



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**Modelado del transporte hídrico y de la dispersión superficial
de Pb, a partir de un sitio de disposición final de residuos
sólidos urbanos en una zona semiárida**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestría en Tecnología y Gestión del Agua

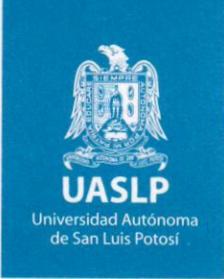
Presenta:

Ing. Marcos Benjamín Cruz Jiménez

Asesor:

Dr. Alfredo Ávila Galarza





18 de junio de 2020

**DR. ALFREDO ÁVILA GALARZA
P R E S E N T E.**

De conformidad con las facultades que el H. Consejo Técnico Consultivo otorgó a esta Secretaría, le comunico que ha sido propuesto como *Asesor del Trabajo de Tesis* que deberá desarrollar el **Ing. Marcos Benjamín Cruz Jiménez**, para obtener el grado de **Maestro en Tecnología y Gestión del Agua**. Se le indica que es obligatoria la participación del Asesor en los exámenes Previo y Final de Grado.

El tema propuesto para dicho trabajo es el siguiente:

“Modelado del transporte hídrico y de la dispersión superficial de Pb, a partir de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos en una zona semiárida”

Solicito a Usted tome nota que dicho Tema ha quedado registrado y que su vigencia es de un año a partir de la fecha; si transcurrido ese lapso su asesorado no concluye el trabajo, deberá hacer nuevo trámite de registro y/o solicitar **prórroga** para la terminación del mismo.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

A T E N T A M E N T E



DR. JUAN ANTONIO CÁRDENAS GALINDO
SECRETARIO DEL CONSEJO.

UNIVERSIDAD AUTONOMA
DE SAN LUIS POTOSI
FACULTAD DE INGENIERIA
SECRETARIA GENERAL

www.uaslp.mx

Copia. Asesorado.
Coordinador Académico del Posgrado.
Consejero Maestro Del Posgrado.
H. Consejo Técnico Consultivo.
*etn.

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336

“1945-2020: 75 años de formación de profesionales en la Facultad de Ingeniería”

PROYECTO REALIZADO EN:

Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

CON FINANCIAMIENTO DE:

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)

AGRADEZCO A CONACYT EL OTORGAMIENTO DE LA BECA:

Becario No. 758286

LA MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA Y GESTIÓN DEL AGUA RECIBE APOYO A
TRAVÉS DEL PADRÓN NACIONAL DE POSGRADOS DE CALIDAD (PNPC)

ÍNDICE DE LA TESIS

INTRODUCCIÓN.	1
1. PROBLEMATICA AMBIENTAL DE LA DISPOSICIÓN FINAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.	4
1.1 GENERALIDADES DEL MANEJO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU).	4
1.1.1 GENERACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.	4
1.1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS.	5
1.1.3 ALMACENAMIENTO TEMPORAL.	6
1.1.4 RECOLECCIÓN Y TRANSPORTE.	7
1.1.5 TRANSFERENCIA.	8
1.1.6 TRATAMIENTO DE RESIDUOS.	8
1.1.7 VALORACIÓN DE RESIDUOS Y DISPOSICIÓN FINAL.	8
1.1.7.1 Compostaje.	9
1.1.7.2 Reutilización y Reciclaje.	9
1.1.7.3 Incineración.	10
1.1.7.4 Disposición final.	11
1.2 GENERALIDADES DE LOS RELLENOS SANITARIOS.	11
1.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS RELLENOS SANITARIOS.	11
1.2.2 CARACTERÍSTICAS DE CONSTRUCCIÓN Y EQUIPAMIENTO DE UN RELLENO SANITARIO.	12
1.2.3 ASPECTOS OPERATIVOS DE UN RELLENO SANITARIO.	13
1.3 CONTAMINANTES PRODUCIDOS POR LA MALA DISPOSICIÓN DE LOS RSU.	14
1.3.1 BIOGÁS.	14
1.3.2 LIXIVIADOS.	15
1.3.2.1 Generación de los lixiviados.	16
1.3.2.2 Clasificación de lixiviados.	18
1.3.2.3 Composición estándar de un lixiviado.	18

1.3.3	PARTÍCULAS.	19
1.3.4	CONTAMINACIÓN VISUAL.	20
1.4	CONTAMINACIÓN POR LA MALA DISPOSICIÓN DE LOS RSU.	20
1.4.1	EN LAS AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS.	20
1.4.2	EN LOS SUELOS.	21
1.4.3	EN EL AIRE.	21
1.5	MARCO LEGAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.	22
1.5.1	NORMATIVIDAD INTERNACIONAL.	22
1.5.1.1	Normatividad en la Unión Europea.	22
	1.5.1.1.1 <i>Directiva 1999/31/CE.</i>	22
1.5.1.2	Normatividad en Canadá.	23
1.5.1.3	Normatividad en Estados Unidos de América (E.U.A.).	24
1.5.1.4	Normatividad en América Latina y El Caribe.	24
1.5.2	NORMATIVIDAD EN LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS.	25
1.5.2.1	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)	25
1.5.2.2	Reglamento de la LGPGIR	26
1.5.2.3	Leyes Ambientales Estatales.	26
1.5.2.4	Reglamentos de Ecología Municipales.	27
1.5.2.5	Normas Oficiales Mexicanas aplicables a los RSU y RME	27
	1.5.2.5.1 <i>NOM-161-SEMARNAT-2011</i>	27
	1.5.2.5.2 <i>NOM-098-SEMARNAT-2002.</i>	28
	1.5.2.5.3 <i>NOM-083-SEMARNAT-2003.</i>	28
1.5.2.6	Normas Mexicanas (NMX) aplicables.	29
1.6	RECOLECCIÓN Y DISPOSICIÓN FINAL DE LOS RSU EN MÉXICO.	29
2.	DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO.	31
2.1	UBICACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO.	32
2.2	EL RELLENO SANITARIO ESTUDIADO Y SU CONDICIÓN ACTUAL.	32
2.2.1	MEDIDAS CORRECTIVAS DURANTE LA CLAUSURA DEL SITIO.	36

2.2.2	COLOCACIÓN DE POZOS DE VENTEO DE BIOGÁS.	37
2.2.3	CONSTRUCCIÓN Y ADECUACIÓN DE LA FOSA DE LIXIVIADOS.	37
2.3	CARACTERIZACIÓN DE LOS ELEMENTOS BIÓTICOS.	39
2.3.1	FLORA.	39
2.3.2	FAUNA.	40
2.3.2.1	Fauna local.	40
2.3.2.2	Fauna nociva.	40
2.4	CARACTERIZACIÓN DE LOS ELEMENTOS FÍSICOS.	41
2.4.1	GEOLOGÍA DEL ÁREA.	42
2.4.2	HIDROLOGÍA SUPERFICIAL DEL ÁREA.	44
2.4.2.1	Propiedades físicas de la cuenca hidrológica.	45
2.4.2.2	Cuerpos de agua superficiales cercanos.	46
2.4.3	HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA DEL ÁREA.	47
2.4.4	GEOMORFOLOGÍA DEL ÁREA.	48
2.4.5	EDAFOLOGÍA.	49
2.4.6	CLIMA.	50
2.4.6.1	Climograma local.	50
2.4.6.2	Índice de Martonne.	51
2.4.6.3	Índice de Dantín-Revenga.	52
2.5	CARACTERIZACIÓN DE ELEMENTOS LEGALES LOCALES APLICABLES.	53
2.5.1	LEY AMBIENTAL DEL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ.	53
2.5.2	REGLAMENTO PARA LA PROTECCIÓN AL MEDIO AMBIENTE Y ECOLOGÍA MUNICIPAL.	54
2.5.3	BANDO DE POLICÍA Y BUEN GOBIERNO.	55
3.	<i>MODELOS DE TRANSPORTE HÍDRICO Y MEDICIÓN DE CONTAMINANTES EN SUELO Y AGUA.</i>	56

3.1	MODELADO HIDRODINÁMICO DEL TRANSPORTE DE CONTAMINANTES.	56
3.1.1	ANTECEDENTES.	56
3.1.2	FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS.	57
3.1.3	FUNDAMENTOS HIDROLÓGICOS.	60
3.1.3.1	Sistemas fluviales.	60
3.1.3.1.1	<i>Cauces meándricos y depósito de sedimentos y contaminantes.</i>	61
3.2	CARACTERISTICAS DE LOS MODELOS HIDRODINÁMICOS.	62
3.2.1	TIPOS DE MODELOS HIDRODINÁMICOS.	62
3.2.2	SOFTWARES PARA EL MODELADO HIDRODINÁMICO.	63
3.2.3	CALIBRACIÓN DE UN MODELO.	64
3.3	NORMATIVIDAD APLICABLE A LA CALIDAD DEL AGUA.	65
3.3.1	PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA DE DESCARGA.	65
3.4	EL SUELO Y SU COMPOSICIÓN.	66
3.5	NORMATIVIDAD APLICABLE A LA CALIDAD DEL SUELO.	68
3.5.1	CONTAMINANTES EN SUELO.	69
3.5.1.1	Efectos de los metales pesados en la salud humana.	70

4.	MODELADO DEL TRANSPORTE HÍDRICO DE CONTAMINANTES EN UN ARROYO INTERMITENTE.	71
4.1	SELECCIÓN DEL SOFTWARE PARA MODELADO DE FLUJO HIDRODINÁMICO.	71
4.1.1	FUNCIONAMIENTO DE EFDC EXPLORER.	72
4.1.1.1	Ecuaciones utilizadas por el modelo hidrodinámico.	72
4.2	DATOS REQUERIDOS POR EL SOFTWARE PARA REALIZAR EL MODELADO.	74
4.2.1	DATOS PARA EL MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN.	75
4.3	INGRESO DE LOS DATOS EN EL MODELO EFDC EXPLORER.	77
4.4	MODELADO HIDRODINÁMICO DEL ARROYO ESTUDIADO.	79

5.	<i>MEDICIÓN DE CONTAMINANTES EN CAMPO Y SU ANÁLISIS.</i>	80
5.1	MUESTREO DE SEDIMENTOS Y SUELO EN EL SITIO DE ESTUDIO.	80
5.1.1	SELECCIÓN DEL TIPO DE MUESTREO DE SUELO Y SEDIMENTOS.	81
5.1.2	SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO Y OBJETIVO DE ÉSTE.	82
5.1.3	METODOLOGÍA DE MUESTREO SEGÚN LA NMX-AA-132-SCFI2006 .	84
5.1.4	METODOLOGÍA PARA EL MUESTREO DE SEDIMENTOS SUPERFICIALES.	84
5.1.5	METODOLOGÍA PARA EL MUESTREO DEL SUBSUELO.	85
5.1.6	MUESTREO DE SEDIMENTOS DE LA FOSA DE LIXIVIADOS.	86
5.1.7	MUESTREO DE LIXIVIADOS.	87
5.2	ANÁLISIS EN CAMPO DE LAS MUESTRAS DE SEDIMENTOS, SUELO Y LIXIVIADOS.	87
5.2.1	ANÁLISIS EN CAMPO DE SEDIMENTOS Y SUELO CON ESPECTRÓMETRO DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X (FRX).	88
5.2.2	ANÁLISIS EN CAMPO DE LIXIVIADOS CON Sonda MULTIPARÁMETRO.	88
5.3	ANÁLISIS EN LABORATORIO DE LAS MUESTRAS DE SUELO Y SEDIMENTO.	89
5.3.1	ANÁLISIS CON ESPECTRÓMETRO DE MASAS CON PLASMA DE ACOPLAMIENTO INDUCTIVO (ICP-MS).	89
5.3.2	ANÁLISIS CON EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (MEB).	92
5.3.2.1	Formación de las imágenes en el MEB.	92
5.3.2.2	Preparación de las muestras antes de ingresarlas al MEB.	93
6	<i>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y PROPUESTAS PARA LA PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN.</i>	95

6.1	RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS EN CAMPO.	95
6.1.1	RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS EN CAMPO DE LAS MUESTRAS DE LIXIVIADOS.	95
6.1.2	ANÁLISIS EN CAMPO DE SUELO Y SEDIMENTOS CON ESPECTRÓMETRO DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X.	96
6.2	RESULTADOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO.	98
6.2.1	RESULTADOS DEL ANÁLISIS CON EL ESPECTRÓMETRO DE MASAS CON PLASMA DE ACOPLAMIENTO INDUCTIVO (ICP-MS).	99
6.2.2	RESULTADOS DEL ANÁLISIS CON MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB).	101
6.2.2.1	Análisis de la muestra de sedimentos de la fosa de lixiviados FLX-01.	102
6.2.2.2	Análisis de la muestra de suelo subsuperficial.	107
6.3	INTERPRETACIÓN GENERAL DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS,	108
6.3.1	ANÁLISIS EN CAMPO CON EL EFRX.	109
6.3.2	ANÁLISIS EN EL LABORATORIO CON EL ICP-MS.	109
6.3.3	ANÁLISIS EN EL LABORATORIO CON EL MEB.	111
6.4	RECIRCULACIÓN DE LIXIVIADOS COMO PROPUESTA PARA SU TRATAMIENTO.	113
6.5	RECOMENDACIONES PARA EL SELLADO DE LA CELDA Y EVACUACIÓN DE LAS AGUAS SUPERFICIALES.	114
6.5.1	CONDICIÓN ACTUAL DE LA CELDA DE CONTENCIÓN DE RSU.	115
6.5.2	SELLADO Y MANTENIMIENTO DE LA CELDA.	116
6.5.3	REINSERCIÓN AL PAISAJE LOCAL.	118
6.6	MONITOREO DEL RELLENO SANITARIO MUNICIPAL.	120
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	122
	REFERENCIAS	124