



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO EN  
ELECTROQUÍMICA, S.C.

---

**“ELECTRO-REMEDIACIÓN DE SUELO CONTAMINADO CON  
HIDROCARBURO *in situ*”**

Tesis

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE

*Maestría en Ciencia y Tecnología  
en la Especialidad de Ingeniería Ambiental*

PRESENTA

I.Q. Maribel Pérez Corona



Santiago de Querétaro, Qro., México, diciembre del 2012.



**Este trabajo fue realizado en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ), bajo la dirección de la Dra. Erika Bustos Bustos**

*A Dios, porque poca ciencia me alejo muchas veces de él, sin embargo el conocimiento de ella me guio hacia a él.*

*Francis Bacon.*

## **Agradecimientos.**

A *Dios* por haberme permitido vivir esta experiencia maravillosa con la cual aprendí muchas cosas y conocí gente extraordinaria.

A *mi mami*, por el inmenso amor que me tienes, porque gracias a el por mucho tiempo no me di cuenta de lo cruel y difícil que puede llegar a ser el mundo, porque gracias a ese inmenso amor creo que las cosas pueden cambiar, renovarse y mejorar; pero sobre todo por enseñarme a hacer siempre lo correcto en todos los aspectos de mi vida.

A *mi papi*, por todos tus consejos, los cuales me han orientado a lo largo de mi vida, por todos los sacrificios que hiciste por mí y por mostrarme que yo soy capaz de conseguir lo que quiero.

A *mi querida hermana Gris*, por ser ese empujoncito que siempre me falta para seguir adelante, porque confías en mí a pesar de que yo misma no lo hago, porque no solo eres mi hermana, eres mi amiga fiel e incondicional.

A *mi pequeña hermana Chely*, por confiar en mí, porque me enseñas diariamente una manera diferente de vivir y disfrutar la vida, por ser tan clara y directa conmigo diciéndome todo lo que te molesta y apruebas de mí.

A *mi querida tía Elena* por enseñarme que aun en la soledad se puede ser feliz.

Especialmente gracias a *Brenda Ochoa y Ernesto Zapata*, por haberme acompañado en la aplicación de la técnica en campo, se que estas palabras no pueden pagar todo lo que ustedes hicieron por mi esos días, pero de verdad muchas gracias.

Al *M.C. Jesús Cárdenas*, por brindarme su apoyo desinteresadamente muchas veces y por aconsejarme durante todo este tiempo, por acompañarme en la aplicación en campo, porque usted fue una parte medular muchísimas gracias.

Al *Ing. Juan Pablo Rodríguez* y al *Ing. Parra*, por su apoyo para tener acceso al sitio contaminado, por el tiempo que nos dedicaron y las facilidades para el desarrollo de este proyecto.

A la *Dra. Erika Bustos*, por compartir conmigo sus conocimientos y tener la paciencia de explicarme siempre todas mis dudas, por aguantarme casi dos años, porque todo este trabajo no hubiera sido posible si no hubiera contado con su apoyo incondicional, muchas gracias.

A toda la comunidad CIDETEQ, porque hubo muchas personas que en algún momento me ayudaron o motivaron en el desarrollo del proyecto: *Daniel Beltrán*, por tu colaboración y compartirme tus conocimientos. *Santiago Castro* porque nunca te negaste a ayudarme. *Don Cruz* por su disposición para realizar trabajos que me permitían realizar mis experimentos. *Maestra Sara Solís* (Geo-ciencias, campus Juriquilla), por compartir sus conocimientos conmigo.

Muchas gracias: Dr. José de Jesús Pérez, Dr. René Antaño, Jorge Corona, Julio Mérida, Alejandro Medel, Víctor Ramírez, Alex Tamaño, Roberto Frausto, Dra. Margarita Teutli, Dr. Gabriel Trejo, Dr. Raúl Ortega, Dra. Julieta Torres, Arturo Corona, Juanita González, M.C. Raquel Fernández, Dra. Rosario Iturbe.

Finalmente a mis amigos y compañeros que hicieron de mi estancia en CIDETEQ una aventura inolvidable: *Jesús Adrián* gracias por ser una persona excepcional conmigo, por compartirme tus conocimientos, porque a lo largo de estos dos años encontré en ti a alguien mejor que un amigo, a un hermano. *Bertha* gracias por permitirme formar parte de tu vida y por acompañarme en esta aventura. *Héctor, Blanca y Paty* gracias por su amistad, por hacerme reír hasta el cansancio y por enseñarme a disfrutar de la vida como nadie. *Carlos Chacón* por dejarme conocerte y por brindarme tú amistad, porque fuiste conmigo una extraordinaria persona. *Gladis* por ser una buena amiga y confiar en mí, gracias. *Luz García* y *Gina Zúñiga* por su ayuda, sus consejos y su amistad.

Al grupo de trabajo de Electroquímica Ambiental del periodo Diciembre 2010- Agosto 2012, por sus comentarios y consejos gracias.

Al CONCYTEQ por el apoyo económico brindado para la presentación de trabajos en el XXVII Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, llevado a cabo en Toluca, México en Junio de 2012.

Al CONACYT por la beca brindada durante el desarrollo de la maestría, sin la cual no habría sido posible concluir satisfactoriamente mis estudios.

## Resumen.

El petróleo es la principal fuente de energía en los países desarrollados y sus derivados tales como el diesel, la parafina y gas licuado se utilizan para el transporte, la calefacción y la producción de energía eléctrica. En contraparte los procesos de producción requeridos para su obtención, transformación, transporte y distribución generan un grave problema de contaminación ambiental por hidrocarburos encontrándose en cuerpos de agua, aire y suelos.

Por tal motivo esta tesis aborda la electro-remediación de un suelo tipo Vertisol contaminado con hidrocarburos fracción intermedia y pesada en una zona industrial del sector petrolero. Se estudió la estabilidad del ánodo empleado ( $\text{IrO}_2 - \text{Ta}_2\text{O}_5 | \text{Ti}$ ) en presencia del suelo contaminado y el electrolito soporte ( $\text{NaOH}$  0,1 M). Además, se realizó el estudio físico y químico del suelo contaminado, determinando textura, grasas y aceites, hidrocarburos de fracción intermedia y pesada, pH, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico, densidad real y aparente, porosidad y materia orgánica, con la finalidad de conocer las variables determinantes en la matriz de estudio.

Una vez caracterizado el suelo contaminado se efectuó la comparación a nivel laboratorio de la eficiencia de remoción de hidrocarburo empleando tres configuraciones diferentes de electrodos propuestas en literatura: frente a frente, alternados y circular, con lo cual se estableció la mejor configuración de electrodos y las condiciones experimentales adecuadas para su posterior escalamiento.

Finalmente, se llevó a cabo el tratamiento electroquímico del suelo contaminado en campo y se evaluaron nuevamente las características físicas y químicas antes mencionadas al suelo tratado, con la finalidad de valorar la eficiencia técnico-económica de la electro-remediación del suelo contaminado con hidrocarburo *in situ*.

El desarrollo de esta tesis permitió generar conocimiento de las condiciones necesarias para la aplicación de la electro-remediación *in situ* de suelo contaminado con hidrocarburo en México. El análisis técnico-económico revela que la electro-remediación es competitiva frente a tecnologías como lavado sólido y extracción química, lo que abre la posibilidad de considerarla como una opción viable en el país para remediar suelos contaminados en un menor tiempo con respecto a técnicas actualmente empleadas como la biorremediación.

En definitiva con esta tesis se abren las posibilidades de seguir en la búsqueda de mejores alternativas y condiciones que permitan aplicar la electro-remediación en suelos contaminados de México, valorando primeramente las condiciones necesarias para poder aplicarla y conseguir que la remediación sea exitosa.