -0.00652316	

Corrida # 2

Tabla X.40. Resultados de la segunda corrida del ensayo de adsorción del soporte D, tamaño A.

Co	Ce	x (Co-Ce)	m grava (g)	x m ⁻¹ (mg g ⁻¹)	Ce (x/m) ⁻¹
117.474669	117.474669	0	0	-	-
117.474669	125.659705	-8.18503661	5	-0.16370073	-767.618468
117.474669	108.978956	8.49571317	10	0.08495713	1282.75229
117.474669	104.095675	13.3789938	15	0.08919329	1167.07964
117.474669	104.302416	13.1722525	20	0.06586126	1583.66864

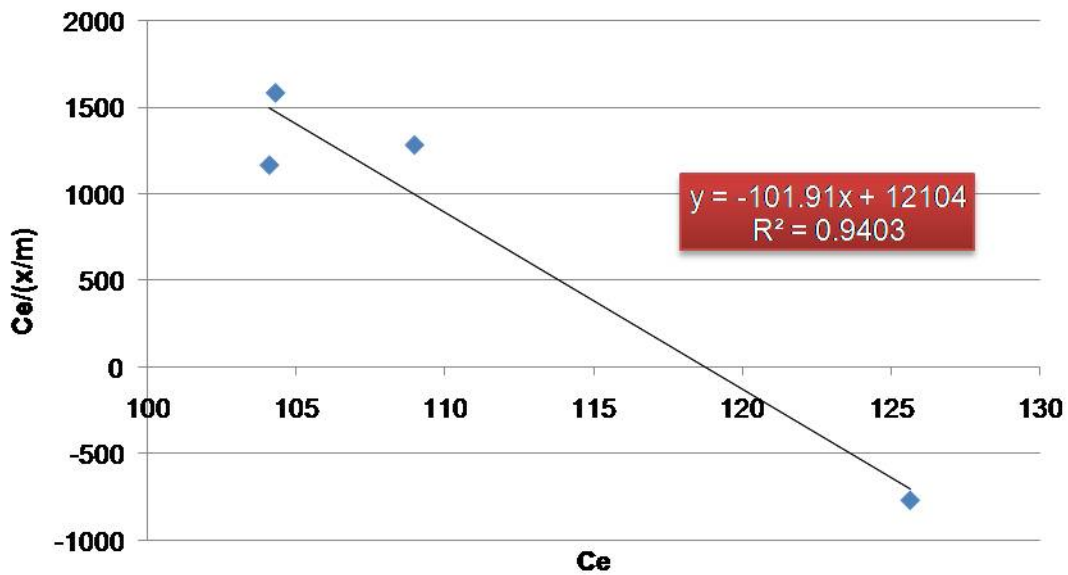


Figura X.46. Segunda ecuación de Langmuir para grava D en tamaño A

Tabla X.41. Cálculo de las constantes de la Figura X.46.

$y = Ce/(x/m)$

1/ab=	12104.00	b=	-0.00841953
1/a=	-101.91	a=	-0.00981258



Corrida # 3

Tabla X.42. Resultados de la tercera corrida del ensayo de adsorción del soporte D, tamaño A.

Co	Ce	x (Co-Ce)	m grava (g)	x m ⁻¹ (mg g ⁻¹)	Ce (x/m) ⁻¹
117.474669	117.474669	0	0	-	-
117.474669	128.088069	-10.6133999	5	-0.212268	-603.426187
117.474669	116.674761	0.79990753	10	0.00799908	14586.031
117.474669	108.12159	9.35307872	15	0.06235386	1734
117.474669	89.8830865	27.5915822	20	0.13795791	651.525424

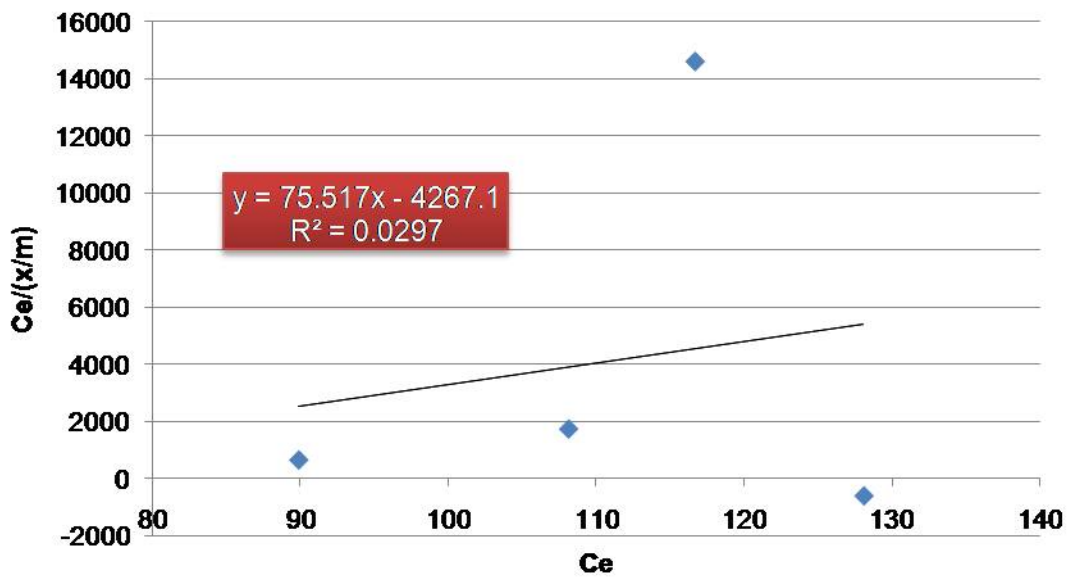


Figura X.47. Tercera ecuación de Langmuir para grava D en tamaño A

Tabla X.43. Cálculo de las constantes de la Figura X.47.

$y = Ce/(x/m)$

1/ab=	-4261.10	b=	-0.01772242
1/a=	75.517	a=	0.01324205



Tamaño de partícula: B

Corrida # 1

Tabla X.44. Resultados de la primera corrida del ensayo de adsorción del soporte D, tamaño B.

Co	Ce	x (Co-Ce)	m grava (g)	x m ⁻¹ (mg g ⁻¹)	Ce (x/m) ⁻¹
117.474669	117.474669	0	0	-	-
117.474669	117.084957	0.38971161	5	0.00779423	15022
117.474669	112.408418	5.06625097	10	0.05066251	2218.76923
117.474669	107.10834	10.3663289	15	0.06910886	1549.84962
117.474669	104.224474	13.2501949	20	0.06625097	1573.17647

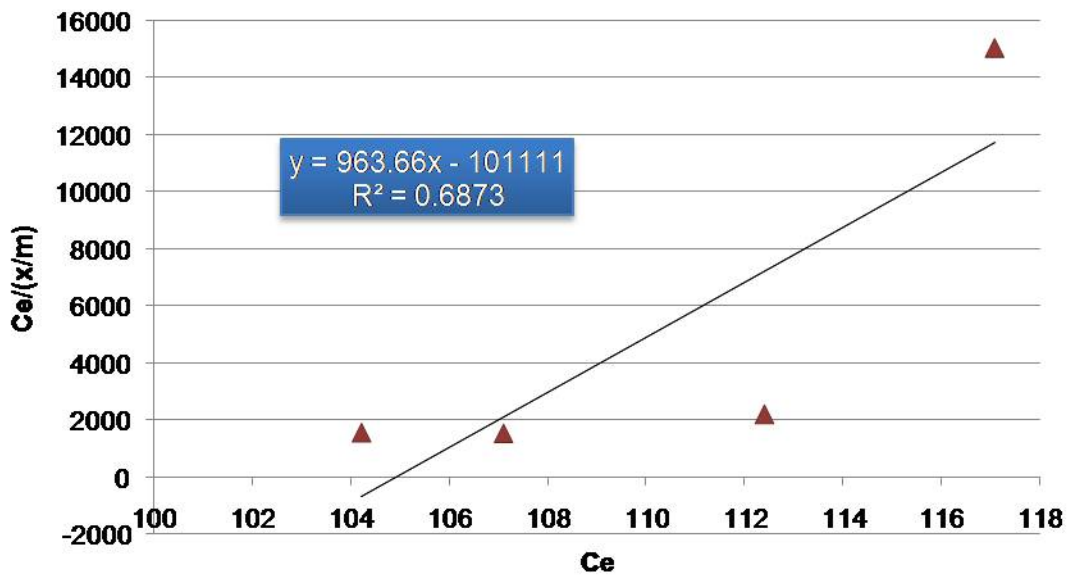


Figura X.48. Primera ecuación de Langmuir para grava D en tamaño B

Tabla X.45. Cálculo de las constantes de la Figura X.48.

$y = Ce/(x/m)$

1/ab=	101111.00	b=	0.00953071
1/a=	963.66	a=	0.00103771



Corrida # 2

Tabla X.46 Resultados de la segunda corrida del ensayo de adsorción del soporte D, tamaño B.					
Co	Ce	x (Co-Ce)	m grava (g)	x m ⁻¹ (mg g ⁻¹)	Ce (x/m) ⁻¹
117.474669	117.474669	0	0	-	-
117.474669	117.969888	-0.49521955	5	-0.00990439	-11910.8674
117.474669	112.384653	5.090016	10	0.05090016	2207.94301
117.474669	105.549493	11.9251754	15	0.07950117	1327.64706
117.474669	104.937672	12.5369967	20	0.06268498	1674.04801

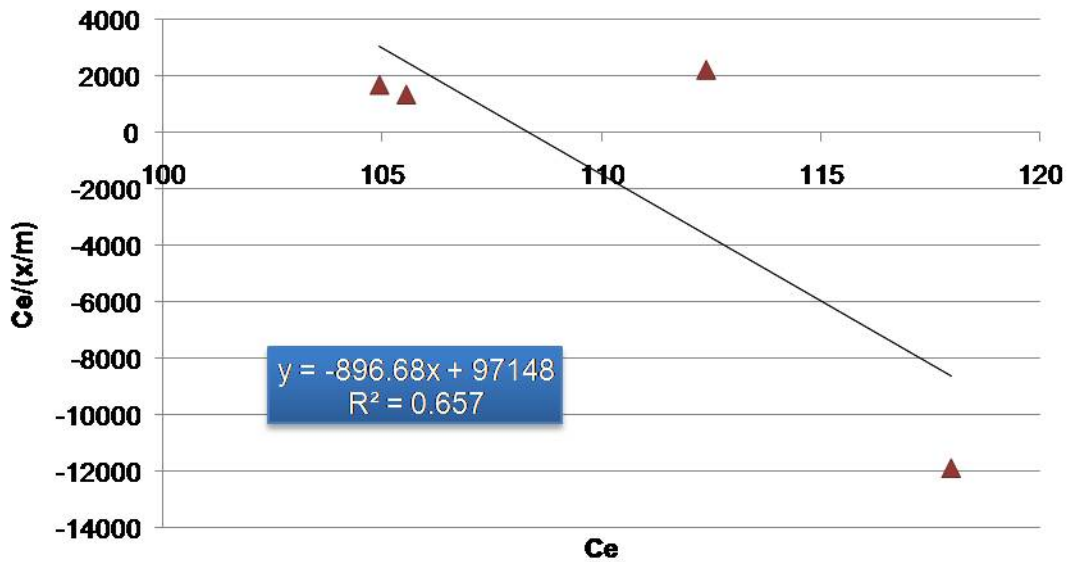


Figura X.49. Segunda ecuación de Langmuir para grava D en tamaño B

Tabla X.47. Cálculo de las constantes de la Figura X.49.			
y= Ce/(x/m)			
1/ab=	97148.00	b=	-0.00923004
1/a=	-896.68	a=	-0.00111523



Corrida # 3

Tabla X.48 Resultados de la tercera corrida del ensayo de adsorción del soporte D, tamaño B.

Co	Ce	x (Co-Ce)	m grava (g)	x m ⁻¹ (mg g ⁻¹)	Ce (x/m) ⁻¹
117.474669	117.474669	0	0	-	-
117.474669	115.604053	1.87061574	5	0.03741231	3090
117.474669	115.541525	1.93314373	10	0.01933144	5976.87192
117.474669	111.979926	5.49474321	15	0.03663162	3056.91971
117.474669	93.2011796	24.2734892	20	0.12136745	767.925689

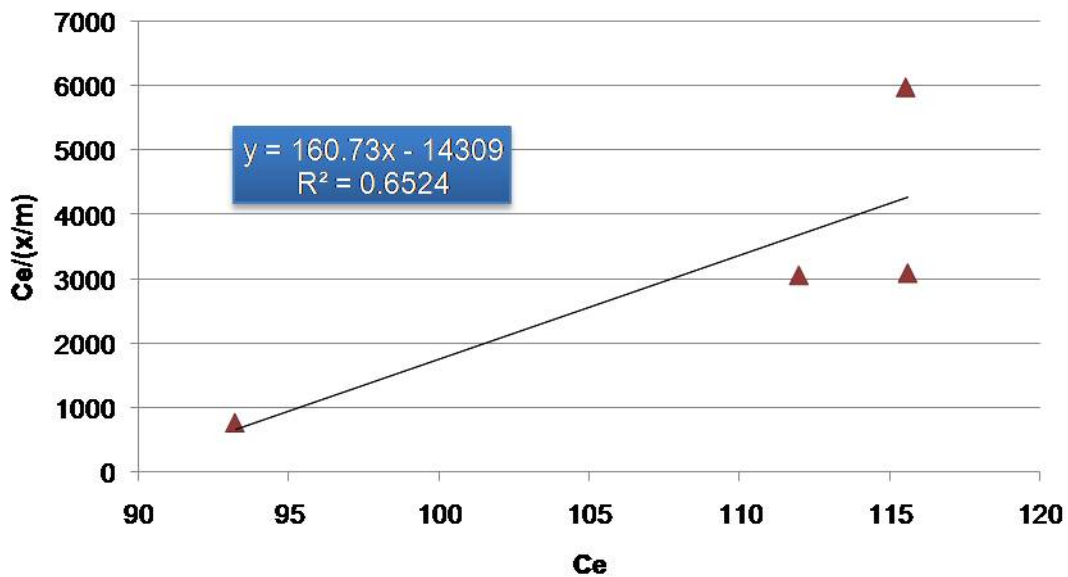


Figura X.50 Tercera ecuación de Langmuir para grava D en tamaño B

Tabla X.49. Cálculo de las constantes de la Figura X.50.

$y = Ce/(x/m)$

1/ab=	14309.00	b=	0.01123279
1/a=	160.73	a=	0.00622161



Tamaño de partícula: C

Corrida # 1

Tabla X.50. Resultados de la primera corrida del ensayo de adsorción del soporte D, tamaño C.

Co	Ce	x (Co-Ce)	m grava (g)	x m ⁻¹ (mg g ⁻¹)	Ce (x/m) ⁻¹
117.474669	117.474669	0	0	-	-
117.474669	128.24996	-10.7752908	5	-0.21550582	-595.111362
117.474669	119.18407	-1.70940119	10	-0.01709401	-6972.2702
117.474669	110.45986	7.01480904	15	0.04676539	2362
117.474669	88.5321101	28.9425587	20	0.14471279	611.778047

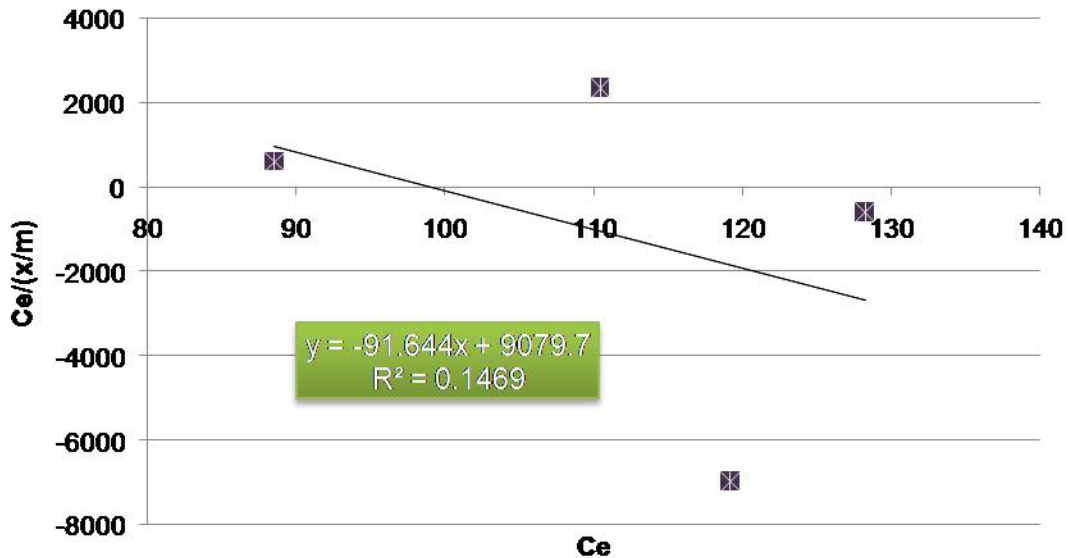


Figura X.51. Primera ecuación de Langmuir para grava D en tamaño C

Tabla X.51. Cálculo de las constantes de la Figura X.51.

$y = Ce/(x/m)$

1/ab=	9079.70	b=	-0.01009329
1/a=	-91.644	a=	-0.01091179



Corrida # 2

Tabla X.52. Resultados de la segunda corrida del ensayo de adsorción del soporte D, tamaño C.

Co	Ce	x (Co-Ce)	m grava (g)	x m ⁻¹ (mg g ⁻¹)	Ce (x/m) ⁻¹
117.474669	117.474669	0	0	-	-
117.474669	125.376396	-7.90172756	5	-0.15803455	-793.348007
117.474669	119.62927	-2.15460113	10	-0.02154601	-5552.2699
117.474669	118.098207	-0.62353858	15	-0.00415692	-28410
117.474669	90.1703801	27.3042887	20	0.13652144	660.485107

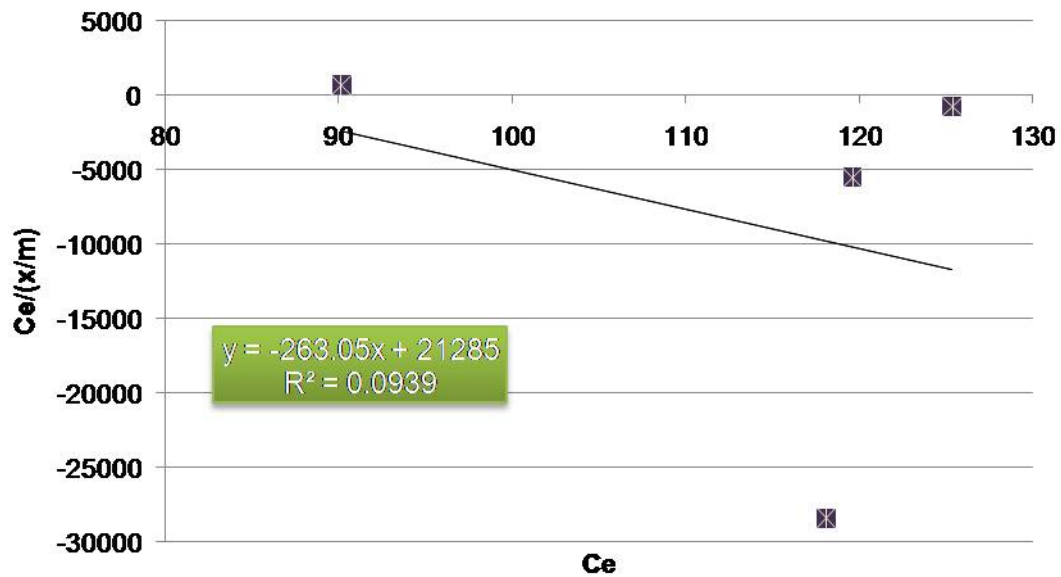


Figura X.52. Segunda ecuación de Langmuir para grava D en tamaño C

Tabla X.53. Cálculo de las constantes de la Figura X.52.

$y = C_e/(x/m)$

$1/ab =$	21285.00	$b =$	-0.01235847
$1/a =$	-263.05	$a =$	-0.00380156

Corrida # 3

Tabla X.54. Resultados de la tercera corrida del ensayo de adsorción del soporte D, tamaño C.

Co	Ce	x (Co-Ce)	m grava (g)	x m ⁻¹ (mg g ⁻¹)	Ce (x/m) ⁻¹
117.474669	117.474669	0	0	-	-
117.474669	122.502833	-5.02816435	5	-0.10056329	-1218.16656
117.474669	120.07447	-2.59980106	10	-0.02599801	-4618.60223
117.474669	115.759938	1.7147311	15	0.01143154	10126.3636
117.474669	101.106781	16.3678878	20	0.08183944	1235.42857

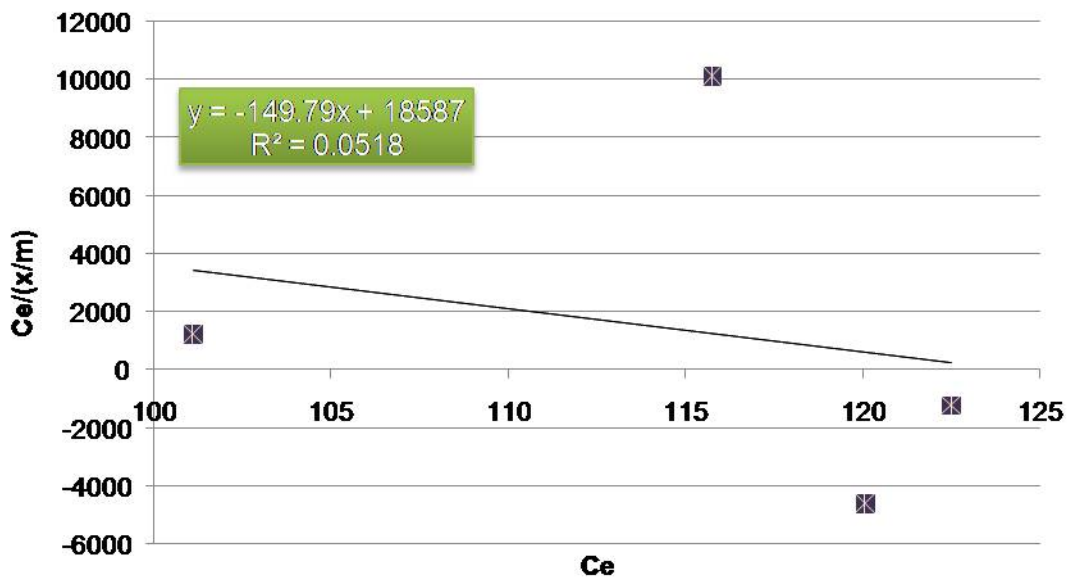


Figura X.53. Tercera ecuación de Langmuir para grava D en tamaño C

Tabla X.55. Cálculo de las constantes de la Figura X.53.

$y = C_e / (x/m)$

1/ab=	18587.00	b=	-0.00805886
1/a=	-149.79	a=	-0.00667601



X.2.3.ZEOLITA

Tabla X.56. Valores de pH y fósforo soluble obtenidos en la Fase 1 de la selección del soporte.

Tamaño de grava	Cantidad de grava (g)	# ID	Día 0	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 7	FS
A	5	73	4.86	5.72	5.84	6.02	5.99	6.10	88.29
	10	74	4.86	5.79	5.88	6.04	5.97	6.10	64.86
	15	75	4.86	5.96	6.07	6.20	6.12	6.22	43.10
	20	76	4.86	6.16	6.43	6.64	6.56	6.64	15.01
	5	77	4.86	5.57	5.59	5.73	5.62	5.69	109.29
	10	78	4.86	5.96	6.09	6.2	6.15	6.3	39.53
	15	79	4.86	5.98	6.18	6.32	6.28	6.39	19.66
	20	80	4.86	6.01	6.17	6.30	6.27	6.30	19.27
	5	81	4.86	5.90	5.71	5.83	5.71	5.83	111.55
	10	82	4.86	5.87	6.07	6.20	6.15	6.23	46.63
	15	83	4.86	5.94	6.14	6.26	6.2	6.28	16.46
	20	84	4.86	6.07	6.4	6.55	6.47	6.64	18.41
B	5	85	4.86	5.77	6.02	6.14	6.14	6.24	68.37
	10	86	4.86	5.76	5.99	6.15	6.15	6.32	50.95
	15	87	4.86	5.67	5.91	6.03	5.96	6.07	25.65
	20	88	4.86	5.91	6.24	6.42	6.43	6.52	17.55
	5	89	4.86	5.67	5.96	6.10	6.13	6.27	88.59
	10	90	4.86	5.78	6.06	6.20	6.17	6.29	44.72
	15	91	4.86	5.70	5.96	6.07	6.05	6.19	30.05
	20	92	4.86	5.77	5.95	6.04	5.98	6.06	28.54
	5	93	4.86	5.61	5.9	6.08	6.09	6.26	65.18
	10	94	4.86	5.57	5.83	5.98	5.94	6.08	58.88
	15	95	4.86	5.88	6.19	6.30	6.24	6.29	33.53
	20	96	4.86	5.91	6.31	6.44	6.37	6.45	17.94
C	5	97	4.86	5.36	5.53	5.66	5.58	5.64	106.63
	10	98	4.86	5.61	5.79	5.9	5.81	5.95	76.26
	15	99	4.86	5.8	6.00	6.09	6.02	6.09	73.55
	20	100	4.86	5.81	5.99	6.09	6.03	6.12	20.66
	5	101	4.86	5.39	5.56	5.71	5.61	5.68	107.88
	10	102	4.86	5.80	6.14	6.27	6.24	6.28	74.37
	15	103	4.86	5.88	6.28	6.39	6.37	6.33	69.07
	20	104	4.86	5.95	6.15	6.28	6.29	6.30	13.81
	5	105	4.86	5.43	5.62	5.72	5.61	5.72	110.89
	10	106	4.86	5.79	6.12	6.24	6.25	6.30	95.26
	15	107	4.86	5.45	5.68	5.78	5.67	5.72	23.30
	20	108	4.86	5.78	6.08	6.19	6.14	6.20	10.39

Tabla X.57. Valores de CE (mS cm⁻¹) obtenidos en la Fase 1 de la selección del soporte.

Tamaño de grava	Cantidad de grava (g)	# ID	Día 0	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 7
A	5	73	8.18	8.17	8.17	8.03	8.03	8.05
	10	74	8.18	8.22	8.25	8.00	8.08	8.05
	15	75	8.18	8.20	8.26	8.00	8.06	8.02
	20	76	8.18	8.21	8.23	8.00	7.99	7.98
	5	77	8.18	8.16	8.23	7.96	8.06	8.09
	10	78	8.18	8.18	8.29	7.98	8.04	8.06
	15	79	8.18	8.23	8.25	8.03	8.06	8.05
	20	80	8.18	8.23	8.26	8.09	8.02	8.00
	5	81	8.18	8.14	8.27	7.98	8.06	8.13
	10	82	8.18	8.16	8.23	7.98	8.02	8.07
	15	83	8.18	8.23	8.30	8.00	8.08	8.05
	20	84	8.18	8.23	8.34	8.03	8.06	7.99
B	5	85	8.18	8.17	8.27	8.02	8.07	8.09
	10	86	8.18	8.19	8.31	8.05	8.09	8.02
	15	87	8.18	8.20	8.39	8.00	8.12	8.07
	20	88	8.18	8.2	8.29	8.04	7.94	7.96
	5	89	8.18	8.18	8.25	8.00	8.01	8.07
	10	90	8.18	8.19	8.26	8.02	7.95	8.08
	15	91	8.18	8.20	8.31	8.06	7.97	8.06
	20	92	8.18	8.19	8.29	8.03	8.00	8.02
	5	93	8.18	8.19	8.27	8.06	8.04	8.14
	10	94	8.18	8.18	8.31	8.06	8.02	8.06
	15	95	8.18	8.29	8.30	8.08	8.06	8.00
	20	96	8.18	8.21	8.28	8.05	8.02	8.07
C	5	97	8.18	8.16	8.30	8.04	8.04	8.09
	10	98	8.18	8.27	8.29	8.07	8.10	8.06
	15	99	8.18	8.27	8.31	8.10	8.09	8.22
	20	100	8.18	8.22	8.37	8.04	8.08	8.12
	5	101	8.18	8.18	8.29	7.99	8.13	8.19
	10	102	8.18	8.18	8.26	7.99	8.07	8.12
	15	103	8.18	8.29	8.40	8.04	8.12	8.13
	20	104	8.18	8.18	8.31	8.02	8.12	8.12
	5	105	8.18	8.17	8.26	8.02	8.05	8.22
	10	106	8.18	8.19	8.40	8.07	8.12	8.13
	15	107	8.18	8.18	8.33	8.04	8.12	8.11
	20	108	8.18	8.22	8.33	8.09	8.11	8.13

X.2.3.1. Ecuaciones de Langmuir

Tamaño de partícula: A

Corrida # 1

Tabla X.58. Resultados de la primera corrida del ensayo de adsorción del soporte Z, tamaño A.					
Co	Ce	x (Co-Ce)	m grava (g)	x m ⁻¹ (mg g ⁻¹)	Ce (x/m) ⁻¹
116.227592	116.227592	0	0	-	-
116.227592	88.2922535	27.9353381	5	0.55870676	158.029685
116.227592	64.8636009	51.3639906	10	0.51363991	126.282246
116.227592	43.1044601	73.1231315	15	0.48748754	88.4216647
116.227592	15.0088028	101.218789	20	0.50609394	29.6561597

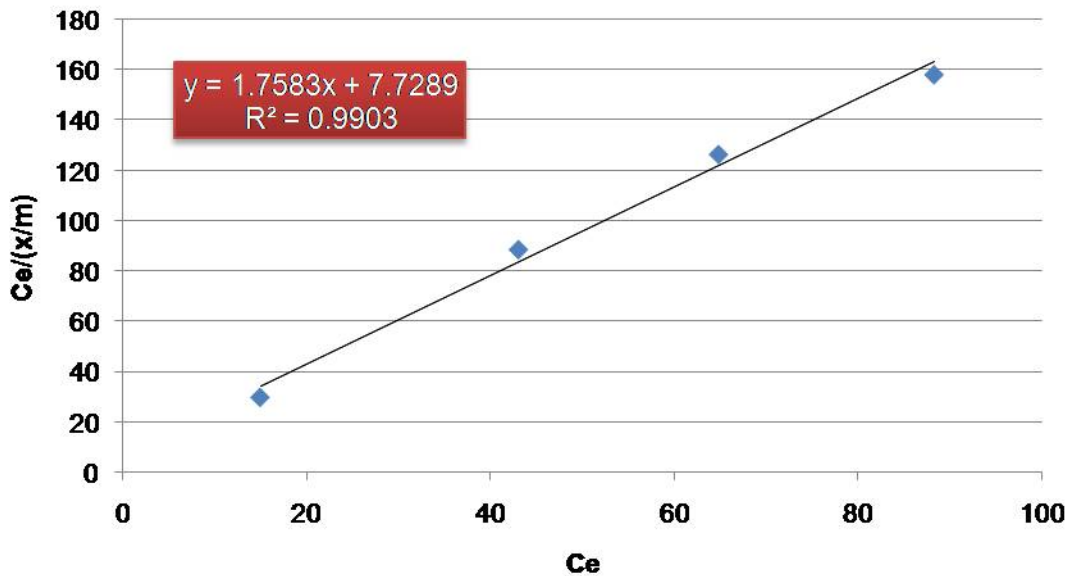


Figura X.54. Primera ecuación de Langmuir para grava Z en tamaño A

Tabla X.59. Cálculo de las constantes de la Figura X.54.		
y= $\bar{C}_e/(x/m)$		
1/ab=	7.73	b= 0.2274968
1/a=	1.7583	a= 0.56873116



Corrida # 2

Tabla X.60. Resultados de la segunda corrida del ensayo de adsorción del soporte Z, tamaño A.					
Co	Ce	x (Co-Ce)	m grava (g)	$x m^{-1} (mg g^{-1})$	$Ce (x/m)^{-1}$
116.227592	116.227592	0	0	-	-
116.227592	109.290725	6.93686672	5	0.13873733	787.752809
116.227592	39.5323461	76.6952455	10	0.76695246	51.5447154
116.227592	19.6570538	96.5705378	15	0.64380359	30.5326877
116.227592	19.2673422	96.9602494	20	0.48480125	39.7427653

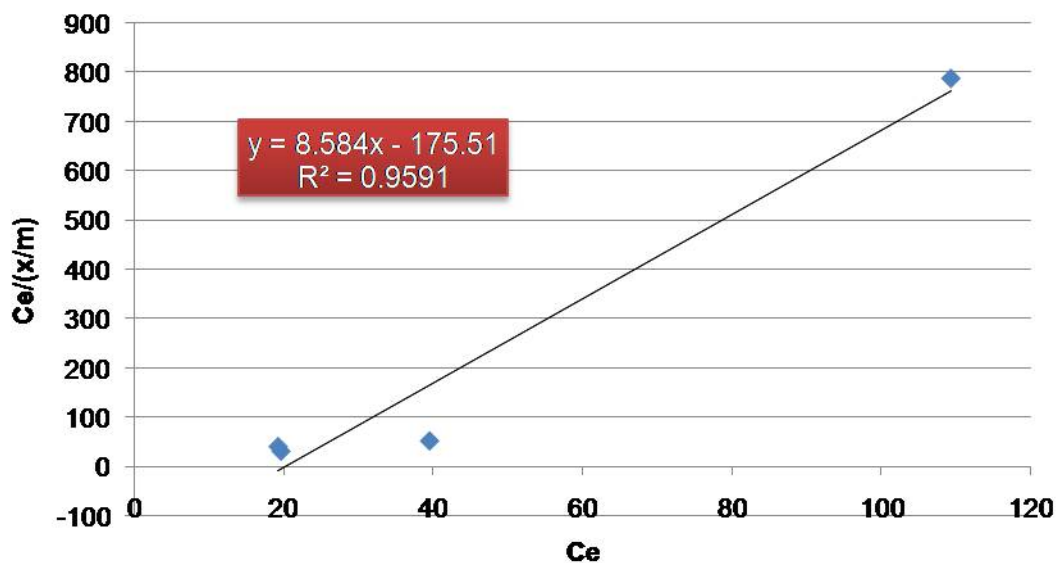


Figura X.55. Segunda ecuación de Langmuir para grava Z en tamaño A

Tabla X.61. Cálculo de las constantes de la Figura X.55.

y = Ce/(x/m)		
1/ab =	-175.51	b = -0.04890889
1/a =	8.584	a = 0.11649581

Corrida # 3

Tabla X.62. Resultados de la tercera corrida del ensayo de adsorción del soporte Z, tamaño A.

Co	Ce	x (Co-Ce)	m grava (g)	x m ⁻¹ (mg g ⁻¹)	Ce (x/m) ⁻¹
116.227592	116.227592	0	0	-	-
116.227592	111.546362	4.68123008	5	0.0936246	1191.42148
116.227592	46.6255869	69.6020047	10	0.69602005	66.9888562
116.227592	16.4614186	99.766173	15	0.66510782	24.75
116.227592	18.4099766	97.817615	20	0.48908807	37.6414343

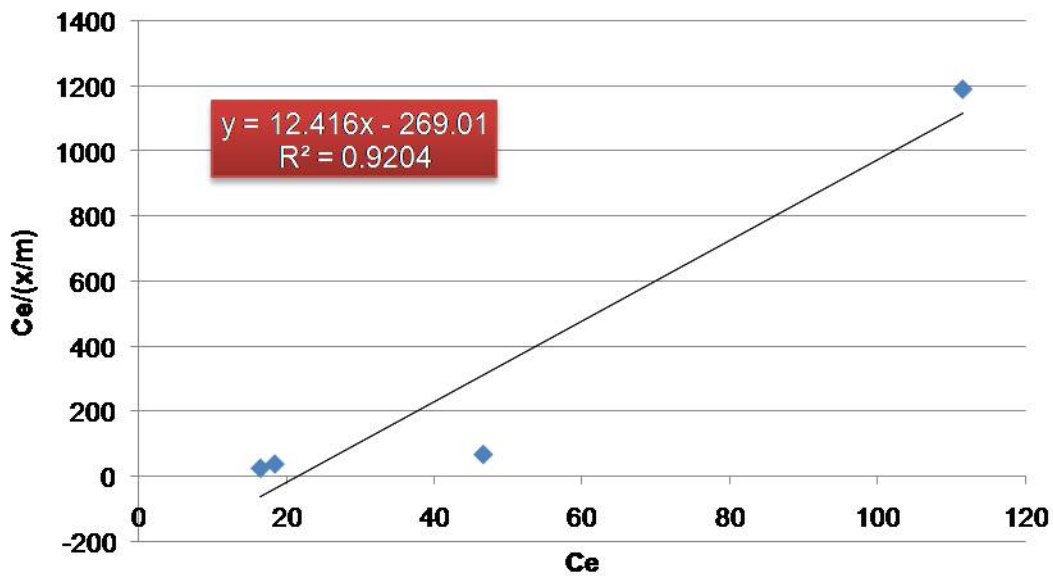


Figura X.56. Tercera ecuación de Langmuir para grava Z en tamaño A

Tabla X.63. Cálculo de las constantes de la Figura X.56.

$y = Ce/(x/m)$

1/ab=	-269.01	b=	-0.04615442
1/a=	12.416	a=	0.08054124



Tamaño de partícula: B

Corrida # 1

Tabla X.64. Resultados de la primera corrida del ensayo de adsorción del soporte Z, tamaño B.					
Co	Ce	x (Co-Ce)	m grava (g)	x m ⁻¹ (mg g ⁻¹)	Ce (x/m) ⁻¹
116.227592	116.227592	0	0	-	-
116.227592	68.3710055	47.8565861	5	0.95713172	71.4332248
116.227592	50.9536385	65.2739531	10	0.65273953	78.0612114
116.227592	25.6455399	90.5820517	15	0.60388034	42.4679163
116.227592	17.5526111	98.6749805	20	0.4933749	35.5766193

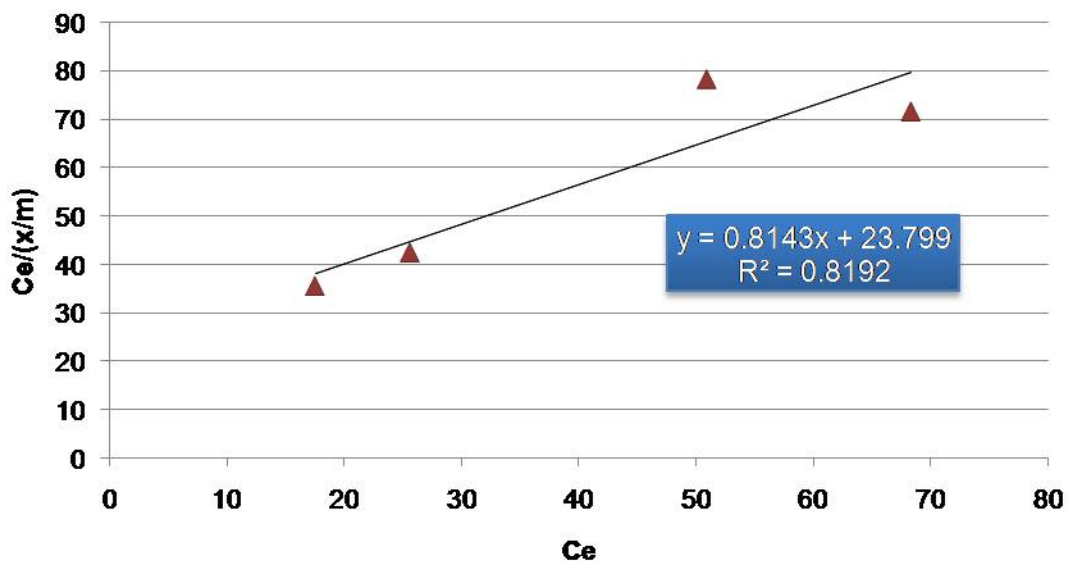


Figura X.57. Primera ecuación de Langmuir para grava Z en tamaño B

Tabla X.65. Cálculo de las constantes de la Figura X.57.			
$y = C_e/(x/m)$			
1/ab=	23.80	b=	0.03421572
1/a=	0.8143	a=	1.22804863



Corrida # 2

Tabla X.66. Resultados de la segunda corrida del ensayo de adsorción del soporte Z, tamaño B.					
Co	Ce	x (Co-Ce)	m grava (g)	$x m^{-1} (mg g^{-1})$	$Ce (x/m)^{-1}$
116.227592	116.227592	0	0	-	-
116.227592	88.5856808	27.6419108	5	0.55283822	160.237983
116.227592	54.7183099	61.5092817	10	0.61509282	88.9594356
116.227592	30.0469484	86.1806432	15	0.57453762	52.2976168
116.227592	28.5424786	87.685113	20	0.43842557	65.1022222

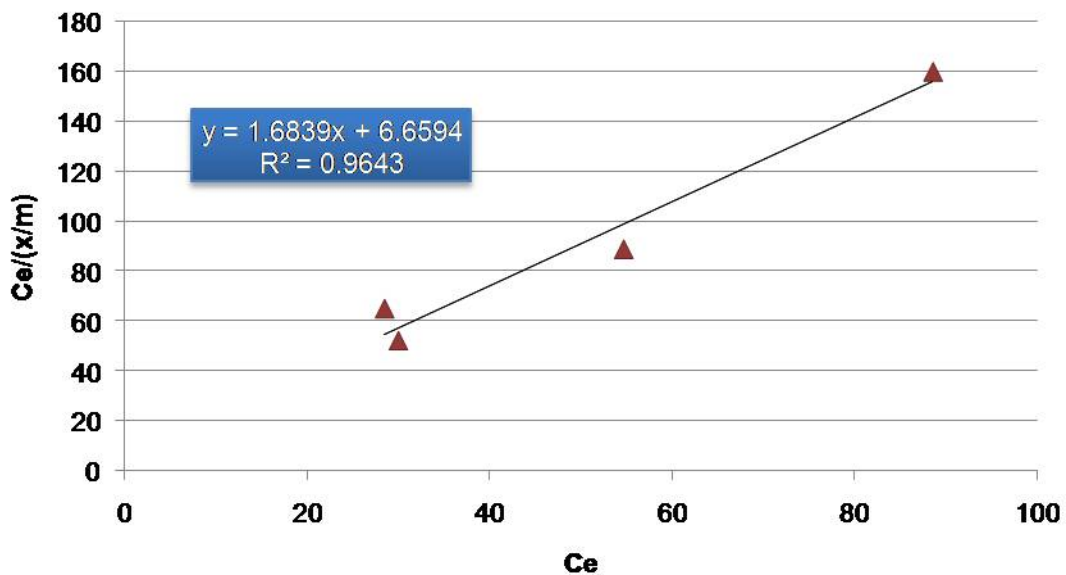


Figura X.58. Segunda ecuación de Langmuir para grava Z en tamaño B

Tabla X.67. Cálculo de las constantes de la Figura X.58.

$y = Ce/(x/m)$		
1/ab=	6.66	b= 0.25286062
1/a=	1.6839	a= 0.59385949



Corrida # 3

Tabla X.68. Resultados de la tercera corrida del ensayo de adsorción del soporte Z, tamaño B.

Co	Ce	x (Co-Ce)	m grava (g)	x m ⁻¹ (mg g ⁻¹)	Ce (x/m) ⁻¹
116.227592	116.227592	0	0	-	-
116.227592	65.1753702	51.0522214	5	1.02104443	63.8320611
116.227592	58.8761737	57.3514179	10	0.57351418	102.658619
116.227592	33.5307872	82.6968044	15	0.55131203	60.8199811
116.227592	17.9423227	98.2852689	20	0.49142634	36.5107058

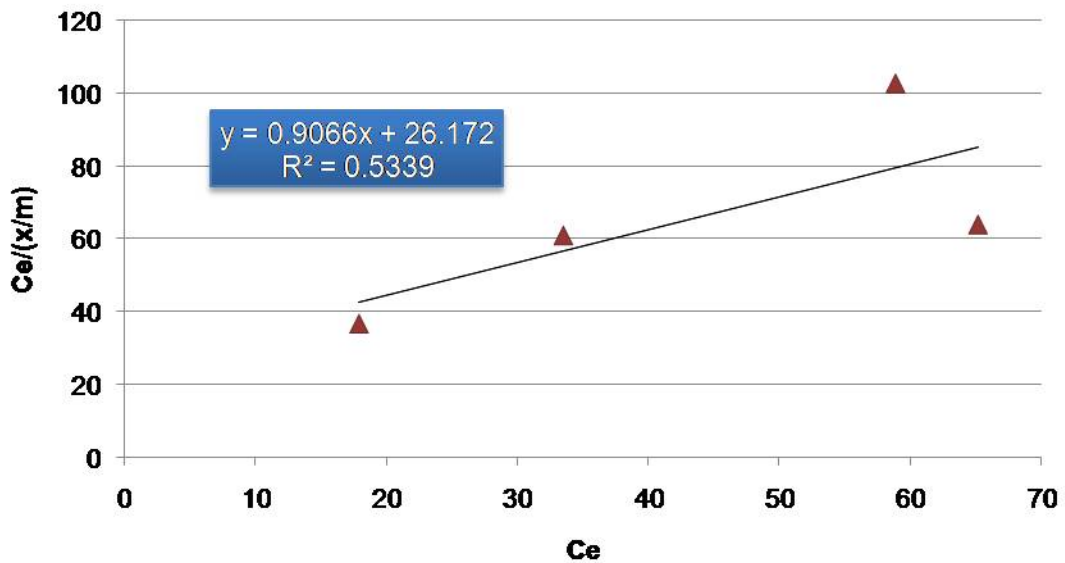


Figura X.59. Tercera ecuación de Langmuir para grava Z en tamaño B

Tabla X.69. Cálculo de las constantes de la Figura X.59.

$y = Ce/(x/m)$

1/ab=	26.17	b=	0.03464007
1/a=	0.9066	a=	1.10302228



Tamaño de partícula: C

Corrida # 1

Co	Ce	x (Co-Ce)	m grava (g)	x m ⁻¹ (mg g ⁻¹)	Ce (x/m) ⁻¹
116.227592	116.227592	0	0	-	-
116.227592	106.631455	9.59613618	5	0.19192272	555.59578
116.227592	76.2617371	39.9658545	10	0.39965854	190.817232
116.227592	73.5475352	42.6800564	15	0.28453371	258.484436
116.227592	20.657277	95.5703146	20	0.47785157	43.2294841

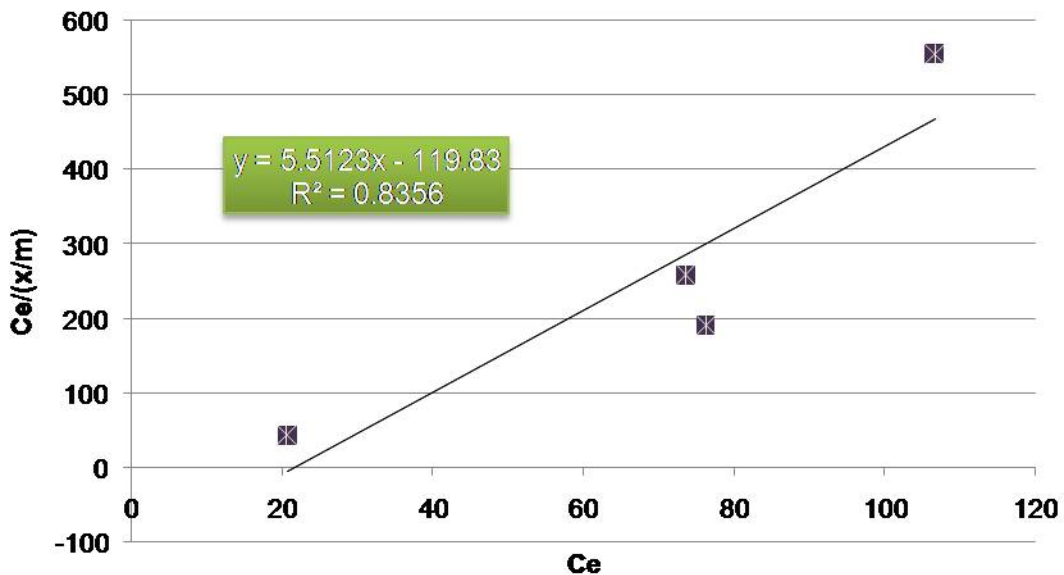


Figura X.60. Primera ecuación de Langmuir para grava Z en tamaño C

y = $C_e/(x/m)$		
1/ab=	-119.83	b= -0.046001
1/a=	5.5123	a= 0.18141248

Corrida # 2

Tabla X.72. Resultados de la segunda corrida del ensayo de adsorción del soporte Z, tamaño C.

Co	Ce	x (Co-Ce)	m grava (g)	x m ⁻¹ (mg g ⁻¹)	Ce (x/m) ⁻¹
116.227592	116.227592	0	0	-	-
116.227592	107.878521	8.34907046	5	0.16698141	646.051089
116.227592	74.3725643	41.8550273	10	0.41855027	177.690875
116.227592	69.07277	47.1548216	15	0.31436548	219.721232
116.227592	13.8113796	102.416212	20	0.51208106	26.9710807

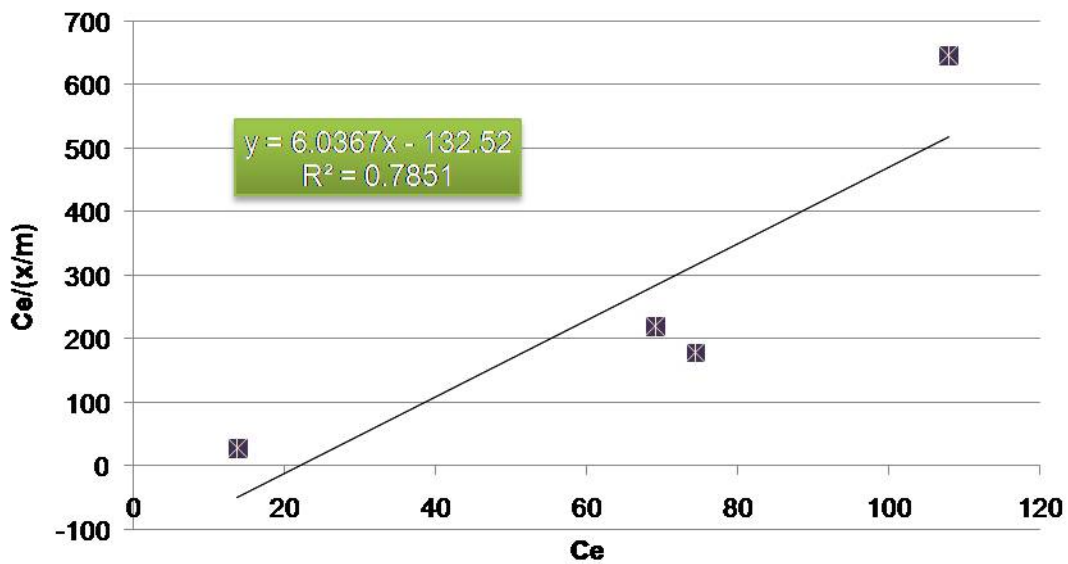


Figura X.61. Segunda ecuación de Langmuir para grava Z en tamaño C

Tabla X.73. Cálculo de las constantes de la Figura X.61.

$y = Ce/(x/m)$

1/ab=	-132.52	b=	-0.04555312
1/a=	6.0367	a=	0.16565342



Corrida # 3

Co	Ce	x (Co-Ce)	m grava (g)	$x m^{-1}$ (mg g ⁻¹)	$Ce (x/m)^{-1}$
116.227592	116.227592	0	0	-	-
116.227592	110.88615	5.34144135	5	0.10682883	1037.97967
116.227592	95.2611502	20.9664413	10	0.20966441	454.350591
116.227592	23.2981221	92.9294695	15	0.6195298	37.6061364
116.227592	10.3873239	105.840268	20	0.52920134	19.6283025

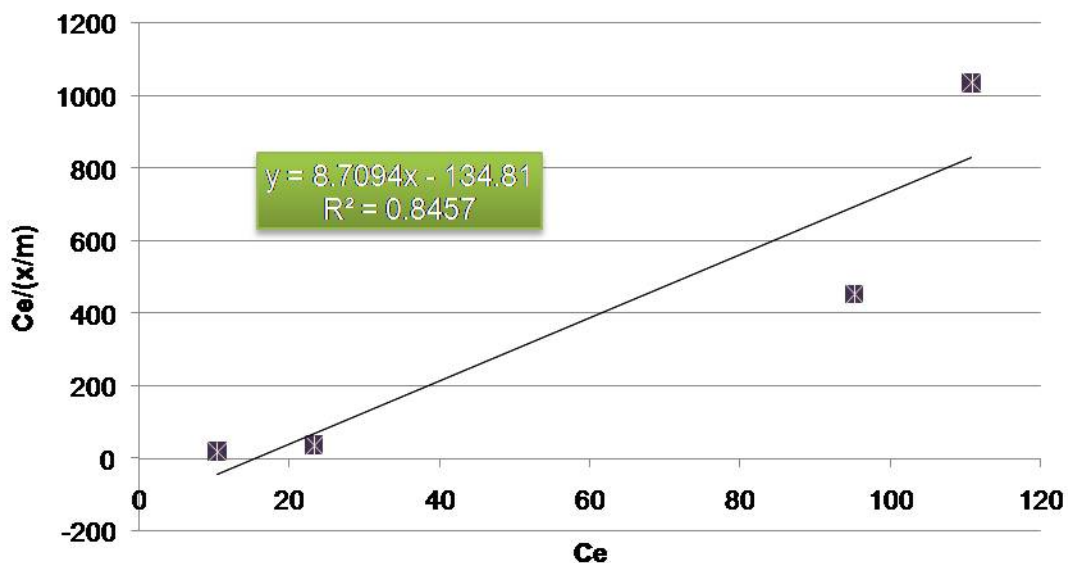


Figura X.62. Tercera ecuación de Langmuir para grava Z en tamaño C

Tabla X.75. Cálculo de las constantes de la Figura X.62.

$y = Ce/(x/m)$	
1/ab=	-134.81 b= -0.064605
1/a=	8.7094 a= 0.11481847

**X.3.ANEXO 3. Datos de la segunda fase del experimento con los soporte.**

Tabla X.76. Valores de pH obtenidos en la 2ª. Fase del experimento para la selección del soporte

Tipo	Cantidad (g)	Día 0	Día 1	Día 2	Día 5	Día 6
NI	40	4.72	5.54	5.64	5.71	5.72
NI	40	4.72	5.57	5.67	5.78	5.8
NI	40	4.72	5.61	5.69	5.79	5.8
NI	80	4.72	5.75	5.85	5.9	5.91
NI	80	4.72	5.79	5.98	5.98	5.99
NI	80	4.72	5.54	5.62	5.65	5.67
D	40	4.72	5.2	5.31	5.37	5.38
D	40	4.72	5.2	5.29	5.38	5.38
D	40	4.72	5.2	5.29	5.35	5.34
D	80	4.72	5.39	5.47	5.54	5.54
D	80	4.72	5.43	5.58	5.56	5.61
D	80	4.72	5.44	5.54	5.65	5.66
Z	40	4.72	6.09	6.45	6.81	6.94
Z	40	4.72	5.95	6.19	6.43	6.49
Z	40	4.72	6.02	6.29	6.61	6.7
Z	80	4.72	6.31	6.48	6.86	6.6
Z	80	4.72	6.28	6.45	6.76	6.73
Z	80	4.72	6.33	6.51	6.85	6.87

Tabla X.77. Valores de CE (mS cm^{-1}) de la 2ª. Fase del experimento para seleccionar el soporte

Tipo	Cantidad (g)	Día 0	Día 1	Día 2	Día 5	Día 6
NI	40	7.28	7.32	7.08	7.19	7.04
	40	7.28	7.28	7.09	7.21	7.02
	40	7.28	7.17	7.29	7.2	7.05
	80	7.28	7.21	7.26	7.08	6.76
	80	7.28	7.19	7.21	7.09	6.99
	80	7.28	6.98	7.17	6.92	6.85
D	40	7.28	7.21	7.15	7.19	7.06
	40	7.28	7.19	7.17	7.15	7.13
	40	7.28	7.2	7.2	7.14	7.14
	80	7.28	7.25	7.11	7.15	7.13
	80	7.28	7.24	7.24	7.19	7.15
	80	7.28	7.25	7.23	7.22	7.25
Z	40	7.28	7.43	7.29	7.44	7.34
	40	7.28	7.42	7.37	7.4	7.43
	40	7.28	7.42	7.36	7.58	7.48
	80	7.28	7.47	7.35	7.48	7.44
	80	7.28	7.54	7.41	7.48	7.5
	80	7.28	7.45	7.35	7.44	7.35