

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL Y DE
RECURSOS NATURALES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL Y DE
RECURSOS NATURALES



**“ESTIMACIÓN DE LA REMOCIÓN DE CROMO,
HIERRO Y MANGANESO MEDIANTE UN
HUMEDAL ARTIFICIAL UTILIZANDO
Eichhornia crassipes”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
**INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS
NATURALES**

AUTOR:

SANDRA MARILIA POMA VÁSQUEZ

Callao, Marzo, 2015
PERÚ

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES

ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES

N° 002-2015-JEDT-FIARN

Siendo las 13:30 horas del día viernes 06 de marzo de 2015, en el Auditorio de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales ubicado en la Av. Juan Pablo II N° 306 Bellavista-Callao; se dio inicio a la Sustentación de la Tesis titulada ***“Estimación de la Remoción de Cromo, Hierro y Manganeso mediante un Humedal Artificial Utilizando Eichhornia Crassipes”*** presentado para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales de la Bachiller: Sandra Marilia Poma Vásquez.

Contando con la asistencia del Jurado Evaluador y Asesor a fin de dar cumplimiento a la Resolución N° 008-2015-D-FIARN de fecha 20 de febrero de 2015, los mismos que están integrados por los siguientes docentes:

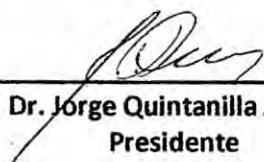
Dr. Jorge Quintanilla Alarcón	Presidente
Mg. Máximo Fidel Baca Neglia	Secretario
Ing. Gabriel Eduardo Escudero Cornejo	Vocal
Dr. Rubén Gilberto Rodríguez Flores	Asesor

Terminada la exposición, el Jurado Evaluador invita a la Bachiller y al público en general se retiren del auditorio para las deliberaciones del caso.

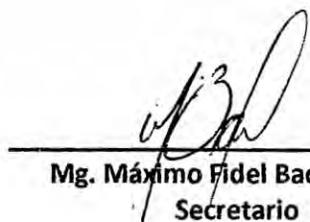
Luego de las deliberaciones el **Jurado Evaluador acuerda: APROBAR POR UNANIMIDAD**

Con el Calificativo de **SOBRESALIENTE** y en consecuencia da por terminado el acto de exposición.

En señal de conformidad firman el Jurado Evaluador y Asesor, siendo las 14:30 horas del día 06 de marzo de 2015.



Dr. Jorge Quintanilla Alarcón
Presidente



Mg. Máximo Fidel Baca Neglia
Secretario



Ing. Gabriel Eduardo Escudero Cornejo
Vocal



Dr. Rubén Gilberto Rodríguez Flores
Asesor

DEDICTORIA

Dedico este trabajo a todas las personas que aman la investigación, que no desvanezcan sus esfuerzos, aunque sea vea difícil la situación, sin embargo, a pesar de los problemas debemos perseverar y vencer todos los obstáculos, la finalidad es aportar nuevo conocimiento, que constituye el progreso.

AGRADECIMIENTOS

A los representantes de DELTA LAB SAC Ing. Michael Holger Romaní Girón e Ing. Miguel Dueñas Dueñas por brindarme todas las facilidades para realizar la presente investigación en su empresa, en especial al Ing. Michael Romaní por la confianza depositada desde el inicio, sin su apoyo no habría sido posible la realización de este trabajo, agradezco a todo el personal de DELTA LAB SAC quienes me brindaron su ayuda en especial al Ing. Jesús Zegarra Villar y al Sr. Francisco Chara Salas.

A la Mg. Mary Fátima Manrique Carhuas por ser la orientadora de la presente investigación, al Sr. Víctor Ramos docente de la Universidad Nacional Federico Villarreal por su participación voluntaria en este estudio y la MSc. Ing. Rosa Yaya Beas de la Universidad Nacional de Ingeniería, quienes me demostraron su apoyo desinteresado.

También a Ph D. Enrique Flores Mariazza y Mg. Sc. Raúl Enrique Tácuna Céspedes de la Universidad Nacional Agraria La Molina por brindar a este trabajo la potencia de la estadística, base fundamental de toda investigación.

A mis padres, Sr. Felix Poma Leonardo y Sra. Rubí Vásquez Gonzales, a Oscar Luciano De La Cruz Huerta por su dedicado tiempo.

Y en especial al Dr. Rubén Rodríguez Flores por sus importantes aportes y acertadas opiniones como asesor de esta tesis.

INDICE

	Pág.
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	8
1.1 Determinación del Problema.....	8
1.2 Formulación del problema.....	9
1.3 Objetivos de la investigación.....	10
1.3.1 Objetivo general.....	10
1.3.2 Objetivos específicos.....	10
1.4 Justificación.....	10
1.5 Importancia.....	11
1.5.1 Aspecto ambiental.....	11
1.5.2 Aspecto legal.....	11
1.5.3 Aspecto económico.....	11
II. MARCO TEÓRICO	12
2.1 Antecedentes teóricos vinculados a la investigación.....	12
2.1.1 Base Histórica.....	12
2.1.2 Base Legal.....	15
III. VARIABLES E HIPÓTESIS	16
3.1 Hipótesis General.....	16
3.2 Variables de la investigación.....	16
3.2.1 Variable Independiente.....	16
3.2.2 Variable Dependiente.....	16
3.3 Definición conceptual de variables.....	17
3.3.1 Tratamiento por humedal artificial de flujo superficial.....	17
3.3.2 Remoción de metales.....	17

3.4	Definición conceptual de los indicadores	17
3.4.1	Potencial de hidrógeno (pH).....	17
3.4.2	Temperatura (°C).....	19
3.4.3	Humedad Relativa (%).....	19
3.4.4	Tiempo de retención (d).....	19
3.4.5	Volumen tipo Batch (L).....	19
3.4.6	Porosidad del suelo (δ).....	20
3.4.7	Densidad de plantas (ρ).....	20
3.4.8	Concentración de metales final en agua (ppm o mg/L).....	20
3.5	Definición operacional de las variables.....	21
3.5.1	Tratamiento por humedal artificial de flujo superficial.....	21
3.5.2	Remoción de metales.....	21
IV.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	22
4.1	Tipo de investigación.....	22
4.2	Diseño de la investigación.....	22
4.3	Ámbito geográfico.....	22
4.4	Experiencia preliminar.....	22
4.4.1	Recolección de la muestra.....	23
4.4.2	Selección de <i>E. crassipes</i>	23
4.4.3	Selección de concentración de metales.....	23
4.4.4	Tiempo óptimo de retención.....	25
4.5	Determinación del universo.....	28
4.5.1	Muestra.....	28
4.5.2	Metales pesados.....	28
4.5.3	Humedal artificial de flujo superficial.....	28
4.6	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	29
4.6.1	Monitoreo del humedal artificial de flujo superficial.....	29
4.6.2	Determinación del porcentaje de remoción.....	30
4.7	Procesamiento estadístico y análisis de datos.....	30

V. RESULTADOS.....	33
5.1 Selección de concentración de metales.....	33
5.2 Tiempo óptimo de retención.....	42
5.3 Ensayos en Humedal Artificial de Flujo Superficial.....	54
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	58
6.1 Contratación de la hipótesis con los resultados.....	58
6.1.1 Análisis sobre efectos de condiciones ambientales.....	58
6.1.2 Análisis sobre la Remoción.....	82
VII. CONCLUSIONES.....	102
VIII. RECOMENDACIONES.....	105
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	106

ANEXOS

ANEXO 1. Matriz de Consistencia.

ANEXO 2. Composición del agua desionizada usada en las pruebas.

ANEXO 3. Recojo de plantas – Palle

ANEXO 4. Construcción del Humedal Artificial.

ANEXO 5. Detalle de Fertilizante, detalle de *E. crassipes* y corrida

ANEXO 6. Tabla I. Valores de t para Probabilidades de 0.50 a 0.01 (50 a 99%).

ANEXO 7. Versión original en inglés de la prueba estadística, según programa SAS Versión 8.2.

LISTA DE TABLAS

Título	Pág.
Concentración de metales y peso de <i>E. crassipes</i> al inicio del ensayo.....	33
Monitoreo de las condiciones ambientales.....	34
Datos estadísticos.....	35
Concentración tolerable de metales.....	42
Pesos de plantas.....	42
Monitoreo de las condiciones ambientales – Tr.....	43
Datos estadísticos – Tr.....	44
Concentraciones de metales en blanco control.....	47
Concentraciones según tiempos de retención.....	48
Límites de metales según normas.....	48
Remoción en función al tiempo de retención.....	51
Remoción total según tiempos de retención.....	51
Resultado concentración de metales y tiempo de retención.....	53
Resumen de ensayos – meses cálidos.....	56
Resumen de ensayos – meses fríos.....	57

LISTA DE GRÁFICOS

Título	Pág.
Concentración de cromo vs límite.....	49
Concentración de hierro vs límite.....	49
Concentración de manganeso vs límite.....	50
Relación entre el porcentaje de remoción total de los metales respecto al tiempo de retención.....	52
Remoción de metales – meses cálidos.....	83
Remoción de cromo vs límite – meses cálidos.....	85
Remoción de hierro vs límite – meses cálidos.....	87
Remoción de manganeso vs límite – meses cálidos.....	89
Remoción de metales – meses fríos.....	91
Remoción de cromo vs límite – meses fríos.....	93
Remoción de hierro vs límite – meses fríos.....	95
Remoción de manganeso vs límite – meses fríos.....	97
Remoción total de metales – meses fríos y cálidos.....	99

LISTA DE FIGURAS

Título	Pág.
Escala del pH.....	18
Determinación de un rango de concentración de metales.....	25
Determinación de tiempo óptimo de retención.....	27
Humedal artificial de flujo superficial.....	29
Análisis sobre condiciones ambientales.....	31
Análisis sobre la remoción.....	31
Blanco control inicio.....	36
Blanco control final.....	36
Cromo hexavalente inicio c = 10 ppm.....	37
Cromo hexavalente inicio c = 20 ppm.....	37
Cromo hexavalente inicio c = 30 ppm.....	37
Cromo hexavalente final c = 10 ppm.....	37
Cromo hexavalente final c = 20 ppm.....	37
Cromo hexavalente final c = 30 ppm.....	37
Hierro disuelto inicio c = 10 ppm.....	38
Hierro disuelto inicio c = 20 ppm.....	38
Hierro disuelto inicio c = 40 ppm.....	38
Hierro disuelto final c = 10 ppm.....	38
Hierro disuelto final c = 20 ppm.....	38
Hierro disuelto final c = 40 ppm.....	38
Manganeso disuelto inicio c = 10 ppm.....	39
Manganeso disuelto inicio c = 20 ppm.....	39
Manganeso disuelto inicio c = 40 ppm.....	39
Manganeso disuelto final c = 10 ppm.....	39
Manganeso disuelto final c = 20 ppm.....	39
Manganeso disuelto final c = 40 ppm.....	39
Blanco control inicio (tr = 0).....	45
Blanco control final (tr = 4).....	45
Celda experimental tr = 0.....	46
Celda experimental tr = 1.....	46
Celda experimental tr = 2.....	46
Celda experimental tr = 3.....	46
Celda experimental tr = 4.....	46
Celda experimental tr = 5.....	46

RESUMEN

En el presente trabajo se evalúa la capacidad de remoción de tres metales pesados como son cromo hexavalente, hierro y manganeso elementos encontrados en las descargas de procesos industriales y mineros, a través de un humedal artificial de flujo superficial mediante *E. crassipes* en condiciones de temperatura del ambiente diferentes.

Los tipos de tratamiento en estos casos a veces requieren de la aplicación de compuestos químicos que dejan residuos peligrosos, perjudiciales para el ambiente, es por eso que se trata de demostrar una alternativa mediante el uso del tratamiento biológico que deja residuos más fáciles de manejar y menos contaminantes.

Los resultados fueron tratados mediante pruebas estadísticas; la prueba t de student para demostrar la significación del experimento así como sus requisitos como la prueba de normalidad aplicado a los datos, los cuales llevan a cuantificar la probabilidad de lo realizado.

El humedal artificial de flujo superficial mediante *E. crassipes*, presenta una diferencia significativa en su capacidad de remoción para las temperaturas del ambiente trabajadas, donde se encuentra que existe una mayor capacidad de remoción de metales en meses cálidos que en meses fríos.

El efecto combinado de los tres metales hace que las proporciones en la remoción de cada metal resulte ser distinta para cada caso, donde se puede observar un efecto sinérgico para el manganeso y cromo.

ABSTRACT

In this paper the removal capacity is assessed of three heavy metals such as hexavalent chromium, iron and manganese, these elements found in the discharges of industrial processes and miners through an artificial wetland surface flow by *E. crassipes* conditions on different ambient temperature.

The types of treatment in these cases sometimes require the application of hazardous chemicals which leave residues, this is harmful to the environment, is for it, that is demonstrated by an alternative biological treatment that leaves residues easier to handle and less polluting.

The results were treated by statistical tests, t - student test to demonstrate the significance of the experiment as well as requirements the normality test applied to data, which lead to quantify the likelihood of achievements.

The artificial wetland surface flow by *E. crassipes* shows a significant difference in the removal capacity for ambient temperatures worked, where there is a greater capacity for metal removal in cold months than in warm months.

The combined effect of the three metals makes the proportions on removal each metal to be different for each case, where you can observe a synergistic effect for manganese and chromium.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Determinación del problema

A diario las industrias y empresas mineras–metalúrgicas descargan grandes cantidades de aguas residuales contaminadas con metales a los cursos de agua, en algunos casos son sometidas a cierto tipo de tratamiento el cual no siempre logra cumplir los niveles de los parámetros establecidos en la legislación. Otras veces son vertidas sin tratamiento alguno, provocando de esta manera una alteración del hábitat acuático local así como la contaminación de las aguas perjudicando a las poblaciones aledañas dependientes del recurso.

En los sistemas acuáticos se disuelven numerosas sales y sustancias de acuerdo a sus solubilidades, uno de los componentes químicos potencialmente más tóxicos son los metales pesados, como por ejemplo el cromo, actualmente el aporte de las concentraciones es debido a las actividades humanas, como la minería y los procesos industriales que aportan metales al agua.

El cromo hexavalente es un elemento utilizado en diversos procesos industriales, en sectores como la minería, industria farmacéutica, la galvanoplastia (chapado electrolítico), la tintura de cueros y manufacturación de pintura.

El hierro puede encontrarse en efluentes de actividades minero-metalúrgicas, así como en las aguas subterráneas se puede determinar la existencia de grandes concentraciones de hierro, la presencia de hierro ocasiona efectos indeseables como turbiedad ocasionada por precipitados de óxidos e hidróxidos.

“El manganeso puede entrar al aire desde plantas de fierro, acero y de centrales eléctricas, hornos de coque y de polvo generado por operaciones de minería. Puede entrar al agua y al suelo desde depósitos naturales, a través de la disposición de residuos o por deposición desde el aire”.

Sin embargo en suma estos tres metales los podemos ubicar dentro de las aguas residuales de las actividades minero-metalúrgicas, actividad muy difundida en el territorio nacional.

Cuando se realiza el tratamiento del agua contaminada con metales en muchos casos requiere el uso de sustancias químicas con las que es posible cumplir con los valores establecidos por la norma, pero provocan otro tipo de contaminación que deben ser tratados.

El uso de tecnologías limpias disminuye la contaminación que se genera, puesto que no se usan otras sustancias más que el mismo organismo depurador, cuyo tratamiento deja residuos menos contaminantes.

1.2 Formulación del problema

¿Es posible que se remuevan los metales cromo, hierro y manganeso en un humedal artificial utilizando *Eicchornia crassipes*?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

- Evaluar la remoción de metales – Cr^{+6} , Fe^{+2} y Mn^{+2} – en el humedal artificial de flujo superficial mediante *E. crassipes* en diferentes condiciones ambientales.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar los rangos de concentración tolerable de cada metal aplicables a *E. crassipes*. en el humedal artificial de flujo superficial.
- Determinar el tiempo de retención óptimo en que la planta pueda tratar las aguas de manera eficiente.
- Determinar la capacidad de remoción de cromo hexavalente, hierro y manganeso del humedal artificial de flujo superficial a temperatura del ambiente mediante *E. crassipes*.

1.4 Justificación

El tratamiento que se aplica a las aguas con metales pesados muchas veces no llega a cumplir con los límites de los parámetros especificados en las normas, además de emplear el tratamiento químico que puede derivar residuos contaminantes, sin embargo es interesante saber si el tratamiento biológico logra cumplir dichos límites y con ello se conocería la importancia que puede llegar a tener esta investigación en caso de que se pueda remover el Cr^{+6} , Fe^{+2} y Mn^{+2} con eficiencia en el sistema planteado.

1.5 Importancia

1.5.1 Aspecto ambiental

- Radica en el uso de tecnología limpia para el tratamiento del agua proveniente de diversas actividades que presentan metales pesados como cromo, hierro y manganeso, de esta forma se reduce costos y minimiza impactos ambientales producidos por el empleo de otro tipo de tecnologías.
- Puesto que *E. crassipes* es una planta que vive en clima tropical y se encuentra en forma abundante en los diversos cuerpos de agua del territorio, se busca utilizarla como una opción para el tratamiento del agua con metales, trabajadas en un humedal artificial.

1.5.2 Aspecto legal

Se cumplirá con los parámetros de la normatividad vigente:

- Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM Aprueban Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas.
- Decreto Supremo N° 021-2009-VIVIENDA Aprueban Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario.

1.5.3 Aspecto económico

- Minimizar el costo del tratamiento de aguas con metales mediante el empleo de tecnología limpia.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes teóricos vinculados a la investigación

2.1.1 Base Histórica

El tratamiento de aguas residuales con *Eichhornia crassipes* en adelante *E. crassipes*, también conocido como jacintos de agua se ha empleado para aguas residuales crudas, así como para efluentes primarios y secundarios; con todo, el método más usado ha sido el de lagunas de estabilización combinadas con lagunas de jacintos de agua. El tratamiento con jacintos de agua, en fase activa de crecimiento, permite remover metales pesados, nutrientes, pesticidas y otros contaminantes orgánicos. Las raíces de los jacintos de agua soportan una masa activa de microorganismos que descomponen y ayudan en la remoción de contaminantes del agua residual.

Los humedales construidos artificialmente han sido redescubiertos en las últimas décadas como método eficaz para el tratamiento de aguas residuales. En los ecosistemas de humedal, la concentración de contaminantes disminuye con los procesos naturales de purificación con plantas acuáticas que son capaces de asimilarlos. El efecto depurador del jacinto de agua le permite asimilar grandes cantidades nitrógeno y fósforo, además de metales pesados como manganeso, cromo, cobre, zinc y plomo. Reduce también microorganismos patógenos y su sistema radicular es un excelente medio filtrante para minimizar los sólidos suspendidos.

Según Quiroz (2009) “Las potencialidades de esta planta fueron descubiertas por Sir Albert Howard en 1920. Este brillante científico especializado en agricultura, realizó estudios sobre la planta en India y publicó artículos relacionados con el aprovechamiento de ésta en la depuración de aguas residuales, usos derivados como abono orgánico y alimento para ganado porcino”.

“La habilidad del jacinto de agua para absorber los nutrientes y otros elementos ha sido ampliamente investigado. Además de estos elementos, toma calcio, magnesio, azufre, hierro, manganeso, el aluminio, el boro, cobre, molibdeno y zinc. La habilidad del jacinto de agua de extraer los nutrientes y los metales pesados puede ser explotada para tratar los efluentes de alcantarillados pasándolos a través de canales que contienen la planta” (Harley, 1996).

Martelo & Lara (2012) describieron que Las macrófitas flotantes comprenden un amplio y variado grupo de plantas, entre las que se destacan el jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), la lechugade agua (*Pistiastrariotes*), la salvinia (*SalviniaSpp.*), la redondita de agua (*Hydrocotyleranunculoides*), y algunas especies de lentejas de agua (*LemnaSpp.*, *SpirodellaSpp.*)... los procesos que tienen lugar para la depuración de contaminantes con macrófitas flotantes se dan a través de tres mecanismos primarios:

- Filtración y sedimentación de sólidos.
- Incorporación de nutrientes en plantas y su posterior cosechado.

- Degradación de la materia orgánica por un conjunto de microorganismos facultativos asociados a las raíces de las plantas; y en los detritos del fondo de la laguna, dependiendo del diseño.

Los metales pesados también han sido objeto de numerosos estudios. Por ejemplo, la *Salvinia rotundifolia* demostró una gran eficiencia en el tratamiento de plomo; *S. herzogii de la Sota* (*Salviniaceae*) y *Eichhornia crassipes* (*Pontederiaceae*) resultaron excelentes bioabsorbentes de cadmio, níquel, cobre, zinc, cromo y plomo.

Guerrero (1985) En este trabajo se evalúa la tasa de remoción de cuatro metales pesados, comúnmente encontrado en Aguas Residuales Industriales (A,R,I): Cobre, Cromo, Mercurio y Plata, mediante el empleo de plantas acuáticas vasculares "jacintos de Agua". "Las investigaciones para cada metal se realizaron, acondicionando aguas con cinco concentraciones diferentes que oscilaran por encima y por debajo del valor promedio encontrado en A,R,I, Se adoptó un modelo de comportamiento del sistema debido a la similitud que muestra la remoción de metales por el jacinto de Agua, con el estudio de cultivos puros de MONOD, Esto permite realizar los ajustes estadísticos a los datos experimentales encontrados en el presente proyecto.

La ecuación establecida para el estudio de remoción de metales por un método biológico es el siguiente:

$$\% \text{ Remoción} = A \times t / B + t$$

A= Porcentaje de remoción máxima

B= Tiempo mínimo para alcanzar la mitad de la remoción máxima,

t =Tiempo de remoción

Las constantes A y B, indican la tendencia a la remoción y el tiempo mínimo de recolección, respectivamente.

El Jacinto de Agua presenta limitación en su capacidad de remoción de metales, esto determina concentraciones máximas permisibles de metales en el agua para poder utilizar estas plantas acuáticas.”

El estudio de selectividad en la remoción de metales, indica que la presencia de Cromo, Mercurio y Plata disminuyen el porcentaje de remoción de Cobre, Se observa disminución en el porcentaje de remoción de Cromo, cuando están presentes Cobre, Mercurio y Plata en el agua residual. El caso del Mercurio es diferente a los dos anteriores, observándose más bien un efecto sinérgico.

2.1.2 Base Legal

En la parte la normativa del país podemos considerar el DS N°021-2009-VIVIENDA que regula las cantidades de cromo hexavalente y manganeso que puede verterse al sistema alcantarillado sanitario y el DS N°010-2010-MINAM que regula las concentraciones de hierro disuelto que pueden encontrarse en las descargas de efluentes líquidos de actividades Minero-Metalúrgicas.

En base a la información citada, se propone el presente trabajo de investigación que se cree logrará la remoción de los metales Cr^{+6} , Fe^{+2} y Mn^{+2} en el humedal artificial.

CAPÍTULO III VARIABLES E HIPÓTESIS

3.1 Hipótesis General

“Se puede remover los metales cromo, hierro y manganeso en un humedal artificial utilizando *Eichhornia crassipes*”.

3.2 Variables de la investigación

3.2.1 Variable Independiente

X = Tratamiento por humedal artificial de flujo superficial

Indicadores:

X₁.....Potencial de hidrógeno (pH)

X₂.....Temperatura (°C)

X₃.....Humedad Relativa (%)

X₄.....Tiempo de retención (d)

X₅.....Volumen tipo Batch (V): 75 L

X₆.....Porosidad del suelo (δ): 100 %

X₇.....Densidad de plantas (ρ): 0.024 Kg/L

3.2.2 Variable Dependiente

Y = Remoción de metales

Indicadores:

Y₁.....Potencial de hidrógeno (pH)

Y₂.....Concentración de metales final en agua (ppm o mg/L)

Según norma (ver subtítulo 1.5.2)

Y_{2,1} = Cr⁺⁶ → (VMA = 0.5 ppm)

Y_{2,2} = Mn⁺² → (VMA = 4 ppm)

Y_{2,3} = Fe⁺² → (LMP = 2 ppm)

3.3 Definición conceptual de variables

3.3.1 Tratamiento por humedal artificial de flujo superficial

Humedal artificial que proporciona tratamiento de aguas residuales a través de la floculación y sedimentación a través de plantas acuáticas que crecen de pie en aguas poco profundas. En algunos también hay áreas abiertas donde la biooxidación aeróbica complementa los procesos de eliminación física. Estos sistemas se asemejan a los humedales naturales en la función y la apariencia.

3.3.2 Remoción de metales

Los mecanismos de eliminación de metales en humedales artificiales son asimilación por parte de las plantas, adsorción, y precipitación.

3.4 Definición conceptual de indicadores

3.4.1 Potencial de hidrógeno (pH)

El pH (potencial de hidrógeno o concentración de protones) de una solución acuosa se define, de una manera conveniente, por medio de una función logarítmica:

$$\text{pH} = \log_{10} \frac{1}{[\text{H}^+]} = -\log_{10} [\text{H}^+]$$

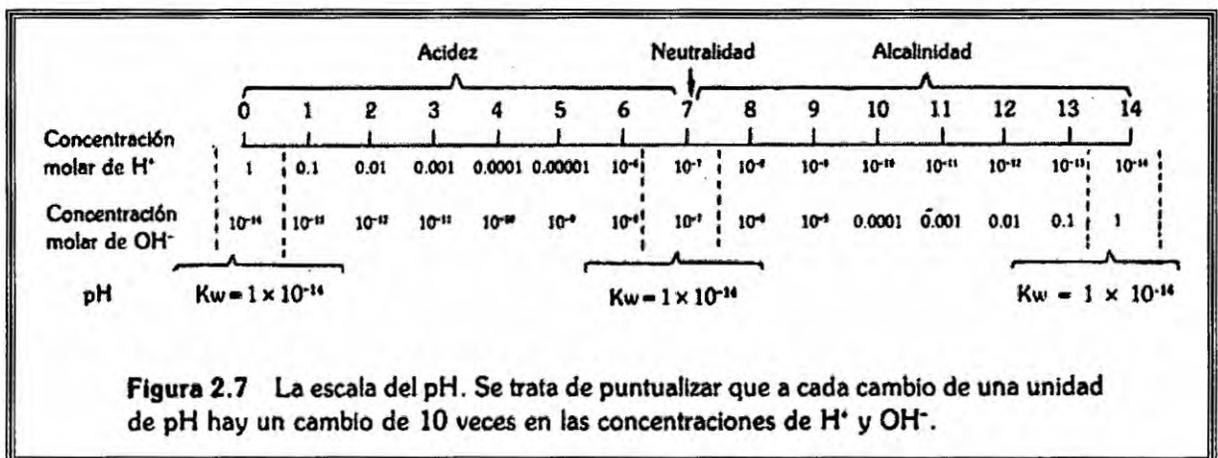
Esto quiere decir que el pH es el logaritmo negativo de la logarítmica, la variación de 10 veces en la concentración de protones en la solución (1.0×10^{-4} M a 1.0×10^{-5} M) sólo da lugar a la variación de una unidad de pH (de 4.0 a 5.0). En el agua pura a 25°C , como ya se ha mencionado antes, la concentración de protones es 1.0×10^{-7} M; por lo tanto, el pH del agua pura a 25°C será:

$$\text{pH} = \log_{10} \frac{1}{(1.0 \times 10^{-7})} = \log_{10} 1.0 \times 10^{-7} = 7.0$$

La escala del pH

La escala de pH está basada precisamente en la disociación del agua, y tiene como valor central el pH del agua pura a 25°C (figura 2.7); por tanto, es válida para soluciones acuosas. Cuando la concentración de protones es 1.0 M, el valor del pH es 0.0 ya que el \log_{10} de 1.0 es cero. En el otro extremo de la escala, cuando la concentración de protones es la mínima posible (1.0×10^{-14} M) el pH es 14.

FIGURA 3.1 ESCALA DEL pH



3.4.2 Temperatura (°C)

Definimos una magnitud llamada temperatura de modo que de dos sistemas en equilibrio térmico entre sí tienen el mismo valor de esta magnitud.

Las temperaturas de dos cuerpos en contacto térmico son exactamente iguales, pero el contacto permite el intercambio espontáneo de energía de uno de los cuerpos. Así ocurrirán siempre pequeñas fluctuaciones de energía de uno de los cuerpos.

Cualquier medida de la temperatura de un sistema lleva consigo el establecimiento de algún contacto o interacción de un dispositivo con el sistema y el termómetro.

3.4.3 Humedad Relativa (%)

Es la relación entre la cantidad de vapor de agua que tiene una masa de aire y la máxima que podría tener.

3.4.4 Tiempo de retención (d)

Cada partícula de fluido tarda exactamente el mismo tiempo en atravesar el reactor. Este tiempo de flujo completo en general se designa como tiempo de retención.

Para este caso por tratarse de un reactor de tipo Batch, en el cual no hay flujo de entrada ni de salida, ocurre que este tiempo de retención será el tiempo en el que la solución realizada se encuentra dentro del Humedal Artificial.

3.4.5 Volumen tipo Batch (L)

Es el espacio ocupado por el sistema material considerado.

Se indica tipo Batch debido a que en un tanque de esta clase no hay flujo de entrada ni de salida, por lo que se mantiene constante el volumen. Siendo el volumen total correspondiente a 75 L.

3.4.6 Porosidad del suelo (δ)

Se designa con el nombre de porosidad el volumen de los espacios vacíos, llenos de agua o de aire, expresado en tanto por ciento del volumen total de la tierra.

Esta porosidad varía según los suelos y su determinación es de orden experimental. Para nuestro caso se tiene 100 % ya que no se ha aplicado algún tipo de grava.

3.4.7 Densidad de plantas (ρ)

Es el número de plantas por unidad de volumen. De la siguiente manera:

$$\rho = \frac{\text{peso (Kg.)}}{\text{Volumen (L)}}$$

3.4.8 Concentración de metales final en agua (ppm o mg/L)

Cuando se combinan peso y volumen, siempre es necesario especificar las unidades de cada uno. La concentración de soluto en partes por millón peso a volumen se define como el número de gramos de soluto puro disuelto, por cada 106 mililitros de solución (o cualquier otra proporción equivalente a ésta).

2463



Es muy común la interpretación en mg STO / L SLN. Nótese que esta unidad de concentración sirve como un factor de conversión entre la masa de soluto disuelto (mg) y el volumen de la solución (L).

Para nuestro caso el soluto (STO) será el metal indicado ya sea cromo, hierro o manganeso y el volumen de la solución (SLN) será el volumen total agregado.

3.5 Definición operacional de las variables

3.5.1 Tratamiento por humedal artificial de flujo superficial (X)

La capacidad de remoción en un humedal artificial de flujo superficial es posible medirlo según las condiciones ambientales (temperatura y humedad relativa) y de los parámetros de tratamiento (pH, tiempo de retención, porosidad de suelo, volumen y densidad de plantas).

3.5.2 Remoción de metales (Y)

La medición de esta variable está dada por la concentración final del metal pesado luego del proceso al que será sometido.

Luego:

$$Y = f(X)$$

CAPÍTULO IV METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Tipo de investigación

Esta es una investigación de tipo experimental, pues se realizaron pruebas en el laboratorio.

4.2 Diseño de la investigación

Se aplicó un diseño de enfoque analítico – experimental aleatorio.

4.3 Ámbito geográfico

La experiencia se realizó en las instalaciones del laboratorio Delta Lab SAC, ubicado en Av. Carretera Central Km 9.3 - Ate Vitarte.

- **Altura:** 400 m.s.n.m.
- **Presión atmosférica:** 1016 mb.

4.4 Experiencia preliminar

Para realizar la experiencia en el humedal artificial de flujo superficial se requirieron de datos que no se pudieron encontrar en la literatura, debido a esta carencia de datos se realizaron experiencias previas con el fin de determinar la concentración inicial de los metales y el tiempo óptimo de retención, así también las plantas debieron cumplir ciertos requisitos los cuales se indican a continuación:

4.4.1 Recolección de la muestra

En este estudio *E. crassipes* fue traído de un lugar denominado Palle¹ donde su medio acuático fue agua de manantial.

Estas plantas fueron traídas al laboratorio y cultivadas en tinas en donde el medio de soporte acuático fue agua potable almacenado (12 horas) y la alimentación un fertilizante natural (cuya aportación de metales fue analizado mediante el blanco control).

4.4.2 Selección de *E. crassipes*

Las plantas se seleccionaron según el tamaño y aspecto normal de hojas y raíces. También se tomó en cuenta el peso (hojas más raíces). Durante el tiempo de estudio se observó el color y forma de hojas así como el crecimiento en general.

4.4.3 Selección de concentración de metales

Se requirió investigar la concentración de cada metal en el agua residual, en el que *E. crassipes* es capaz de soportar sin alterar sus funciones metabólicas, este paso permitió conocer que concentraciones de metal es capaz de remover.

Se realizaron experiencias previas con la finalidad de determinar un rango de concentración tolerable de cada metal (Cromo Hexavalente, Hierro Disuelto y Manganeso Disuelto) aplicables a *E. crassipes* en el humedal artificial de

¹ Palle: ubicado camino a la carretera que lleva a Marcahuasi, saliendo de Chosica.

flujo superficial. Estas pruebas se realizaron en acuarios de vidrio individuales de 30 cm largo, 20 cm de ancho y 30 cm de alto, un volumen de 4 L, un peso aproximado de *E. crassipes* de 100 g y en un tiempo de 15 días.

➤ Para Cromo Hexavalente – Cr^{+6} :

Las plantas fueron colocadas en 3 acuarios que contenían 4 L de solución madre de cromo hexavalente, en el primer acuario se agregó una concentración igual a 10 ppm; en el segundo 20 ppm y finalmente en el tercero 30 ppm.

➤ Para Hierro Disuelto – Fe^{+2} :

Las plantas fueron colocadas en 3 acuarios que contenían 4 L de solución madre de hierro disuelto, en el primer acuario se agregó una concentración igual a 10 ppm; en el segundo 20 ppm y finalmente en el tercero 40 ppm.

➤ Para Manganeseo – Mn^{+2} :

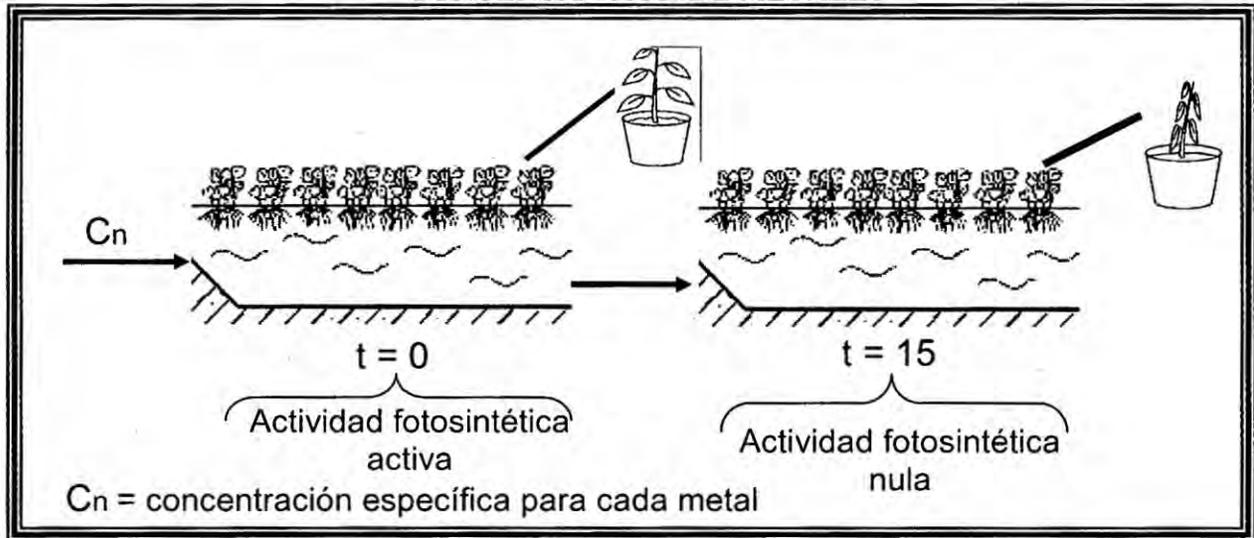
En el caso del manganeseo se realizó de manera similar a las concentraciones del hierro, pues el nivel de toxicidad en ambos es similar.

➤ Para el Blanco Control:

Se colocó en otra celda solamente agua desionizada con la planta, denominada Blanco Control, el cual ayudará a determinar si los componentes

del agua desionizada – listadas en ANEXO 2 – son perjudiciales o no para la planta.

FIGURA N°4.1 DETERMINACIÓN DE UN RANGO DE CONCENTRACIÓN DE METALES



Fuente: Elaboración propia

4.4.4 Tiempo óptimo de retención

Para la determinación del tiempo óptimo de retención se realizó ensayos con una solución que contenían las concentraciones tolerables para cada metal determinadas al realizar las pruebas referidas en el subtítulo 4.4.3.

Las concentraciones a tomar en cuenta no fueron las máximas pues se asumió que el efecto combinado de los metales podría resultar ser tóxico para la planta, las concentraciones a tomar fueron mayores a los encontrados en la norma y en el caso del manganeso la concentración que se tomó fue similar al del hierro, pues los efectos de estos dos metales pesados a nivel de toxicidad son los menos nocivos.

Estas concentraciones fueron iguales a 1.5 ppm de Cr^{+6} , 7 ppm de Fe^{+2} y 7 ppm de Mn^{+2} ; estas concentraciones son menores a las halladas en los experimentos aislados, razón por la cual se asegura que *E. crassipes* puede seguir desarrollándose en este medio.

Se colocó en una celda 5 L de esta solución (**1.5 ppm de Cr^{+6} , 7 ppm de Fe^{+2} y 7 ppm de Mn^{+2}**), se pesó aproximadamente 125 g de *E. crassipes* a esta celda se le denominó **Celda Experimental**.

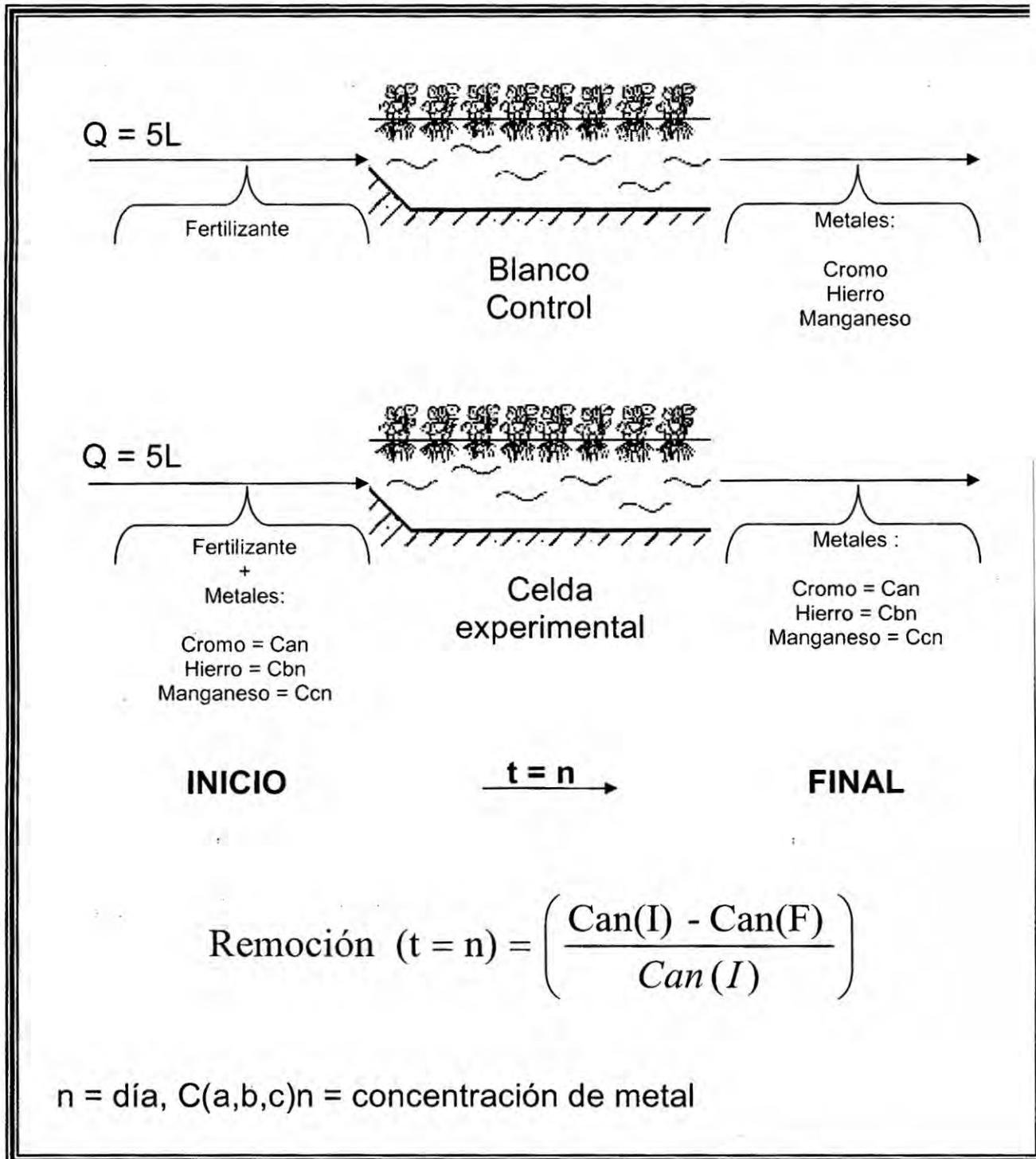
En otra celda se realizó el mismo procedimiento pero la solución añadida fue agua desionizada esto sirvió para conocer las aportaciones de Cr^{+6} , Fe^{+2} y Mn^{+2} que ofrece el fertilizante natural y se le denominó **Blanco Control**.

Para ambos casos se agregó 7 g de fertilizante natural y **el pH se mantuvo en 7 ± 1** .

Cada 24 horas se tomó una muestra de agua y se analizó la concentración de los 3 metales (Cr^{+6} , Fe^{+2} y Mn^{+2}).

A partir de los resultados obtenidos se eligió las concentraciones finales menores de dichos metales que se dieron en el menor tiempo, pues en general es ideal un tiempo de retención menor, y el día en que se ocurrió esto correspondió al tiempo óptimo de retención. Para ello se realizó un gráfico Tiempo de retención VS Porcentaje de remoción (aplicado a la remoción total para cada metal).

FIGURA N°4.2 DETERMINACIÓN DE TIEMPO ÓPTIMO DE RETENCIÓN



Fuente: Elaboración propia

4.5 Determinación del universo

El desarrollo de la tesis está enmarcado a nivel de laboratorio por lo tanto quedan establecidos los siguientes aspectos.

4.5.1 Muestra

La totalidad de la población fue la muestra (ver subtítulo 3.2.1) y la especie que se utilizó fue *E. crassipes* con un peso de plantas total de 1.8 Kg. en el humedal artificial de flujo superficial.

4.5.2 Metales pesados

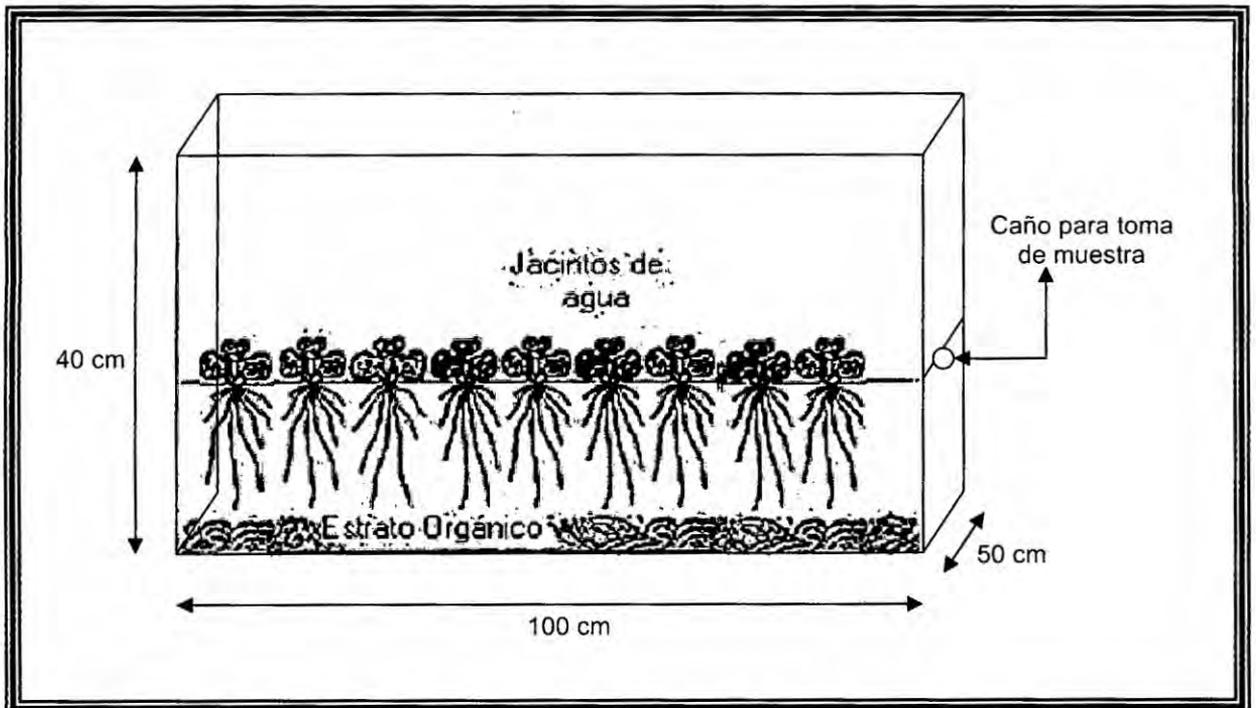
Los metales pesados que se utilizaron fueron cromo hexavalente (Cr^{+6}), hierro disuelto (Fe^{+2}) y manganeso soluble (Mn^{+2}).

4.5.3 Humedal artificial de flujo superficial

Para la implementación del humedal se empleó un acuario de vidrio, cuyas dimensiones fueron de 50 cm de ancho, 100 cm de largo y 40 cm de altura; con un espesor de 4 mm.

El soporte acuático fue agua desionizada (75 L aprox.), la alimentación un fertilizante natural y el medio *E. crassipes* (1.8 Kg. aprox.).

FIGURA N°4.3 HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUPERFICIAL



Fuente: Elaboración propia

4.6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.-

4.6.1 Monitoreo del humedal artificial de flujo superficial:

a) Condiciones ambientales:

La temperatura ambiental y la humedad relativa se midieron a las 8:00, 12:00 y 17:00 horas, empleando un termohigrómetro. Durante el periodo hallado al realizar las pruebas referidas en el subtítulo 4.4.4.

b) Determinación de concentración de metales:

Se trabajó con las concentraciones iniciales de (Cr^{+6} , Fe^{+2} y Mn^{+2}) halladas en las pruebas referidas en el subtítulo 4.4.3.

Las muestras de agua fueron tomadas del humedal artificial de flujo superficial subtítulo 4.5.3 tanto al inicio (1 muestra) como al final (3 muestras) del periodo definido, dependiendo del tiempo óptimo de retención se tomó la muestra de agua que fue analizada para determinar la concentración final de cada metal, según los siguientes métodos:

- Para determinar Cr^{+6} se empleó:

APHA-AWWA-WEF.22nd Edition 2012.3500-Cr B. Colorimetric Method.

- Para determinar Fe^{+2} se empleó:

APHA-AWWA-WEF.22nd Edition 2012.3500-Fe B. Phenanthroline Method.

- Para determinar Mn^{+2} se empleó:

APHA-AWWA-WEF.22nd Edition 2012.3500-Mn B. Persulfate Method.

4.6.2 Determinación del porcentaje de remoción - eficiencia:

Se empleará la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Remoción} = \frac{C_o - C_f}{C_o} \times 100 \%$$

Donde:

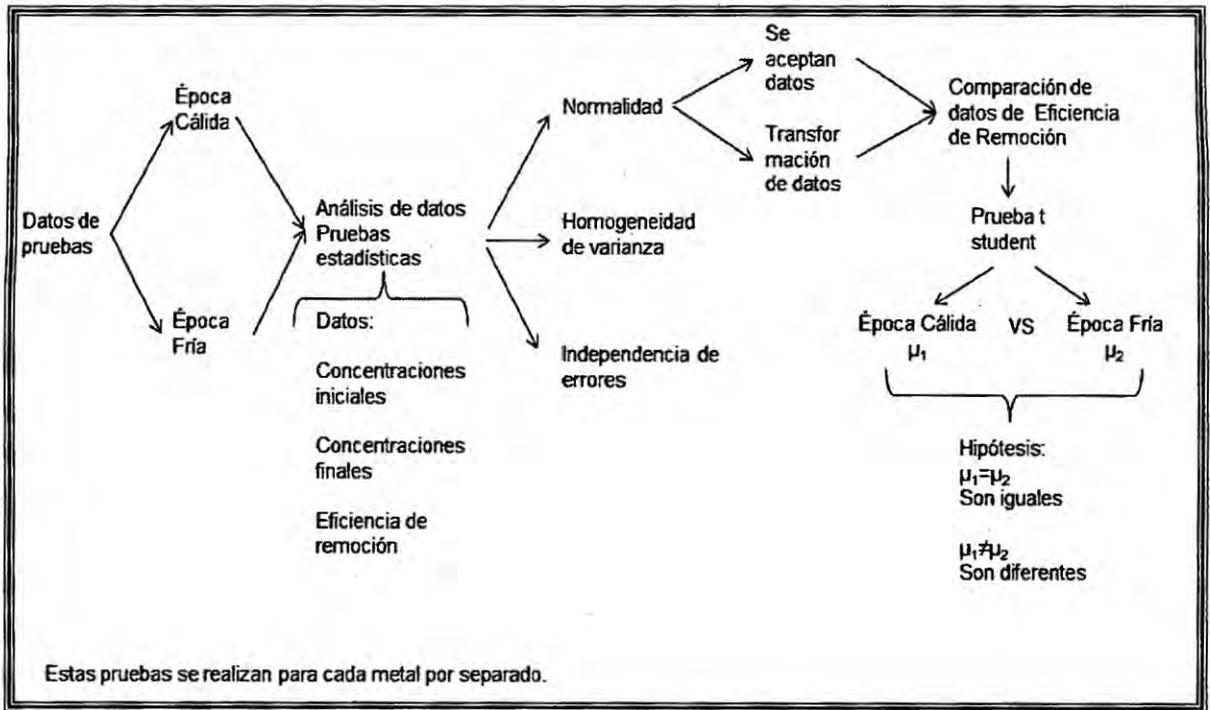
C_o : Concentración inicial de metales, Cr^{+6} , Fe^{+2} y Mn^{+2} (según sea el caso).

C_f : Concentración final de metales, Cr^{+6} , Fe^{+2} y Mn^{+2} (según sea el caso).

4.7 Procesamiento estadístico y análisis de datos

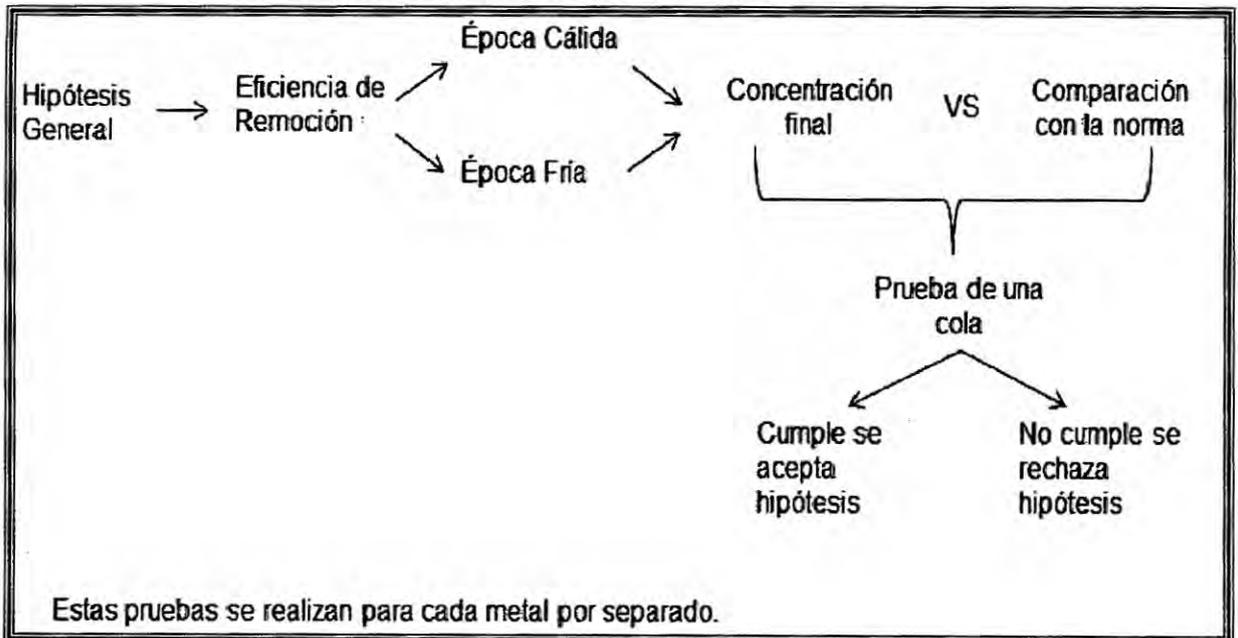
Se esquematiza el procedimiento realizado para las pruebas estadísticas:

FIGURA N°4.4 ANÁLISIS SOBRE CONDICIONES AMBIENTALES



Elaboración propia

FIGURA N°4.5 ANÁLISIS SOBRE LA REMOCIÓN



Elaboración propia

Para el tratamiento de los datos se hizo uso del programa estadístico Statistical Analysis System (SAS) versión 8.2 y Excel.

Una vez determinadas las concentraciones finales de los metales, se realizó un comparativo con los valores indicados en el subtítulo **1.5.2**.

Según esto se trataron los datos a fin de contrastar la hipótesis.

CAPÍTULO V RESULTADOS

5.1. Selección de concentración de metales

Al realizar el experimento se agregó distintas concentraciones para los tres tipos de metales, también se pesó la cantidad de *E. crassipes* usada para cada caso particular y cuyos resultados se presentan a continuación en la TABLA N° 5.1:

TABLA N° 5.1
CONCENTRACIÓN DE METALES Y PESO DE *E. crassipes* AL INICIO DEL ENSAYO

Prueba	Concentración (ppm)	Peso de <i>E. crassipes</i> (g)
<i>Blanco Control</i>	0	109
<i>Fe⁺²</i>	10	122
	20	130
	40	129
<i>Mn⁺²</i>	10	113
	20	102
	40	118
<i>Cr⁺⁶</i>	10	122
	20	128
	30	132

Fuente: Elaboración propia

Se monitoreó las condiciones ambientales solo con el objetivo de conocer si existen variaciones significativas en cuanto a las mismas (temperatura y humedad relativa) y se observó los cambios en la planta por 15 días, obteniendo los siguientes datos:

TABLA N° 5.2
MONITOREO DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES

Día	Hora	Condiciones ambientales	
		T (°C)	HR (%)
0	15:10	26.8	57
1	15:20	26.9	55
2	15:14	24.8	61
3	15:14	26.3	59
4	15:32	26.9	55
5	13:18	26.1	58
6	-	-	-
7	15:23	26.5	58
8	15:06	26.9	59
9	14:57	23.8	67
10	15:31	26.4	61
11	15:14	27.6	54
12	13:01	25.9	62
13	-	-	-
14	15:14	25.9	57

Donde: T = temperatura; HR = humedad relativa
Fuente: Elaboración propia

Se realizó el análisis estadístico a los datos obtenidos de los pesos y las condiciones ambientales (temperatura y humedad relativa), encontrándose lo siguiente:

TABLA N° 5.3
DATOS ESTADÍSTICOS

Estadístico	Condiciones ambientales	
	Temperatura	Humedad Relativa
x	26.22	58.69
s	0.99	3.50
CV	3.79	5.96

Donde: \bar{x} = media, s = desviación estándar, CV = coeficiente de variación
Fuente: Elaboración propia

Según los datos estadísticos indican que siguen una distribución normal y no se encuentra una variación significativa en cuanto a las condiciones ambientales (para todos los casos $CV < 10\%$), de esta manera aseguramos que las condiciones ambientales no tuvieron variaciones significativas durante el tiempo de evaluación de 15 días.

A continuación se presentan las imágenes de las pruebas realizadas a las plantas - *E. crassipes* - empezando por el Blanco Control luego para el cromo hexavalente, hierro y finalmente manganeso, en el día inicial (día 0) comparado con el día final (día 14) – luego de 15 días.

BLANCO CONTROL

FIGURA N° 5.1
BLANCO CONTROL INICIO



FIGURA N° 5.2
BLANCO CONTROL FINAL



* Se puede apreciar de arriba hacia abajo a la planta desde el inicio de la prueba y después de 15 días en un medio con solo agua desionizada.

CROMO HEXAVALENTE

FIGURA N° 5.3
INICIO C = 10 ppm



FIGURA N° 5.4
INICIO C = 20 ppm



FIGURA N° 5.5
INICIO C = 30 ppm



FIGURA N° 5.6
FINAL C = 10 ppm



FIGURA N° 5.7
FINAL C = 20 ppm



FIGURA N° 5.8
FINAL C = 30 ppm



* Se puede apreciar de arriba hacia abajo a la planta desde el inicio de la prueba y después de 15 días en una misma concentración de metal.

HIERRO DISUELTO

FIGURA N° 5.9
INICIO C = 10 ppm



FIGURA N° 5.12
FINAL C = 10 ppm



FIGURA N° 5.10
INICIO C = 20 ppm



FIGURA N° 5.13
FINAL C = 20 ppm



FIGURA N° 5.11
INICIO C = 40 ppm



FIGURA N° 5.14
FINAL C = 40 ppm



* Se puede apreciar de arriba hacia abajo a la planta desde el inicio de la prueba y después de 15 días en una misma concentración de metal.

MANGANESO DISUELTO

FIGURA N° 5.15
INICIO C = 10 ppm



FIGURA N° 5.18
FINAL C = 10 ppm



FIGURA N° 5.16
INICIO C = 20 ppm



FIGURA N° 5.19
FINAL C = 20 ppm



FIGURA N° 5.17
INICIO C = 40 ppm



FIGURA N° 5.20
FINAL C = 40 ppm



* Se puede apreciar de arriba hacia abajo a la planta desde el inicio de la prueba y después de 15 días en una misma concentración de metal.

Para todos los casos se colocó una planta en buenas condiciones (color de hojas verdes y formas enteras), no se utilizó plantas maltratadas, a continuación se describe lo que se encuentra al finalizar la experiencia (luego de 15 días). Según las imágenes mostradas se pudo observar lo siguiente:

BLANCO CONTROL

- La tonalidad verde ha disminuido sin embargo la planta continua creciendo notándose este crecimiento en la expansión de sus hojas y altura de sus ramas.

CROMO HEXAVALENTE

Para C = 10 ppm y 20 ppm

- La planta tiene hojas enteras, no se observa que hayan comenzado a secarse, se observa coloración verdosa en las hojas aunque la tonalidad ha disminuido.

Para C = 30 ppm

- La mayoría de sus hojas comenzaron a secarse, notándose una tonalidad marrón en algunas de ellas.

HIERRO DISUELTO

Para C = 10 ppm, 20 ppm, 40 ppm

- La planta tiene hojas enteras, no se observa que hayan comenzado a secarse, se observa coloración verdosa en las hojas aunque la tonalidad ha disminuido.

MANGANESO DISUELTO

Para C = 10 ppm, 20 ppm, 40 ppm

- La planta tiene hojas enteras, no se observa que hayan comenzado a secarse, se observa coloración verdosa en las hojas aunque la tonalidad ha disminuido.

Las observaciones realizadas en la experimentación durante el período de prueba, nos permite determinar que:

- El peso inicial de las plantas en cada caso de la experimentación no tiene variación significativa por lo que cada una tuvo la misma oportunidad de afectación.
- Las condiciones ambientales no sufrieron variaciones significativas durante el tiempo de evaluación lo cual permite asegurar que las plantas no sufrieron cambios bruscos de las mismas y las respuestas son afectadas por estas condiciones uniformes.
- El agua desionizada no fue perjudicial para la planta puesto que *E. crassipes* continua su crecimiento con solamente el agua desionizada como medio de soporte.

➤ Según lo anterior *E. crassipes* puede soportar las siguientes concentraciones de metales sin detrimento de sus actividades metabólicas:

TABLA N° 5.4
CONCENTRACIÓN TOLERABLE DE METALES

Metales	Concentración tolerable (ppm)
Cr ⁺⁶	20
Fe ⁺²	40
Mn ⁺²	40

Fuente: Elaboración propia

Lo encontrado nos permitirá continuar con la siguiente prueba, acerca del Tiempo óptimo de retención.

5.2. Tiempo óptimo de retención

Al realizar la prueba se pesó la cantidad de *E. crassipes* que se introdujo en cada celda de experimentación y cuyos resultados se presentan a continuación en la TABLA N° 5.5:

TABLA N° 5.5
PESOS DE PLANTAS

Prueba	Peso de <i>E. crassipes</i> (g)
Blanco Control	118
Celda Experimental	126

Fuente: Elaboración propia

Se monitoreó con ayuda del termohigrómetro (calibrado) las condiciones ambientales (temperatura y humedad relativa) con el objetivo de conocer si existen variaciones significativas en cuanto a las mismas, durante todo el período de prueba en este caso es igual a 6 días y cuyos resultados se presentan a continuación en la TABLA N° 5.6:

TABLA N° 5.6
MONITOREO DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES – Tr

Día	Condiciones ambientales	
	T(°C)	HR (%)
0	26.3	70
1	27.4	72
2	30.6	76
3	26.5	74
4	26.9	76
5	27.5	72

T = temperatura; HR = humedad relativa
 Fuente: Elaboración propia

Se realizó el análisis estadístico a los datos obtenidos de las condiciones ambientales (temperatura y humedad relativa), encontrándose lo siguiente:

TABLA N° 5.7
DATOS ESTADÍSTICOS – Tr

Estadístico	Condiciones ambientales	
	Temperatura	Humedad Relativa
x	27.53	73.33
s	1.58	3.44
CV	5.72	6.67

Donde: \bar{x} = media, s = desviación estándar, CV = coeficiente de variación
Fuente: Elaboración propia

Según los datos estadísticos indican que siguen una distribución normal y no se encuentra una variación significativa en las condiciones ambientales ($CV < 10\%$), de esta manera aseguramos que las condiciones ambientales no tuvieron variaciones significativas durante el tiempo de evaluación de 6 días, por lo tanto las plantas fueron afectadas de la misma forma durante la experimentación.

Se realizó la inspección visual para conocer cómo se comportaba la planta en este nuevo entorno, no se observó efectos negativos en la planta por lo que lo asumido al inicio fue adecuado (“Las concentraciones a tomar en cuenta no fueron las máximas pues se asumió que el efecto combinado de los metales podría resultar ser tóxico para la planta, las concentraciones a tomar fueron mayores a los encontrados en la norma” ...), no hubo dificultades durante el tiempo de prueba, las figuras se muestran a continuación:

BLANCO CONTROL

FIGURA N° 5.21
BLANCO CONTROL INICIO ($Tr = 0$)

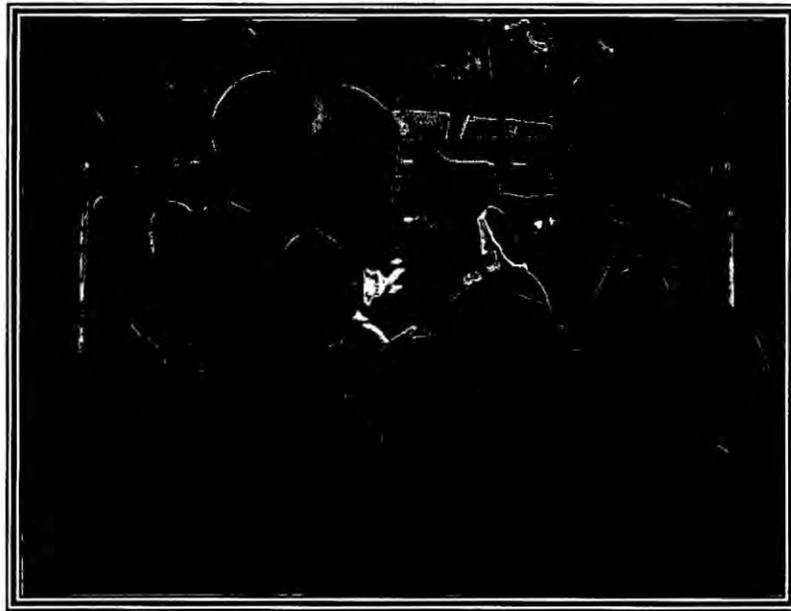
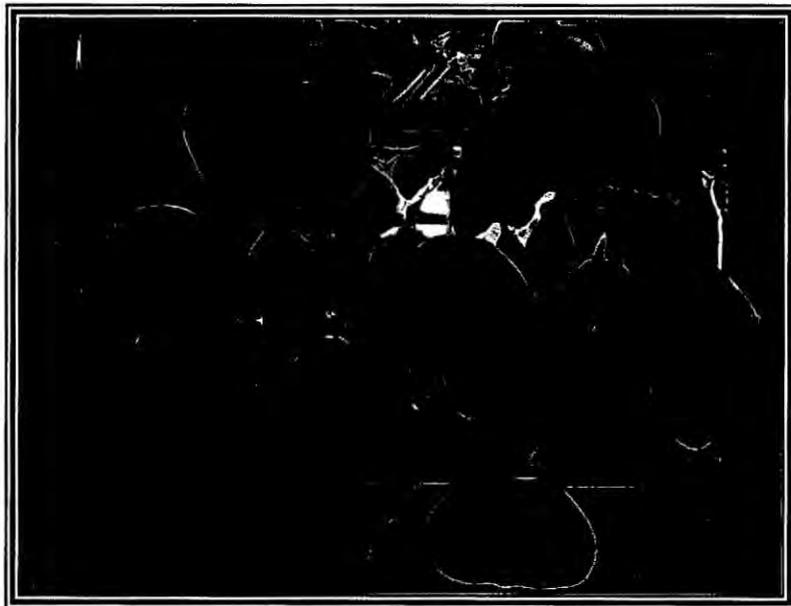


FIGURA N° 5.22
BLANCO CONTROL FINAL ($Tr = 5$)



* Se puede apreciar de arriba hacia abajo a la planta desde el inicio de la prueba y después de 5 días en un medio con agua desionizada y fertilizante.

CELDA EXPERIMENTAL

FIGURA N° 5.23
Tr = 0

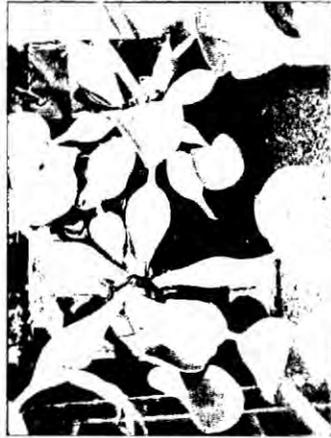


FIGURA N° 5.24
Tr = 1



FIGURA N° 5.25
Tr = 2



FIGURA N° 5.26
Tr = 3



FIGURA N° 5.27
Tr = 4

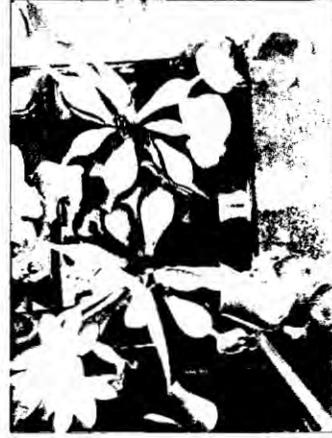


FIGURA N° 5.28
Tr = 5



* Se puede apreciar de izquierda a derecha a la planta en diferentes tiempos de retención. En el medio de soporte se encuentran las concentraciones de metales fijadas en la prueba anterior.

Se realizó el análisis de los metales (cromo hexavalente, hierro y manganeso disuelto) en el Blanco Control, para determinar las aportaciones de los metales en la experimentación, los valores obtenidos no son significativos (véase TABLA N° 5.8 en la página 47), es decir que el fertilizante utilizado no aporta concentraciones significativas de metales que puedan alterar (aumentar) las concentraciones iniciales que se aplican a la Celda Experimental.

TABLA N° 5.8
CONCENTRACIONES DE METALES EN BLANCO CONTROL

Blanco Control	Concentración (ppm)	Tiempos de Retención (d)					
		0	1	2	3	4	5
	Cr⁺⁶	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Fe⁺²	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.002
	Mn⁺²	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Fuente: Elaboración propia

Se realizó el análisis de metales en la Celda Experimental, cada 24 horas se tomó una muestra de agua, según su tiempo de retención, encontrándose lo siguiente:

TABLA N° 5.9
CONCENTRACIONES SEGÚN TIEMPOS DE RETENCIÓN

Celda Experimental	Concentración (ppm)	Tiempos de Retención (d)					
		0	1	2	3	4	5
	Cr ⁺⁶	1.480	1.337	1.145	0.650	0.489	0.463
	Fe ⁺²	6.903	6.655	5.324	3.943	2.000	1.875
	Mn ⁺²	6.752	3.485	2.75	2.437	1.872	1.512

Fuente: Elaboración propia

La norma (véase el subtítulo 1.5.2) limita las concentraciones de los metales en estudio a valores específicos, véase TABLA N° 5.10.

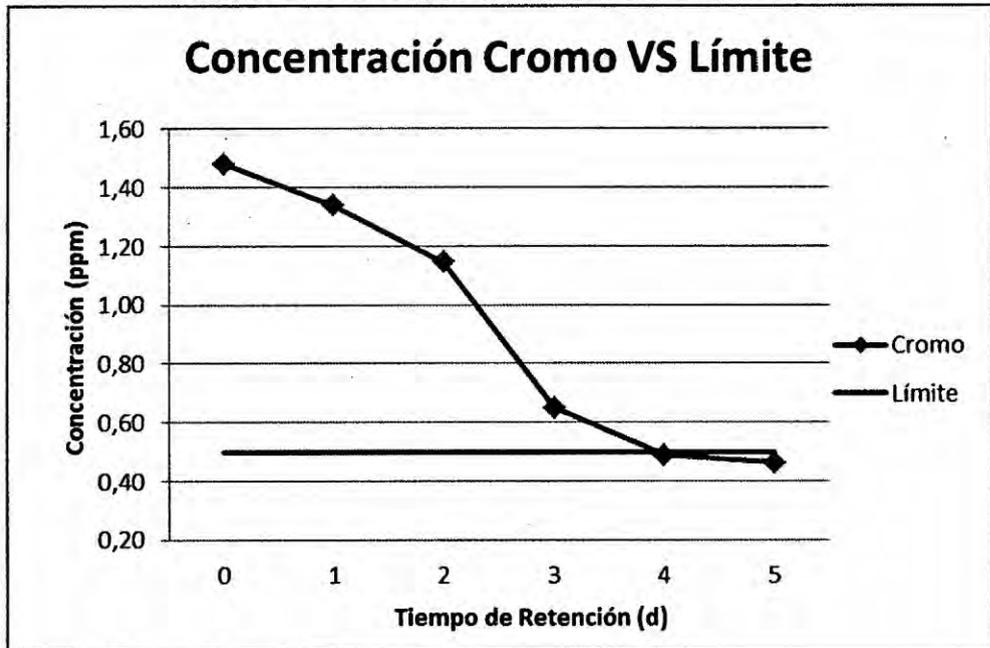
TABLA N° 5.10
LÍMITES DE METALES SEGÚN NORMAS

Metal	Límite (ppm)
Cr ⁺⁶	0.5
Fe ⁺²	2
Mn ⁺²	4

Fuente: Elaboración propia

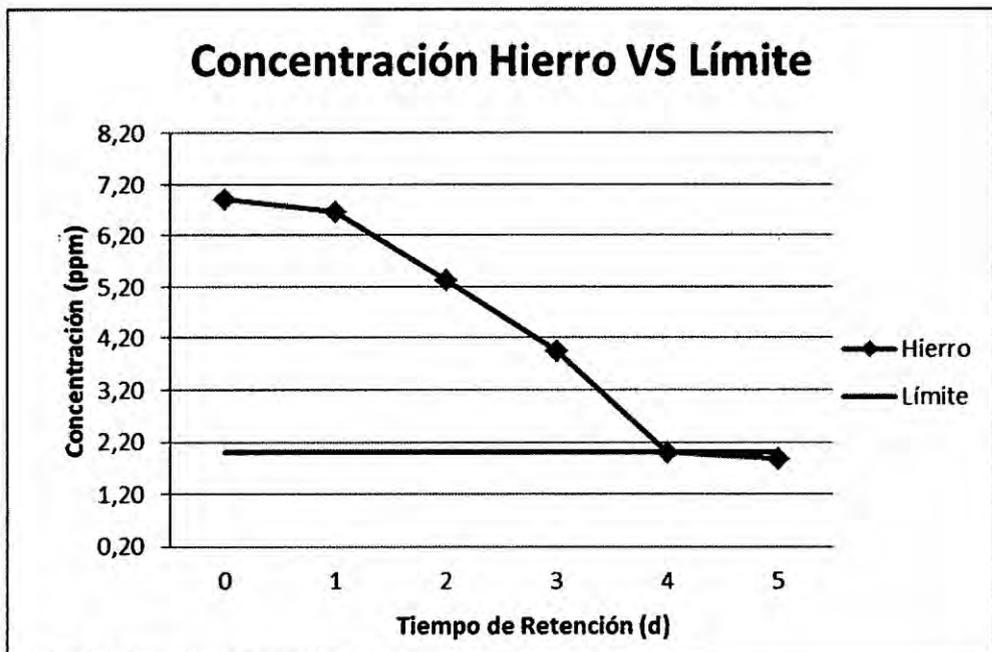
A fin de una mejor ilustración sobre las concentraciones en función del tiempo de retención y comparándolas con las normas se realizaron las siguientes gráficas:

GRÁFICA N° 5.1
CONCENTRACIÓN DE CROMO VS LÍMITE



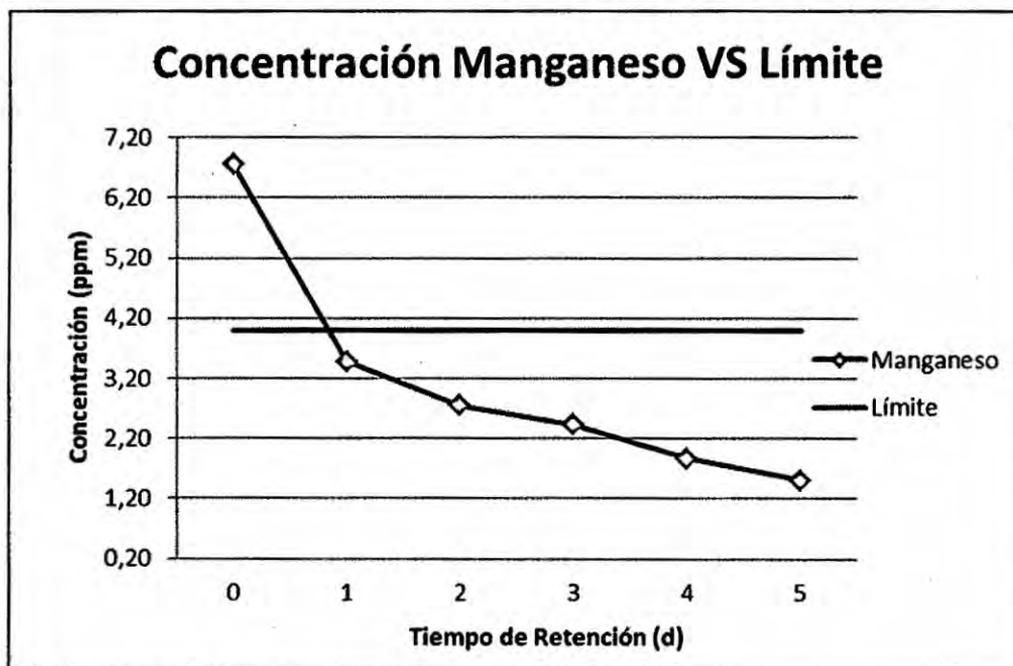
Fuente: Elaboración propia

GRÁFICA N° 5.2
CONCENTRACIÓN DE HIERRO VS LÍMITE



Fuente: Elaboración propia

GRÁFICA N° 5.3
CONCENTRACIÓN DE MANGANESO VS LÍMITE



Fuente: Elaboración propia

Los datos de concentración de cada metal de la TABLA N° 5.9 (véase en la página 48) se colocaron en función al tiempo de retención y porcentaje de remoción para cada metal empleándose la fórmula del subtítulo 4.6.2:

$$\%Remoción = \frac{C_o - C_f}{C_o} \times 100\%$$

Donde:

C_o : Concentración inicial de Cr^{+6} , Fe^{+2} y Mn^{+2} (según sea el caso).

C_f : Concentración final de Cr^{+6} , Fe^{+2} y Mn^{+2} (según sea el caso).

En la siguiente tabla observamos los porcentajes de remoción de los metales en el humedal artificial de flujo superficial mediante *E. crassipes*, los porcentajes han sido calculados en base a las concentraciones iniciales agregadas y a las determinadas en el tiempo de retención indicados.

TABLA N° 5.11
REMOCIÓN EN FUNCIÓN AL TIEMPO DE RETENCIÓN

Metal	Porcentaje de Remoción (%)				
	Tr = 1	Tr = 2	Tr = 3	Tr = 4	Tr = 5
Cr ⁺⁶	9.7	22.6	56.1	67.0	68.7
Fe ⁺²	3.6	22.9	42.9	70.7	72.8
Mn ⁺²	48.4	59.3	63.9	72.3	77.6

Fuente: Elaboración propia

Para conocer la remoción total de los metales en el humedal artificial, se aplicó la fórmula del subtítulo 4.6.2, aplicada a la concentración total inicial y las totales finales de los metales en estudio (según tiempo de retención) de la TABLA 5.11 (véase en la página 51).

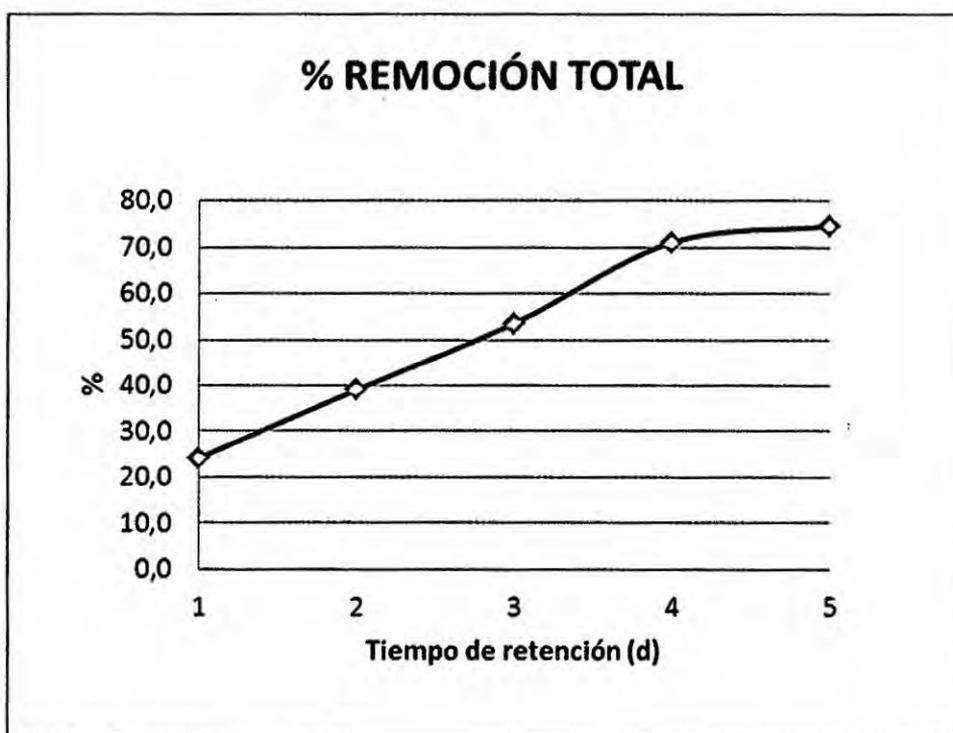
TABLA 5.12
REMOCIÓN TOTAL SEGÚN TIEMPOS DE RETENCIÓN

	Tiempos de Retención (d)					
	0	1	2	3	4	5
Concentraciones Totales (ppm)	15.1	11.5	9.2	7.0	4.4	3.9
Remoción Total (%)	-	24.2	39.1	53.6	71.0	74.6

Fuente: Elaboración propia

La siguiente gráfica muestra el porcentaje de remoción total de los metales con respecto al tiempo de retención, nótese que el porcentaje de remoción aumenta en el tiempo sin embargo, en una situación real, lo más adecuado es que el tratamiento dado sea realizado en el menor tiempo posible, por lo tanto el tiempo de retención óptimo para este caso es $Tr = 4$ días, dado que en este tiempo se llegó a las concentraciones que requiere la norma para los tres metales.

GRÁFICA N° 5.4
RELACIÓN ENTRE EL PORCENTAJE DE REMOCIÓN TOTAL DE LOS METALES RESPECTO AL TIEMPO DE RETENCIÓN



Fuente: Elaboración propia

Lo realizado en la experimentación durante el período de prueba, nos permite determinar que:

- Las condiciones ambientales no sufrieron variaciones significativas durante el tiempo de evaluación lo cual permite asegurar que las plantas no sufrieron cambios bruscos de las mismas y las respuestas son afectadas por estas condiciones uniformes.
- El agua desionizada no aporta concentraciones significativas de los metales en estudio, por lo tanto las concentraciones iniciales agregadas en la celda experimental no aumentarán en forma significativa.
- Según lo anterior en el humedal artificial se puede remover las siguientes concentraciones de metales en un tiempo de retención que se considera óptimo por ser el menor tiempo en donde se alcanza las concentraciones que requiere la norma, véase Tabla N° 5.10 (en la página 48).

TABLA N° 5.13
RESULTADO CONCENTRACIÓN DE METALES Y TIEMPO DE
RETENCIÓN

Metales	Concentración Inicial (ppm)	Concentración Final (ppm)	Límite (ppm)	Tiempo Óptimo de Retención (d)
Cr ⁺⁶	1.5	0.49	0.5	4
Fe ⁺²	7	2.00	2.0	
Mn ⁺²	7	1.87	4.0	

Fuente: Elaboración propia

Con los datos ya determinados se procede a realizar las corridas en el humedal artificial de flujo superficial con *E. crassipes*.

5.3. Ensayos en Humedal Artificial de Flujo Superficial:

Con los parámetros ya fijados gracias a las pruebas experimentales anteriores, se realizaron los ensayos en el Humedal; se pesó la cantidad determinada de *E. crassipes* así como de fertilizante para cada prueba – 15 Ensayos para los Meses cálidos² y 15 Ensayos para los Meses fríos³ – y cuyos resultados se presentan en las Tablas N° 5.14 y 5.15 (véanse en las páginas 56 y 57 respectivamente):

Observaciones:

La TABLA 5.14 (véase en la página 56) y la TABLA 5.15 (véase en la página 57) siguientes son un resumen de los datos originales, debido a que:

1. Cada corrida tiene una duración de 4 días, pues se determinó que ese es el tiempo óptimo de retención.
2. Los datos de temperatura así como de humedad relativa son un promedio de los 4 días (tomadas 3 veces por día), para las corridas.
3. El pH fue medido sólo una vez al inicio y al final de cada corrida.
4. Las concentraciones iniciales para cada metal fueron determinadas mediante la toma de una sola muestra al inicio, Ejm: para corrida 1 se sacó una muestra al inicio de la prueba y se determinó contenido de hierro en un único análisis, el resultado aparece en la tabla.

² Meses cálidos : Temperatura mayor o igual que 20°C

³ Meses fríos : Temperatura menor a 20°C

5. Las concentraciones finales de cada metal son un promedio de tres repeticiones para cada muestra de cada metal de la misma corrida, ejm: para corrida 1(luego de 4 días) se sacó tres muestras y se realizaron los análisis (de cada metal) el promedio figura en la tabla.
6. La eficiencia es determinada con la fórmula del porcentaje de remoción (véase el subtítulo 4.6.2).

TABLA 5.14 RESUMEN DE ENSAYOS – MESES CÁLIDOS

Corrida	Metales	Tratamiento						
		Condiciones Ambientales		pH		Concentración (ppm)		Eficiencia (%)
		T (°C)	HR (%)	Inicio	Final	Inicio	Final	
1	Cr ⁺⁶	23,3	63,8	6,9	7,7	1,450	0,961	33,7
	Fe ⁺²					6,509	0,863	86,7
	Mn ⁺²					6,540	2,090	68,0
	TOTAL					14,499	3,914	73,0
2	Cr ⁺⁶	21,9	67,1	6,1	7,1	1,559	0,892	42,8
	Fe ⁺²					6,566	0,348	94,7
	Mn ⁺²					6,821	2,639	61,3
	TOTAL					14,946	3,879	74,0
3	Cr ⁺⁶	21,0	79,9	6,0	6,5	1,335	0,952	28,7
	Fe ⁺²					6,441	1,758	72,7
	Mn ⁺²					6,713	0,483	92,8
	TOTAL					14,489	3,193	78,0
4	Cr ⁺⁶	21,2	77,8	6,0	6,7	1,333	0,805	39,6
	Fe ⁺²					6,731	1,975	70,7
	Mn ⁺²					6,630	0,106	98,4
	TOTAL					14,694	2,886	80,4
5	Cr ⁺⁶	22,2	77,4	6,0	6,4	1,396	0,832	40,4
	Fe ⁺²					6,667	1,147	82,8
	Mn ⁺²					6,988	2,027	71,0
	TOTAL					15,051	4,006	73,4
6	Cr ⁺⁶	22,2	75,2	6,0	6,5	1,457	0,888	39,1
	Fe ⁺²					6,775	1,952	71,2
	Mn ⁺²					6,721	1,096	83,7
	TOTAL					14,953	3,936	73,7
7	Cr ⁺⁶	23,2	69,8	6,0	6,5	1,346	0,888	34,0
	Fe ⁺²					6,857	1,959	71,4
	Mn ⁺²					6,448	0,649	89,9
	TOTAL					14,651	3,496	76,1
8	Cr ⁺⁶	24,3	61,0	6,0	6,6	1,371	0,877	36,0
	Fe ⁺²					6,532	1,825	72,1
	Mn ⁺²					6,530	1,711	73,8
	TOTAL					14,433	4,413	69,4
9	Cr ⁺⁶	21,0	72,6	6,3	6,8	1,398	1,025	26,7
	Fe ⁺²					6,709	1,684	74,9
	Mn ⁺²					6,695	0,723	89,2
	TOTAL					14,802	3,432	76,8
10	Cr ⁺⁶	21,1	73,1	6,3	6,9	1,482	0,971	34,5
	Fe ⁺²					6,550	1,923	70,6
	Mn ⁺²					6,519	2,171	66,7
	TOTAL					14,551	5,065	65,2
11	Cr ⁺⁶	23,8	72,6	6,4	6,5	1,399	0,912	34,8
	Fe ⁺²					6,668	1,380	79,3
	Mn ⁺²					6,531	1,829	72,0
	TOTAL					14,598	4,121	71,8
12	Cr ⁺⁶	24,9	71,1	6,4	6,8	1,382	0,931	32,6
	Fe ⁺²					6,593	0,844	87,2
	Mn ⁺²					6,873	1,856	73,0
	TOTAL					14,848	3,631	75,5
13	Cr ⁺⁶	28,2	55,5	6,2	6,9	1,423	0,884	37,9
	Fe ⁺²					6,841	1,895	72,3
	Mn ⁺²					6,594	0,765	88,4
	TOTAL					14,858	3,544	76,1
14	Cr ⁺⁶	26,7	57,6	6,7	7,0	1,341	0,857	36,1
	Fe ⁺²					6,762	0,717	89,4
	Mn ⁺²					6,900	1,166	83,1
	TOTAL					15,003	2,740	81,7
15	Cr ⁺⁶	25,8	68,3	6,8	7,2	1,392	0,817	41,3
	Fe ⁺²					6,798	1,971	71,0
	Mn ⁺²					6,630	0,689	89,6
	TOTAL					14,820	3,477	76,5

Fuente: Elaboración propia

TABLA 5.15 RESUMEN DE ENSAYOS – MESES FRÍOS

Monitoreo	Metales	Tratamiento						Eficiencia (%)
		Condiciones Ambientales		pH		Concentración (ppm)		
		T (°C)	HR (%)	Inicio	Final	Inicio	Final	
1	Cr ⁺⁶	16,5	92,2	7,9	7,5	1,55	1,318	15,0
	Fe ⁺²					7,073	3,586	49,3
	Mn ⁺²					7,128	2,801	60,7
	TOTAL					15,75	7,705	51,1
2	Cr ⁺⁶	16,3	81,7	6,9	7,1	1,523	1,078	29,2
	Fe ⁺²					6,566	3,093	52,9
	Mn ⁺²					6,982	3,234	53,7
	TOTAL					15,071	7,405	50,9
3	Cr ⁺⁶	16,0	89,7	6,8	7,2	1,502	1,203	19,9
	Fe ⁺²					7,249	2,281	68,5
	Mn ⁺²					6,807	3,757	44,8
	TOTAL					15,558	7,241	53,5
4	Cr ⁺⁶	15,4	87,9	6,0	6,8	1,355	1,015	25,1
	Fe ⁺²					6,755	4,713	30,2
	Mn ⁺²					6,94	2,457	64,6
	TOTAL					15,05	8,185	45,6
5	Cr ⁺⁶	14,4	96,6	7,2	6,7	1,42	1,197	15,7
	Fe ⁺²					6,543	5,148	21,3
	Mn ⁺²					6,793	2,527	62,8
	TOTAL					14,756	8,872	39,9
6	Cr ⁺⁶	15,3	91,8	6,5	6,6	1,322	0,988	25,3
	Fe ⁺²					6,509	4,717	27,5
	Mn ⁺²					6,519	1,871	71,3
	TOTAL					14,35	7,576	47,2
7	Cr ⁺⁶	16,2	87,3	6,7	6,7	1,408	1,045	25,8
	Fe ⁺²					6,509	4,968	23,7
	Mn ⁺²					6,611	1,851	72,0
	TOTAL					14,528	7,864	45,9
8	Cr ⁺⁶	15,1	89,5	7,1	6,7	1,395	1,028	26,3
	Fe ⁺²					6,599	4,844	26,6
	Mn ⁺²					6,722	2,373	64,7
	TOTAL					14,716	8,245	44,0
9	Cr ⁺⁶	15,9	88,3	6,3	6,8	1,438	0,982	31,7
	Fe ⁺²					6,612	5,567	15,8
	Mn ⁺²					6,521	2,119	67,5
	TOTAL					14,571	8,668	40,5
10	Cr ⁺⁶	16,5	83,7	6,7	6,5	1,333	0,863	35,3
	Fe ⁺²					6,786	5,531	18,5
	Mn ⁺²					6,522	1,089	83,3
	TOTAL					14,641	7,483	48,9
11	Cr ⁺⁶	16,2	87,8	7,5	6,5	1,457	0,942	35,3
	Fe ⁺²					6,684	5,755	13,9
	Mn ⁺²					6,721	1,432	78,7
	TOTAL					14,862	8,129	45,3
12	Cr ⁺⁶	17,2	82,2	6,7	6,6	1,383	0,909	34,3
	Fe ⁺²					6,512	5,105	21,6
	Mn ⁺²					6,583	1,106	83,2
	TOTAL					14,478	7,12	50,8
13	Cr ⁺⁶	17,2	84,1	6,3	6,4	1,411	0,772	45,3
	Fe ⁺²					6,636	5,296	20,2
	Mn ⁺²					6,622	1,689	74,5
	TOTAL					14,669	7,757	47,1
14	Cr ⁺⁶	17,9	81,4	6,3	6,6	1,395	0,987	29,2
	Fe ⁺²					6,473	2,829	56,3
	Mn ⁺²					6,683	1,25	81,3
	TOTAL					14,551	5,066	65,2
15	Cr ⁺⁶	16,7	82,1	6,4	6,7	1,346	0,966	28,2
	Fe ⁺²					6,558	5,333	18,7
	Mn ⁺²					6,683	3,388	49,3
	TOTAL					14,587	9,687	33,6

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO VI DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Contratación de la hipótesis con los resultados

6.1.1 Análisis sobre efectos de condiciones ambientales

Se estudió por separado el efecto de cada uno de los metales (cromo, hierro y manganeso). Debido a que la época (cálida y fría) ejerce influencia en la respuesta de la evaluación inicial, final y el porcentaje final de remoción, se incluyó en el análisis.

En todos los casos se le realizó una corrida SAS versión 8.2 para estimar las pruebas de normalidad, homogeneidad de varianza e independencia de errores.

Si cumple al menos para la normalidad, los datos podrán ser procesados sin necesidad de una transformación para las distintas pruebas estadísticas que requiera el estudio. Si no cumpliera en los tres casos, se tendrá que realizar una transformación de datos antes de procesar la información.

CASO 1. CROMO

Datos de evaluación inicial (INICIO)

a. Homogeneidad de Varianza

Prueba de Levene para la homogeneidad de Varianza⁴
ANOVA de Desviaciones cuadradas de Grupos Medios

Fuente	GD	Suma de cuadrados	Media cuadrada	Valor de F	Pr > F
Trat.	1	4.046E-6	4.046E-6	0.13	0.7247
Error	28	0.000895	0.000032	-	-

⁴ Prueba de Levene y Bartlett son utilizadas para probar la homogeneidad de Varianza.

Prueba de Bartlett para la homogeneidad de Varianza⁵

Fuente	GD	Chi-Cuadrado	Pr > ChiSq
Trat.	1	0.1149	0.7347

La prueba es no significativa, tanto para Levene y Bartlett. Se concluye que existe homogeneidad de varianzas, lo cual indica que los datos son resultado de un efecto aleatorio y existe gran probabilidad que las fuentes de variación sean las mismas.

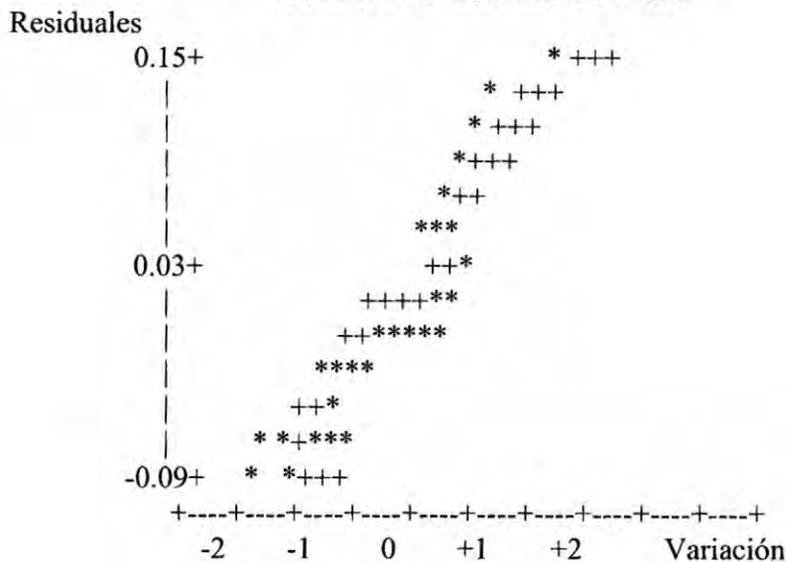
b. Test de normalidad

Prueba de Normalidad

Prueba	Estadístico	Valor de p
Shapiro-Wilk	W 0.938254	Pr < W 0.0816
Kolmogorov-Smirnov	D 0.163517	Pr > D 0.0398
Cramer-von Mises	W-Sq 0.102546	Pr > W-Sq 0.0994
Anderson-Darling	A-Sq 0.62064	Pr > A-Sq 0.0972

La prueba es no significativa para el test Shapiro-Wilk. Se concluye que los datos se distribuyen normalmente.

Gráfico de Probabilidad Normal



⁵ La versión original del programa es en inglés. Ver Anexo 7.

Datos de evaluación final (FINAL)

a. Homogeneidad de Varianza

Prueba de Levene para la homogeneidad de Varianza
ANOVA de Desviaciones cuadradas de Grupos Medios

Fuente	GD	Suma de cuadrados	Media cuadrada	Valor de F	Pr > F
Trat.	1	0.00157	0.00157	4.36	0.0460
Error	28	0.0101	0.000360	-	-

Prueba de Bartlett para la homogeneidad de Varianza

Fuente	GD	Chi-Cuadrado	Pr > ChiSq
Trat.	1	8.2949	0.0040

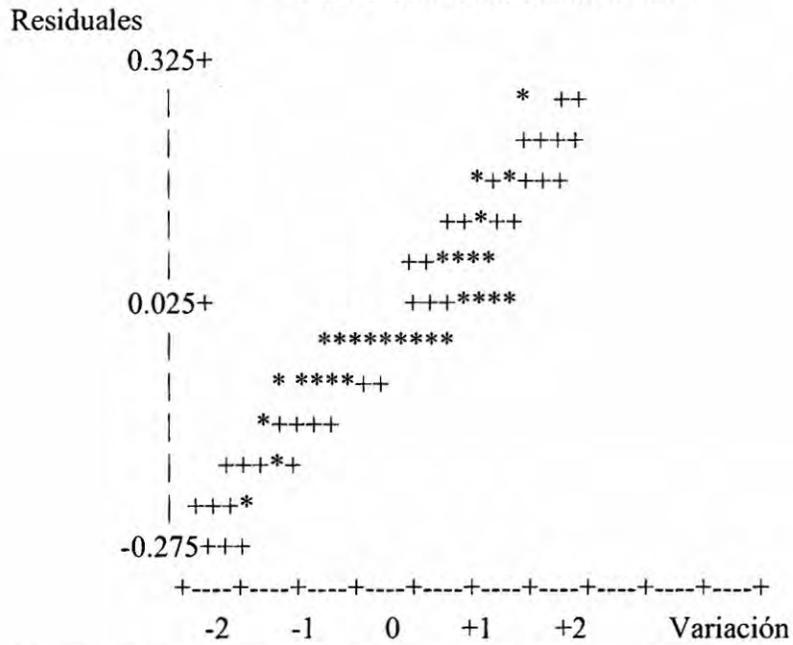
El test es significativo para las pruebas Bartlett y Levene. Se concluye que no existe homogeneidad de varianza por lo que se requerirá transformar los datos.

b. Normalidad

Prueba de Normalidad

Prueba	Estadístico	Valor de p
Shapiro-Wilk	W 0.950046	Pr < W 0.1695
Kolmogorov-Smirnov	D 0.119213	Pr > D >0.1500
Cramer-von Mises	W-Sq 0.114584	Pr > W-Sq 0.0716
Anderson-Darling	A-Sq 0.656959	Pr > A-Sq 0.0818

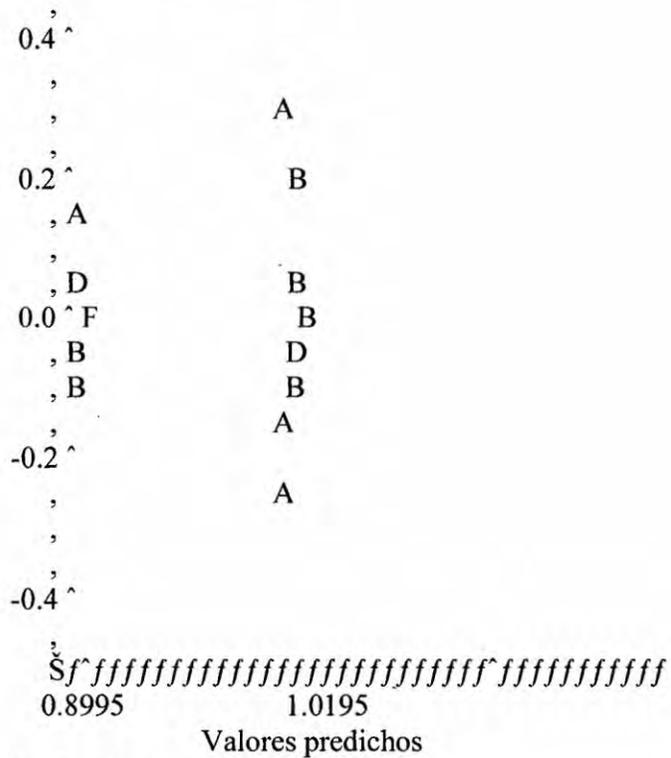
Gráfico de Probabilidad Normal



Los datos presentados se distribuyen normalmente (siguen una distribución Normal).

c. Independencia de Errores

Residuales ,



Donde: A = 1 obs, B = 2 obs, etc.

La grafica presentada indica independencia de errores.

CONCLUSIÓN: Dos de las tres pruebas cumplen con los supuestos estadísticos. Sin embargo debido a que no existe homogeneidad de varianza, los datos deberán transformarse para el estudio y análisis estadístico.

Datos de evaluación Remoción (REMOCIÓN)

a. Homogeneidad de Varianza

Prueba de Levene para la homogeneidad de Varianza
ANOVA de Desviaciones cuadradas de Grupos Medios

Fuente	GD	Suma de cuadrados	Media cuadrada	Valor de F	Pr > F
Trat.	1	11499.2	11499.2	2.92	0.0983
Error	28	110117	3932.7	-	-

Prueba de Bartlett para la homogeneidad de Varianza

Fuente	GD	Chi-Cuadrado	Pr > ChiSq
Trat.	1	4.0419	0.0444

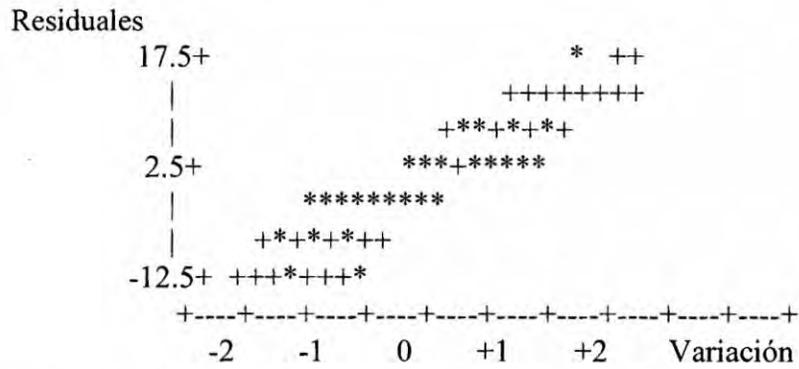
La prueba es no significativa para Levene. Se concluye que existe homogeneidad de varianza.

b. Normalidad

Prueba de Normalidad

Prueba	Estadístico	Valor de p
Shapiro-Wilk	W 0.963359	Pr < W 0.3763
Kolmogorov-Smirnov	D 0.134982	Pr > D >0.1500
Cramer-von Mises	W-Sq 0.058945	Pr > W-Sq >0.2500
Anderson-Darling	A-Sq 0.403923	Pr > A-Sq >0.2500

Gráfico de Probabilidad Normal

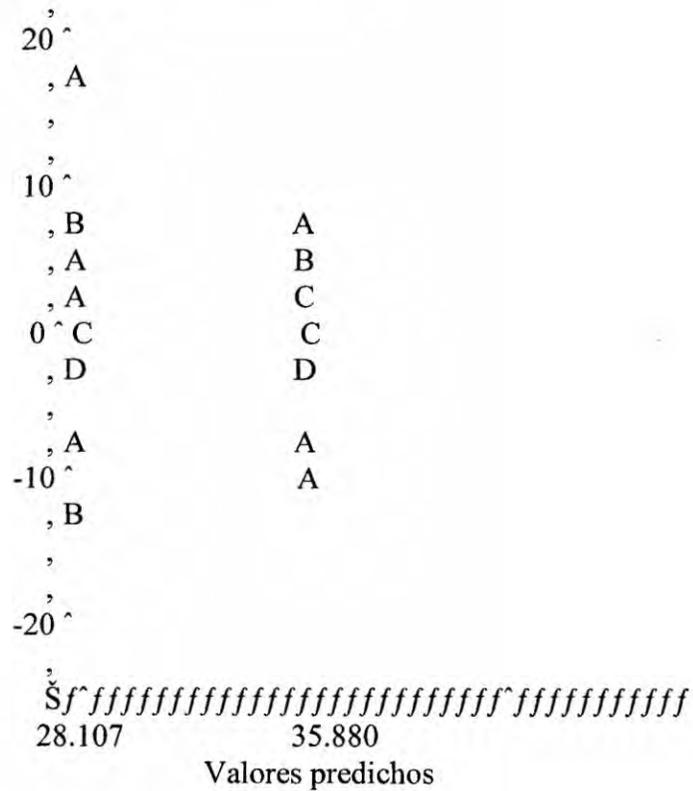


La prueba es no significativa para Shapiro Wilk y la gráfica es creciente.

Se concluye que los datos presentados siguen una distribución normal.

c. Independencia de errores

Residuales ,



Donde: A = 1 obs, B = 2 obs, etc.

Los errores no siguen un patrón ni tampoco una tendencia. Se concluye independencia de errores.

CONCLUSIÓN: Las tres pruebas cumplen con los supuestos estadísticos.

Los datos no deberán transformarse para el estudio y análisis estadístico.

CONCLUSIÓN FINAL:

En el caso del CROMO utilizar el porcentaje de REMOCIÓN para el análisis estadístico, y operar con los valores sin transformar. Luego realizar la prueba t comparando la eficiencia de la remoción en la época cálida vs. fría, ya que estas ejercen influencia sobre la respuesta.

CASO 2. HIERRO

Datos de evaluación inicial (INICIO)

a. Homogeneidad de Varianza

Prueba de Levene para la homogeneidad de Varianza
ANOVA de Desviaciones cuadradas de Grupos Medios

Fuente	GD	Suma de cuadrados	Media cuadrada	Valor de F	Pr > F
Trat.	1	0.00673	0.00673	1.65	0.2090
Error	28	0.1140	0.00407	-	-

Prueba de Bartlett para la homogeneidad de Varianza

Fuente	GD	Chi-Cuadrado	Pr > ChiSq
Trat.	1	3.7149	0.0539

Ambas pruebas (Levenne y Bartlett) no significativas, se concluye que existe homogeneidad de varianza.

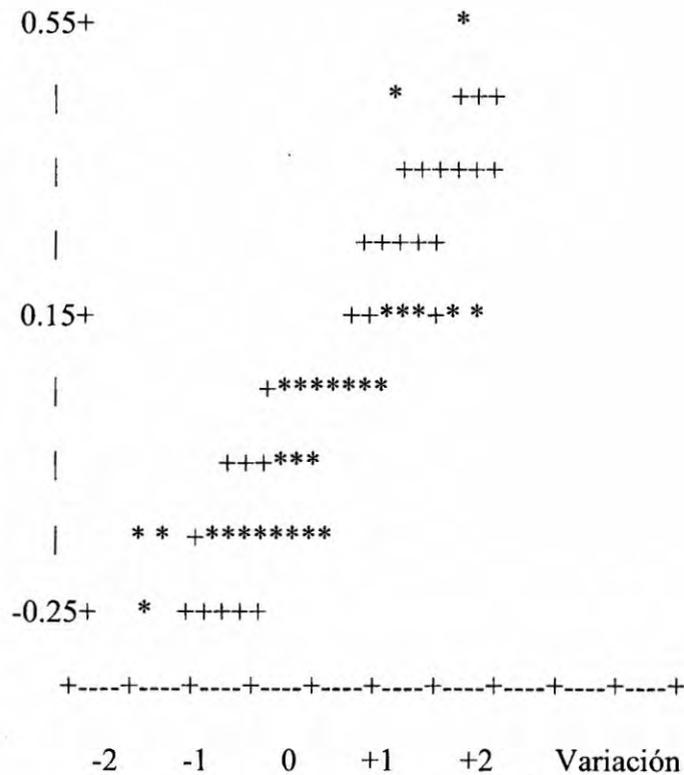
b. Normalidad

Prueba de Normalidad

Prueba	Estadístico	Valor de p
Shapiro-Wilk	W 0.874685	Pr < W 0.0021
Kolmogorov-Smirnov	D 0.129843	Pr > D >0.1500
Cramer-von Mises	W-Sq 0.136923	Pr > W-Sq 0.0350
Anderson-Darling	A-Sq 0.986757	Pr > A-Sq 0.0120

Gráfico de Probabilidad Normal

Residuales



Prueba de Bartlett para la homogeneidad de Varianza

Fuente	GD	Chi-Cuadrado	Pr > ChiSq
Tra.	1	5.7898	0.0161

Las varianzas no son homogéneas.

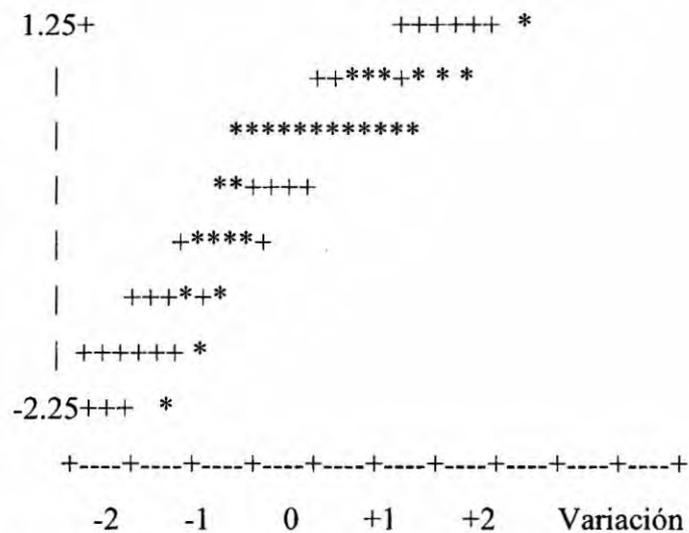
b. Normalidad

Prueba de Normalidad

Prueba	Estadístico	Valor de p
Shapiro-Wilk	W 0.886339	Pr < W 0.0040
Kolmogorov-Smirnov	D 0.226645	Pr > D <0.0100
Cramer-von Mises	W-Sq 0.272141	Pr > W-Sq <0.0050
Anderson-Darling	A-Sq 1.401507	Pr > A-Sq <0.0050

Gráfico de Probabilidad Normal

Residuales



Los datos según el gráfico siguen una distribución normal.

Prueba de Bartlett para la homogeneidad de Varianza

Fuente	GD	Chi-Cuadrado	Pr > ChiSq
Trat.	1	6.6557	0.0099

Los datos reflejan que no existe homogeneidad de varianza.

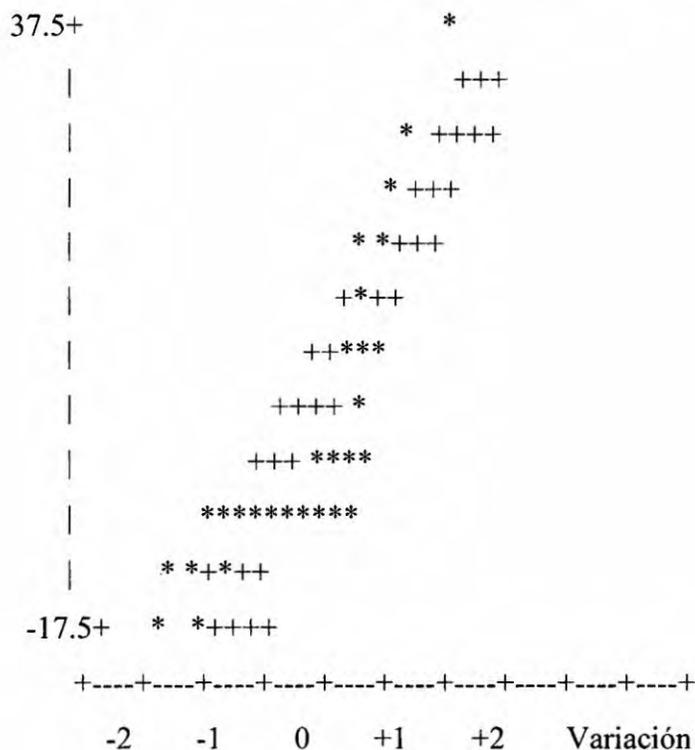
b. Normalidad

Prueba de Normalidad

Prueba	Estadístico	Valor de p
Shapiro-Wilk	W 0.876659	Pr < W 0.0024
Kolmogorov-Smirnov	D 0.220546	Pr > D <0.0100
Cramer-von Mises	W-Sq 0.285301	Pr > W-Sq <0.0050
Anderson-Darling	A-Sq 1.479589	Pr > A-Sq <0.0050

Gráfico de Probabilidad Normal

Residuales



Los datos siguen una distribución normal.

CASO 3. MANGANESO

Datos de evaluación inicial (INICIO)

A. Homogeneidad de Varianza

Prueba de Levene para la homogeneidad de Varianza
ANOVA de Desviaciones cuadradas de Grupos Medios

Fuente	GD	Suma de cuadrados	Media cuadrada	Valor de F	Pr > F
Trat.	1	0.000327	0.000327	0.26	0.6157
Error	28	0.0355	0.00127		

Prueba de Bartlett para la homogeneidad de Varianza

Fuente	GD	Chi-Cuadrado	Pr > ChiSq
Trat.	1	0.1994	0.6552

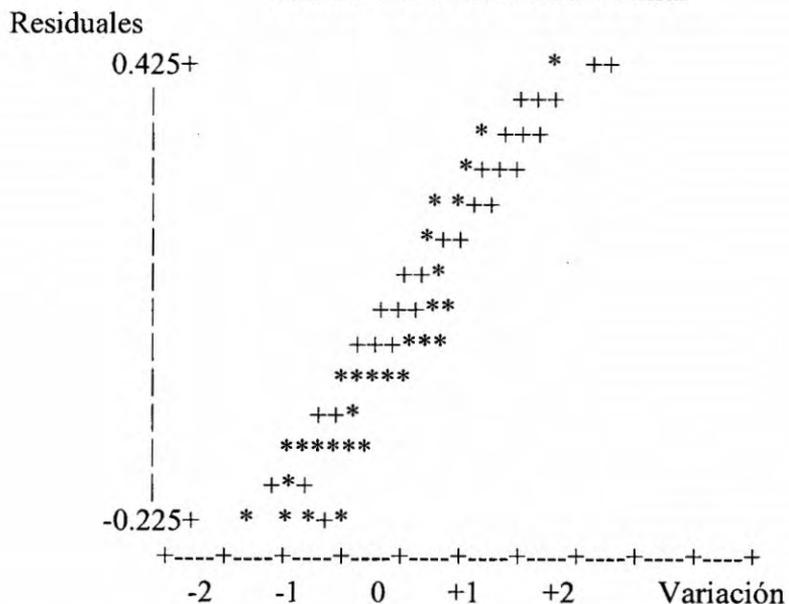
La no significancia de ambas prueba demuestra que existe homogeneidad de variancia

B. Normalidad

Prueba de Normalidad

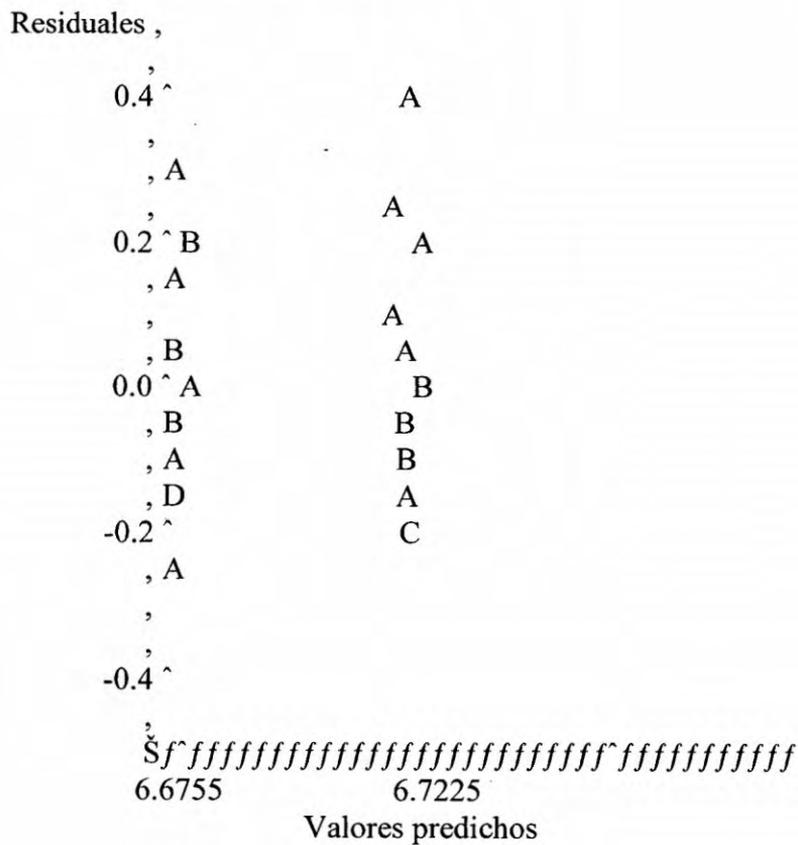
Prueba	Estadístico	Valor de p
Shapiro-Wilk	W 0.936401	Pr < W 0.0728
Kolmogorov-Smirnov	D 0.126223	Pr > D >0.1500
Cramer-von Mises	W-Sq 0.097479	Pr > W-Sq 0.1188
Anderson-Darling	A-Sq 0.619638	Pr > A-Sq 0.0977

Gráfico de Probabilidad Normal



Los datos siguen una distribución normal.

C. Independencia de Errores



Donde: A = 1 obs, B = 2 obs, etc.

Los errores son independientes entre sí.

CONCLUSIÓN: Las tres pruebas cumplen con los supuestos estadísticos.

Los datos no deberán transformarse para el estudio y análisis estadístico.

Datos de evaluación final (FINAL)

A. Homogeneidad de Varianza

Prueba de Levene para la homogeneidad de Varianza
ANOVA de Desviaciones cuadradas de Grupos Medios

Fuente	GD	Suma de cuadrados	Media cuadrada	Valor de F	Pr > F
Trat.	1	0.1172	0.1172	0.32	0.5742
Error	28	10.1536	0.3626	-	-

Prueba de Bartlett para la homogeneidad de Varianza

Fuente	GD	Chi-Cuadrado	Pr > ChiSq
Trat.	1	0.1491	0.6994

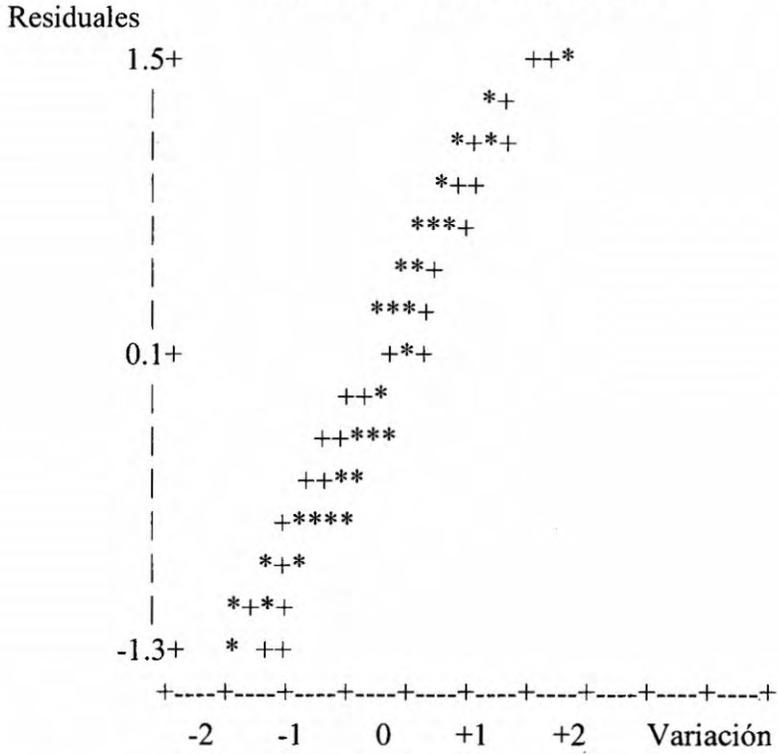
Las varianzas son homogéneas.

B. Normalidad

Prueba de Normalidad

Prueba	Estadístico	Valor de p
Shapiro-Wilk	W 0.961454	Pr < W 0.3373
Kolmogorov-Smirnov	D 0.107394	Pr > D >0.1500
Cramer-von Mises	W-Sq 0.062362	Pr > W-Sq >0.2500
Anderson-Darling	A-Sq 0.36925	Pr > A-Sq >0.2500

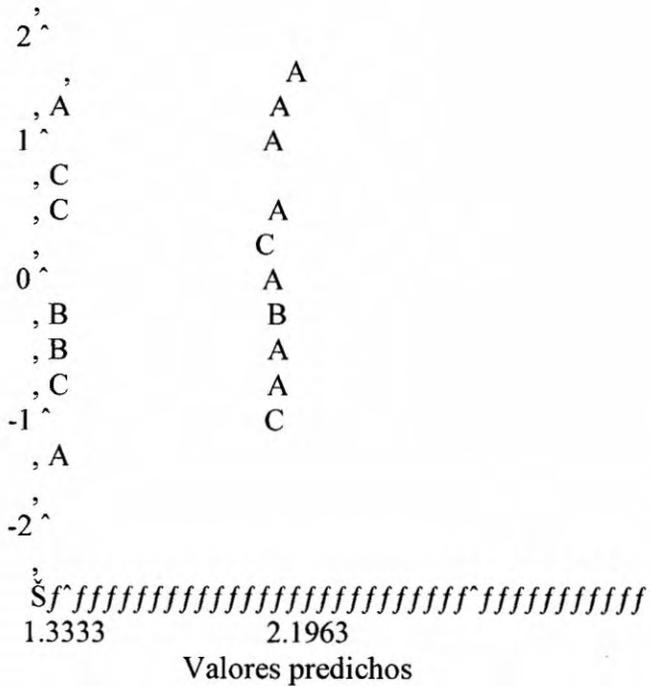
Gráfico de Probabilidad Normal



Los datos siguen una distribución normal.

C. Independencia de Errore

Residuales ,



Donde: A = 1 obs, B = 2 obs, etc.

Los errores son independientes.

Datos de evaluación remoción (REMOCIÓN)

A. Homogeneidad de Varianza

Prueba de Levene para la homogeneidad de Varianza
ANOVA de Desviaciones cuadradas de Grupos Medios

Fuente	GD	Suma de cuadrados	Media cuadrada	Valor de F	Pr > F
Trat.	1	1971.8	1971.8	0.12	0.7349
Error	28	472109	16861.0	-	-

Prueba de Bartlett para la homogeneidad de Varianza

Fuente	GD	Chi-Cuadrado	Pr > ChiSq
Trat.	1	0.0557	0.8134

Existe homogeneidad de varianza

B. Normalidad

Prueba de Normalidad

Prueba	Estadístico	Valor de p
Shapiro-Wilk	W 0.963136	Pr < W 0.3716
Kolmogorov-Smirnov	D 0.104833	Pr > D >0.1500
Cramer-von Mises	W-Sq 0.057149	Pr > W-Sq >0.2500
Anderson-Darling	A-Sq 0.351301	Pr > A-Sq >0.2500

Donde: A = 1 obs, B = 2 obs, etc.

La grafica de residuales demuestra que se distribuyen desordenados en el espacio y no siguen un patrón o tendencia. Se concluye que los errores son independientes entre sí.

CONCLUSIÓN FINAL:

En el caso del MANGANESO utilizar el porcentaje de REMOCIÓN para el análisis estadístico directamente con los datos presentados (al cumplirse los tres supuestos estadísticos, no necesita de una transformación de datos). Finalmente, realizar la prueba t comparando la eficiencia de la remoción en la época cálida vs. fría, ya que estas ejercen influencia sobre la respuesta.

CUADRO RESUMEN

ESTADÍSTICO	CROMO			HIERRO			MANGANESO		
	INICIAL	FINAL	REMOCIÓN	INICIAL	FINAL	REMOCIÓN	INICIAL	FINAL	REMOCIÓN
Homogeneidad de Varianza	SI	NO	SI	SI	NO	NO	SI	SI	SI
Normalidad	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Independencia de Errores	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
CONCLUSIÓN	Usar base de datos original			Usar base de datos original			Usar base de datos original		

Como todos los datos cumplen los supuestos estadísticos, procedemos a realizar las pruebas t, comparando la remoción de las dos épocas cálida VS fría.

Las hipótesis respectivas son las siguientes:

$$\mu_1 = \mu_2$$

Los promedios de ambos grupos estudiados son iguales para la época cálida/fría.

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Los promedios de ambos grupos estudiados son diferentes para la época cálida/fría.

CASO 1. CROMO

ÉPOCA CÁLIDA $\mu_0 = 35.9$

ÉPOCA FRÍA $\mu_0 = 28.1$

Sabemos que:

Estadístico	Datos
n	15
\bar{x}	35.9 %
s	4.5

Donde: n = muestra, \bar{x} = media, s = desviación estándar

Fuente: Elaboración propia

Como podemos observar que el promedio de la remoción es mayor a 28.1 % ($\mu > 28.1$). Para este caso se aplicará la prueba de una cola y el nivel escogido de $\alpha = 0.05$. Entonces tenemos:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} = 13.553$$

Para $t_{2(0.05)}$ es decir para este caso $t_{0.10}$ y además $(n - 1) = 14$ en la Tabla I da 1.761 y como $13.553 > 1.761$ queda probado que el promedio $\mu > 28.1$,

con 5% de probabilidades de que $\mu = 28.1$, luego queda comprobado que **los promedios de remoción son diferentes para las épocas cálida /fría.**

CASO 2. HIERRO

ÉPOCA CÁLIDA $\mu_0 = 77.8$

ÉPOCA FRÍA $\mu_0 = 31$

Sabemos que:

Estadístico	Datos
n	15
\bar{x}	77.8 %
s	8.2

Donde: n = muestra, \bar{x} = media, s = desviación estándar

Fuente: Elaboración propia

Como podemos observar que el promedio de la remoción es mayor a 31 % ($\mu > 31$). Para este caso se aplicará la prueba de una cola y el nivel escogido de $\alpha = 0.05$. Entonces tenemos:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} = 36.436$$

Para $t_{2(0.05)}$ es decir para este caso $t_{0.10}$ y además $(n - 1) = 14$ en la Tabla I da 1.761 y como $36.436 > 1.761$ queda probado que el promedio $\mu > 31$, con 5% de probabilidades de que $\mu = 31$, luego queda comprobado que **los promedios de remoción son diferentes para las épocas cálida /fría.**

CASO 3. MANGANESO

ÉPOCA CÁLIDA $\mu_0 = 80.1$

ÉPOCA FRÍA $\mu_0 = 67.5$

Sabemos que:

Estadístico	Datos
n	15
\bar{x}	80.1 %
s	11.3

Donde: n = muestra, \bar{x} = media, s = desviación estándar

Fuente: Elaboración propia

Como podemos observar que el promedio de la remoción es mayor a 67.5 % ($\mu > 67.5$). Para este caso se aplicará la prueba de una cola y el nivel escogido de $\alpha = 0.05$. Entonces tenemos:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} = 27.373$$

Para $t_{2(0.05)}$ es decir para este caso $t_{0.10}$ y además $(n - 1) = 14$ en la Tabla I da 1.761 y como $27.373 > 1.761$ queda probado que el promedio $\mu > 67.5$, con 5% de probabilidades de que $\mu = 67.5$, luego queda comprobado que **los promedios de remoción son diferentes para las época cálida/fría.**

CONCLUSIÓN FINAL: Se concluye según los resultados que los promedios de los grupos analizados son distintos para la época cálida / fría, es decir que **las condiciones del ambiente ejercen influencia en la capacidad de remoción en la planta.**

6.1.2. Análisis sobre la Remoción

La Hipótesis planteada es:

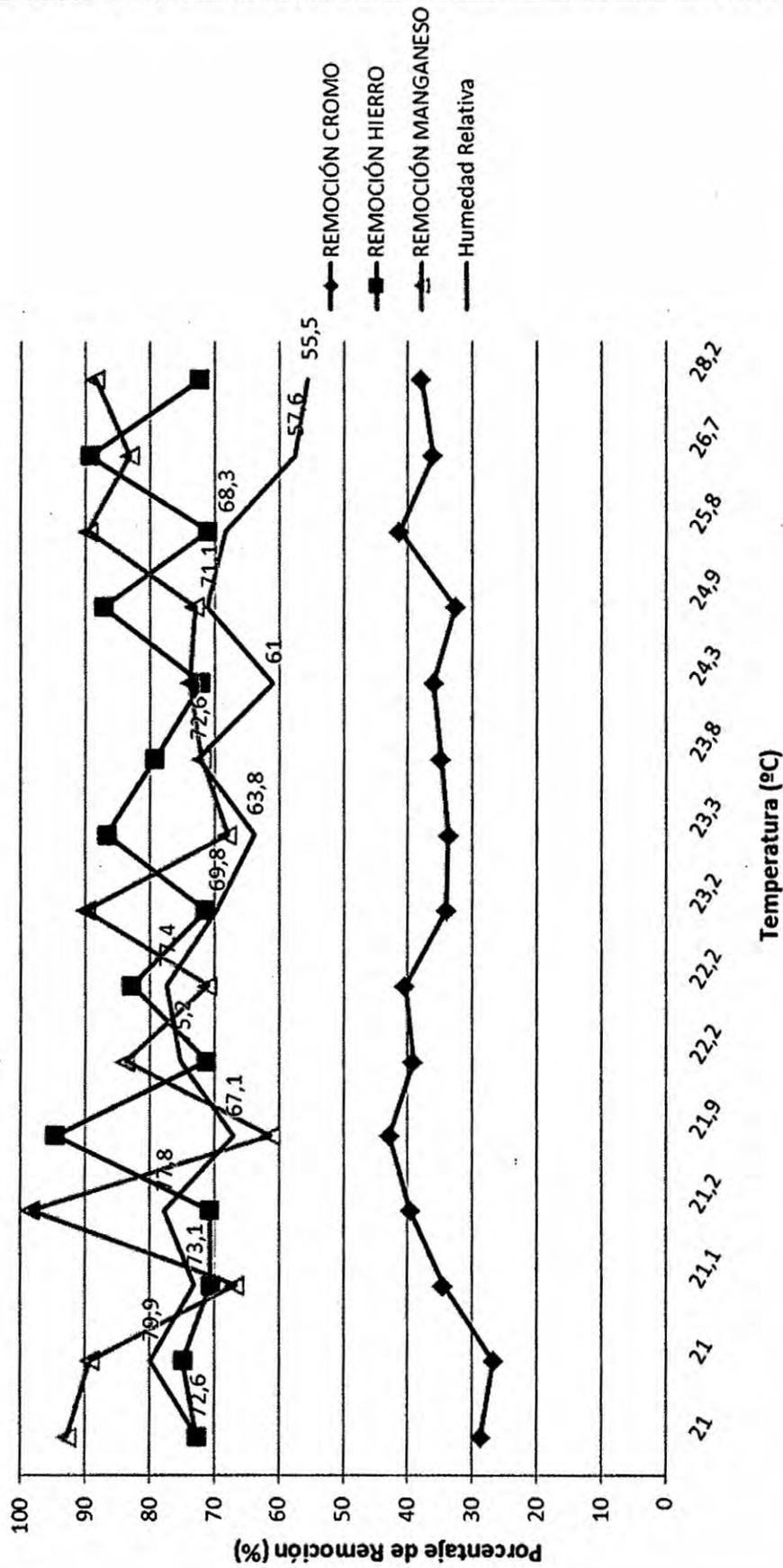
Hipótesis General

“Se puede remover los metales cromo, hierro y manganeso en un humedal artificial utilizando *Eichhornia crassipes*”.

Para el mejor entendimiento acerca de lo que se requiere demostrar en la hipótesis planteada, se realizará un análisis respecto a las corridas realizadas en los Meses Cálidos y en los Meses Fríos, considerando como ya se ha indicado los límites de concentración para cada metal.

GRÁFICA N° 6.1 REMOCIÓN DE METALES – MESES CÁLIDOS.

Remoción de Metales - Meses Cálidos



Fuente: Elaboración propia

Según Guerrero Fajardo (véase pág. 14) “La planta acuática utilizada, Jacinto de agua, remueve metales de las aguas residuales. La eficiencia en la remoción está de acuerdo al metal y al efecto sinérgico o antagonístico causado por la presencia de otros metales.”

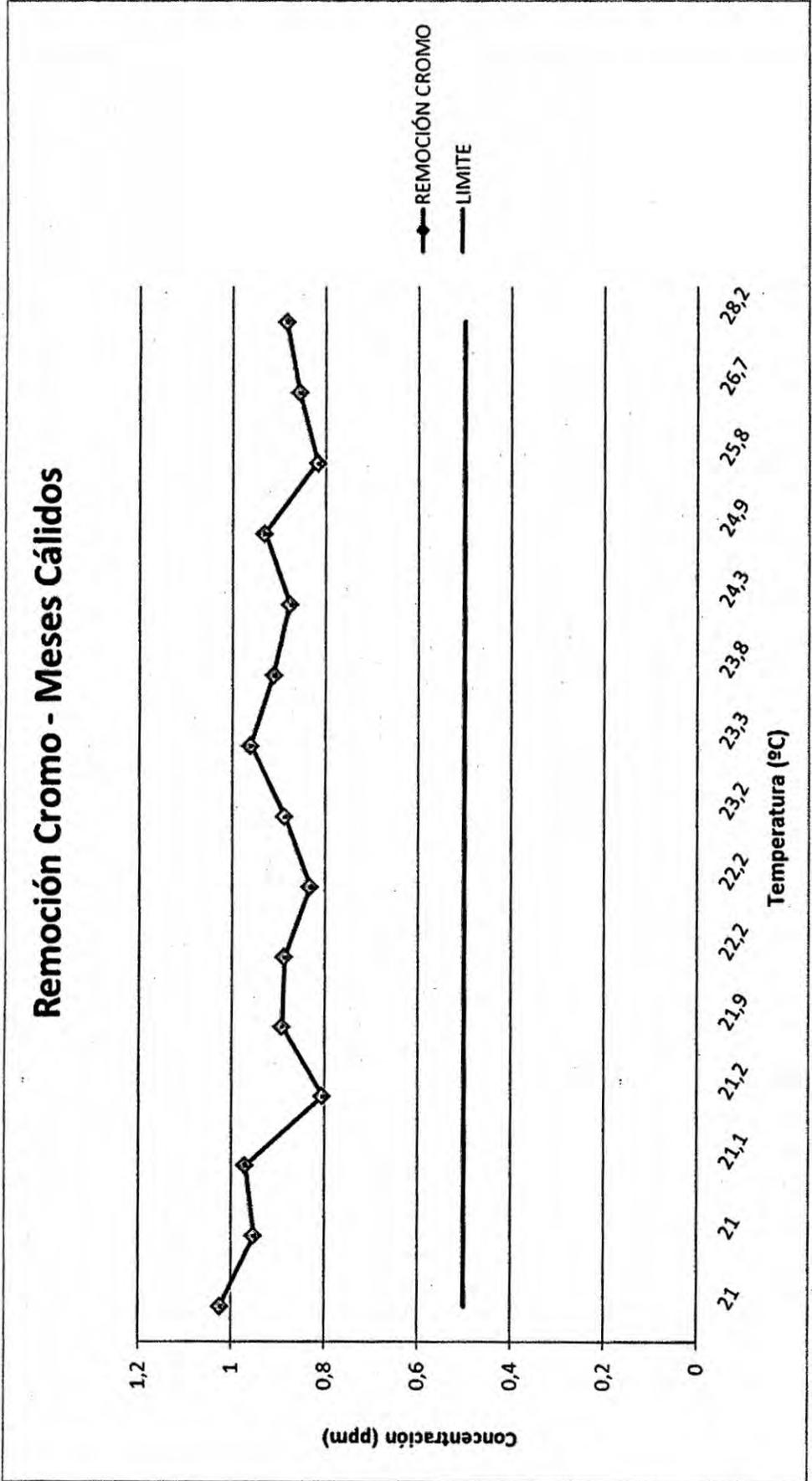
En la GRÁFICA N° 6.1 (véase en la página 83) puede notarse este efecto puesto que si observamos en forma particular cada corrida se encuentra que:

- Si la planta remueve hierro en mayor cantidad entonces removerá menos cromo y manganeso.
- Asimismo si la planta remueve mayor cantidad de manganeso y cromo entonces removerá menor cantidad de hierro.

Guerrero indica además que “... no se puede modificar el pH del agua porque se cambian las condiciones óptimas de pH para el desarrollo de las plantas, el cual debe estar alrededor de 7.”

En la experimentación se ha realizado hasta en un pH de 6 – con un promedio de 6.3 para las pruebas en meses cálidos – cabe indicar que la escala de pH es logarítmica eso quiere decir que un pH de 6 es 10 veces más ácido que un pH de 7, lo cual refiere que la planta puede desarrollar sus actividades en este tipo de medio con tendencia ácida.

GRÁFICA N° 6.2 REMOCIÓN DE CROMO VS LÍMITE - MESES CÁLIDOS



Sabemos que:

Estadístico	Datos
n	15
\bar{x}	0.899 ppm
s	0.06

Donde: n = muestra, \bar{x} = media, s = desviación estándar
Fuente: Elaboración propia

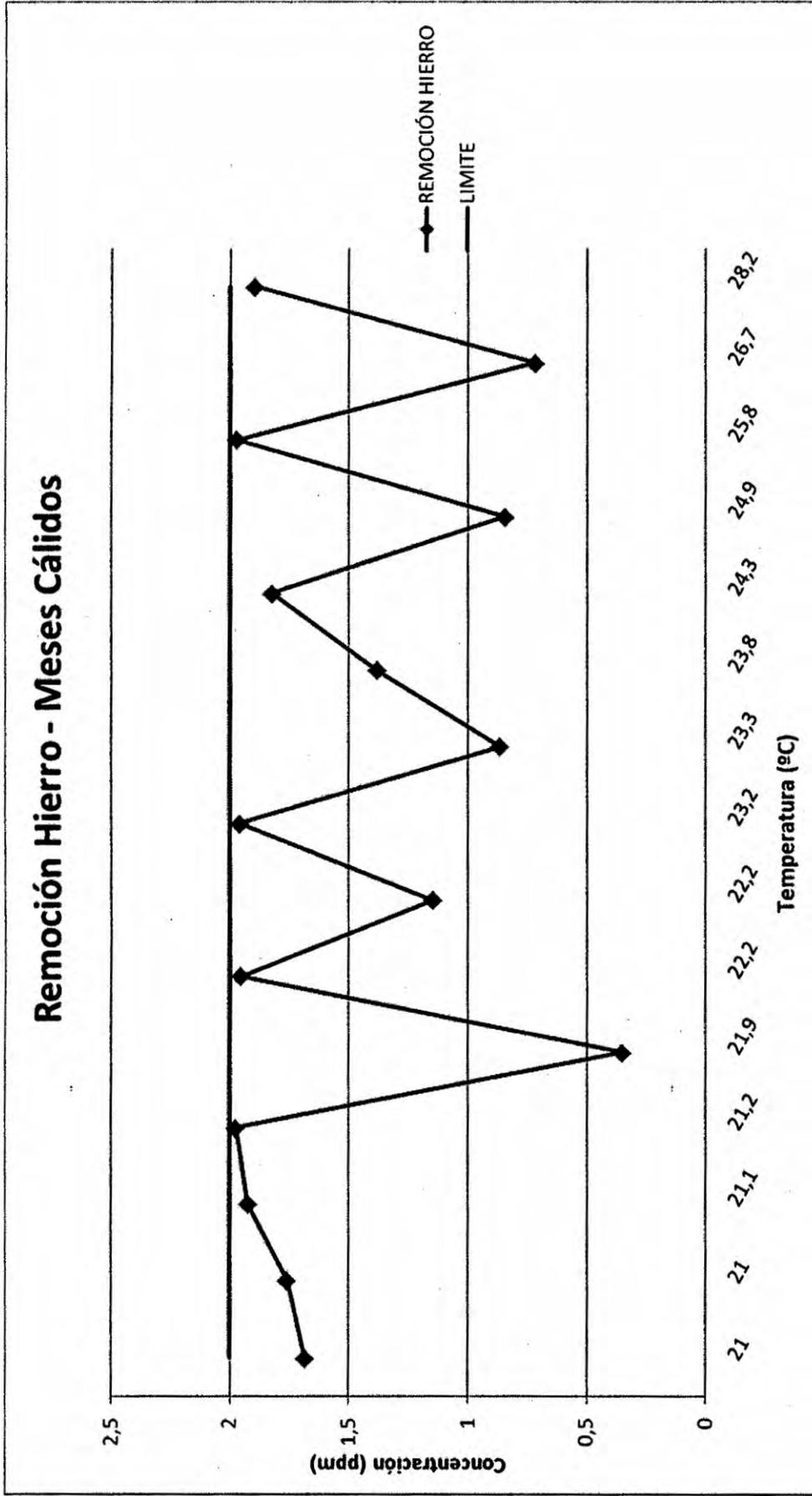
Como podemos observar en la GRÁFICA N° 6.2 (véase en la página 85) las concentraciones de cromo luego de la remoción son superiores a 0.5 ppm ($\mu > 0.5$). Para este caso se aplicará la prueba de una cola y el nivel escogido de $\alpha = 0.05$. Entonces tenemos:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} = 25.455$$

Para $t_{2(0.05)}$ es decir para este caso $t_{0.10}$ y además $(n - 1) = 14$ en la Tabla I da 1.761 y como $25.455 > 1.761$ queda probado que el promedio $\mu > 0.5$, con 5% de probabilidades de que $\mu = 0.5$, luego queda comprobado lo deducido de las concentraciones resultantes de las corridas realizadas.

No se encuentra similitud entre los experimentos preliminares (véase TABLA N° 5.9 en la página 48), puesto que la concentración final fue mayor a la permitida, se esperaba que luego de la remoción la concentración no superara al límite que indica la norma.

GRÁFICA N° 6.3 REMOCIÓN DE HIERRO VS LÍMITE – MESES CÁLIDOS



Fuente: Elaboración propia

Sabemos que:

Estadístico	Datos
n	15
\bar{x}	1.483
s	0.555

Donde: n = muestra, \bar{x} = media, s = desviación estándar
Fuente: Elaboración propia

Como podemos observar en la GRÁFICA N° 6.3 (véase en la página 87) las concentraciones de hierro luego de la remoción son inferiores a 2 ppm ($\mu < 2$). Para este caso se aplicará la prueba de una cola y el nivel escogido de $\alpha = 0.05$. Entonces tenemos:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} = -3.609$$

Para $t_{2(0.05)}$ es decir para este caso $t_{0.10}$ y además $(n - 1) = 14$ en la Tabla I da 1.761 y como $-3.609 < 1.761$ queda probado que el promedio $\mu < 2$, con 5% de probabilidades de que $\mu = 2$, luego queda comprobado lo deducido de las concentraciones resultantes de las corridas realizadas.

Se encuentra similitud entre los experimentos preliminares (véase TABLA N° 5.9 en la página 48), ya que las concentraciones finales no superaron el límite.

Sabemos que:

Estadístico	Datos
n	15
\bar{x}	1.333
s	0.757

Donde: n = muestra, \bar{x} = media, s = desviación estándar
Fuente: Elaboración propia

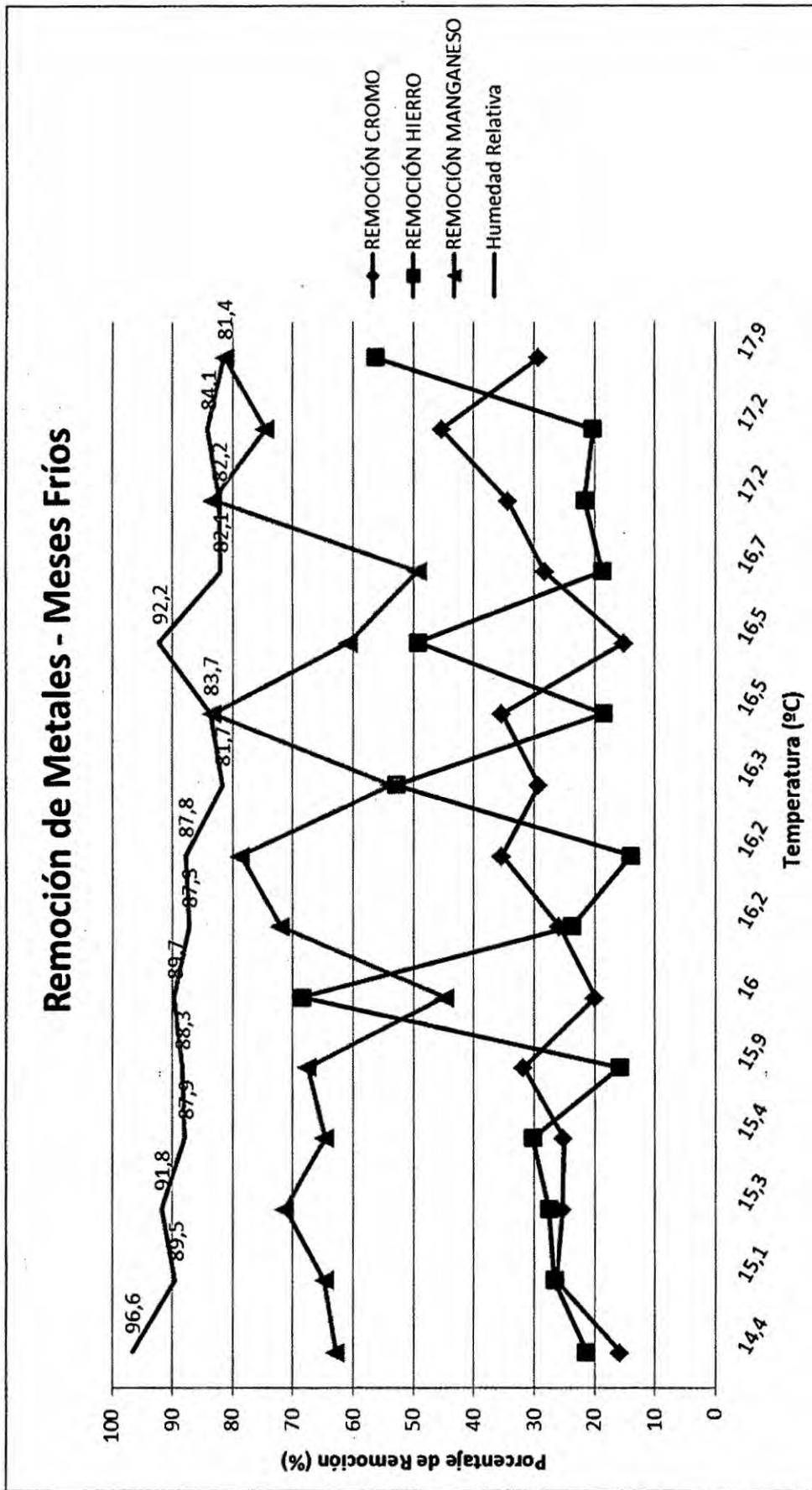
Como podemos observar en la GRÁFICA N° 6.4 (véase en la página 89) las concentraciones de hierro luego de la remoción son inferiores a 4 ppm ($\mu < 4$). Para este caso se aplicará la prueba de una cola y el nivel escogido de $\alpha = 0.05$. Entonces tenemos:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} = -13.750$$

Para $t_{2(0.05)}$ es decir para este caso $t_{0.10}$ y además $(n - 1) = 14$ en la Tabla I da 1.761 y como $-13.750 < 1.761$ queda probado que el promedio $\mu < 4$, con 5% de probabilidades de que $\mu = 4$, luego queda comprobado lo deducido de las concentraciones resultantes de las corridas realizadas.

Se encuentra similitud entre los experimentos preliminares (véase TABLA N° 5.9 en la página 48), dado que las concentraciones finales no superaron el límite.

GRÁFICA N° 6.5 REMOCIÓN DE METALES – MESES FRÍOS



Fuente: Elaboración propia

Tal como se indicó para los meses cálidos con respecto al efecto sinérgico o antagonístico esto mismo ocurre en las corridas para los meses fríos:

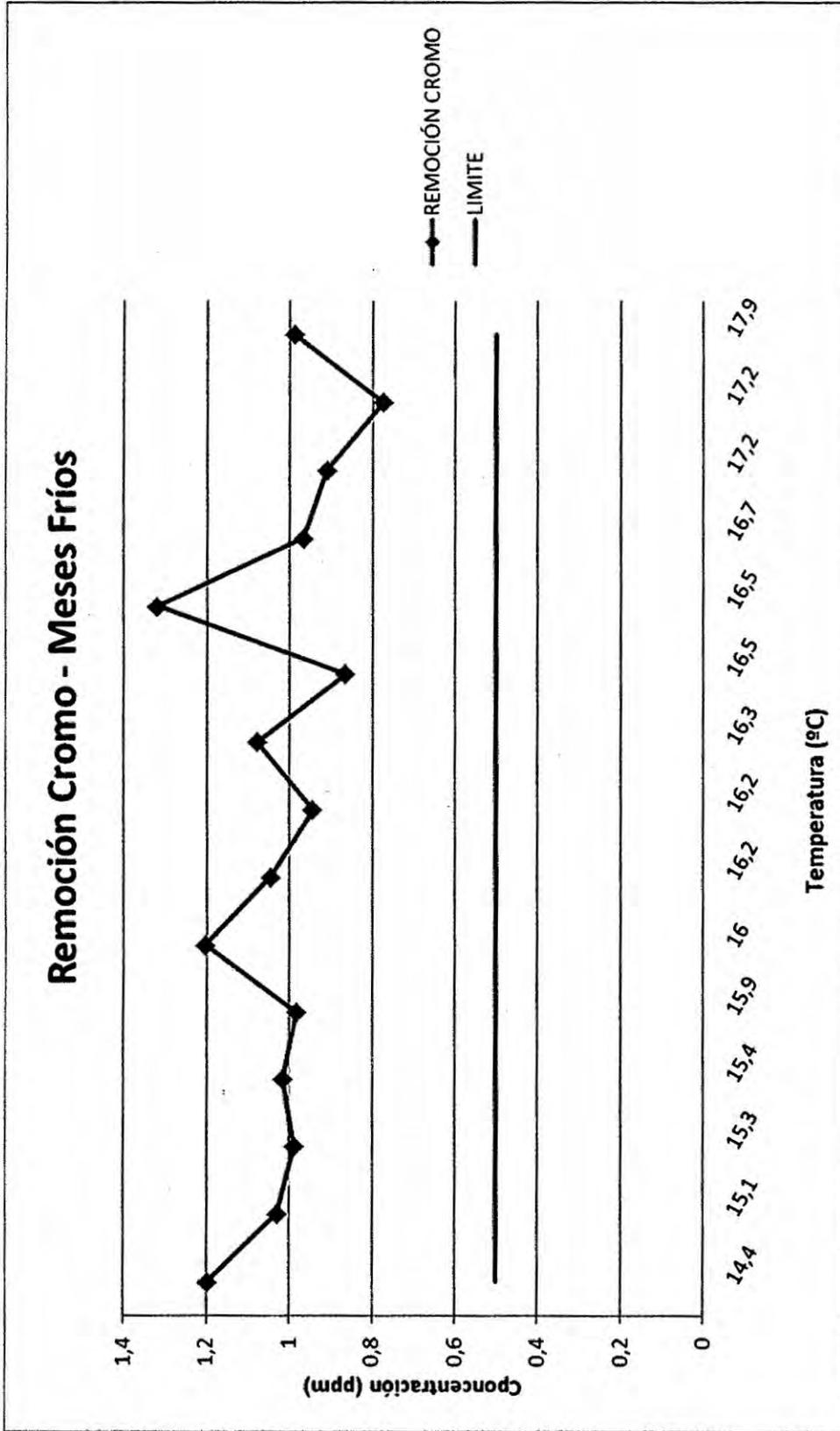
En la GRÁFICA N° 6.5 (véase en la página 91) puede notarse el efecto sinérgico o antagonístico puesto que si observamos en forma particular cada corrida – total 15 corridas – puede indicarse que:

- Si la planta remueve hierro en mayor cantidad entonces removerá menos cromo y manganeso.
- Asimismo si la planta remueve mayor cantidad de manganeso y cromo entonces removerá menor cantidad de hierro.

Asimismo con respecto a la tendencia del medio, el pH influye en forma notable en el desarrollo de la planta, se observa que:

La experimentación fue realizada hasta en un pH de 6 – con un promedio de 6.8 para las pruebas en meses fríos – aunque en estas corridas la tendencia es al neutro, esto no afectó la capacidad de remoción dado que se encuentra similitud entre los resultados.

GRÁFICA N° 6.6 REMOCIÓN DE CROMO VS LÍMITE – MESES FRÍOS



Fuente: Elaboración propia

Sabemos que:

Estadístico	Datos
n	15
\bar{x}	1.020
s	0.139

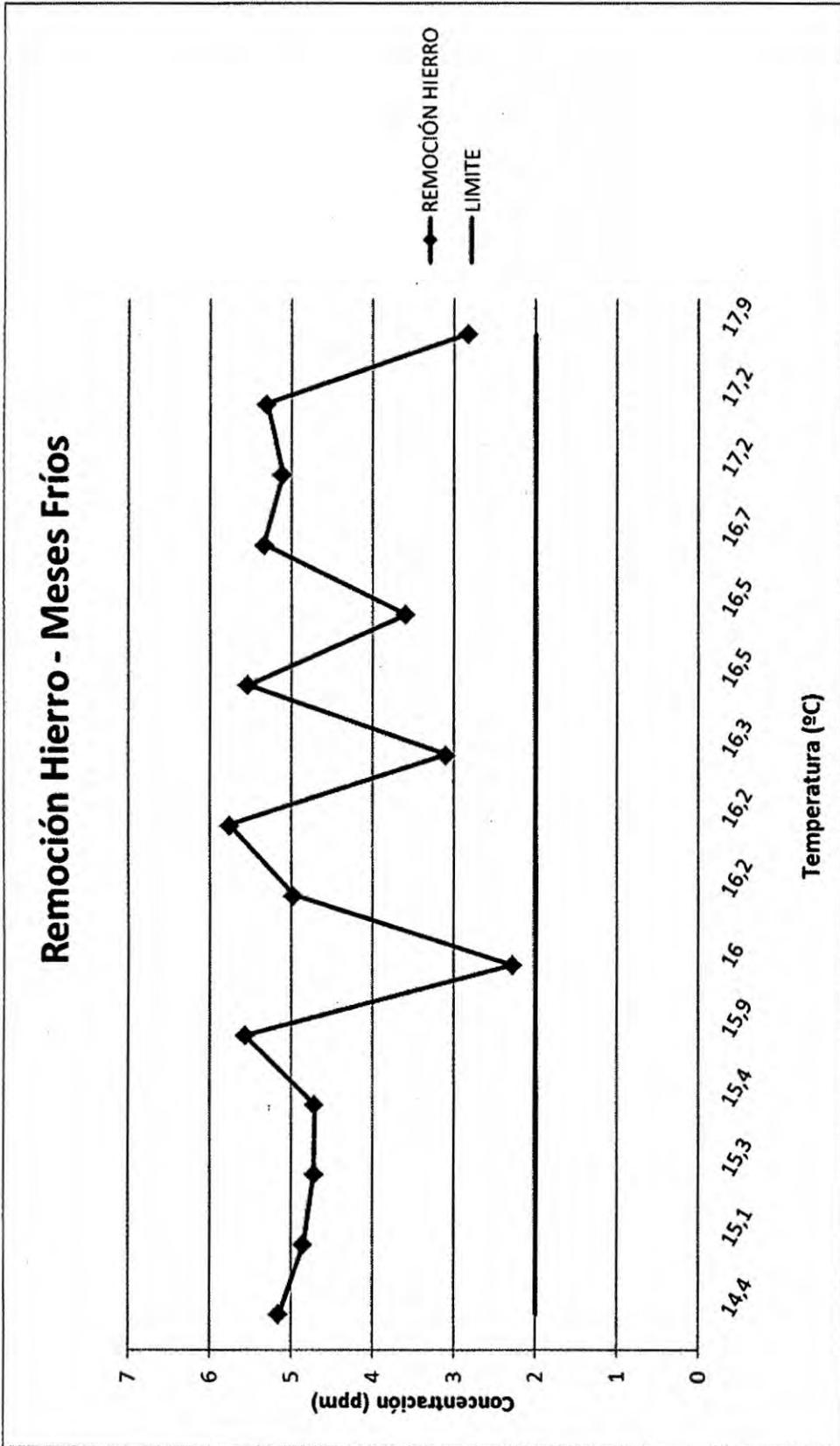
Donde: n = muestra, \bar{x} = media, s = desviación estándar
Fuente: Elaboración propia.

Como podemos observar en la GRÁFICA N° 6.6 (véase en la página 93) las concentraciones de cromo luego de la remoción son superiores a 0.5 ppm ($\mu > 0.5$). Para este caso se aplicará la prueba de una cola y el nivel escogido de $\alpha = 0.05$. Entonces tenemos:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} = 14.523$$

Para $t_{2(0.05)}$ es decir para este caso $t_{0.10}$ y además $(n - 1) = 14$ en la Tabla I da 1.761 y como $14.523 > 1.761$ queda probado que el promedio $\mu > 0.5$, con 5% de probabilidades de que $\mu = 0.5$, luego queda comprobado lo deducido de las concentraciones resultantes de las corridas realizadas. Se encuentra similitud entre los experimentos realizados en las pruebas en meses cálidos y fríos (véase GRÁFICA N° 6.2 REMOCIÓN DE CROMO VS LÍMITE – MESES CÁLIDOS en la página 85), puesto que luego de la remoción las concentraciones superan al límite que indica la norma.

GRÁFICA N° 6.7 REMOCIÓN DE HIERRO VS LÍMITE – MESES FRÍOS



Fuente: Elaboración propia

Sabemos que:

Estadístico	Datos
n	15
\bar{x}	4.584
s	1.094

Donde: n = muestra, \bar{x} = media, s = desviación estándar
Fuente: Elaboración propia

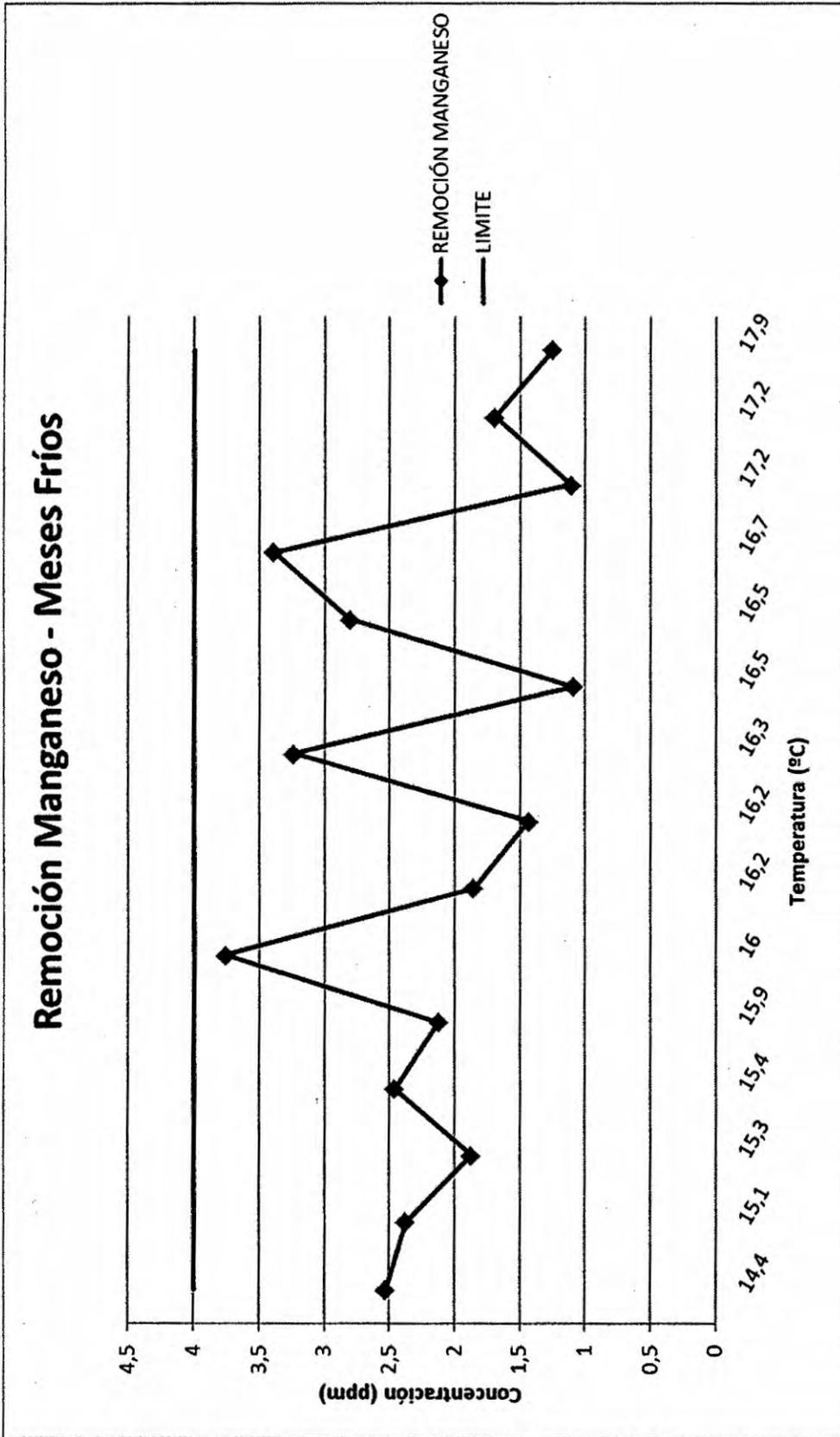
Como podemos observar en la GRÁFICA N° 6.7 (véase en la página 95) las concentraciones de hierro luego de la remoción son mayores a 2 ppm ($\mu > 2$). Para este caso se aplicará la prueba de una cola y el nivel escogido de $\alpha = 0.05$. Entonces tenemos:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} = 9.152$$

Para $t_{2(0.05)}$ es decir para este caso $t_{0.10}$ y además $(n - 1) = 14$ en la Tabla I da 1.761 y como $9.152 > 1.761$ queda probado que el promedio $\mu > 2$, con 5% de probabilidades de que $\mu = 2$, luego queda comprobado lo deducido de las concentraciones resultantes de las corridas realizadas.

No se encuentra similitud entre los experimentos preliminares (véase TABLA N° 5.9 en la página 48), dado que las concentraciones finales superan lo establecido en la norma.

GRÁFICA N° 6.8 REMOCIÓN DE MANGANESO VS LÍMITE – MESES FRÍOS



Fuente: Elaboración propia

Sabemos que:

Estadístico	Datos
n	15
\bar{x}	2.196
s	0.840

Donde: n = muestra, \bar{x} = media, s = desviación estándar
Fuente: Elaboración propia

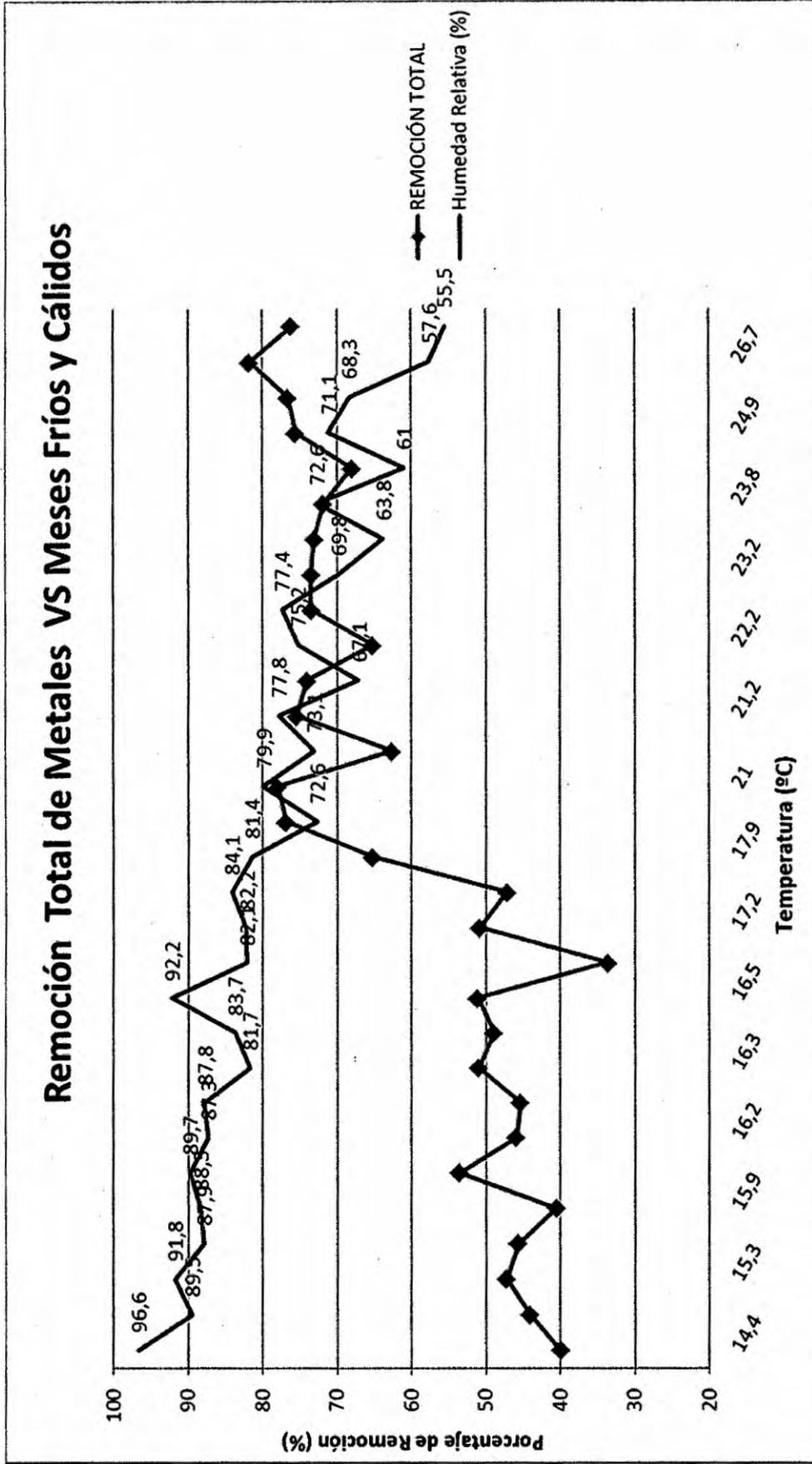
Como podemos observar en la GRÁFICA N° 6.8 (véase en la página 97) las concentraciones de hierro luego de la remoción son inferiores a 4 ppm ($\mu < 4$). Para este caso se aplicará la prueba de una cola y el nivel escogido de $\alpha = 0.05$. Entonces tenemos:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} = -8.311$$

Para $t_{2(0.05)}$ es decir para este caso $t_{0.10}$ y además $(n - 1) = 14$ en la Tabla I da 1.761 y como $-8.311 < 1.761$ queda probado que el promedio $\mu < 4$, con 5% de probabilidades de que $\mu = 4$, luego queda comprobado lo deducido de las concentraciones resultantes de las corridas realizadas.

Se encuentra similitud entre los experimentos preliminares (véase TABLA N° 5.9 en la página 48), dado que el resultado ha llegado a cumplir con el límite.

GRÁFICA N° 6.9 REMOCIÓN TOTAL DE METALES – MESES FRÍOS Y CÁLIDOS



Fuente: Elaboración propia

Basándose en la experimentación se observa que *E. crassipes* logra remover cromo hexavalente tal como indican Martelo & Lara “ ... *Eichhornia crassipes* (*Pontederiaceae*) resultaron excelentes bioabsorbedores de cadmio, níquel, cobre, zinc, cromo y plomo.”

Según Harley “La habilidad del jacinto de agua de extraer los nutrientes y los metales pesados puede ser explotada para tratar los efluentes de alcantarillados...” lo cual según esta investigación es posible, ya que se puede remover metales pesados como cromo, hierro y manganeso en ciertos porcentajes dependiendo de las condiciones del ambiente.

Guerrero también indica que “... se encuentra que las condiciones óptimas de desarrollo de la planta y por ende de la capacidad de remoción son principalmente: pH, temperatura y nutrientes.”

En las pruebas se ha tomado en consideración el pH, el nutriente (un fertilizante natural), la temperatura y además se ha tomado en cuenta la humedad relativa – que junto con la temperatura nos determinan las condiciones ambientales – se ha notado que la remoción tiene una tendencia a disminuir cuando la humedad relativa es menor a 60 %.

Por lo cual es probable que mientras menor sea la humedad relativa aún estando en temperatura óptima para el desarrollo de la planta, esto

afectaría las condiciones en las que esta se desarrolla impidiéndole remover elementos presentes del medio en el cual se encuentra.

En la GRÁFICA N° 6.9 (véase en la página 99) se desprende que el promedio de la remoción de metales en meses cálidos es de 87.1% y en meses fríos de 69.5%.

CAPÍTULO VII CONCLUSIONES

- A. Se ha evaluado la remoción de metales – cromo hexavalente, hierro y manganeso – en el humedal artificial de flujo superficial mediante *E. crassipes* en diferentes condiciones ambientales, notándose significativamente que la planta en estudio puede remover en mayor proporción dichos metales en meses cálidos (temperaturas mayores o iguales que 20 °C) que en meses fríos (temperaturas menores que 20 °C).

- B. Las condiciones ambientales mostradas en este estudio están determinadas por la temperatura y la humedad relativa, específicamente se ha observado que cuando la humedad relativa disminuye el porcentaje de remoción también lo hace, notándose más cuando la humedad relativa es menor a 60%.

- C. Otro aspecto a tomar en cuenta en las condiciones del medio donde se desarrolla la planta es el efecto del pH, *E. crassipes* ha demostrado que puede lograr remover dichos elementos en un medio con tendencia ácida o ligeramente ácida tanto para los meses cálidos como para los fríos.

- D. Se determina que el rango de concentración tolerable para el caso de Cromo hexavalente son concentraciones menores a 20 ppm y para los metales Hierro y Manganeso las concentraciones son menores a 40 ppm, estos rangos fueron los resultados encontrados en las pruebas aisladas

realizadas para cada metal. (Véase Tabla N° 5.4 Concentración Tolerable de Metales en la página 42).

- E. Se evidencia el efecto sinérgico o antagónico en todas las pruebas realizadas, ya que mientras la planta remueve hierro removerá menos manganeso y cromo; asimismo mientras la planta remueve manganeso y cromo removerá menos hierro. (Véase Gráfica N° 6.1 Remoción de metales – meses cálidos en la página 83 y Gráfica N° 6.5 Remoción de metales – meses fríos en la página 91).
- F. Se determina que el tiempo de retención óptimo es de 4 días donde la remoción puede llevar a cumplir los límites de la norma, tomando en cuenta condiciones de temperatura mayores o iguales que 20°C. (Véase Tabla N° 5.13 Resultado Concentración de Metales y Tiempo de Retención en la página 53).
- G. A pesar de las similitudes encontradas tanto en la Celda Experimental como en el Humedal Artificial de Flujo Superficial en los meses cálidos, no se ha podido registrar en este último que el cromo hexavalente haya llegado a concentraciones menores a 0.5 ppm.
- H. Se determina que la capacidad de remoción del hierro es mayor en época cálida, además en el caso del cromo es menor en época fría como ilustra la siguiente Tabla:

TABLA N° 7.1 RESUMEN CAPACIDAD DE REMOCIÓN

Metal	Temperatura (°C)	Concentración Inicial * (ppm)	Concentración Final * (ppm)	Remoción (%)	Limite (ppm)	Cumple
Cr ⁺⁶	< 20	1.416	1.020	15 - 45	0.5	NO
	≥ 20	1.404	0.899	27 - 43		NO
Fe ⁺²	< 20	6.671	4.584	14 - 69	2	NO
	≥ 20	6.666	1.483	71 - 95		SI
Mn ⁺²	< 20	6.722	2.196	45 - 83	4	SI
	≥ 20	6.676	1.333	67 - 98		SI

* Promedio de concentraciones

Fuente: Elaboración propia

- I. Se observa que la capacidad de remoción de cromo hexavalente, hierro y manganeso del humedal artificial de flujo superficial mediante *E. crassipes* en meses cálidos es de 87.1% y para los meses fríos es de 69.5%.

CAPÍTULO VIII RECOMENDACIONES

- A. Sería necesario conocer donde tiene lugar la mayor parte de la remoción ya sea hojas o raíces de la planta, dado que se ha notado en el presente estudio una mayor proporción de raíces con respecto a las hojas.

- B. Sería importante estudiar cómo se comporta la planta con respecto a la remoción en otras altitudes y climas, ya que la experiencia sólo fue realizada a nivel del mar donde la presión es máxima y en clima húmedo.

CAPÍTULO IX REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) APHA-AWWA-WEF. 22nd Edition 2012. 3500-Cr B. Colorimetric Method.
- 2) APHA-AWWA-WEF. 22nd Edition 2012. 3500-Fe B. Phenanthroline Method.
- 3) APHA-AWWA-WEF. 22nd Edition 2012. 3500-Mn B. Persulfate Method.
- 4) **BENÍTEZ PACHECO INGRID LORENA. Evaluación de la distribución de metales pesados en las plantas acuáticas jacinto de agua (eichhornia crassipes) y tul (thypa spp) utilizadas en la planta de tratamiento de aguas residuales la cerra, villa canales por medio de fluorescencia de rayos x.** Tesis. Master en ciencias en ciencia y tecnología del medio ambiente. Universidad de San Carlos de Guatemala. 2008.
- 5) Decreto Supremo N°010-2010-MINAM Aprueban Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas.
- 6) Decreto Supremo N° 021-2009-VIVIENDA Aprueban Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario.
- 7) **DÉNES GÁL, y otros. Tratamiento de las aguas residuales de sistemas intensivos de acuicultura mediante humedales y estanques extensivos- Estudio de caso en Hungría.** *SustainAqua handbook – A handbook for sustainable aquaculture.* (28). 2009.
- 8) Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo libre superficial EPA Septiembre de 2000.
- 9) **GUERRERO FAJARDO CARLOS ALBERTO. Remoción de Metales de Aguas Residuales Industriales.** *Revista Colombiana de Química.* Vol. 14: 89-97. Colombia. 1985.
- 10) **GUTIÉRREZ RÍOS ENRIQUE. Química.** España. Editorial Reverté S.A. 1985.

- 11) HARLEY KENNETH LEIGH SCOTT. **Eichhornia crassipes (Martius) Solms – Laubach.** *Manejo de malezas para países en desarrollo. Estudio FAO Producción y Protección Vegetal – 120.:133 a 143.* 1996.
- 12) HENRY J. GLYNN y otros. **Ingeniería Ambiental.** México. Editorial Assistant. 1999.
- 13) HOWARD Albert. **An Agriculture Testament.** Inglaterra. 1940
- 14) KITTEL CHARLES. **Física térmica.** España. Editorial Reverte S.A. 1973.
- 15) MARTELO JORGE, LARA BORRERO JAIME. **Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales; una revisión del estado del arte.** *Ingeniería y Ciencia, ing. y cienc.* Volumen (8): 224 a 228. Colombia. 2012.
- 16) PENA ANTONIO. **Bioquímica.** México. Editorial Limusa. Segunda Edición. 1988.
- 17) POIRÉE MAURICE y OLLIER. **El Regadío: redes, teoría, técnica y economía de los riegos.** España. Editorial Editores Técnicos Asociados S.A. Cuarta edición. 1977
- 18) QUIROZ RONALD. **Manual de procedimientos - Filtros verdes. Ecuador.** 2009 – 2010.
- 19) R.M N° 026-2000-ITINCI/DM Aprueban Protocolos de Monitoreo de Efluentes Líquidos y Emisiones Atmosféricas.
- 20) TRUJILLO SANTACOLOMA FRANCISCO JULIÁN. **Soluciones acuosas: teoría y aplicaciones. Módulo de apoyo académico en Química.** España. Editorial Universidad de Medellín. Primera Edición. 2004.
- 21) ZAMBRANO FAJARDO Sandra Lidia, MADROÑERO PAZ Sandra Patricia. **Caracterización Físico-Química y Microbiológica de las Cuencas Hidrográficas del Departamento de Caldas.** Colombia. 2006.

ANEXOS

ANEXO 1. Matriz de Consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA	POBLACIÓN
¿Es posible que se remuevan los metales cromo, hierro y manganeso en un humedal artificial utilizando <i>Eicchornia crassipes</i> ?	<p>Objetivo General</p> <p>Evaluar la remoción de metales – Cr⁺⁶, Fe⁺² y Mn⁺² – en el humedal artificial de flujo superficial mediante <i>E. crassipes</i> en diferentes condiciones ambientales.</p> <p>Objetivos Específicos</p> <p>Determinar un rango de concentración para cada metal, que la planta puede soportar sin detrimento de su proceso metabólico, de esta manera se podrá conocer la concentración del metal que puede agregarse al agua residual a tratar en el humedal artificial de flujo superficial.</p> <p>Determinar el tiempo de retención óptimo en que la planta pueda tratar las aguas de manera eficiente.</p> <p>Determinar la capacidad de remoción del humedal artificial de flujo superficial a diferentes condiciones ambientales mediante <i>E. crassipes</i> de tres metales pesados: cromo hexavalente, hierro y manganeso.</p>	<p>Hipótesis</p> <p>Se puede remover los metales cromo, hierro y manganeso en un humedal artificial utilizando <i>Eicchornia crassipes</i>.</p>	<p>Variable independiente</p> <p>Tratamiento por humedal artificial de flujo superficial</p> <p>Variable dependiente</p> <p>Remoción de metales</p>	<p>Tipo de investigación</p> <p>Esta es una investigación de tipo experimental, pues se realizarán pruebas en el laboratorio.</p> <p>Diseño de la investigación</p> <p>Se aplica un diseño de enfoque analítico experimental aleatorio.</p>	<p>Muestra:</p> <p>La totalidad de la población será la muestra y la especie a utilizar será <i>E. crassipes</i> en el humedal artificial de flujo superficial.</p>

ANEXO 2. Composición del agua desionizada usada en las pruebas.

TABLE 1080-1. WATER PURIFICATION PROCESSES

Process	Major Classes of Contaminants*						
	Dissolved Ionized Solids	Dissolved Ionized Gases	Dissolved Organics	Particulates	Bacteria	Pyrogens/Endotoxins	
Distillation	G-E†	P	G	E	E	E	
Deionization	E	E	P	P	P	P	
Reverse osmosis	G†	P	G	E	E	E	
Carbon adsorption	P	P§	G-E	P	P	P	
Filtration	P	P	P	E	E	P	
Ultrafiltration	P	P	G#	E	E	E	
Ultraviolet oxidation	P	P	G-E**	P	G††	P	

Permission to use this table from C3-A2, Vol. 11, No. 13, Aug. 1991, "Preparation and Testing of Reagent Water in the Clinical Laboratory - Second Edition" has been granted by the National Committee for Clinical Laboratory Standards. The complete current standard may be obtained from National Committee for Clinical Laboratory Standards, 771 E. Lancaster Ave., Villanova, PA 19085.

* E = Excellent (capable of complete or near total removal), G = Good (capable of removing large percentages), P = Poor (little or no removal).

† Resistivity of water purified by distillation is an order of magnitude less than water produced by deionization, due mainly to the presence of CO₂ and sometimes H₂S, NH₃, and other ionized gases if present in the feedwater.

‡ Resistivity of dissolved ionized solids in the product water depends on original feedwater resistivity.

§ Activated carbon removes chlorine by adsorption.

|| When used in combination with other purification processes, special grades of activated carbon and other synthetic adsorbents exhibit excellent capabilities for removing organic contaminants. Their use, however, is targeted toward specific compounds and applications.

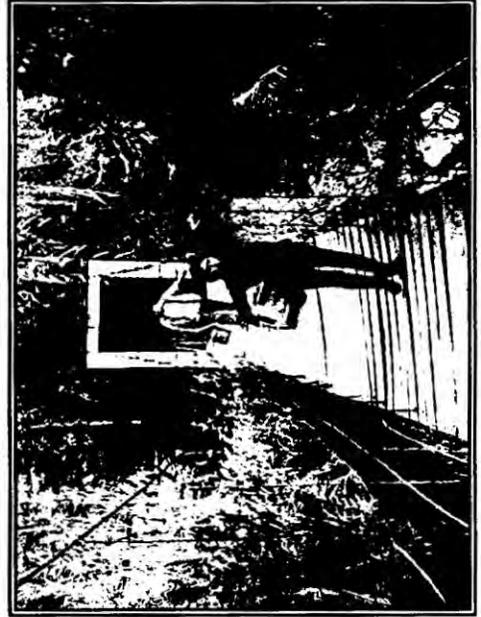
Ultrafilters have demonstrated usefulness in reducing specific feedwater organic contaminants based on the rated molecular weight cut-off of the membrane.

** 185 nm ultraviolet oxidation (batch process systems) is effective in removing trace organic contaminants when used as post-treatment. Feedwater makeup plays a critical role in the performance of these batch processors.

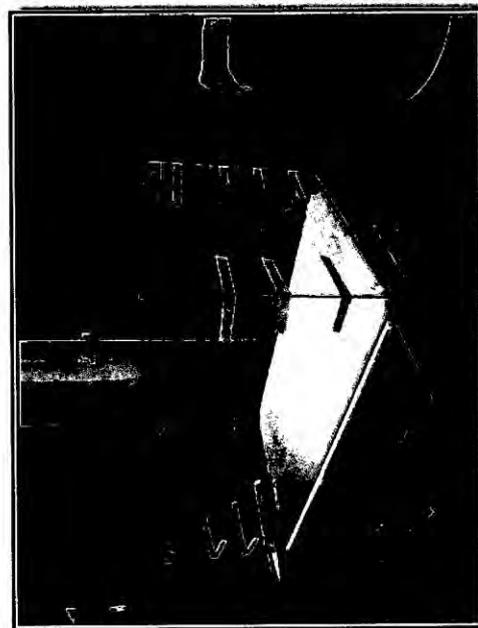
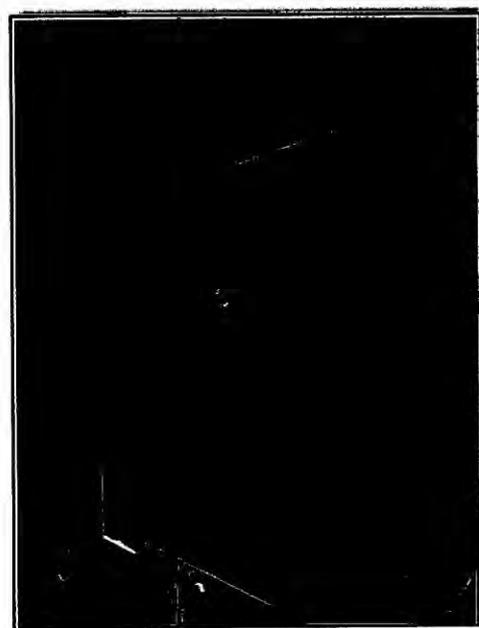
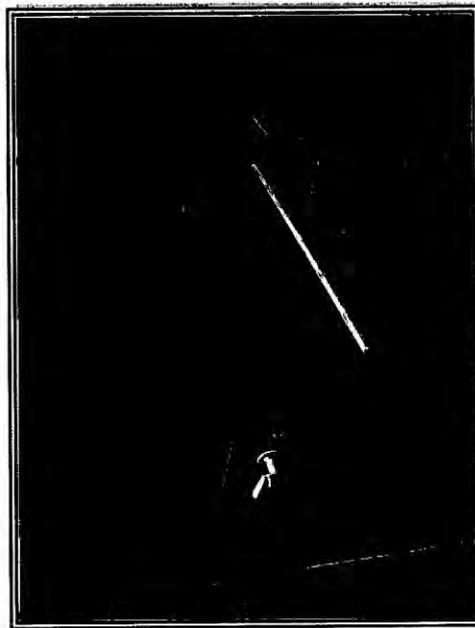
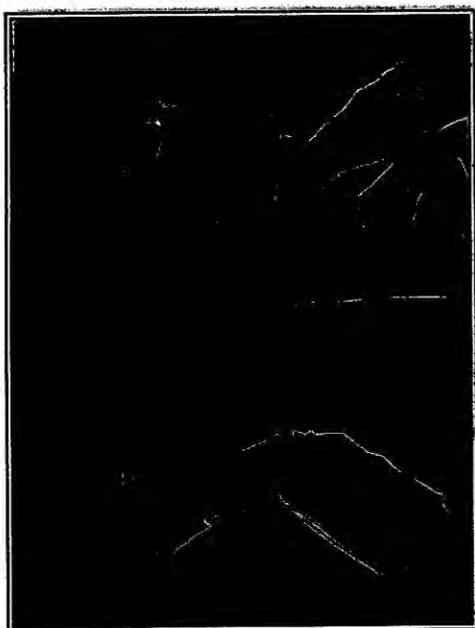
†† 254 nm UV sterilizers, while not physically removing bacteria, may have bactericidal or bacteriostatic capabilities limited by intensity, contact time, and flow rate.

Reproducido de APHA-AWWA-WEF. 22nd Edition 2012. TABLE 1080-1. WATER PURIFICATION PROCESSES

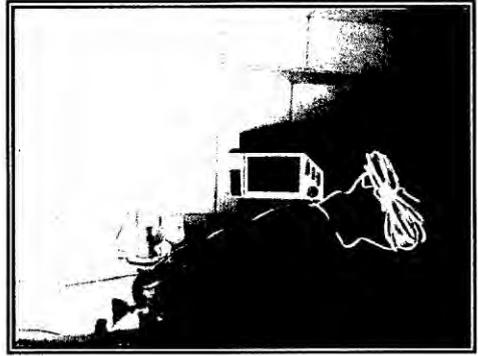
ANEXO 3. Recojo de plantas - Palle



ANEXO 4. Construcción del Humedal Artificial



ANEXO 5. Detalle de Fertilizante, detalle de *E. crassipes* y corrida



ANEXO 6. Tabla I. Valores de t para Probabilidades de 0.50 a 0.01 (50 a 99%)

G. L.	Probabilidad de un valor más alto de t. Signos ignorados							
	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
1	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657
2	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925
3	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841
4	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.804
5	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032
6	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707
7	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499
8	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355
9	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250
10	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169
11	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106
12	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055
13	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012
14	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977
15	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.608	2.947
16	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921
17	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898
18	0.688	0.863	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878
19	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861
20	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845
21	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831
22	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819
23	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807
24	0.685	0.857	1.060	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797
25	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787
26	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779
27	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771
28	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763
29	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756
30	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750
35						2.030		2.724
40						2.021		2.704
45						2.014		2.690
50						2.008		2.678
60						2.000		2.660
70						1.994		2.648
80						1.990		2.638
90						1.987		2.632
100						1.984		2.626
125						1.979		2.616
150						1.976		2.609
200						1.972		2.601
300						1.968		2.592
400						1.966		2.588
500						1.965		2.586
1000						1.962		2.581
∞	0.67449	0.84162	1.03643	1.28155	1.64485	1.95996	2.32634	2.57582

Reproducido de la TABLA III del libro MÉTODOS ESTADÍSTICOS PARA LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA por JOSE CALZADA BENZA.

ANEXO 7. Versión original en inglés de la prueba estadística, según programa SAS Versión 8.2.

Traducción – Español	Versión original – Inglés
Prueba de Levene para la homogeneidad de Varianza	Levene's Test for Homogeneity of VR Variance
ANOVA de Desviaciones cuadradas de Grupos Medios	ANOVA of Squared Deviations from Group Means
Fuente	Source
Grados de libertad - GD	DF
Suma de cuadrados	Sum of squares
Cuadrado Medio	Mean square
Valor de F	F Value
Prueba de Bartlett para la homogeneidad de Varianza	Bartlett's Test for Homogeneity of VR Variance
Chi-Cuadrado	Chi-Square
Prueba de Normalidad	Test for Normality
Prueba	Test
Estadístico	Statistic
Valor de p	p Value
Gráfico de Probabilidad Normal	Normal Probability Plot
Tratamiento – Trat.	TRT

Elaboración propia