

Tabla de contenido

1.	Introducción	1
1.1.	Antecedentes generales	1
1.1.1.	Arsénico y sus propiedades fisicoquímicas.....	1
1.1.2.	Toxicidad del Arsénico	2
1.1.3.	Fuentes de exposición a arsénico	4
1.1.4.	Usos de arsénico.....	5
1.1.5.	Arsénico en la naturaleza	6
1.1.6.	Arsénico en la industria.....	7
1.1.7.	Concentraciones de arsénico permitidas y su medición	7
1.2.	Proyecto Solarsenic	8
1.3.	Planteamiento del problema	9
1.4.	Motivación del proyecto.....	10
2.	Objetivos y limitaciones.....	11
2.1.	Objetivo general	11
2.2.	Objetivos específicos.....	11
2.3.	Limitaciones	11
3.	Marco Teórico.....	12
3.1.	Técnicas de remoción de arsénico.....	12
3.1.1.	Oxidación y Reducción	12
3.1.2.	Precipitación.....	12
3.1.3.	Coagulación y floculación.....	13
3.1.3.1.	Antecedentes obtenidos del proceso de coagulación/floculación con hierro	13
3.1.4.	Ablandamiento con cal.....	17
3.1.5.	Adsorción y precipitación	18
3.1.6.	Procesos de membrana	18
3.1.7.	Foto-oxidación	19
3.1.8.	Electrocoagulación	19
3.2.	Técnicas de estabilización de residuos arsenicales	20
3.2.1.	Dilución y disposición en un Landfill	21
3.2.2.	Volatilización	21
3.2.3.	Métodos Biológicos.....	21

3.2.4.	Estabilización y solidificación.....	21
3.2.4.1.	Definición del método.....	21
3.2.4.2.	Antecedentes obtenidos con el proceso de Estabilización y Solidificación (S/S) 23	
3.3.	Tipos de Morteros	24
3.3.1.	Morteros de cal.....	25
3.3.2.	Morteros de cemento.....	26
3.3.3.	Morteros mixtos	26
3.4.	Medición de arsénico en sólidos (TCLP).....	27
4.	Materiales y metodología.....	29
4.1.	Descripción del proyecto.....	29
4.1.1.	Coagulación/Floculación.....	30
4.1.2.	Estabilización/Solidificación.....	30
4.1.3.	Medición de arsénico	31
4.2.	Condiciones de seguridad y EPP.....	31
4.3.	Reactivos	31
4.4.	Materiales.....	32
4.5.	Coagulación/Floculación.....	32
4.5.1.	Protocolo con Hierro (II).....	33
4.5.2.	Protocolo con Cal viva	34
4.5.2.1.	Pureza de la cal viva.....	34
4.5.2.2.	Desarrollo del protocolo con cal	35
4.6.	Densidad aparente de los reactivos	36
4.7.	Estabilización y solidificación (S/S)	37
4.8.	Medición de arsénico	38
4.8.1.	Protocolo de medición de arsénico en líquidos por método colorimétrico	39
4.8.2.	Protocolo de medición de arsénico en sólidos mediante método colorimétrico.....	40
4.8.3.	Efecto de las condiciones del medio en la medición de As.....	41
4.8.4.	Curvas de calibración	42
4.8.4.1.	Agua como solvente	42
4.8.4.2.	Extracto solución lixivante de una matriz blanco como solvente	42
4.8.5.	Validez del método colorimétrico	43
5.	Resultados y discusión	44

5.1.	Coagulación/Floculación.....	44
5.1.1.	Protocolo con Hierro	44
5.1.1.1.	pH Inicial.....	44
5.1.1.2.	Tiempo de agitación	45
5.1.1.3.	Velocidad de agitación.....	46
5.1.1.4.	Tiempo de decantación.....	47
5.1.1.5.	Razón Molar.....	49
5.1.1.6.	Condiciones de operación óptimas en la floculación con hierro.....	50
5.1.2.	Protocolo con cal.....	51
5.1.2.1.	Pureza de la cal viva.....	51
5.1.2.2.	Tiempo de agitación	51
5.1.2.3.	Velocidad de agitación.....	52
5.1.2.4.	pH inicial	53
5.1.2.5.	Tiempo de decantación.....	54
5.1.2.6.	Razón molar	55
5.1.2.7.	Condiciones de operación óptimas en la floculación con cal viva.....	56
5.1.3.	Comparación de procedimientos.....	57
5.2.	Densidad aparente de las materias primas.....	59
5.3.	Estabilización y Solidificación.....	60
5.3.1.	Concentrado hecho con el protocolo de hierro.....	60
5.3.2.	Concentrado hecho con el protocolo de cal.....	63
5.3.3.	Análisis general de las matrices de encapsulamiento.....	64
5.4.	Medición de Arsénico	65
5.4.1.	Efecto de las condiciones del medio en la medición de As.....	65
5.4.2.	Curvas de calibración	66
5.4.2.1.	Agua como solvente	66
5.4.2.2.	Extracto de la solución lixiviante como solvente.....	68
5.4.3.	Validez del método colorimétrico	68
6.	Conclusiones	71
6.1.	Recomendaciones.....	73
7.	Bibliografía	74
8.	Anexos.....	78
8.1.	Informe entregado por el DITUC.....	78

8.2.	Efectos del arsénico en la salud.....	81
8.2.1.	Tipos de Intoxicación	81
8.2.1.1.	Intoxicación aguda	81
8.2.1.2.	Intoxicación crónica	81
8.2.2.	Efectos del Arsénico en el cuerpo humano	81
8.2.2.1.	Efectos gastrointestinales	81
8.2.2.2.	Efectos hepáticos.....	82
8.2.2.3.	Efectos renales.....	82
8.2.2.4.	Efectos cardiovasculares	82
8.2.2.5.	Efectos neurológicos	82
8.2.2.6.	Efectos dérmicos	82
8.2.2.7.	Efectos pulmonares	83
8.2.2.8.	Efectos hematopoyéticos.....	83
8.2.2.9.	Efectos cancerígenos	84
8.3.	Morteros	84
8.3.1.	Características de materias primas	84
8.3.1.1.	La cal	84
8.3.1.1.1.	Obtención de la cal.....	85
8.3.1.1.2.	Cales aéreas	85
8.3.1.1.3.	Cales hidráulicas	86
8.3.1.1.4.	Hidratación o apagado de la cal	86
8.3.1.1.5.	Carbonatación de la cal	87
8.3.1.2.	El cemento.....	88
8.3.1.2.1.	Clasificación del cemento	88
8.3.1.2.1.1.	Tipos de cemento	88
8.3.1.2.1.2.	Resistencias del cemento.....	91
8.3.1.2.1.3.	Características especiales	92
8.3.1.3.	La arena.....	92
8.4.	Elaboración de soluciones madre	94
8.4.1.	Solución lixivante para TCLP	94
8.4.2.	Solución arsenical 100ppm	94
8.4.3.	Solución arsenical 10ppm	94
8.4.4.	Solución arsenical 1ppm	94

8.4.5.	Imitación del desecho producido por Solarsenic.....	94
8.4.6.	Extracto de solución lixivante de una matriz blanco (sin arsénico).....	94
8.4.7.	Solución arsenical de 25ppm en extracto de solución lixivante.....	95
8.4.8.	Solución de ácido ascórbico y yoduro de potasio al 5% p/v.....	95
8.4.9.	Solución <i>HCl</i> 1[M].....	95
8.4.10.	Solución <i>HCl</i> 3[M].....	95
8.4.11.	Solución <i>HCl</i> 0.1M.....	95
8.4.12.	Solución de Hierro (II).....	95
8.4.13.	Solución de NaOH 0.5M.....	95
8.4.14.	Solución de NaOH 4M.....	95
8.4.15.	Soluciones de ajuste de pH.....	96
8.4.16.	EDTA 0.01[N].....	96
8.5.	Valores tabulados de los experimentos realizados.....	96
8.5.1.	Coagulación/floculación.....	96
8.5.1.1.	Protocolo con hierro.....	96
8.5.1.2.	Protocolo con cal.....	97
8.5.1.2.1.	Pureza de la cal.....	97
8.5.1.2.2.	Coagulación/floculación con cal.....	98

Índice de Figuras

Figura 1: A) Expresión normal de la PDK4 B) Represión de la proteína PDK4 debido al As [13]	3
Figura 2: Fuentes arsénico en los alimentos y agua	4
Figura 3: Esquema de funcionamiento de Solarsenic.....	9
Figura 4: Etapas del proceso de precipitación, de izquierda a derecha: solución sobresaturada, suspensión y solución saturada con precipitado en la parte inferior	12
Figura 5: Acción del aluminio en la oxidación del arsénico [9].....	16
Figura 6: Procedimiento de filtración en función de las características del residuo.	19
Figura 7: Adsorción de As en Fe a diferentes pH y dosis de hierro [35]	20
Figura 8: Esquema de morteros mixtos de cemento, cal y arena.	26
Figura 9: Agitación vertical para TCLP	28
Figura 10: Esquema de la solución factible al desecho generado por Solarsenic	29
Figura 11: Elección de concentrado y sobrenadante del proceso de coagulación/floculación	33
Figura 12: Cambio de color en la solución problema al agregar EDTA	35
Figura 13: Llenado del contenedor y retiro de material excesivo	37
Figura 14: Distribución de los flóculos a través del tiempo	49
Figura 15: Queratosis en las palmas de las manos y en los pies.	83
Figura 16: Cáncer de piel asociado a arsénico	83
Figura 20: Máquina hidratadora de cal.....	87

Índice de gráficos

Gráfico 1: Diagramas de distribución de especies para As(III) y As(V) [8].....	1
Gráfico 2: Diagrama de Pourbaix del arsénico y el hierro [9].....	2
Gráfico 3: Eliminación de arsénico a través de la orina. Las líneas y puntos negros representan la eliminación de As en la orina para ratones que fueron tratados con arseniato de sodio. Las líneas y puntos rojos representan la eliminación de As en la orina para ratones que fueron tratados con un residuo de arsénico, cadmio y plomo [12]......	3
Gráfico 4: Precipitación con sulfato de calcio, óxido férrico, sulfato ferroso y peróxido de hidrógeno.....	15
Gráfico 5: Disociación del ácido arsenical y del hierro en agua en función del pH	15
Gráfico 6: A) Concentración de As(III) en función del tiempo de agitación y la concentración de hierro (III) B) Concentración de As(III) en función del tiempo de agitación y la concentración de hierro (II).....	17
Gráfico 7: Remoción de As(III) y As(V) en función de la dosis de FHC [33].....	17
Gráfico 8: Efecto de la adición de cal viva en una matriz cementada [40]	24
Gráfico 9: Experimento de coagulación/floculación a distintos pH iniciales de reacción ..	44
Gráfico 10: Concentración obtenida a distintos tiempos de agitación en el experimento de coagulación/floculación.....	46
Gráfico 11: Experimento de coagulación/floculación a distintas velocidades de agitación.	47
Gráfico 12: Experimento de coagulación/floculación a distintas velocidades de agitación.	47
Gráfico 13: Experimento de coagulación/floculación a distintas razones molares	50
Gráfico 14: Experimento de coagulación/floculación a distintos tiempos de agitación.....	52
Gráfico 15: Experimento de coagulación/floculación a distintas velocidades de agitación.	53
Gráfico 16: Experimento de coagulación/floculación a distintos pH iniciales de trabajo del desecho de Solarsenic	54
Gráfico 17: Experimento de coagulación/floculación a distintos tiempos de decantación ..	55
Gráfico 18: Experimento de coagulación/floculación a distintas razones molares entre arsénico y calcio	56
Gráfico 19: Peak de absorbancia del método colorimétrico en función del cambio de pH del medio	66
Gráfico 20: Desarrollo de la resistencia de los materiales puros.....	92

Índice de tablas

Tabla 1: Usos del arsénico [17].	6
Tabla 2: Detalle de la composición de matrices	23
Tabla 3: Soluciones lixiviantes del ensayo de TCLP	27
Tabla 4: Reactivos necesarios para llevar a cabo todos los experimentos	31
Tabla 5: Especificación de materiales e instrumentos	32
Tabla 6: Variaciones puntuales de cada tipo para las condiciones de operación en el tratamiento con hierro (II)	34
Tabla 7: Variaciones puntuales de cada tipo para las condiciones de operación en el tratamiento con cal viva	36
Tabla 8: Preparación de matrices para determinar el efecto de la cantidad de residuo	38
Tabla 9: Preparación de matrices para determinar el efecto de la cantidad de cemento	38
Tabla 10: Preparación de matrices para determinar el efecto de la cantidad de cal	38
Tabla 11: Preparación de matrices para determinar el efecto de la cantidad de arena	38
Tabla 12: Correcciones a la colorimetría estándar	40
Tabla 13: Volumen de la solución arsenical 1[ppm] que se utiliza en el ajuste de curva	42
Tabla 14: Tabla 2: Volumen de la solución diluida que se utiliza en el ajuste de curva	43
Tabla 15: Condiciones de operación óptimas en el proceso de floculación con sulfato de hierro II	50
Tabla 16: Floculación de arsénico con hierro utilizando las condiciones óptimas de operación	51
Tabla 17: Condiciones de operación óptimas en el proceso de floculación con cal viva	57
Tabla 18: Floculación de arsénico con cal viva utilizando las condiciones óptimas de operación	57
Tabla 19: Comparación de desviación con respecto al promedio obtenido en la floculación con hierro	58
Tabla 20: Comparación de desviación con respecto al promedio obtenido en la floculación con cal	58
Tabla 21: Características de remoción de ambos protocolos	59
Tabla 22: Ventajas y desventajas de la floculación con hierro y con cal viva	59
Tabla 23: Densidad aparente de las materias primas del tratamiento S/S	59
Tabla 24: Resultados de la variación en la cantidad de residuo en el encapsulamiento en las muestras tratadas con hierro	60
Tabla 25: Resultados de la variación en la cantidad de cemento en el encapsulamiento en las muestras tratadas con hierro	61
Tabla 26: Resultados de la variación en la cantidad de cal en el encapsulamiento en las muestras tratadas con hierro	61
Tabla 27: Resultados de la variación en la cantidad de arena en el encapsulamiento en las muestras tratadas con hierro	61
Tabla 28: Resultados de la variación en la cantidad de residuo en el encapsulamiento en las muestras tratadas con cal	63
Tabla 29: Resultados de la variación en la cantidad de cemento en el encapsulamiento en las muestras tratadas con cal	63

Tabla 30: Resultados de la variación en la cantidad de cal en el encapsulamiento en las muestras tratadas con cal	63
Tabla 31: Resultados de la variación en la cantidad de arena en el encapsulamiento en las muestras tratadas con cal	64
Tabla 32: Efecto del pH en la medición de arsénico	65
Tabla 33: Absorbancia obtenida en el ajuste de la curva de medición de arsénico utilizando agua como solvente de la solución	67
Tabla 34: Absorbancia obtenida en el ajuste de la curva de medición de arsénico utilizando extracto de solución lixiviante como solvente de la solución	68
Tabla 35: Matrices elaboradas con concentrado hecho con el protocolo de hierro.....	69
Tabla 36: Matrices elaboradas con concentrado hecho con el protocolo de cal.....	70
Tabla 37: Resultados de los ajustes de curva concentración v/s absorbancia	71
Tabla 38: Requisitos químicos de la cal [44].	85
Tabla 39: Requerimientos químicos de la cal hidráulica [44]......	86
Tabla 40: Tipos de cemento [51].....	89
Tabla 41: Componentes adicionales al clinker [51]	89
Tabla 42: Subtipos de cemento y sus características [51]	90
Tabla 43: Resistencia mecánica inicial y normal de los distintos tipos de cemento	91
Tabla 44: Clasificación de cementos especiales [51]	92
Tabla 45: Experimento de coagulación/floculación a distintos pH iniciales de reacción	96
Tabla 46: Experimento de coagulación/floculación a distintos tiempos de agitación.....	96
Tabla 47: Experimento de coagulación/floculación a distintas velocidades de agitación....	97
Tabla 48: Experimento de coagulación/floculación a distintas velocidades de agitación....	97
Tabla 49: Experimento de coagulación/floculación a distintas razones molares	97
Tabla 50: Experimento de coagulación/floculación a distintos tiempos de agitación.....	98
Tabla 51: Experimento de coagulación/floculación a distintas velocidades de agitación....	98
Tabla 52: Experimento de coagulación/floculación a distintos pH iniciales de trabajo del desecho de Solarsenic	98
Tabla 53: Experimento de coagulación/floculación a distintos tiempos de decantación	99
Tabla 54: Experimento de coagulación/floculación a distintas razones molares entre arsénico y calcio	99