

ALTERNATIVAS DE GESTIÓN DE LODOS PAPELEROS
EN LA INDUSTRIA DE PAPEL TISÚ Y KRAFT

CATALINA GARNICA DAZA

DIRECTORA:

LAURA MARCELA VARGAS LÓPEZ

Pontificia Universidad Javeriana

Facultad de Estudios Ambientales y Rurales

Bogotá, Mayo de 2013

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	5
1. INTRODUCCIÓN	6
1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	6
1.2 JUSTIFICACIÓN	7
1.3 PROPÓSITO.....	8
2. OBJETIVOS.....	9
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	9
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	9
3. MARCO REFERENCIAL	10
3.1 MARCO CONCEPTUAL	10
3.2 ANTECEDENTES	19
4. ÁREA DE ESTUDIO.....	20
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
5.1 DISEÑO DEL ESTUDIO.....	22
5.2 MÉTODO DE RECOLECCIÓN DE DATOS	25
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
6.1 EVALUACION SISTEMA PRODUCTIVO DEL PAPEL TISÚ Y KRAFT	29
6.2 CLASIFICACIÓN, CARACTERIZACIÓN Y FUENTES GENERADORAS DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS	34
6.3 ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN	38
7. CONCLUSIONES	60
8. RECOMENDACIONES	61
9. REFERENCIAS.....	62
10. ANEXOS	69
10.1 FOTOGRAFIAS INDUSTRIA UNIBOL S.A	69

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Normativa Colombiana para la correcta disposición de los residuos.....	14
Tabla 2. Normativa de los Estados Unidos para la correcta disposición de los residuos	14
Tabla 3. Técnicas Análisis de Laboratorio para determinar la Peligrosidad	25
Tabla 4. Otros Métodos de Laboratorio.....	26
Tabla 5. Cuantificación y Fuentes Generadoras de los Residuos Sólidos.....	34
Tabla 6. Resultados de análisis de peligrosidad	35
Tabla 7. Caracterización Microbiológica de los Lodos del Papel.	36
Tabla 8. Otras variables para tener en cuenta.	37
Tabla 9. Ventajas y Desventajas del Compostaje.....	39
Tabla 10. Parámetros en Compostaje	40
Tabla 11. Ventajas y Desventajas de la Incineración con Aprovechamiento Energético. ...	41
Tabla 12. Parámetros en Incineración con Aprovechamiento Energético.....	42
Tabla 13. Ventajas y Desventajas Agricultura	44
Tabla 14. Parámetros para disposición en Agricultura.....	44
Tabla 15. Parámetros en Restauración de Suelos	46
Tabla 16. Ventajas y Desventajas en la fabricación de materiales de construcción.....	49
Tabla 17. Parámetros en Insumo Producción Materiales de Construcción	49
Tabla 18. Ventajas y Desventajas en Rellenos Sanitarios y Monorellenos.....	51
Tabla 19. Parámetros en Monorellenos y Rellenos Sanitarios	51
Tabla 20. Criterios para Seleccionar la mejor alternativa	53
Tabla 21. Alternativas.....	53
Tabla 22. Criterio Requerimiento de Humedad.....	54
Tabla 23. Criterio Tasa de Disposición	55
Tabla 24. Criterios Aprovechamiento de las Propiedades del Lodo Papelero	56
Tabla 25. Criterios Requerimiento de Personal Especializado.....	56
Tabla 26. Selección de la Mejor Alternativa	57

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo de Vida de los Residuos Sólidos.	13
Figura 2. Diagrama de procedimiento metodológico del Estudio.	23
Figura 3. Estructura para seleccionar las mejores alternativas	27
Figura 4. Método Complejo.	27
Figura 5. Diagrama del Sistema Productivo del Papel Tisú y Kraft.....	32
Figura 6. Tratamiento de Aguas	33
Figura 7. Diagrama de variables para la determinación de alternativas posibles.	52

LISTADO DE ANEXOS

Ilustración 1. Transporte materia prima seleccionada (Papel Recuperado y Fibra Virgen). 69	
Ilustración 2. Materia prima seleccionada de Papel Recuperado y Fibra Virgen.....	69
Ilustración 3. Fabricación Papel Tisú. Fases de Secado, Crepado y Enrollado.....	70
Ilustración 4. Rollo de papel tisú listo para ir a la sección de Conversión.	70
Ilustración 5. Diagrama del Sistema Productivo del Papel Tisú y Kraft.....	71

RESUMEN

La propuesta de alternativas de gestión ambiental para el óptimo manejo de los residuos sólidos generados en la industria de papel Tisú y Kraft, se basó en la realización de un estudio en Unibol S.A, buscando conocer y evaluar el proceso productivo, identificando los residuos sólidos, para luego caracterizarlos a partir de información primaria y/o secundaria, y determinar las alternativas para el manejo apropiado de los lodos papeleros utilizando el método multicriterio.

De esta evaluación se determinó, que la mayoría de residuos son los lodos provenientes del tratamiento de las aguas residuales de la industria, los cuáles de acuerdo al Decreto 4741 de 2005 no son peligrosos, y de acuerdo a las demás características típicas de este tipo de industria, los lodos papeleros tienen un alto porcentaje de materia orgánica y de nutrientes, desempeñando un papel muy importante en la conservación del suelo, además cuentan con un alto poder calorífico beneficiando su incineración con aprovechamiento energético.

Teniendo en cuenta las características del lodo y la metodología utilizada, entre las alternativas viables en este estudio, están el compostaje para restauración de suelos, compostaje para uso agrícola y rellenos (monorellenos y rellenos sanitarios), debido al efecto beneficioso que tiene el lodo, mejorando las propiedades biológicas, físicas, químicas del suelo, y aumentando la protección contra algunas formas de contaminación y degradación.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En Colombia la producción de residuos sólidos es de aproximadamente 30.000 toneladas de basura al día, de las cuales aproximadamente el 92% son dispuestas principalmente en rellenos sanitarios, mientras que la reutilización de los residuos generados a nivel nacional está entre el 5% y 7% del total (SSPD 2010).

Lo anterior considerando que la gestión de los residuos sólidos aun es deficiente en gran parte del país a nivel industrial, desde su recolección hasta su disposición final, por la poca planeación, el desconocimiento de los procesos de aprovechamiento y reciclaje, la falta de estudios técnicos y el bajo compromiso del sector industrial (CONPES 2008). Los impactos que puede generar la mala disposición de los residuos sólidos, son desequilibrios ecológicos (contaminación suelos, agua y aire), repercusiones en la salud, olores y vectores de enfermedades principalmente, debido al exceso de la capacidad para asimilar naturalmente los residuos (Tchnobanoglous 1996). solicitó

Específicamente la industria papelera cuenta con altos niveles de consumo y un corto periodo de uso, del producto que luego es desechado y aproximadamente el 60% entra a hacer parte del papel reciclado, (Marmolejo et al 2011; GC Goma-Camps 2011) convirtiéndose en un elemento importante debido a su bajo costo, representando la tercera parte del papel a partir de fibras recicladas a nivel mundial (Betanzos 2006).

Monte et al. (2008) mencionan que los desechos producidos por la industria del papel tisú, son muy diversos en su composición, los cuáles se generan principalmente a partir de la separación del papel reciclado que llega a la zona de depuración y a partir de los residuos líquidos que son transportados a la unidad de tratamiento de aguas residuales, que finalmente son transformados en lodos residuales.

En la industria de Unibol S.A entran diariamente 100 toneladas entre papel reciclado y fibra virgen, con lo cual se producen aproximadamente 70 toneladas diarias entre papel Kraft (40 Ton) y papel Tisú (30 Ton), con un desperdicio de alrededor de 30 Ton diarias, en todas las etapas del sistema productivo. Del desperdicio del proceso, aproximadamente el 98% son

lodos residuales y el 2% son los residuos restantes, que son separados por medios mecánicos (Sarmiento 2012).

Los lodos generados por Unibol S.A en el 2009 según la CRA (Corporación Autónoma Regional del Atlántico) eran dispuestos en pilas de un metro y medio de alto descubiertas, para que con los rayos solares el material pierdan la humedad por evaporación, en una extensión de una hectárea aproximadamente, con el fin de estabilizar y recuperar los suelos, por medio de la revegetalización con plantas rastreras y de bajo tamaño, el problema radicaba en que la empresa no solicitó la autorización correspondiente para la realización de esta actividad ante la autoridad competente, y en que el lugar de disposición se encuentra cercano a una corriente de agua superficial, lo cual representa un riesgo por la lixiviación y los arrastres en época de lluvia. Pero actualmente los lodos papeleros generados en el proceso son dispuestos en un relleno interno de la empresa (Unibol S.A); y en la reconformación geomorfológico de una antigua cantera ubicada en el municipio de Sabana grande en Barranquilla, donde son colocadas en promedio 38 Ton/Día (CRA 2011).

1.2 JUSTIFICACIÓN

En vista de que el sistema productivo de esta industria genera altas cantidades de residuos sólidos, principalmente lodos generados en el tratamiento de agua, es importante impulsar nuevas alternativas que ayuden al desarrollo sostenible mediante el aprovechamiento, tratamiento o la disposición adecuada de estos residuos, ya que hasta ahora son generalmente dispuestos en un relleno interno de la empresa.

La cantidad y la composición de los residuos sólidos, principalmente de los lodos provenientes del tratamiento del agua residual industrial, dependen de las propiedades del papel que se desea producir, las materias primas utilizadas y las técnicas del proceso. Por otra parte, para plantear las alternativas adecuadas de manejo, tratamiento, aprovechamiento y disposición de los residuos sólidos, se debe tener clara la composición física, química y biológica de estos residuos, su clasificación y las fuentes donde se generan dentro de la industria. También es importante tener en cuenta que la gestión ambiental involucra actividades que tienen como fin, evitar, corregir, mitigar y compensar los impactos generados por las acciones del hombre (Cadrecha, 2001).

Considerando las altas cantidades de residuos sólidos (lodos producidos en el tratamiento de aguas residuales) generados en la industria, resulta de interés estudiar a partir de la composición de los lodos, alternativas y/o acciones viables encaminadas al aprovechamiento y la optimización del manejo de los residuos sólidos, que conlleven a disminuir los impactos de su disposición.

1.3 PROPÓSITO

De acuerdo a lo anterior este estudio busca identificar, clasificar y categorizar cuáles son los residuos generados en el sistema productivo del papel Tisú y Kraft, para luego proponer alternativas y lograr un manejo óptimo de los residuos generados, en las diferentes etapas de producción, y así mejorar el ciclo de la gestión ambiental al interior de la industria. A partir del resultado se espera que las opciones propuestas sean tenidas en cuenta, para mantener y mejorar el manejo de residuos sólidos en ambos sistemas de producción (Tisú y Kraft), y evitar al máximo la disposición del material en el caso en el que su composición permita su aprovechamiento.

Como parte de esta investigación se plantea la siguiente pregunta general: ¿Qué acciones permiten optimizar el manejo de los residuos sólidos generados del sistema productivo del papel Tisú y Kraft? Para llegar a una respuesta acertada a la pregunta general es necesario preguntarse: ¿Cuáles son los residuos sólidos generados en el sistema productivo del papel Tisú y Kraft? ¿Qué características tienen los residuos sólidos generados en las diferentes etapas de producción? y ¿Cuál es la alternativa más adecuada para el manejo óptimo de los residuos generados a partir de las alternativas existentes?

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar acciones que permitan optimizar el manejo de los residuos sólidos del sistema productivo del papel Tisú y Kraft.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Evaluar el proceso productivo, e identificar los residuos sólidos generados en la producción de papel Tisú y Kraft.
- Caracterizar los residuos sólidos generados en el sistema productivo del papel Tisú y Kraft, a partir de información primaria y/o secundaria.
- Identificar las alternativas de manejo, tratamiento, o disposición existentes y proponer las alternativas más adecuadas para los residuos sólidos provenientes del sistema productivo del papel Tisú y Kraft.

3. MARCO REFERENCIAL

3.1 MARCO CONCEPTUAL

A continuación se explican los componentes, procesos y relaciones más importantes para este estudio, estos son: Ecología Industrial, Gestión Ambiental, Residuos Sólidos y alternativas de gestión, los cuáles se relacionan entre sí con un objetivo en común, que es aprovechar ordenadamente los recursos naturales o residuos, que permiten el ciclo continuo de los procesos biológicos.

3.1.1 Ecología Industrial

La ecología industrial es una práctica innovadora que sugiere buscar alternativas que permitan convertir los residuos generados de diferentes actividades industriales, en materiales que sean aprovechables como materia prima para el mismo proceso u otro, reduciendo de esta forma los costos económicos, sociales y ambientales, tanto en el consumo de la materia prima como en la disposición de los residuos (McManus & Gibbs, 2008).

Algunos autores, consideran que el modelo tradicional de la actividad industrial debe ser cambiado al de un ecosistema industrial integrado, donde los sistemas industriales sean reestructurados para hacerlos compatibles con la forma en que los ecosistemas naturales funcionan (McManus & Gibbs 2008). Por otra parte, “entre los propios industriales y las administraciones públicas crece el interés por esta rama, con una perspectiva de ganancia, es decir, que resulta a la vez económica, ambientalmente posible y conveniente, convertir los residuos de un proceso en insumos para otro sistema” (Martínez 2003).

Además los residuos hacen parte fundamental de la ecología industrial, ya que todo sistema productivo, al igual que los ecosistemas naturales, siempre generará residuos ya sean sólidos, líquidos o gaseosos, los cuáles deben ser manejados mediante diferentes alternativas sostenibles. Sin embargo, dada la continua necesidad de avanzar hacia formas más sostenibles de producción, con el fin de facilitar el desarrollo exitoso de la ecología industrial, surge la obligación de investigar aún más, para aumentar el nivel de conocimiento y aceptación de esta rama de la ecología (McManus & Gibbs, 2008).

3.1.2 Gestión Ambiental

La gestión ambiental es comprendida y “se reconoce como el conjunto de acciones encaminadas al uso, conservación o aprovechamiento ordenado de los recursos naturales y del medio ambiente en general” (Cadrecha 2001), sus propósitos están dirigidos a modificar una situación actual a otra deseada, conservando y mejorando la oferta y calidad ambiental para el soporte de la vida en la tierra (Rodriguez & Espinoza 2002).

“La gestión ambiental puede ser abordada bajo diversas perspectivas y ámbitos territoriales, por ejemplo, se puede centrar en el sector rural o urbano (contaminación del aire), en una amenaza ambiental global (calentamiento global), en el impacto ambiental (minería, agricultura, industrias, energía) o en la conservación y uso sostenible de un recurso (bosques, aguas)” (Rodríguez & Espinoza, 2002).

3.1.3 Residuos Sólidos

“Los residuos sólidos son considerados como cualquier producto, materia o sustancia, que provienen de las actividades humanas o de la naturaleza, los cuáles ya no tienen más función para la actividad que lo generó” (Lund, 1996). Además son un elemento esencial para la vida porque permiten el ciclo continuo de los procesos biológicos, que van desde el nacimiento de un producto o ser viviente hasta su muerte o descomposición (Technobanoglous et al 1996).

Según el Decreto 1713 de 2002, expedido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, el residuo o desecho sólido es cualquier material, sustancia o elemento resultante desechado, que proviene de actividades domésticas, industriales, comerciales e institucionales, los cuáles son susceptibles al aprovechamiento o transformación, en un nuevo producto rentable, o de disposición final. Pero actualmente, debido al exceso de la capacidad para asimilar naturalmente los residuos, y a la existencia de materiales que nunca han existido en la naturaleza, se ha dificultado su reciclaje y por ende la eliminación en su ciclo biológico, generando problemas de acumulación y contaminación (Arroyave, 2010; Technobanoglous et al 1996).

3.1.3.1 Características de los residuos sólidos

Las características de los residuos cambia dependiendo de su origen, a nivel doméstico los residuos son generados en viviendas aisladas, o en cualquier establecimiento similar, y se compone por residuos de comida, papel, plásticos, textiles y cuero principalmente. (Decreto 1713 de 2002). Mientras que en las tiendas, restaurantes, mercados, edificios y hoteles, los principales residuos son: papel, cartón, plástico, madera, residuos de comida, residuos especiales, etc. Por otra parte, se encuentran los residuos producto de las cosechas de campo, árboles frutales, ganadería intensiva, residuos agrícolas, basura y residuos peligrosos.

A nivel industrial, se encuentran los residuos sólidos y líquidos provenientes principalmente de procesos de producción, transformación y de fabricación industrial, que por sus características físico-químicas y microbiológicas no se relacionan con los residuos domésticos, y cambian dependiendo de los productos generados a partir de diferentes procesos industriales (Tchnobanoglous et al., 1996). De acuerdo con la información de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios para el 2008, en Colombia se generan diariamente 25.709 toneladas de residuos sólidos urbanos, principalmente se genera materia orgánica (65%), seguido por los plásticos (14%), el papel y cartón (5%), el vidrio (4%) y otros componentes de menor relevancia (MVDT 2008).

En el caso específico de la industria de papel Tisú y Kraft, los residuos sólidos más relevantes son: fragmentos de materiales de gran tamaño, partículas pesadas, contaminantes menores, materia orgánica, material inorgánico y lodos papeleros principalmente, generados alrededor de su sistema productivo (Papeles Higiénicos del Centro, S.A de C.V s.f.).

3.1.3.2 Ciclo de Vida de los residuos sólidos

El ciclo de vida de los residuos sólidos en términos de gestión ambiental, es el proceso mediante el cual son manejados estos elementos, donde existen posibilidades de ser aprovechados, reutilizados o reincorporados en un proceso productivo. El ciclo comienza en la etapa de generación y finaliza en la etapa de disposición final (Tchonbanoglous et al 1996), como se presentan en la Figura 1.

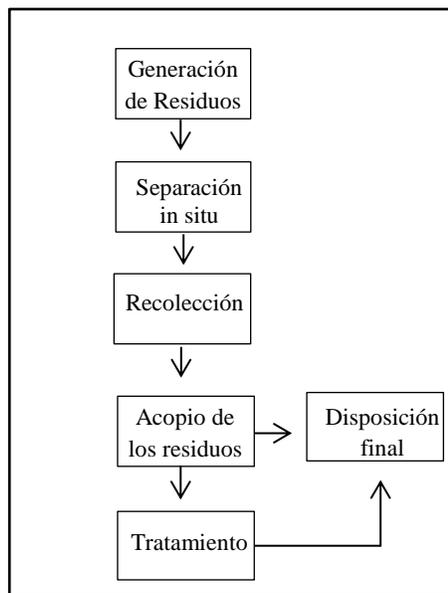


Figura 1. Ciclo de Vida de los Residuos Sólidos. Modificado de Tchobanoglous et al, 1996

3.1.4 Gestión de los Residuos Sólidos

Según el Decreto 1713 de 2002, expedido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, la gestión de residuos sólidos es “el conjunto de operaciones y disposiciones encaminadas a dar a los residuos producidos el destino más adecuado desde el punto de vista ambiental, de acuerdo con sus características, volumen, procedencia, costos, tratamiento, posibilidades de recuperación, aprovechamiento, comercialización y disposición final”.

Lo anterior implica un reconocimiento efectivo y veloz, sobre los cambios que están ocurriendo constantemente y la selección de alternativas compatibles, para lograr una correcta recogida, procesamiento y evacuación de los residuos sólidos generados, seleccionando y aplicando técnicas, tecnologías y programas de gestión idóneos para lograr cumplir metas y objetivos específicos planteados (Tchnobanoglous et al 1996).

Marco Normativo

El marco de la gestión ambiental de residuos sólidos requiere de mejoramientos continuos y permanentes ajustes, lo que hace que exista en Estados Unidos y en Colombia específicamente una amplia normatividad ambiental, se puede observar en la Tabla 1 y Tabla 2.

Tabla 1. Normativa Colombiana para la correcta disposición de los residuos

Norma	Contenido General
Decreto 2811 de 1974	El código nacional de recursos establece en el artículo 34 y 35 la utilización de los mejores métodos para el buen manejo de residuos, basuras, desechos y/o desperdicios, también prohíbe descargar sin autorización las basuras.
Ley 9 de 1979	Establece criterios para la correcta separación y clasificación de los residuos.
Resolución 2309 de 1986	Regula los residuos especiales como los patógenos, tóxicos, combustibles, inflamables, radioactivos o volátiles.
Constitución Política de 1991	En el capítulo III se reglamenta el derecho al ambiente sano y participación comunitaria, base para implementar un programa de minimización de residuos.
Ley 99 de 1993	Crea Ministerio de Ambiente y SINA, además muestra los parámetros a seguir para una buena gestión ambiental nacional, incluyendo actores relacionados con la utilización de los recursos y su utilización.
Decreto 838 de 2005	Exige la adopción de planes de gestión integral de residuos sólidos o PGIRS (Niveles, clases, modalidades y calidad). Define la terminología del manejo de los residuos sólidos.
Resolución 1045 del 2003	Presenta la guía para la elaboración de los planes de gestión integral de residuos sólidos PGIRS (objetivos, metas, programas, proyectos y actividades)
Decreto 4741 de 2005	Este Decreto busca prevenir la generación y regular el manejo de los residuos sólidos o desechos peligrosos, para proteger la salud humana y el medio ambiente

Tabla 2. Normativa de los Estados Unidos para la correcta disposición de los residuos

Norma	Contenido General
EPA (Environmental Protection Agency) 40 CFR (Code of Federal Regulations) PART 261	Identificación y Registro de los Residuos Peligrosos
EPA (Environmental Protection Agency) 40 CFR (Code of Federal Regulations) PART 503 (para biosólido clase B ⁶)	Requisitos de un lodo de aguas residuales (biosólido) clasificados clase B con respecto a los agentes patógenos.
ESD (Environmental Sciences Division) 1999	Estándares y Guías para la implementación al suelo de los lodos de la planta de celulosa mecánica a las tierras agrícolas.

De las normas expuestas en la Tabla 1 cabe destacar el Decreto 838 de 2005, ya que este es el instrumento mediante el cual se exige la adopción de planes de gestión integral, para lograr un mejor uso y disposición de los residuos sólidos, generados por actividades domésticas o industriales. Igualmente el Decreto 4741 de 2005, resulta importante puesto que previene y regula el manejo de los residuos peligrosos.

La Normativa Colombiana es el instrumento que guía la elaboración de planes de gestión de residuos sólidos y desechos peligrosos, y tiene como fin entre otros regular su manejo, prevenir su generación y proteger la salud humana y el medio ambiente. Estos planes varían de acuerdo a la actividad que genera el residuo, el lugar donde son generados, las características físicas, químicas y microbiológicas y el nivel de peligrosidad de los desechos, ya que las alternativas de aprovechamiento, manejo y disposición que hacen parte de dichos planes dependen de esas variables.

El Decreto 835 de 2005 menciona los tipos de manejo, tratamiento, aprovechamiento y disposición de los residuos sólidos (reutilización, reciclaje, compostaje y recuperación de energía), que resultan relevantes para una correcta gestión. Los residuos deberán cumplir con los criterios básicos y requerimientos, para la óptima implementación de las alternativas. Por otra parte, el Decreto 4741 de 2005 es importante en este estudio, porque tiene por objeto prevenir la generación de residuos o desechos peligrosos, mencionando las características de un residuo peligroso y cuáles son los límites establecidos que determina su peligrosidad.

Adicionalmente, considerando que la normatividad Colombiana no establece estándares específicos por actividades, se presentan en la Tabla 2 las normas establecidas por la agencia de protección ambiental (EPA, por sus siglas en ingles) y las establecidas por la División Ambiental de Ciencias (ESD, por sus siglas en ingles). La EPA 40 CFR parte 261, permite identificar y registrar de acuerdo a los lineamientos, si el residuo estudiado es peligroso o no bajo los estándares establecidos por la metodología EPA y la EPA 40 CFR 503 (para biosólido clase B⁶) muestra los requisitos de un lodo de aguas residuales (biosólido) de clase B con respecto a los agentes patógenos.

Mientras que las normas y directrices de la ESD de 1999 están destinadas a las operaciones que implican la aplicación de lodos en tierras agrícolas.

3.1.4.1 Alternativas de Gestión

Según Tchobanoglous et al 1996 para una buena gestión de residuos, existen cuatro acciones o alternativas básicas adoptadas por la agencia de protección ambiental (EPA), las cuáles son: reducción en origen, reciclaje, transformación de residuos y disposición.

Reducción en el origen: Consiste en reducir la cantidad y/o toxicidad de los residuos generados. Esta alternativa se encuentra en primer lugar porque es la manera más eficaz de reducir la cantidad de residuos, el costo al manipularlos y los impactos ambientales.

Reciclaje: Implica en primer lugar, la separación y recolección de materiales residuales, en segundo lugar la preparación de los materiales, realizando su clasificación mediante técnicas como la trituración, depuración y clasificación, por último se encuentra la reutilización, procesamiento y la nueva fabricación de productos.

Transformación de Residuos: Radica en la alteración física, química o biológica de los residuos. Estas transformaciones son utilizadas para mejorar la funcionalidad de las operaciones y sistemas de gestión de residuos, para recuperar materiales reutilizables y reciclables y para recuperar productos de conversión y energía en forma de calor. Esta alternativa es muy importante, porque reduce la contaminación y la cantidad de residuos que son llevados a los rellenos sanitarios o vertederos.

Vertido o Disposición: El vertido debería ser la última alternativa de manejo de los residuos, únicamente para aquellos residuos que no pueden ser reciclados y no tienen ningún otro uso, aunque actualmente sea la manera más utilizada para la disposición de residuos sólidos en los países en vía de desarrollo, debido a los altos costos, el conocimiento necesario y el tiempo que lleva transformar y reciclar los residuos sólidos, además de ser un método que no requiere operaciones adicionales (ISEA, 2012).

3.1.5 Selección de Alternativas Multicriterio

La solución a la problemática creada en un estudio o investigación, da lugar a plantear diferentes alternativas analizadas desde una perspectiva multicriterio, para determinar su viabilidad, rentabilidad y eficiencia teniendo un fin y objetivo en común. La evaluación de cada alternativa debe considerar los siguientes criterios: Viabilidad Técnica (posibilidad de ejecutar la alternativa), Rentabilidad Económica y Eficiencia Ambiental (valoración de los impactos ambientales) (Conesa 1997), que deben ser cumplidos por los criterios específicos de cada estudio.

La evaluación está conformada por la unidad decisora encargada de tomar la decisión, se divide en uniexpertos (una sola entidad) o multiexperto (unidad formada por más de una entidad). Por otra parte, están las alternativas como el conjunto de posibles opciones que deben ser diferenciables y excluyentes del resto, además en la toma de decisiones el entorno influye al igual que los criterios, considerados como elementos sobre los cuáles se toma una decisión para mejorar la situación actual, cumpliendo los objetivos y las metas propuestas, para luego considerar la solución más eficiente. Teniendo en cuenta los conceptos anteriormente descritos, se establece una categorización para tomar la mejor decisión, divididos en estado del entorno, números de criterios de decisión, naturaleza de las alternativas y características de la unidad decisoria (García et al 2010).

El estado del entorno, son las decisiones que se toman teniendo en cuenta el grado de información con el que se cuenta, mientras que la naturaleza de las alternativas, depende si el número de opciones para elegir las mejores alternativas es continuo (infinito), o si es discreto (finito). Por otra parte, el número de criterios de decisión está dividido en monocriterio y multicriterio. Monocriterio como lo dice la palabra son decisiones que se toman bajo un único criterio, y son considerados de utilidad usando criterios valorativos de carácter económico-financiero. Entre los cuáles se encuentra principalmente: análisis costo-beneficio que se encarga de “traducir todos los efectos o consecuencias de una determinada inversión en términos monetarios” (beneficios vs costos) y análisis costo-eficiencia utilizado cuando se conocen los costos de las alternativa pero sus efectos descritos en términos cualitativos (Conesa 1997).

La metodología de toma de decisión multicriterio ayuda a la elección de la opción más adecuada bajo un conjunto de criterios de decisión, evaluando cada uno de ellos teniendo en cuenta los atributos, parámetros, objetivos y metas para las alternativas (García et al., 2010). Para evaluar las alternativas se deben seleccionar los criterios sobre los cuáles se valoraran las alternativas, identificar los efectos de cada una, valorar los impactos, evaluar las alternativas en base a los criterios y desarrollar una matriz simplificando y clasificando los elementos del análisis (Conesa 1997).

En base a lo anterior, se establece una metodología ya sea simple o compleja para operar la matriz y decidir la mejor alternativa teniendo en cuenta los resultados. El método simple se basa en una matriz simple de valoración de alternativas, que tienen en las filas los diferentes criterios y en las columnas las alternativas a comparar, mientras que el método complejo relaciona el comportamiento de cada alternativa, con cada criterio establecido, que se suman de forma ponderada teniendo en cuenta los pesos asignados a cada criterio.

3.1.6 Industria del Papel Tisú y Kraft

El papel Tisú y Kraft es fabricado a partir de fibra virgen, fibra de papel 100% reciclado o a partir de la mezcla de ambas. Se utiliza en productos de higiene personal, en el ámbito doméstico, y como material sanitario y de limpieza industrial. Las fibras recicladas se clasifican de acuerdo a su origen, a la cantidad y colores de tinta que llevan impresos, para luego ser sometidos a procesos de extracción de impurezas (recubrimientos plásticos, corchetes y metales, adhesivos, lacas y tintas) (Hernández & Hernández, 2010). La industria papelera ha usado la madera como material fibroso hace más de 100 años, pero la fibra reciclada se ha convertido en un elemento importante debido a su bajo costo, a la preservación de los recursos forestales y a la conservación del agua y energía, llegando a producir la tercer parte del papel a partir de fibras recicladas a nivel mundial (Betanzos 2006).

La industria del papel Tisú y Kraft se divide en dos etapas, en la primera se da todo el proceso de fabricación desde que llega el material virgen importado, y el papel clasificado y seleccionado por terceros a la industria papelera, hasta la obtención de los jumbos de papel higiénico y Kraft de una sola hoja. Mientras que la segunda es la conversión de los jumbos de papel al producto terminado, listo para comercializar. El proceso detallado será documentado en los resultados del presente documento, como parte del estudio realizado Ilustración 5.

3.2 ANTECEDENTES

Durante la última década, se han realizado diferentes investigaciones que han demostrado, cuáles son las estrategias más viables hacia una buena gestión de los residuos sólidos en las industrias papelera (reutilización, generación de energía y compostaje entre otros), evitando la generación de pérdidas ambientales y económicas. Las alternativas encaminadas al manejo de los residuos sólidos resultantes del sistema productivo del papel Tisú y Kraft, han sido ampliamente discutidas por varios autores, por lo cual es importante mencionar algunos de los estudios que se han realizado al respecto.

Monte et al. (2008) menciona que los desechos generados por la industria del papel en las distintas etapas de producción son muy diferentes, es decir que cada residuo que se genera en distintos procesos necesita de un tratamiento diferente por su composición. Consecuentemente el estudio de Scott (1995) complementa la investigación anterior, mencionando que el uso de los lodos está basado en su caracterización, lo que resulta en una utilización más eficiente del residuo.

Otros estudios se destacan por reutilizar o reciclar los lodos del proceso, como el de Ahmandi & Al-Khaja. (2000), el cual propone la utilización de los lodos de residuos de papel obtenido, como un remplazo para el material de relleno mineral en diferentes mezclas de concreto, ya que las propiedades físico-químicas que posee este material de desecho son principalmente la resistencia y absorción. Y la investigación Ochoa de Alda. (2008) destaca la importancia de usar los materiales de desecho o subproductos, reciclando los lodos en la producción in situ, reutilizándolos o utilizándolos para la fabricación de otros productos.

Otra alternativa investigada es la recuperación de energía a partir de residuos de diferente origen, por medio de la incineración de los lodos papeleros, como el estudio de Colomer et al 2009 que tiene opciones de valorización de lodos provenientes de aguas residuales, el artículo de Ramírez et al. 2009 habla sobre el desarrollo de un sistema para la quema de diferentes residuos y desechos, por otra parte el estudio de Pope, 1999 responde si el lodo paplero es un problema o una oportunidad para generar energía. Estos trabajos adaptan e integran, avanzadas tecnologías de conversión de energía en las operaciones de su planta, para lograr un mayor rendimiento, menor costo y una operación más segura.

Por otra parte, existen diferentes tesis relacionadas con el manejo de lodos de la industria paplero. Una de ellas realizada por Esparza, 2004, para conocer el uso del lodo biológico proveniente del tratamiento de aguas como mejorador de suelos degradados, y se caracteriza por evaluar el efecto de la adición de lodo paplero para mejorar la acidez del suelo. Otra tesis elaborada por Lozano, 2005, plantea reducir el impacto generado por los desechos sólidos y por los efluentes líquidos de la industria papelera, mediante la recuperación de las fibras y los tratamientos primarios y secundarios de los efluentes principalmente.

4. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio es la industria de papel, específicamente el caso considerado, es la Fábrica de Bolsas de Papel Unibol S.A, esta se encuentra en la ciudad de Barranquilla ubicada en la Autopista al Aeropuerto Km 7 (Tabla 3), con una extensión de 2 de hectáreas. Unibol se dedica desde 1948 a fabricar y comercializar en el mercado nacional e internacional, papel Kraft y Tisú fabricados con materias primas recicladas. Los principales productos son: Bolsas de Papel, Papel Higiénico, Servilletas y otros productos fabricados con papel Kraft. Por otra parte, existen otras industrias Colombianas que se encargan solamente de producir papel tisú (Papel Higiénico, Servilletas, Toallas Húmedas, etc.) como: Scott, Papeles Familia, Papeles Nacionales, Compañía CMPC, Kimberly, las cuáles producen al igual que Unibol, lodos papleros y desechos separados mecánicamente, pero son generados en diferente cantidad y composición, a pesar de contar con sistemas productivos similares, lo cual aumenta la problemática relacionada.

La razón por la cual se seleccionó Unibol, es porque se encuentra en la fase donde sus procesos están siendo optimizados, para aumentar la calidad de los productos y contribuir a la protección del medio ambiente (disminuyendo la generación de residuos sólidos, y buscando aprovechar los residuos especialmente lodos papeleros). En este estudio, se tuvieron en cuenta los tipos y la cantidad de residuos sólidos generados, para luego plantear las alternativas más adecuadas con un correcto manejo, tratamiento o disposición.

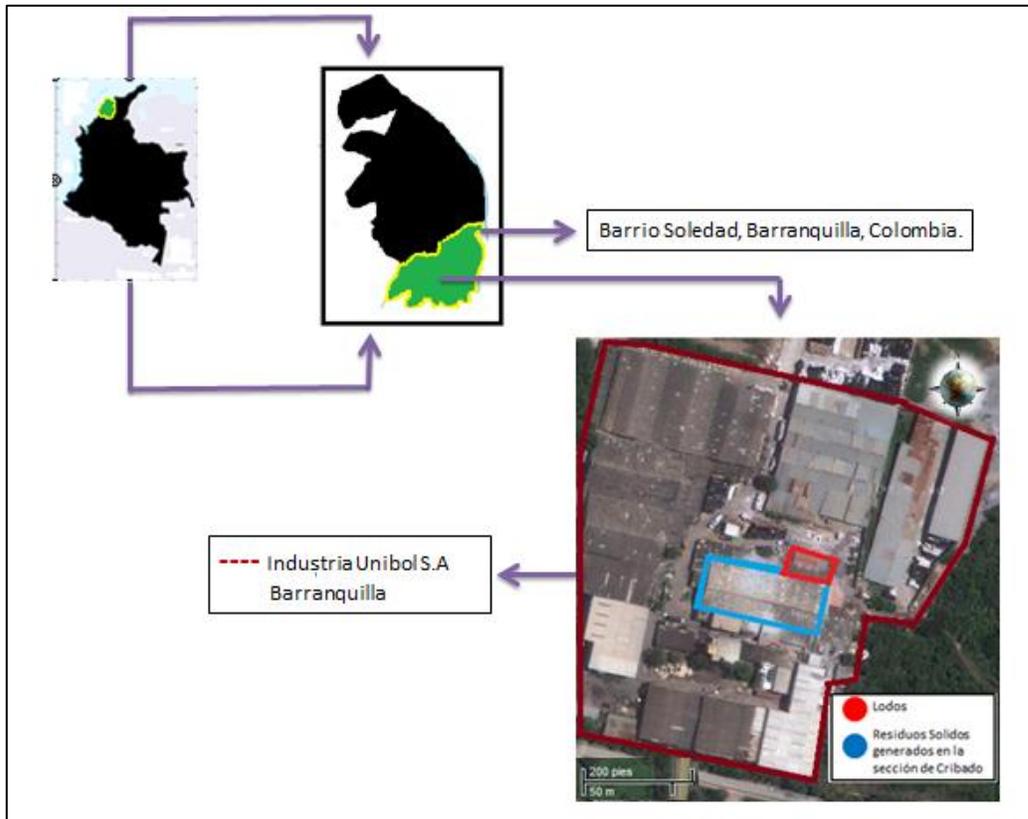


Tabla 3. Mapa del área de Estudio Colombia, Barranquilla, AUTOPISTA AEROPUERTO KM. 7 Soledad y los puntos de generación de residuos. Tomado y modificado de goooglearth 2012.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

A través de esta metodología se realiza la descripción, análisis, caracterización e interpretación del problema ambiental, originado principalmente por el inadecuado manejo de los lodos papeleros en las industrias de papel tisú en Colombia, teniendo como base el caso de Unibol en Barranquilla, lo cual lleva al planteamiento de alternativas para conocer la optimización y el correcto manejo de los residuos sólidos y responder a las preguntas planteadas en este estudio.

5.1 DISEÑO DEL ESTUDIO

En el desarrollo de este estudio, con el fin de cuantificar la problemática de los residuos sólidos en la industria de papel Tisú y Kraft, en nuestro medio, se visitó y evaluó el sistema productivo y se caracterizaron los residuos sólidos generados en cada etapa, para luego identificar y elegir las mejores alternativas de manejo para los residuos identificados en esta industria. La investigación, en la Figura 2 está constituida por tres fases, las cuáles corresponden a cada objetivo específico. En la primera fase, fue necesario conocer el proceso productivo de la industria y los residuos sólidos generados, para lograrlo se recurrió a información primaria (Unibol S.A) y secundaria (Bibliografía). A partir de eso, se elaboró el diagrama de proceso, con la descripción detallada de la información obtenida. Para la segunda fase, teniendo en cuenta la información primaria y secundaria obtenida en la primera fase, se caracterizaron los residuos sólidos generados, a partir de la información (resultados de laboratorio) que analizó Unibol S.A, y de la recolección de información secundaria, identificando las características típicas de este tipo de lodo.

En la última fase se realizó la selección de alternativas, mediante la identificación de las variables dependientes de las alternativas de manejo, tratamiento y/o disposición, y los resultados de la caracterización realizada anteriormente, y un análisis multicriterio lo cual lleva a identificar las alternativas más adecuadas y responder al objetivo principal, que es proponer acciones que permitan optimizar el manejo de los residuos sólidos en el sistema productivo del papel Tisú y Kraft. A continuación se presenta el diagrama de flujo, indicando las fases, el método y los resultados del estudio.

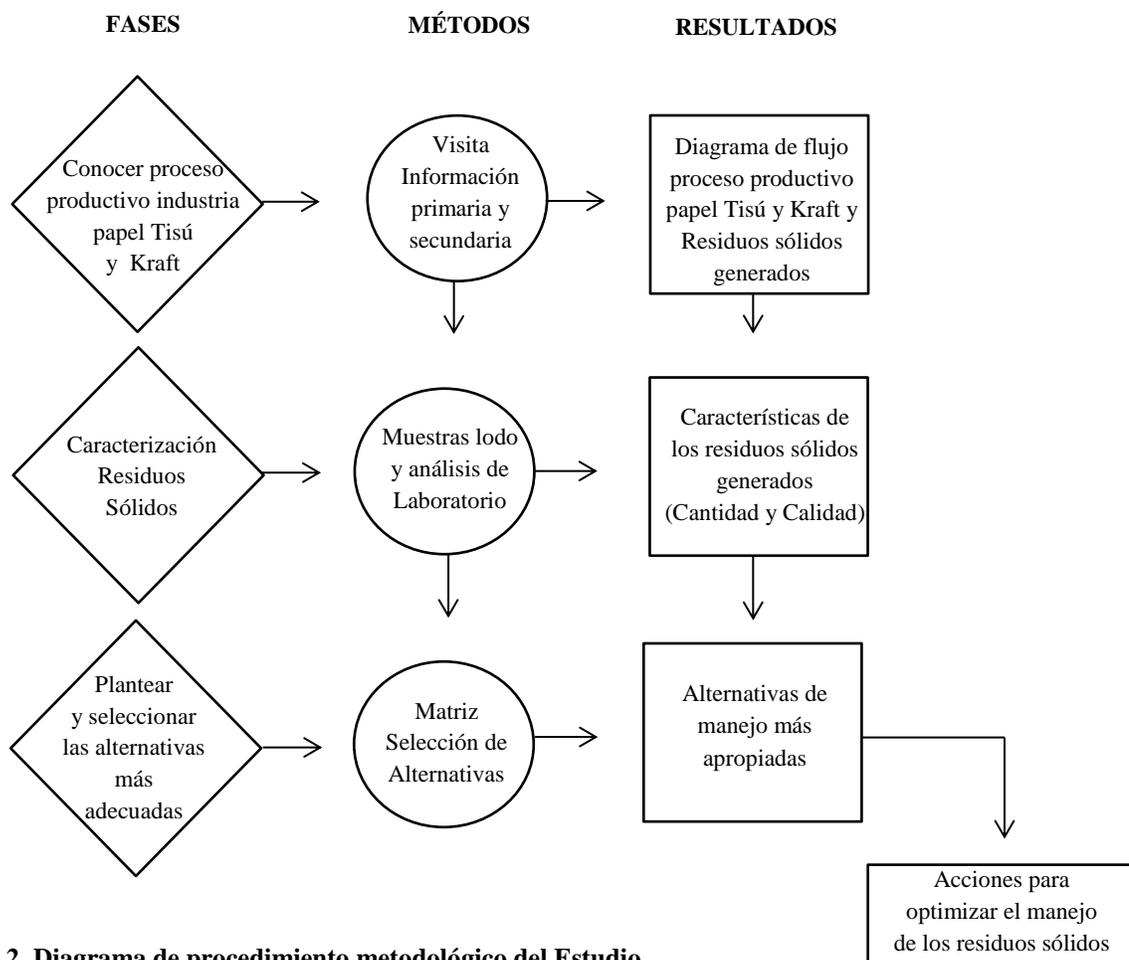


Figura 2. Diagrama de procedimiento metodológico del Estudio.

5.1.1 Evaluación del proceso de la industria de papel Tisú y Kraft

Análisis de información secundaria: En primera instancia se recurrió a distintas fuentes de información secundaria para conocer los conceptos importantes alrededor de este estudio que son: Ecología Industrial, Gestión Ambiental, Residuos Sólidos y Alternativas de Gestión. Adicionalmente se realizó la búsqueda en diferentes fuentes de información del proceso de la industria del papel Tisú y Kraft, y el manejo de los residuos sólidos de la misma.

Búsqueda de fuentes de información primaria: Posteriormente, con el fin de contar con información de fuentes primarias, además de complementar y profundizar la información antes mencionada, se realizaron acercamientos a diferentes empresas del sector, como Kimberly Clark, Papeles Nacionales S.A y Unibol S.A mediante visitas, llamadas y correos

electrónicos, de los cuáles únicamente se logró contar con la colaboración y apoyo de la Fábrica de Bolsas de Papel Unibol S.A.

Visita a la Fábrica de Bolsas de papel Unibol S.A: Se realizó una primera visita en Julio 27 de 2012, con el objetivo de identificar y conocer el sistema de fabricación, los tipos de residuos generados, en qué etapa y cantidad son producidos. Una vez recolectada y documentada la información, se realizó una segunda visita, en Septiembre 14 de 2012, debido a las nuevas inquietudes que surgieron con el objetivo de aclararlas, y solicitar complementar la información para el estudio. Las visitas fueron atendidas por el Ingeniero Milton Sarmiento, Coordinador de Mantenimiento Locativo y Gestión Ambiental. Lo anterior permitió conocer la secuencia del proceso, describiendo detalladamente sus etapas, los insumos y los residuos generados en cada una de las etapas del proceso.

5.1.2 Caracterización de los Residuos Sólidos

Las alternativas de manejo, tratamiento y disposición enmarcadas dentro de la gestión de los residuos sólidos, dependen de las características físicas, químicas y microbiológicas de los residuos sólidos generados en la Industria de Unibol.

Identificación del tipo de residuos Sólidos: La información brindada por Milton Sarmiento, y el recorrido que se realizó para conocer cada una de las etapas del proceso en Unibol S.A, permitió identificar en la primera visita los tipos de residuos sólidos generados y en una segunda visita se conoció el volumen promedio generado de cada uno de los residuos producidos mensualmente.

Análisis de Características de los Residuos Sólidos: A partir de la información suministrada por la industria y de datos reportados en literatura se establecieron las características de los residuos sólidos, considerando que, a la fecha Unibol S.A no ha realizado los análisis correspondientes que permitan definir las alternativas que pueden resultar viables.

Aspectos Relevantes para la selección de Alternativas: Por otra parte, se estudiaron y evaluaron las alternativas existentes de tratamiento y/o disposición de este tipo de residuos sólidos, a partir de información secundaria, teniendo en cuenta los requerimientos físicos, químicos y biológicos para cada alternativa.

5.1.3 Selección de alternativas viables

Se realizó la búsqueda de información relacionada con métodos de selección de alternativas, a partir de lo cual se identificó el método que recibe el nombre de Análisis Multicriterio, que consiste principalmente en seleccionar la mejor alternativa frente a un problema mediante el análisis de diferentes criterios que permitan tomar la mejor decisión.

5.2 MÉTODO DE RECOLECCIÓN DE DATOS

En el desarrollo de esta investigación, a partir de la información primaria y secundaria, se realizó la recolección de datos existentes y brindados por Unibol S.A.

5.2.1 Evaluación de los resultados de los análisis de laboratorio

Los análisis de laboratorio para llevar a cabo la caracterización son muy importantes, porque permiten determinar qué tipo de alternativa es viable desde ese punto de vista. Como primera medida se debe establecer si se trata de un residuo peligroso, el cual debe mostrar de acuerdo al Decreto 4741 de 2005 por lo menos una de las siguientes características: corrosivo, explosivo, toxico, inflamable, infeccioso o radioactivo (Tabla 4).

Tabla 4. Técnicas Análisis de Laboratorio para determinar la Peligrosidad

FÍSICO – QUÍMICA				
COMPUESTO	MÉTODO EPA	TÉCNICA	EQUIPO	LIMITE DE DETECCIÓN
CORROSIVIDAD	EPA-9040-B	pH-metro	pH-metro	No aplica
INFLAMIBILIDAD	EPA-1030	Combustión	Tren de Ignición	No aplica
TOXICIDAD-TCLP	SM-3500	Extracción	Equipo de TCLP	No aplica
METALES-TCLP ¹	SM-3500	Digestión Acida Absorción Atómica	Espectrofotómetro de Absorción Atómica	No aplica
REACTIVIDAD	EPA-9012 SM-4500-CN-D EPA-9034 SM-4500-S ² -F	Espectrofotometría Visible	Espectrofotómetro UV-VIS	No aplica
Ph	EPA-9040-B	pH-metro	pH-metro	No aplica

¹ arsénico, bario, cadmio, cromo, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio.

MICROBIOLOGICO				
COMPUESTO	MÉTODO EPA	TÉCNICA	EQUIPO	LIMITE DE DETECCIÓN
Bacterias Mesófilas	9215B-9260D APHA-AWWA-WPCF	Recuento Estándar en placa	Agar Plate Cout	No Aplica
Salmonella sp.	9260D-APHA-AWWA-WPCF EPA625-R92-013	Sallmonella sp. Serie de cinco tubos	Caldo Selenite/ Agar Salmonella y Shigella S.S	No Aplica
Coliformes Totales y Fecales	9221E APHA-AWWA-WPCF EPA625-R92-013	Coliformes Totales y Fecales en cinco tubos	Florocout	< 2 x 10 ⁶ NMP/g
Huevos de Helmitos	EPA-625-R92-013	Método WHIPPLE	No Aplica	No Aplica

Las pruebas específicas para determinar su peligrosidad son: Corrosividad con un pH-Metro que dice que tan básico o ácido es el material, reactividad utilizando un espectrofotómetro que muestra el nivel de radiación que genera el residuo, toxicidad por metales mediante la prueba TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure), que se encarga de determinar la cantidad y el tipo de metales pesados que posee la muestra, inflamabilidad recurriendo a la prueba de combustión y riesgo biológico por medio de pruebas microbiológicas para comprobar la presencia de agentes patógenos (bacterias, virus, parásitos y hongos) (UPB 2010). Otros parámetros medidos por Unibol que se tuvieron en cuenta por ser considerados de gran importancia para seleccionar las mejores alternativas de tratamiento y disposición se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Otros Métodos de Laboratorio (CRA 2009)

Parámetros	Métodos de Laboratorio
pH	Potenciómetro
Materia Orgánica	Walkly-black
Fósforo	Bray II
Calcio	Complexometría
Magnesio	Complexometría

5.3 MÉTODO DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

La metodología de toma de decisión multicriterio ayuda a la elección de la opción más adecuada bajo un conjunto de criterios de decisión, evaluando cada uno de ellos teniendo en cuenta los atributos, parámetros, objetivos y metas para las alternativas (García et al., 2010). Para seleccionar apropiadamente las alternativas de tratamiento de lodos papeleros se deben seguir los siguientes pasos que se muestran en la Figura 3.

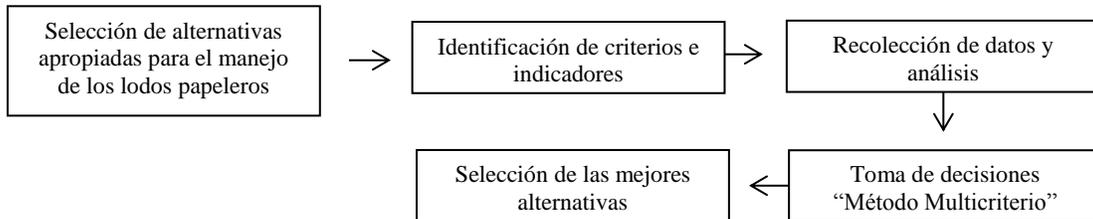


Figura 3. Estructura para seleccionar las mejores alternativas

En base a lo anterior se debe desarrollar una matriz simplificando y clasificando los elementos del análisis, luego establecer una metodología (simple o compleja) para operar la matriz y decidir la mejor alternativa teniendo en cuenta los resultados. En este estudio se va utilizar un método complejo que recibe el nombre de Adición Ponderada (Figura 4), el cual inicia relacionando el comportamiento de cada alternativa, con cada criterio establecido, que se suman de forma ponderada teniendo en cuenta los pesos asignados a cada criterio.

Criterios \ Alternativas		Alternativas					
		A_1	A_2		A_3		A_n
M_1	P_1						
M_j	P_j				V_{ij}		
M_m	P_m						
$V_{pi} = \sum_{j=1}^m V_{ij} P_j$					$\sum V_{ij} \cdot P_j$		
$V_{ai} = V_{pi} / \sum_{j=1}^m P_j$					V_{aj}		

Figura 4. Método Complejo (Conesa 1997).

Para lograr la valoración de cada alternativa, el procedimiento metodológico es: definir los criterios, valorar las alternativas (A_i) de acuerdo a los criterios (M_j) obteniendo un valor (V_{ij}), asignar los pesos relativos a cada criterio y calcular los índices (V_a), teniendo en cuenta el peso del criterio (P_j), y para cada alternativa se utiliza la siguiente formula (Conesa 1997):

$$Va_i = Va = \frac{\sum_{j=1}^m V_{ij}P_j}{\sum_{j=1}^m P_j}$$

Por último es importante mencionar que ningún método para seleccionar alternativas genera resultados objetivos incuestionables, sino que deben utilizarse como herramientas de toma de decisiones, los cuáles tienen que contar con un análisis y reflexión, que certifique que los resultados son confiables. (Conesa, 1997). Se utilizó la evaluación multicriterio, porque es uno de los métodos más estudiados y aplicados con éxito principalmente en organizaciones, industrias, entidades y empresas, además en el momento de ser aplicado se realiza de una manera rápida y sencilla.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 EVALUACION DEL SISTEMA PRODUCTIVO DEL PAPEL TISÚ Y KRAFT

La fabricación del papel Tisú y Kraft se divide, en etapas, desde la llegada del material virgen importado y seleccionado a la industria papeleras, hasta la obtención de los jumbos de papel de 1 sola hoja, para luego realizar la conversión al producto terminado listo para comercializar. Solamente difiere el Papel Tisú del Kraft en los tipos de químicos utilizados para cada tipo de papel (Sarmiento M 2012). El diagrama del sistema productivo se puede observar en la Figura 5 el cual cambia dependiendo de las características necesarias para cada tipo de papel. A continuación se muestran los resultados de la evaluación del sistema productivo del papel explicando cada proceso detalladamente. Es importante tener en cuenta que la fabricación del papel Tisú y Kraft se realizan por aparte, porque la materia prima que se utiliza para cada tipo de papel es diferente, pero es relevante saber que el orden y los procesos que se siguen en la industria son similares.

Selección: La primera etapa de la producción consiste en la selección de la materia prima. Para el papel Tisú se seleccionan dos materiales distintos de acuerdo a su procedencia y características, los cual son fibra virgen importada (50%) y material recuperado (archivo, revistas, periódicos) en buen estado (50%), mientras que para el papel Kraft se utilizan fibras recicladas de dos tipos: Corrugado (cartón con el que fabrican las cajas de cartón corrugado) de fabricación nacional o americano y DKL (Double-Lined Kraft) que son recortes de papel corrugado con dos capas de Liner (mayor resistencia) provenientes del exterior. Los materiales para fabricar estos dos tipos de papel provienen del reciclaje de residuos sólidos de otras actividades a nivel nacional o internacional, estos son seleccionados por terceros o empresas clasificadoras, y despachados a la industria prensados en grandes fardos o bloques de papel (Ilustración 1) (Sarmiento, 2013).

Los bloques de papel recuperado vienen mezclados con otro tipo de residuos que no es conveniente que entren al proceso, razón por la cual se realiza una verificación y separación del papel que sí puede ingresar al sistema de producción (Ilustración 2). Los materiales no aptos para la entrada al proceso de producción, son considerados residuos, Unibol almacena estos residuos y hace entrega a otras industrias para su manejo y disposición, considerando que no se le puede dar ninguna clase de aprovechamiento dentro de la industria.

Desfibrado o Pulpeo: Posterior a la selección, la fibra reciclada y la virgen son transportadas a la etapa de fabricación del papel Tisú y Kraft, la producción para cada tipo de papel es realizada por aparte porque las propiedades de la pasta son diferentes. La fibra virgen es colocada dentro de un pulper el cual cuenta con un agitador, donde se mezcla con agua quedando una pasta líquida, y posteriormente se une la pasta reciclada ya depurada al proceso de fabricación, luego el material es mezclado, triturado y desfibrado, hasta obtener la pulpa (PHC, S.A de C.V s.f; Hernández & Hernández 2010).

Depuración: En el proceso de preparación de la pasta para fabricar papel tisú y Kraft, es necesario saber cuáles elementos pasan a formar parte de la hoja y cuáles no, mediante unos sistemas de depuración, que separan las fibras de las partículas no deseadas, las cuáles perjudican la formación del papel. Esto se realiza mediante depuradores y cribas (malla o tamiz perforado) encargadas de eliminar impurezas de distinto tamaño y forma como: gomas, plásticos, grapas, plásticos duros, arenillas, piedras, etc. (Torras Papel, S.A s.f).

Destintado: Una vez que la pulpa ha sido separada de los elementos extraños, una unidad se encarga de retirar la tinta mediante la inyección de aire a la pulpa solamente a la pulpa del papel Tisú, donde las partículas se adhieren a las burbujas de aire que salen a la superficie, después se retira la espuma dejando la pulpa libre de tinta que se retira por aspersión, para luego ser tratada en la planta de tratamiento de aguas residuales de Unibol (PHC, S.A de C.V s.f).

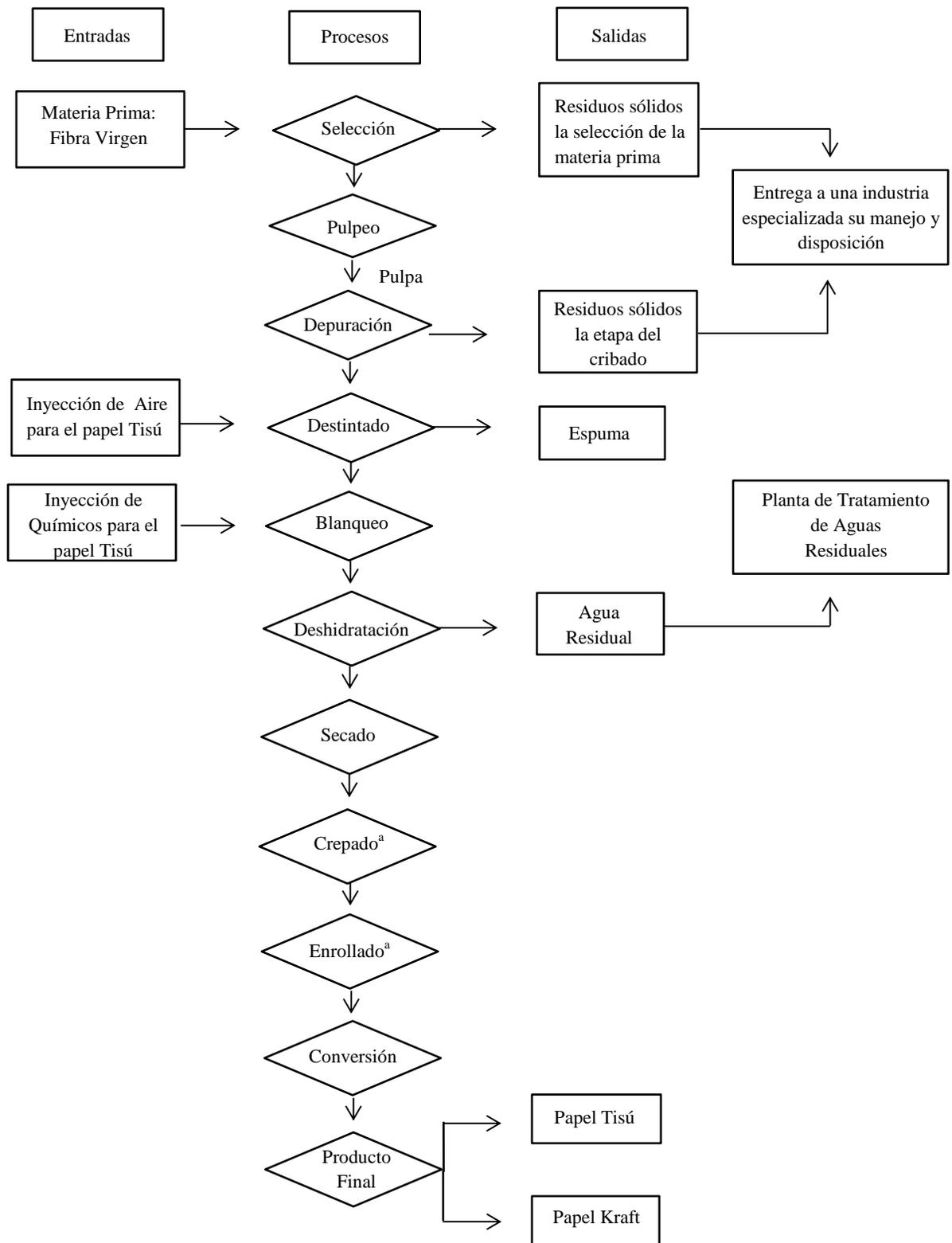
Blanqueo: Luego la pasta del papel Tisú sigue hasta la torre de blanqueo, en un tanque donde se agregan de forma automática una mezcla de químicos (cloro elemental, dióxido de cloro y peróxido de hidrogeno) (textos científicos s.f), obteniendo el punto justo de blancura que requiere el producto (PHC, S.A de C.V., s.f.). Mientras que al papel Kraft se agregan otros tipos de químicos (no conocidos) que brindan mayor resistencia y mantiene su color original.

Deshidratación: A continuación, la pasta se dirige a la fase de formación de la hoja, que consiste en transformar la pasta diluida en una lámina delgada, ancha y uniforme, con todos los componentes perfectamente distribuidos (Torras Papel, S.A s.f), donde las fibras se entrelazan unas con otras. La pasta líquida pasa sobre unas telas de transporte en la mesa de fabricación, formando la hoja y reduciendo la humedad de la pasta un 20% por medio del sistema de goteo (UPB 2010). Posteriormente, el papel entra a los filtros banda para retirar un 20% más de agua. En este proceso la hoja es transportada a través de unos filtros banda que la presionan dándole unas condiciones superficiales y de resistencia favorables para su posterior utilización, las cuáles cambian dependiendo del uso final que se le quiera dar (Kraft o Tisú) (Torras Papel s.f), y el agua que sale de esta etapa es colectada y dirigida al sistema de tratamiento de aguas residuales.

Secado: Luego de retirar el mayor porcentaje de agua en la etapa anterior, la hoja se adhiere al cilindro secador, para realizar el proceso de secado, mediante la combinación del calor generado en la superficie del cilindro a 100°C y soplado de aire caliente a 500°C por una campana que rodea el cilindro (Ilustración 3) (Hernández & Hernández 2010; PHC, S.A de C.V s.f).

Crepado: Para separar la hoja del cilindro se utilizan unas cuchillas de crepado (Ilustración 3) que vencen las fuerzas que adhieren la hoja al cilindro, aumentando la superficie específica para lograr una mayor adsorción, resistencia, blancura y elongación de la hoja. Esta operación se encarga de establecer las mejores propiedades para cada tipo de papel como: absorbencia, suavidad, espesor, volumen, resistencia, aspecto y crepado (Sarmiento, 2013). El papel Kraft necesita un mayor porcentaje de resistencia frente a lo que necesita el papel Tisú.

Enrollado y Conversión: Luego el papel proveniente de la etapa de crepado es enrollado y se forma una bobina de gran tamaño (Ilustración 3 e Ilustración 4) (Hernández & Hernández, 2010), transportada a la sección de conversión, donde los rollos de papel Tisú y Kraft son transformados en el producto final (papel higiénico, servilletas, bolsas de papel, sobres en papel manila y rollos de papel Kraft entre otros) y luego son vendidos a nivel nacional (PHC, S.A de C.V s.f.).



^a Cambia dependiendo de las características necesarias para cada tipo de papel

Figura 5. Diagrama del Sistema Productivo del Papel Tisú y Kraft.

Tratamiento de las aguas residuales del proceso industrial

El agua residual proveniente de las etapas de blanqueo y deshidratación, tanto del proceso del papel tisú como del papel Kraft, es colectada y dirigida al sistema de tratamiento de aguas residuales industriales realizada por aparte para cada tipo de papel (eficiencia mayor al 80%), e implementado en Unibol para obtener como producto final el agua tratada y como subproducto el lodo papeler. El tratamiento se encuentra compuesto por las etapas que se detallan en la Figura 6.

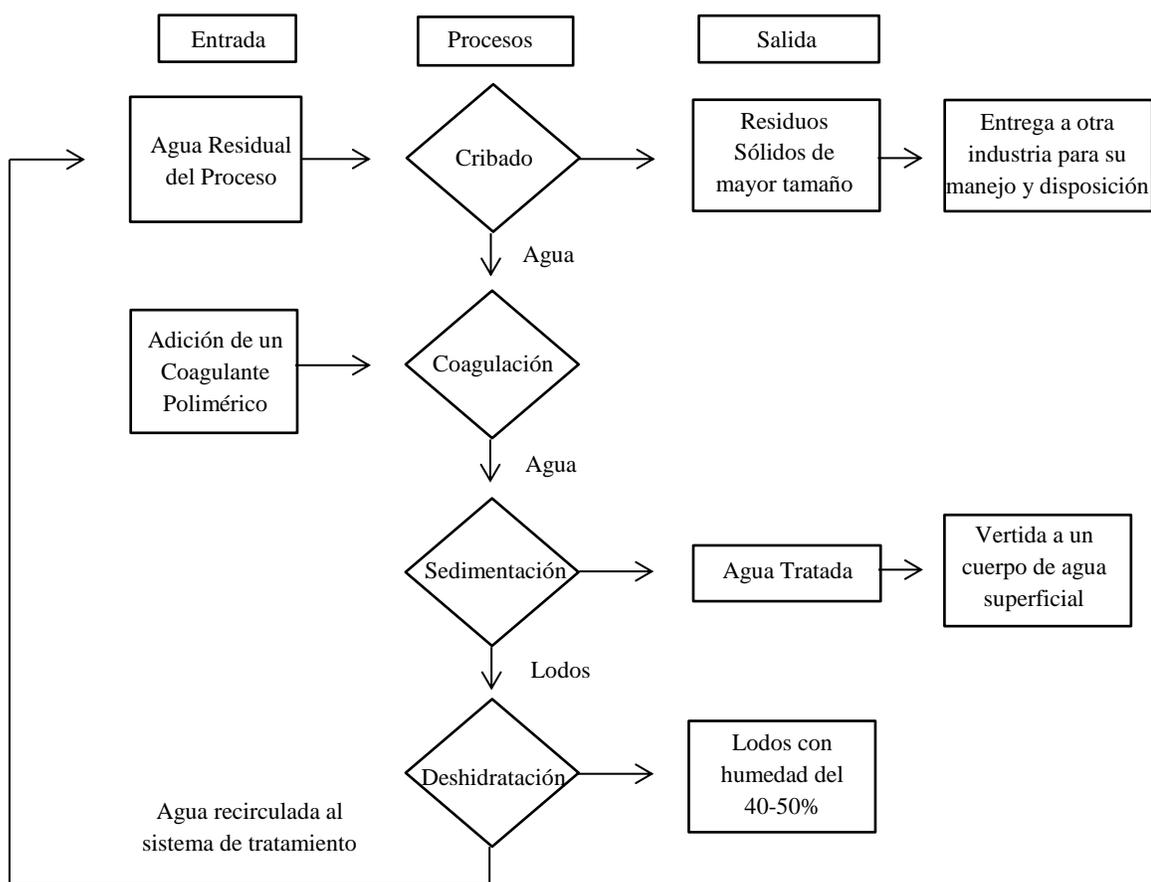


Figura 6. Tratamiento de Aguas Residuales Industriales

En Unibol el lodo es producido en el tratamiento del agua residual industrial. El tratamiento inicia separando aquellos residuos sólidos de mayor tamaño mediante el cribado (rejillas de diferentes tamaños), luego en el tanque de coagulación se adiciona coagulante (Cloruro Férrico) (UPB 2010), en seguida el agua pasa al tanque homogenizador, y por medio de una agitación suave se agrupan en partículas llamadas flóculos, los cuáles son sedimentados (la

mayor parte del efluente es reutilizado en el sistema de tratamiento y el excedente es vertido a un cuerpo de agua superficial) (CRA 2011).

Luego el lodo sedimentado es extraído y deshidratado mediante filtros prensa (belt press), incorporando cloruro férrico mejorando el proceso y la calidad del lodo, quedando el producto final con un humedad del 40-50%, el cual es dispuesto en un relleno interno de la empresa y en la reconformación geomorfológica de una antigua cantera ubicada en el municipio de Sabanagrande, es importante tener en cuenta que el agua residual doméstica es tratada por aparte (UPB 2010; CRA 2011).

6.2 CLASIFICACIÓN, CARACTERIZACIÓN Y FUENTES GENERADORAS DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS

Lo primero a tener en cuenta para la correcta gestión, es identificar los residuos generados en el sistema de producción de la Industria de Papel Unibol S.A, y así conocer cuál es el origen de cada uno y la respectiva cantidad y calidad generada (Tabla 6).

Tabla 6. Cuantificación y Fuentes Generadoras de los Residuos Sólidos. (Datos promedio del 2012)

Tabla de Diagnostico de Residuos			
Nombre	Cantidad/ Mes (Base Seca)	Porcentaje	Origen
Desechos Separados Mecánicamente	20 Ton/Mes	2%	Depuración de la Pasta
Lodos de (Papel Tisú) tratamiento de agua	798 Ton/Mes	69%	Tratamiento de Aguas Residuos Industriales
Lodos de (Papel Kraft) tratamiento de agua	342 Ton/Mes	29%	Tratamiento de Aguas Residuos Industriales

A partir de la Tabla 6, se infiere que de un promedio de 1160 Ton/Mes de desechos generados en Unibol, el 98% obedece al lodo (40-50% de humedad) proveniente del tratamiento de agua del Papel Tisú y Kraft, y el 2% restante corresponde a los desechos separados mecánicamente. Teniendo en cuenta estos resultados, es necesario darle mayor importancia a los lodos del Papel (Tisú y Kraft) debido a la alta cantidad generada mensualmente. Los datos considerados para el análisis fueron los suministrados por Unibol, el muestreo lo realizó la Universidad Pontificia Bolivariana, considerando tanto el lodo proveniente del proceso de elaboración del papel tisú, como del papel Kraft. Estos lodos se generan respectivamente en porcentajes del 70% y 30%, por lo que se compuso la muestra de manera proporcional.

6.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL LODO

El lodo paplero es un residuo industrial producto del tratamiento de las aguas residuales provenientes de la fabricación de papel Tisú y Kraft, se caracteriza por contener principalmente agua y materia orgánica e inorgánica, representadas en fibra de celulosas de longitud variable. Las características varían en función del proceso de tratamiento de agua que se utilice, y de los aditivos agregados que ayudan a eliminar las impurezas del agua tratada (UPB 2010). Por otra parte contiene grandes cantidades de materia orgánica, CaCO₃, materiales celulósicos, arcillas, productos químicos de la coagulación, microorganismos y un alto poder calorífico (Quinchia et al 2007).

Determinación de la Peligrosidad

Con el objetivo de evaluar el aprovechamiento del lodo generado, es necesario determinar su peligrosidad. Los análisis realizados por la Universidad Pontificia Bolivariana el 18 de Febrero de 2010, permitieron determinar la No peligrosidad de los lodos papleros, teniendo en cuenta los límites establecidos en el Decreto 4741 de 2005 y la regulación EPA 40 Parte-261, los cuáles son presentados a continuación en la Tabla 7 y Tabla 8.

Tabla 7. Resultados de análisis de peligrosidad (UPB 2010)

Análisis	Método	Unidades	Resultado	Incertidumbre	Límite (Regulación EPA 40, Parte 261 y Decreto 4741 de 2005)	Residuo Peligroso
Corrosividad	EPA-9040-B	Unidades de pH	8.135	+/- 0.160	No aplica	NO
Inflamabilidad	EPA-1030	mm/s	Negativo	NO	No aplica	NO
Reactividad	EPA 9012 ^a SM-4500-CN- D EPA-9034 SM-4500-S2-F		Negativo		No aplica	
Explosividad	Internal Ignition Test	Tiempo (m/s)	No se Realizó			
Toxicidad	SM-3500	mg As/L mg Ba/L mg Cd/L mg Cr/L mg Hg/L mg Ag/L mg Pb/L mg Se/L	0.552 0.635 0.006 0.088 0.488 0.0159 0.031 0.230	+/- 0.044 +/- 0.025 +/- 0.003 +/- 0.006 +/- 0.063 +/- 0.0006 +/- 0.001 +/- 0.009	5,0 100,0 1,0 5,0 200,0 5,0 5,0 1,0	NO

De los resultados de la Tabla 7, se infiere que los lodos no son peligrosos por Corrosividad, Inflamabilidad, Reactividad y Toxicidad, según los lineamientos del Anexo III del Decreto 4741 de 2005, y los estándares establecidos por la metodología EPA, porque cumplen con los valores límites exigidos para cada parámetro. Y la explosividad aunque no fue medida por Unibol, se determinó que los lodos papeleros no son explosivos principalmente cuando en estado sólido o líquido no desprenden gases por reacciones químicas.

Resulta de gran importancia para este estudio determinar si el lodo paplero es peligroso, porque al no considerarse peligroso su manejo se facilita y no requiere de tratamientos extras para darle una correcta disposición. Según estos resultados, la información encontrada y el listado Europeo de Residuos estos lodos son reconocidos como residuos industriales no peligrosos (Aspapel, 2008; Quinchia et al., 2007), porque los productos que se utilizan para elaborar papel Tisú y Kraft, no superan las concentraciones máximas de contaminantes para la prueba TCLP descritas en la Tabla 3 del Decreto 4741 de 2005, y por los lineamientos de la EPA 40 CFR parte 261 que no supera los límites exigidos por esta reglamentación.

Tabla 8. Caracterización Microbiológica de los Lodos del Papel. Tomado de la UPB 2010.

Caracterización Microbiológica (Infeccioso)					
Análisis	Método EPA	Unidades	Resultado	Límite Regulación EPA 40, Parte 503	Residuo Peligroso
Bacteria Mesofilas	9215B-9260D APHA-AWWA-WPCF	UFC/g	16×10^4	No aplica	NO
Sallmonella sp.	9260D APHA-AWWA-WPCF EPA-625-R92-013	NMP/g	0	No aplica	NO
Coliformes Fecales	9221E APHA-AWWA-WPCF EPA-625-R92-013	NMP/g	71×10^3	$< 2 \times 10^6$	NO
Huevos de Helmito	EPA-625-R92-013	HH/l	No se Observaron	No aplica	NO

De los resultados de la Tabla 8, se infiere que los lodos no son peligrosos por ser Infecciosos según los estándares establecidos por las metodologías EPA, porque cumplen con los valores mínimos exigidos e indican la ausencia de microorganismos causantes de

enfermedades (*Coliformes Totales, E. Coli, Coliformes Fecales* y huevos de helmito). Se realizó esta caracterización porque la presencia de agentes patógenos o parásitos limitaría la aplicación de diferentes alternativas o sería necesario un proceso de higienización del lodo, con el fin de disminuir o inactivar los microorganismos patógenos.

El no encontrarse sustancias patógenas en esta muestra, es principalmente debido a que el tratamiento del agua residual industrial y doméstica (aguas sanitarias, grasas, aceites y patógenos) se realiza por aparte, y también porque el material del proceso, entra a una torre de blanqueo hacia un enorme tanque donde se le agrega de forma automática una mezcla de químicos, que reciben el nombre de licor de blanqueo, para eliminar los agentes patógenos presentes y darle el color blanco al papel Tisú (PHC, S.A de C.V s.f). Por lo tanto estos lodos no presentan un peligro en términos de salud pública.

Otros Análisis

A la fecha la fábrica de Unibol también realizó el análisis de otros parámetros que resultan relevantes en el momento de evaluar alternativas de manejo y disposición de este tipo de residuos (Tabla 9).

Tabla 9. Otras parámetros para tener en cuenta (CRA 2009; UPB 2010).

Otros parámetros para tener en cuenta	
Parámetros	Valor Promedio
pH	7.79
Humedad	40-50%
Materia Orgánica	19.08%
Fósforo	27.02 ppm
Calcio	22.40 meq/100g
Magnesio	3.40 meq/100g
Carbono	21.03%

6.3 ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN

Considerando las características de los lodos provenientes de este tipo de industria y una vez establecida la NO peligrosidad del material por corrosividad, inflamabilidad, reactividad, toxicidad y riesgo infeccioso, se eligieron alternativas de tratamiento y disposición diferentes a la disposición en monorellenos y rellenos sanitarios, debido a que el mayor uso de papel reciclado, la mayor aplicación de tratamiento de agua, la legislación y el aumento de los costes, llevo a la industria de pulpa y papel Europea a poner cada vez más énfasis en la gestión de residuos utilizando otros tipos de alternativas presentadas a continuación (Monte et al 2008).

6.3.1 Alternativas de Tratamiento

Compostaje:

El objetivo del compostaje es principalmente reducir la humedad, el peso y el volumen de los residuos, para obtener un producto llamado compost el cual es aplicado ya sea para la agricultura o la restauración de suelos, que al ser incorporado mejore las propiedades y aporte nutrientes para el sustento de las plantas o cultivos (Alonso et al 2003).

Es un tratamiento productivo que estabiliza el material orgánico, basado en la degradación del material orgánico bajo la acción de diferentes microorganismos (Monte et al 2008), en el cual intervienen factores como humedad, disponibilidad de oxígeno, pH, porosidad, temperatura y la relación C/N, los cuáles son determinantes para la eficiencia del proceso y se encuentran en constante cambio debido a las condiciones ambientales en las que se desarrolla la actividad microbiana.

El compostaje está compuesto por diferentes fases, la primera recibe el nombre de mesófila inicial, es la parte más dinámica del proceso, porque el pH varía, en esta fase son degradados diferentes compuestos orgánicos y la temperatura se incrementa rápidamente debido a la alta actividad metabólica de los microorganismos, esto genera la transición a la fase termófila en la cual se inhiben los microorganismos patógenos y parásitos, predominando los actinomicetos. Cuando el compost está por encima de los 60°C el suministro de oxígeno es limitado, esto provoca una disminución de la actividad microbiana y por ende un enfriamiento para dar paso a la etapa de maduración, donde son

degradados los compuestos más complejos, la comunidad de microorganismos se hace más estable y la composición del compost se asemeja cada vez más a los ambientes de los suelos (Alonso et al 2003).

Los parámetros más importantes para compostar son la temperatura, porque pequeñas variaciones afectan la actividad microbiana en cada una de las fases. Por otra parte, la humedad es imprescindible para las necesidades fisiológicas de los microorganismos en conjunto con la porosidad (Alonso et al 2003), el porcentaje óptimo de humedad está entre 50-70%, con valores inferiores a 30% la actividad biológica decrece y por encima de 70% el agua desplaza el aire en los espacios libres reduciendo la transferencia de oxígeno, generando malos olores y disminuyendo la velocidad del proceso, por ende la porosidad baja (Álvarez, s.f), por lo cual utilizando agentes de carga altamente porosos la aireación de la pila aumenta (Luo et al 2007).

Otro parámetro es el pH que cambia por la dinámica de los procesos microbianos en cada fase, los valores óptimos están entre 5 y 8 (Alonso et al 2003), por otra parte la relación C/N es un factor que influye en la velocidad del proceso y en la pérdida de amonio, con valores óptimos entre 25-30 (Charest et al 2003), mientras que la materia orgánica depende de los microorganismos que intervienen y las condiciones físico-químicas presentes (Alonso et al 2003).

Tabla 10. Ventajas y Desventajas del Compostaje. (Gea et al 2004; Charest et al 2003)

Compostaje	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Es la tecnología más prometedora para tratar lodos papeleros debido a los bajos costos del tratamiento. • Reduce grandes porcentajes de masa y volumen, esto hace el compost más adecuado para el uso en el suelo. • Velocidad de descomposición. • Alcanza y mantiene altas temperaturas para una higienización de los agentes patógenos. • Calidad del compost para el uso agrícola. 	<ul style="list-style-type: none"> • El balance inadecuado de nutrientes es un factor que puede dificultar el compostaje. • Bajo contenido de materia orgánica y humedad. • Se generan malos olores si se ejecuta inadecuadamente el tratamiento. • Alto costo de energía para una correcta aireación.

A continuación en la Tabla 11 se identifica si el lodo papelerero es apto o no para compostar, teniendo en cuenta los valores de la humedad y C/N, basado en los datos brindados por Unibol S.A y los valores tomados de distintos estudios.

Tabla 11. Parámetros en Compostaje

Alternativa	Parámetros	Valor Unibol S.A	Valores Óptimos	Valores Simard, citado en Rashid et al 2006	Valores Marche et al 2003	Valores Gea et al., 2004
Compostaje	Humedad (%)	40-50	(Álvarez s.f) 50-70	30	65	52.7
	C/N		(Charest et al 2001) 25-30 (Álvarez s.f) 30	35	21.5	23.7

La humedad óptima que está entre 50-70% (Tabla 11), este valor se cumple por Unibol y los artículos de Marche et al 2003 y Gea et al 2004, esto significa que se da un buen crecimiento microbiano que ayuda a la descomposición de la materia orgánica, mientras que el estudio de Simard, citado en Rashid et al., 2006 no cumple con los límites establecidos, debido a que tiene una humedad muy baja, pero es corregida mediante la incorporación de agua (Álvarez, s.f), en caso contrario es necesaria la adición de agentes de carga o estructurantes como virutas de madera o material inorgánico (Gea et al 2004; Luo et al 2007).

Por otra parte el C/N requerido (25-30) según Charest et al 2003 (Tabla 11) no se cumple para ninguno de los artículos, en los cuáles Marche et al., 2003 y Gea et al., 2004 tuvieron valores menores, esto genera la volatilización del amonio por la pérdida de nitrógeno generando malos olores y disminuyendo la calidad del compost, mientras que Simard, citado en Rashid et al 2006 supera el límite exigido, haciendo que el proceso de descomposición de la materia orgánica se vuelva más lento (ESD, 1999), por lo cual es necesario equilibrar la relación C/N para implementar el proceso de compostaje correctamente, teniendo en cuenta que el balance inadecuado de los nutrientes es el principal factor que afecta el compostaje, por tal motivo es necesario adicionar agentes estructurantes como virutas de madera y restos de poda (Luo et al 2007).

Se concluye que el lodo paplero basado en los distintos estudios y en Unibol, puede ser apto según los valores límites para compostar, a través de un tratamiento previo equilibrando la relación C/N y la humedad.

Incineración con Aprovechamiento Energético

La incineración tiene como fin primordial reducir el volumen y la peligrosidad de los residuos eliminando aquellas sustancias nocivas. Esta alternativa consiste principalmente en oxidar los materiales combustibles de los residuos, generando energía por medio de las reacciones químicas de las sustancias orgánicas presentes en los residuos, cuando entran en contacto con el oxígeno y alcanzan la temperatura de ignición necesaria. Cuando el valor calorífico y el suministro de oxígeno son suficientes, no hay necesidad de adicionar combustibles (European Commission 2006).

El aprovechamiento energético ocurre luego de la combustión en el horno lo cual hace que el agua que circula por las tuberías de la caldera se transforme en vapor a gran presión, este es llevado a diferentes turbinas según la presión, generando el movimiento de un generador eléctrico que se encarga de transformar la energía mecánica en electricidad, la energía obtenida pasa por unos transformadores que adaptan la intensidad y tensión a la red del sistema. Luego el vapor utilizado anteriormente es condensado y el agua resultante es utilizada para repetir el ciclo térmico (UNESA, s.f). Por otra parte en la incineración controlada, no se da una eliminación completa, porque los lodos se convierten en cenizas y en algunos gases, disminuyendo su peso y volumen significativamente. Pero si la incineración no es controlada con sistemas de depuración de gases se generan problemas medioambientales debido a las características de los lodos (Colomer et al 2009).

Los parámetros más importantes para definir si el lodo papelerero es apto en la incineración con aprovechamiento energético, son la baja humedad (10-15%) y el alto poder calorífico debido a la eficiencia y el ahorro energético, porque una alta humedad y un bajo poder calorífico requiere de más energía para incinerar estos lodos.

Tabla 12. Ventajas y Desventajas de la Incineración con Aprovechamiento Energético (Werther & Ogada 1997; Caputo & Pelagagge 2000; Monte et al 2008).

Incineración con Aprovechamiento Energético	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Alto porcentaje de lodo reducido• Recuperación del contenido energético del lodo a través de la incineración.• Poca área requerida para tratar los lodos	<ul style="list-style-type: none">• Emisiones de gases contaminantes a la atmósfera.• Alta inversión de capital en el tratamiento.• Alta humedad y bajo poder calorífico.

A continuación en la Tabla 13 se identifica si el lodo papelerero es apto o no para la incineración con aprovechamiento energético, teniendo en cuenta los valores de la humedad y poder calorífico (cantidad de energía que se desprende al producirse una reacción química de oxidación), basado en los datos brindados por Unibol S.A y los valores tomados de distintos estudios.

Tabla 13. Parámetros en Incineración con Aprovechamiento Energético

Alternativa	Parámetros	Valor Unibol S.A	Valores Óptimos	Valores Colomer et al 2009	Valores Caputo & Pelagagge, 2000	Valores Monte et al 2008
Incineración (Aprovechamiento Energética)	Humedad (%)	40-50%	(Colomer et al 2009)10-15 (Monte et al 2008) 10-15 (Werther & Ogada 1997) 5-10	10-15	45	50
	Poder Calorífico (Kcal/Kg)		(Colomer et al 2009) 2000-3000	3116	1150	

Los valores óptimos de humedad para efectos de incineración deberían estar entre 5-10% o 10-15% (Tabla 13) según Colomer et al (2009), Monte et al (2008) y Werther & Ogada (1997) ya que es el máximo contenido permitido en las plantas de incineración, mientras que el poder calorífico tiene un límite de 2000 a 3000 Kcal/Kg, ya que son los valores aceptables para llevar a cabo la incineración porque la eficiencia y el ahorro energético es mayor. Según lo dicho anteriormente, los datos que se cumplieron están en los artículos de Colomer et al (2009), mientras que el estudio de Caputo & Pelagagge (2000) y Monte et al (2008) no cumplen con los requisitos debido a la alta humedad y el bajo poder calorífico, (Monte et al 2008 no cuenta con el valor de poder calorífico) por esta razón es necesario que reciba un tratamiento mediante el secado térmico (Colomer et al., 2009), porque entre más seco esté el lodo, mayor será la energía consumida o utilizada por la incineradora.

Teniendo en cuenta la información suministrada, se determinó que el poder calorífico del lodo papelerero es alto comparado con el generado en otras industrias, ya que el poder calorífico es un 60% superior al lodo de la industria de curtidos (3081 Kcal/kg), un 133% superior al de la industria textil (2289 Kcal/Kg) y de un 149% (2625 Kcal/Kg) a un 437% (2127 Kcal/Kg) superior de dos estaciones depuradora de agua residuales urbanas, esto

significa que este lodo presenta una mayor viabilidad de realizar una incineración con recuperación de energía en comparación con las otras 4 industrias mencionadas (Colomer et al., 2009). Por lo cual la mejor opción para esta alternativa es que Unibol mida el poder calorífico del lodo y realice un tratamiento previo de secado térmico para hacer un uso más eficiente de los lodos papeleros.

6.3.2 Alternativas de Disposición

Agricultura

Debido a la alta generación de lodos, una de las posibles alternativas de disposición que se ha incrementado en la última década, es la aplicación directa de este residuo en los suelos para la agricultura, ya que aumenta el crecimiento de las plantas en los cultivos y el rendimiento, mejora la humedad del suelo y la retención de nutrientes (Rashid et al 2006). Otras ventajas que tiene esta alternativa es el retorno de los materiales orgánicos en el ciclo biológico, evitar el uso de fertilizantes artificiales y la no contaminación de los suelos por metales pesados debido a la no peligrosidad de los lodos papeleros (Werther & Ogada, 1997). Las desventajas son los altos niveles de sal y las deficiencias de N, aunque los efectos de la alta salinidad y la deficiencia de N se han minimizado controlando las tasas de aplicación de lodos y retrasando la siembra por un período después del tratamiento (Rashid et al 2006).

Los parámetros más importantes para definir si el lodo paplero es apto en la agricultura, son humedad, materia orgánica, pH y nutrientes (carbono, nitrógeno, fósforo, calcio y magnesio), porque este lodo influye en el crecimiento de las plantas y en su rendimiento, debido a la mejora en la humedad del suelo y a la retención de nutrientes, evitando el uso de fertilizantes y mejorando las condiciones del suelo. Para esta alternativa se utilizaron las normas y directrices de la División de Ciencias Ambientales (ESD por sus siglas en inglés) apropiadas para la correcta aplicación de lodos a tierras agrícolas, teniendo en cuenta los valores apropiados para Carbono, Nitrógeno y pH, los cuáles están basados en los resultados de un programa de investigación de Alberta que se inició en 1991.

Tabla 14. Ventajas y Desventajas Agricultura

Agricultura	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Mejora del contenido de nutrientes, la capacidad de retención de agua y la porosidad del suelo. • Alto contenido de materia orgánica de los lodos. • Mejora de la calidad del suelo. • Se reduce el volumen de lodos colocado en los rellenos y para la incineración. • Baja inversión de capital al tratamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Altos niveles de salinidad y deficiencias del nitrógeno. • Área requerida

A continuación en la Tabla 15 se presentan los parámetros si el lodo papelerero es apto o no para la agricultura, teniendo en cuenta los valores de humedad, pH, materia orgánica y nutrientes, basado en los datos brindados por Unibol S.A y los valores tomados de distintos estudios.

Tabla 15. Parámetros para disposición en Agricultura

Alternativa	Parámetros	Técnica	Valor Óptimo	Valor Unibol S.A	Valores Simard, citado en Rashid et al 2006	Valores Goss et al, citado en Rashid et al 2006	Valores Phillips et al 1996
Agricultura	Carbono (%)	Environmental Sciences Division (ESD), 2009	10-25%	21.03%		29.7-33.4%	30.9%
	Nitrógeno (%)		1%		0.27-0.73%	0.41%	
	Fósforo (mg/Kg)	Artículo (Macyk & Faught, citado en ESD, 1999)	61-500 mg/Kg	27.02 mg/Kg	500-800 mg/Kg		800 mg/Kg
	Materia Orgánica	Artículo (Nkana et al y Nunes & Cabral citado en Riberio et al., 2010)	49-89%	19.08%			
	pH	Environmental Sciences Division (ESD), 2009	6.5-7.5	7.79	7.9-8.0	7.7-8.2	
	Humedad (%)	Food and Agriculture Organizations of United Nations (FAO, s.f)	33-38%	40-50%	28-32%	39.7-49%	30%

Los valores límites para el carbono son 10-25% y para el nitrógeno 1% según los estándares de “Environmental Sciences Division” (Tabla 15) (Intervalo que se produce para la mayoría de suelos superficiales necesario para la correcta aplicación de lodos para uso

agrícola). Teniendo en cuenta lo dicho anteriormente, a excepción del valor de Unibol, no se cumplen los parámetros para ninguno de los artículos, en los cuáles Simard, citado en Rashid et al., (2006) y Philips et al., (1996) superan lo exigido para el Carbono y están por debajo del requerimiento de nitrógeno, mientras que el estudio de Goss et al, citado en Rashid et al (2006) tiene los datos para el carbono y el nitrógeno encima del límite. Por lo cual es necesario medir los sólidos volátiles (SV) que representan la materia orgánica de los lodos, para evaluar la necesidad de estabilizar el lodo, reduciendo e inactivando organismos patógenos, eliminando los problemas de olores y evitando provocar daños al medio ambiente y a la salud humana (Barrios 2009).

El valor óptimo aproximado para el fósforo es de 61-500 mg/Kg (Tabla 15) según Macyk & Faught citado en ESD, (1999), por ende los artículos de Simard, citado en Rashid et al., (2006) y Phillips et al., (1996) tienen valores cercanos a lo necesario lo cual favorece el crecimiento, la fertilidad de las plantas y el transporte de energía para llevar a cabo los procesos vitales en las plantas, mientras que el estudio de Goss et al citado en Rahid et al (2006) supera los límites y Unibol está por debajo de lo requerido, por lo cual es necesario estabilizar los valores utilizando fuentes alternativas de fósforo (fosfito) en el suelo, para desarrollar cultivos que capten más del 20% del fósforo, sean más solubles y por ende reaccionen con los componentes del suelo mejorando sus propiedades (Radio UNAM Noticias 2012).

El valor adecuado de la materia orgánica es 49-89% (Tabla 15) según Nkana et al., 1999 y Nunes y Cabral, 2000 citado en Ribeiro et al., 2010 porque mantiene una buena productividad agrícola, el cual no es cumplido por Unibol porque su humedad es baja, pero es corregida mediante la incorporación de agua. El pH apropiado es de 6.5-7.5 (Tabla 15) según la ESD, (1999) por su neutralidad, y es cumplido con valores cercanos por Unibol y los artículos estudiados. Por último el parámetro de humedad adecuado es de 33-38% (Tabla 15) según la FAO, porque nutre a las plantas, forma el suelo e incrementa la fertilidad principalmente, el cual se cumple con valores cercanos en los artículos de Simard, citado en Rashid et al., (2006) y Phillips et al., (1996), mientras que Unibol y el estudio de Goss et al citado en Rashid et al (2006) superan el valor recomendado, por lo cual es necesario adicionar agentes estructurantes para disminuir la humedad.

Según lo anterior, se infiere que el lodo papelerero basado en los distintos estudios y en Unibol, puede ser apto según los valores límites para ser dispuesto en agricultura, a través del tratamiento previo de los lodos papeleros como lo es el compostaje, para lograr un balance adecuado de los nutrientes y la materia orgánica principalmente, mejorando las propiedades de las plantas para que sea apropiado para cultivar.

Restauración de Suelos

La aplicación directa del lodo papelerero para restaurar los suelos, es una alternativa de disposición que estabiliza las condiciones de suelos pobres que ha sido afectado por el uso continuo, mejorando la fertilidad, la textura y estructura del suelo promoviendo un buen drenaje, aireación, retención de agua y penetración de la raíz (Pierce et al 2003) y reduciendo los costos de disposición. Pero el uso de estos residuos requiere buenas prácticas de aplicación y supervisión periódica, mientras que las restricciones de la aplicación del lodo son menos rigurosas debido a su no peligrosidad (Ribeiro 2010), por lo cual es importante mantener un contenido de materia orgánica, nutrientes y pH adecuado para mantener la fertilidad logrando la restauración de los suelos (Rato et al 2007). A continuación en la Tabla 16 se presenta si el lodo papelerero es apto o no para la restauración de suelos, teniendo en cuenta los valores de humedad, pH, materia orgánica y nutrientes, basado en los datos brindados por Unibol S.A y los valores tomados de distintos estudios.

	Parámetros	Valor Óptimo	Valor Unibol S.A	Valores Pierce et al 2003	Valores Ribeiro et al 2010	Valores Bonoli & Dall'Ara 2011
Restauración de Suelos	pH	(Riberio et al., 2010) 7.2-7.8	7.79	8	7.8	6.9
	Materia Orgánica (%)	(Riberio et al., 2010) 49-89%	19.08%		11%	27.3%
	Carbono (%)	(Charest et al., 2001) 25-30%	21.03%	32%		2.32%
	Nitrógeno (%)	(Riberio et al., 2010) 1%		0.4%	0.26%	0.02%
	Fósforo (%)	(Riberio et al., 2010) > 650 mg/Kg	27.02 mg/Kg	800 mg/Kg	370 mg/Kg	
	Humedad (%)	(Bonolia & Dall'Ara, 2011) 30%	40-50%		10%	30%

Tabla 16. Parámetros en Restauración de Suelos

El valor adecuado de la materia orgánica es 49-89% (Tabla 16) según Nkana et al 1999 y Nunes y Cabral (2000) citado en Ribeiro et al (2010) porque mantiene una buena productividad agrícola, pero no es cumplido por Unibol y Bonoli & Dall'Ara, (2011) porque el contenido orgánico de lodos es bajo debido a la mineralización posterior durante el almacenamiento y tratamiento de lodos (Ribeiro et al 2010). El pH apropiado es de 7.2-7.8 (Tabla 16) según Riberio et al, (2010) porque es adecuado para la aplicación al suelo desde el límite fijado en varios manuales y códigos de buena práctica (Ribeiro et al., 2010), el cual satisface los valores de Unibol, Pierce et al (2003), Ribeiro et al (2010) y Bonoli & Dall'Ara (2011).

El parámetro de humedad adecuado es de 30% (Tabla 16) según Bonoli & Dall'Ara (2011) para facilitar el transporte de nutrientes y mejorar las condiciones del suelo degradado, el cual lo cumple el estudio de Bonoli & Dall'Arab, (2011), pero no el de Unibol y Rato et al., (2007) debido a la alta humedad, por lo cual es necesario disminuir la humedad adicionando agentes estructurantes (Luo et al 2007). Los valores límites para el carbono son 25-30% según Charest et al 2003 (Tabla 16) porque es el óptimo exigido para la mayoría de residuos que van a ser dispuestos en los suelos, el cual es cumplido con un valor por Pierce et al (2003), mientras que Unibol y Bonoli & Dall'Arab, (2011) están por debajo de lo permitido.

Mientras que el nitrógeno apropiado según Charest et al, 2003 es 1% porque beneficia la relación C/N y por ende la calidad de los suelos, pero ninguno de los artículos es aceptado para este parámetro, lo cual significa que es necesario equilibrar los valores de Carbono y Nitrógeno midiendo los sólidos volátiles (SV) que representan la materia orgánica de los lodos, y de esta forma reducir e inactivar los organismos patógenos, eliminar los problemas de olores y evitar provocar daños al medio ambiente y a la salud humana (Barrios 2009).

El valor de fósforo indicado por varios autores apunta a ser > 650 mg/Kg según Nkana et al y Nunes & Cabral citado en Riberio et al., (2010) (Tabla 16) porque es el apropiado para ser utilizado en suelos con fines fertilizantes (Ribeiro et al., 2010), este se cumple por Pierce et al (2003) pero no para Unibol y Ribeiro et al (2003), por esta razón es apropiado aplicar al lodo materiales ricos en fósforo, aunque hay que tener en cuenta que este nutriente es poco

asimilable, siendo apropiado también incorporar fuentes alternativas de fósforo (fosfito) (Radio UNAM Noticias 2012).

Según lo anterior, se infiere que el lodo papelerero basado en los distintos estudios y en Unibol, puede ser apto según los valores requeridos para la restauración de suelos, a través del tratamiento de los lodos papeleros mediante el compostaje, obteniendo un suelo apropiado (cantidad de nutrientes adecuados) para cultivar o revegetalizar, teniendo en cuenta que no son peligrosos.

Fabricación de Materiales para Construcción:

Teniendo en cuenta que la acumulación de lodos papeleros no gestionados ha generado problemas ambientales, es necesario abordar este tema desde el reciclaje, en el cual son incorporados en la estructura interna de los materiales de construcción como sustitutos sostenibles a los materiales de construcción, reduciendo su costo de fabricación, sin comprometer su estructura. Investigaciones muestran que adicionar fibras vegetales aumenta la resistencia mecánica, produce materiales compuestos más ligeros y reduce la cantidad de energía utilizada al fabricar los materiales de construcción (Rajput et al 2012).

Este residuo es aplicable para esta alternativa porque incluye en su composición carbonato cálcico que es un mineral insoluble de origen natural el cual proviene de yacimientos de Carbonato de Calcio, es utilizado en la industria papelera incorporado como un aditivo a los papeles que se están fabricando, con el fin de mejorar principalmente la blancura y la calidad de impresión del papel (maripapel, s.f), el cual introduce mejoras en la estructura interna de los materiales de construcción, mejorando la eficiencia energética de la producción de estos materiales e influyendo en las propiedades físico-mecánicas finales del producto aumentando su resistencia, y durabilidad (Díaz et al 2011).

Tabla 17. Ventajas y Desventajas en la fabricación de materiales de construcción (Monte et al 2008; Rajput et al 2012).

Fabricación de Materiales de Construcción	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Mayor resistencia y durabilidad del producto final • Se reduce la cantidad de energía utilizada para fabricar los materiales de construcción (mejor eficiencia energética) • Incluye en su composición carbonato cálcico. • La ceniza resultante de la incineración permanece en el producto. 	<ul style="list-style-type: none"> • Emisiones de gases contaminantes a la atmosfera. • Alta inversión de capital para fabricar materiales de construcción. • Poca investigación y estudios.

A continuación en la Tabla 18 se identifica si el lodo papelero es apto o no como insumo de construcción para materiales de construcción, teniendo en cuenta la importancia del carbonato de calcio en el lodo y los valores de humedad y poder calorífico (brindados por Unibol S.A y por distintos estudios).

Tabla 18. Parámetros en Insumo Producción Materiales de Construcción

Alternativa	Parámetros	Valor Óptimo	Valor Unibol S.A	Valores Martínez et al 2011	Valores Rajput et al 2012	Valores Colomer et al 2009
Insumo Producción Materiales de Construcción	Poder Calorífico (Kcal/Kg)	(Colomer et al 2009) 2000-3000 kcal/Kg		1590 Kcal/Kg		3115 Kcal/Kg
	Humedad (%)	(Monte et al 2008) 10-15%	40-50%		75%	10-15%

El valor adecuado del poder calorífico es de 2000-3000 Kcal/Kg según Colomer et al, 2009, y el de humedad están entre 10-15% según Monte et al., 2008 (Tabla 18), porque cuando se quema el lodo seco en el horno rotatorio, el valor calorífico de las sustancias orgánicas con un alto contenido de carbono se utiliza aumentando su eficiencia (Monte et al 2008), el cual se cumple en los artículos de Colomer et al., (2009), mientras que para Unibol y el estudio de Rajput et al (2012) la humedad es mayor por esta razón es necesario realizar un secado térmico, que influye en el aumento del poder calorífico.

Por otra parte, el contenido de carbonato de calcio del lodo papelerero de Unibol tiene un valor de 25.9%, el cual es de gran importancia como insumo para los materiales de construcción porque al ser incorporado en el estructura interna, se convierte en una fuente de aumento de la eficiencia energética de la producción de este material, a la vez permite un incremento de la capacidad productiva por la disminución del tiempo de cocción y la mejora en la calidad de los productos entre un 30% y un 50% (Díaz et al 2011).

Según lo anterior, se infiere que el lodo papelerero basado en los distintos estudios y en Unibol, puede ser apto según los valores límites como insumo para los materiales de construcción a través de un tratamiento previo donde sean secados los lodos, además es necesario conocer los requerimiento del carbonato de calcio, porque es el parámetro más importante para conocer la viabilidad de esta alternativa. Teniendo en cuenta lo anterior, la mejor opción es trasportar este material a la fábrica de construcción (ladrillos, cemento y cerámica entre otras) más cercana para que sea aprovechado apropiadamente.

Relleno

La alternativa de relleno tiene la mayor acogida para la eliminación de los residuos, debido a los costos, el conocimiento necesario y el tiempo que lleva transformar y reciclar los residuos sólidos, además de ser un método que no requiere operaciones adicionales (ISEA 2012). Por otra parte, existen dos métodos de relleno los cuáles son: Relleno Sanitario (eliminación conjunta de otros residuos) y Monorelleno (eliminación de solo un tipo de residuo), que tienen un funcionamiento similar y requieren de grandes áreas y fertilizantes orgánicos para restaurar los suelos cuando el relleno se cierre.

Se escogieron los parámetros de humedad porque condiciona el aumento o la reducción de los gases y el agua de percolación al aplicar los lodos al relleno y el nivel de pH, (propiedad física) y sirve para conocer si este residuo es apto para su eliminación dependiendo de su acidez o basicidad (Werther & Ogada 1997). Para esta alternativa se utilizaron los estándares para el manejo de los rellenos tomando el de Alberta (iniciativa en la mejora de requisitos normativos de gestión de residuos en rellenos).

Tabla 19. Ventajas y Desventajas en Rellenos Sanitarios y Monorellenos (Werther & Ogada 1997)

Rellenos	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Poca inversión de capital en el tratamiento • Reducción del volumen de lodos dispuestos. • Puede ser usado en un futuro para revegetalizar el terreno donde son dispuestos los lodos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Problemas de estabilidad (emisiones de olores y gas) • Capacidad disponibles de rellenos son limitados. • Grandes requerimientos de área.

A continuación en la Tabla 20 se identifica si el lodo papelerero es apto o no para ser dispuesto en los rellenos, teniendo en cuenta los valores de humedad y pH, basado en los datos brindados por Unibol S.A y los valores tomados de distintos estudios.

Tabla 20. Parámetros en Monorellenos y Rellenos Sanitarios

Alternativa	Parámetros	Técnica	Valor Óptimo	Valor Unibol S.A	Valores Natuni & Kinman 1991	Valores Rato et al 2007	Valores Bonoli & Dall'Ara 2011
Monorellenos y Rellenos Sanitarios	pH	Standars for Landfills in Alberta	6 a 9.5	7.79	6.85	7.8	6.9
	Humedad (%)	Artículo (Kuniholm, s.f)	45-50%	40-50%	70%	84.2%	30

El pH óptimo es de 6 a 9.5 según los estándares sobre vertederos en Alberta (Tabla 20), porque es un valor neutro aceptable para esta alternativa de disposición, el cual es aceptado para Unibol y todos los estudios. La humedad apropiada es de 45-50% de acuerdo a Kuniholm (s.f) (Tabla 20) para la buena disposición de los lodos, se cumple por Unibol pero no para ninguno de los artículos, porque tiene valores diferentes a los exigidos. Existen dos opciones, si la humedad es menor a lo requerido es necesario agregarle agua, y si por lo contrario es mayor se debe realizar el secado térmico, para evitar la emisión de gases, olores y agua de percolación (Werther & Ogada, 1997). Según lo anterior, se infiere que el lodo basado en los distintos estudios y en Unibol, debe recibir un tratamiento previo dependiendo de la humedad que tenga. Para finalizar esta sección se presenta un diagrama que resume como debe ser la correcta elección de las alternativas (Figura 7).

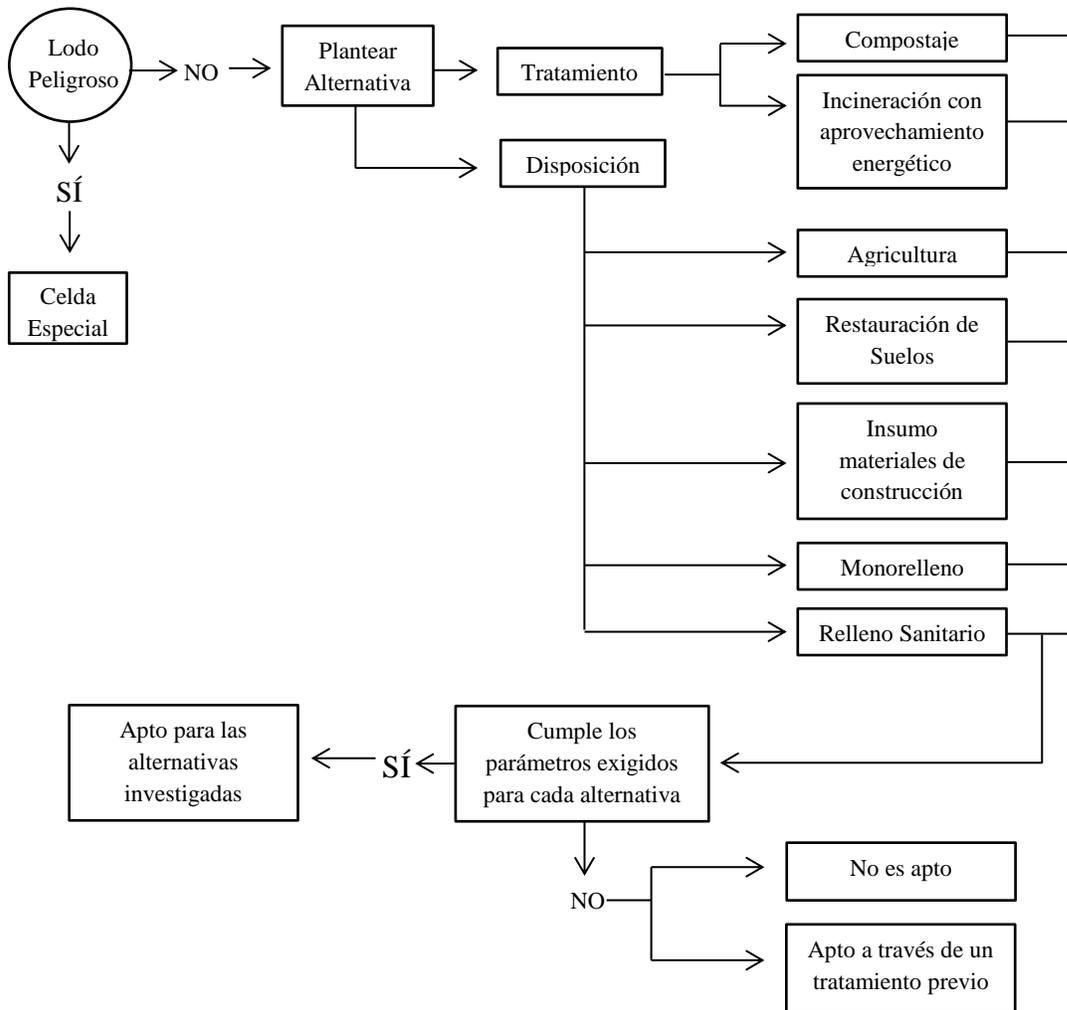


Figura 7. Diagrama de variables representativas para la determinación de alternativas posibles.

6.4 SELECCIÓN ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO:

Con la finalidad de cumplir el último objetivo del estudio, se utilizó el método de selección de alternativas Multicriterio (explicado anteriormente) para elegir la más adecuada.

6.4.1 Criterios para una buena gestión

Se eligieron cinco criterios importantes para cumplir el objetivo planteado, los cuáles fueron: requerimiento de secado, tasa de disposición, aprovechamiento de las propiedades del lodo, disminución de volumen de lodos a disponer y requerimiento de personal especializado. A cada criterio se le asignó un valor de a 1 a 10 según la importancia con su justificación correspondiente, siendo 1 poco importante y 10 muy importante (Tabla 21).

Tabla 21. Criterios para Seleccionar la mejor alternativa

Criterio	Indicador	Peso	Justificación
Requerimiento de secado	%	10	Se asignó el peso más alto porque este criterio depende si la alternativa es apta para ser implementada o necesita de un tratamiento previo, teniendo en cuenta que la humedad inicial del lodo esta entre 40-60%.
Tasa de disposición	Ton/Ha*Año	8	Este peso fue dado debido a que la tasa de disposición es importante teniendo en cuenta que los lodos deben tener un espacio apropiado para ser tratados o dispuestos.
Aprovechamiento de las propiedades del Lodo	Sí o No	10	Este criterio es importante porque de las propiedades del lodo paplero parte la elección de las mejores alternativas, las cuáles serán aprovechadas en el momento de implementar las mejores opciones.
Requerimiento de Personal Especializado	Sí o No	6	Es importante tenerlo en cuenta porque a medida que aumenta la tecnología para cada alternativa aumenta la necesidad de tener personal especializado.

6.4.2 Nivel de Satisfacción de cada Alternativa según los criterios

Se estableció en cuanto cumplen las alternativas cada uno de los criterios en una escala de 1 a 5, siendo 5 el mayor nivel de satisfacción. Para asignar estos valores se construyó una tabla para cada criterio con sus respectivas razones, las cuáles serán explicadas a continuación. Por otra parte se construyó una tabla con las iniciales de cada alternativa (Tabla 22) y facilitar construir las escalas para cada criterio.

Tabla 22. Alternativas

Alternativas	
C-AGR	Compostaje + Agricultura
C-REST	Compostaje + Restauración de Suelos
INC	Incineración con Aprovechamiento Energético + Relleno Sanitario
AGR	Agricultura + Disposición Directa
REST	Restauración de Suelos + Disposición Directa
M	Monorelleno
RSAN	Relleno Sanitario
MC	Fabricación Materiales de construcción

Requerimiento de Humedad

Para definir el nivel de satisfacción de cada alternativa según este criterio y poder construir la escala correspondiente (Tabla 23), se tuvo el nivel de humedad requerida que necesita cada alternativa, y determinar de tipo de tratamiento previo requiere.

Tabla 23. Criterio Requerimiento de Humedad

Requerimiento de Secado		
Nivel de Satisfacción	Porcentaje (%)	Alternativas
1	0-10%	
2	11-20%	INC, MC
3	21-30%	AGR, REST
4	31-40%	
5	41-50%	C-AGR, C-REST, M, RSAN

La razón por la cual se establecieron en este orden los valores de humedad, es porque entre mayor sea la diferencia entre el valor inicial de los lodos papeleros y el apropiado para cada alternativa, se necesitaría de la implementación de un sistema adicional de deshidratación, lo que implica por tanto un costo adicional de inversión y operación.

Teniendo en cuenta los valores asignados en la Tabla 23, se infiere que la alternativa de compostaje, obtiene el mayor nivel de satisfacción, porque los lodos generados en Unibol con una humedad de 40-50%, concuerdan con los valores óptimos (50-70%) requeridos para compostar según Alvarez s.f, y también porque no hay necesidad de deshidratar el lodo debido a que se tiene la humedad requerida. Por otra parte las alternativas de Monorelleno y Relleno Sanitario también tiene un valor de 5 en la escala de clasificación, porque los lodos de Unibol con una humedad de 40-50%, concuerdan con el porcentaje apropiado (45-50%) para los rellenos.

Por otra parte, las alternativas de Agricultura y Restauración de Suelos se les asigno un nivel de 3, porque necesitan reducir este criterio hasta el 30%, porque es el monto necesario para cumplir el requerimiento, logrando una adecuada disposición en los suelos para cultivar o revegetalizar (Phillips et al., 1996; Bonoli & Dall'Arab, 2011).

Por último las alternativas de Incineración con Aprovechamiento Energético y Fabricación de Materiales de Construcción, reciben el menor nivel de satisfacción porque necesitan deshidratar el lodo (utilizando más energía) hasta el 10-15% según Colomer et al., (2009), porque es la humedad mínima requerida para llevar a los hornos de incineración.

Tasa de Disposición

Para definir el nivel de satisfacción de cada alternativa según la Tasa de Disposición y construir la escala correspondiente (Tabla 24), se utilizó la cantidad permitida de Ton/Ha*Año para disponer los lodos en cada alternativa según Metcalf citado en Jiménez 2005.

Tabla 24. Criterio Tasa de Disposición

Tasa de Disposición		
Nivel de Satisfacción	Ton/Ha*Año	Alternativas
1	0-60	C-AGR, AGR, MC
2	61-120	C-REST, REST
3	121-180	
4	181-240	
5	241-300	INC, M, RSAN

Teniendo en cuenta los valores asignados en la Tabla 24, se infiere que las alternativas de incineración + rellenos, monorellenos y relleno sanitario, obtienen el mayor nivel de satisfacción, porque la tasa de disposición para los rellenos es de 300 Ton/Ha*Año, debido a que los rellenos requieren de cierta profundidad por ende la cantidad de este residuo aumenta (Scott et al 2008). Para el compostaje + restauración de suelos y restauración de suelos el nivel de satisfacción es de 2, porque la tasa es de 100 Ton/Ha*Año.

Por otra parte, el compostaje + agricultura y el uso agrícola recibieron un valor de 1 porque la tasa disminuye a 10 Ton/Ha*Año, esto ocurre debido a que si se incrementa la cantidad de residuos dispuestos afecta la estructura del suelo e incrementa la agregación (incremento de los poros, generando resistencia a la desintegración) (FAO, s.f). Mientras que la fabricación de materiales de construcción que tiene como insumo el lodo, son llevados a otras industrias para que realicen su tratamiento y disposición apropiadamente.

Aprovechamiento de las Propiedades del Lodo Papelero

Para definir el nivel de satisfacción de cada alternativa según el aprovechamiento de las propiedades del lodo paplero y construir la escala correspondiente (Tabla 25), se determinó que para cada alternativa se va utilizar solamente el valor de 1 (propiedades no aprovechadas) y el de 5 (propiedades aprovechadas).

Tabla 25. Criterios Aprovechamiento de las Propiedades del Lodo Papelero

Aprovechamiento de las Propiedades del Lodo Papelero		
Nivel de Satisfacción	SI/NO	Alternativas
1	NO	M, RSAN
5	SI	C-AGR, AGR, C-REST, REST, MC, INC

Teniendo en cuenta los datos asignados en la Tabla 25, se infiere que todas las alternativas exceptuando el monorelleno y el relleno sanitario, aprovechan las propiedades del lodo paplero que son: humedad, pH, nutrientes, materia orgánica y carbonato de calcio principalmente, aunque algunas deben ser estabilizadas, para implementarlas con sus respectivas alternativas de disposición.

Requerimiento de Personal Especializado

Para definir el nivel de satisfacción de cada alternativa según el requerimiento de personal especializado y construir la escala correspondiente (Tabla 26), se determinó que para cada alternativa se va utilizar solamente el valor de 1 (personal especializado) y el de 5 (personal no especializado).

Tabla 26. Criterios Requerimiento de Personal Especializado

Requerimiento de Personal Especializado		
Nivel de Satisfacción	SI/NO	Alternativas
1	Personal Especializado	INC, MC
5	Personal No Especializado	C-AGR, AGR, C-REST, REST, M, RSAN

Teniendo en cuenta los datos asignados en la Tabla 26, se infiere que todas las alternativas exceptuando la incineración con aprovechamiento energético + rellenos y la fabricación materiales de construcción, no necesitan personal especializado porque no requieren de grandes maquinarias que necesita un nivel más alto de especialización, como lo son las incineradoras.

6.4.3 Selección de la Alternativa más apropiada según el Método Multicriterio

Teniendo en cuenta la valoración de los criterios para una buena gestión se seleccionó la alternativa más apropiada según el método multicriterio la cual se puede observar a continuación en la Tabla 27.

Tabla 27. Selección de la Mejor Alternativa

CRITERIOS	PESO	ALTERNATIVAS							
		C-AGR	C-REST	INC	AGR	REST	M	RSAN	MC
Requerimiento de Secado	10	5	5	2	3	3	5	5	2
Tasa de Disposición	8	1	2	5	1	2	5	5	5
Aprovechamiento de las propiedades del lodo	10	5	5	5	5	5	1	1	5
Requerimiento de Personal Especializado	6	5	5	1	5	5	5	5	1
Sumatoria Peso Criterio	34	138	146	116	118	126	130	130	116
Total Ponderado		4.06 (2)	4.30 (1)	3.41	3.47	3.70	3.82 (3)	3.82 (3)	3.41

Para seleccionar la mejor alternativa es importante saber que todas las alternativas podrían ser implementados, pero de acuerdo a los criterios valorados en la Tabla 27 en este estudio la mejor alternativa para darle un buen manejo a los lodos papeleros en Unibol S.A según el total ponderado, es el compostaje + restauración de suelos con un 4.30, seguido por el compostaje + agricultura con 4.06 y rellenos con 3.82.

La razón por la cual se considera disponer estos lodos papeleros en el tratamiento de compostaje para restaurar en suelos, primero que todo es porque en el compostaje son estabilizados los nutrientes, la humedad y la materia orgánica para darle la mejor disposición (Roca, 2003), que en este caso resultó ser la restauración en suelos porque la cantidad de materia orgánica que poseen los lodos desempeña un papel muy importante en la conservación del suelo, debido al efecto beneficioso que tiene sobre sus propiedades

biológicas, físicas, químicas, y la protección contra algunas formas de contaminación y degradación (Ribeiro et al 2010).

La segunda opción más apropiada es compostar los lodos papeleros para el uso agrícola, primero que todo como se dijo para la alternativa anterior es porque el compostaje estabiliza estos residuos sólidos, y segundo porque con el uso agrícola aumenta el crecimiento de las plantas y el rendimiento, mejorar la humedad del suelo y la retención de nutrientes (Rashid et al 2006), también permite el retorno de los materiales orgánicos en el ciclo biológico y se evita el uso de fertilizantes artificiales (Werther & Ogada, 1997).

La tercera posibilidad con más alto puntaje son los rellenos (monorelleno y relleno sanitario), debido a que cuenta con un porcentaje de humedad óptimo 45-50% (Kuniholm, s.f), también porque la tasa de disposición alta facilita la disposición de estos lodos en rellenos, teniendo en cuenta que el área disponible en Colombia es alta en comparación con algunos países en Europa. Pero es importante mencionar que no aprovecha las propiedades del lodo papelerero.

Actividades para Implementar la Alternativa Recomendada

Teniendo en cuenta los resultados del método multicriterio y la información consultada (Ribeiro et al 2010; Álvarez s.f) se plantearon diferentes actividades para implementar la mejor alternativa que es el compostaje con disposición en la restauración de suelos

- Identificar y evaluar zonas con potencial para restaurar con lodos papeleros cercanas a Unibol S.A, teniendo en cuenta zonas con estado de protección y las restricciones técnicas, como los recursos hídricos, las zonas urbanas y las zonas de alta pendiente.
- Basándose en la información recogida y el trabajo de campo realizado, procesar y editar la información digital, construir un modelo geográfico, construir nuevos mapas temáticos (perímetro urbano, reservas, fuentes de abastecimientos de agua, flujos o canales, carreteras y el uso de suelo), realizar un análisis espacial de los mapas temáticos y estructurar la información cartográfica
- Estudio de la ubicación de un lugar o punto estratégico para almacenar los lodos, que debe permitir la optimización de su disposición.
- Para seleccionar el punto estratégico se debe producir un mapa de aptitud a partir los mapas temáticos mencionados anteriormente, analizando la información utilizando el software ArcGIS 9.1.
- Luego de seleccionar el punto para disponer los lodos papeleros, realizar estudios de laboratorio para conocer las características del lodo y del terreno.
- Compostar el lodo papeleros producto del tratamiento de aguas.
- Para llevar a cabo este proceso es necesario disponer los lodos dentro de los predios de Unibol en diferentes pilas, acondicionándolos y mezclándolos para regular su contenido de agua, tamaño de las partículas y ajustando los nutrientes logrando una relación adecuada C/N.
- Es importante realizar volteos periódicamente para controlar el olor, lograr una mayor velocidad de transformación y control de insectos.
- Luego de compostar el lodo papeleros y transportarlo al punto seleccionado, disponerlo y realizar revisiones periódicas para verificar el buen funcionamiento de esta alternativa.

7. CONCLUSIONES

Este proyecto de grado se centró, en la evaluación de acciones que permitan optimizar el manejo de los residuos sólidos del sistema productivo del papel Tisú y Kraft, evaluando el proceso, identificando y caracterizando los residuos generados y seleccionando las alternativas más adecuadas a partir del método multicriterio

Del cual se concluye que la mayoría de los residuos generados en Unibol S.A son lodos papeleros provenientes del tratamiento del agua con un 98%. Estos lodos no son peligrosos según los análisis realizados por la Universidad Pontificia Bolivariana en el 2010 y el decreto 4741 de 2005, lo cual facilita su tratamiento y disposición aprovechando las propiedades que tiene este residuo.

De acuerdo el análisis multicriterio y los criterios seleccionados se determinaron que las mejores alternativas son: compostaje para luego disponerlo en restauración de suelos, compostaje con disposición en uso agrícola y llevar los lodos a los rellenos. El compostaje para restauración de suelos y uso agrícola es óptimo para tratar estos lodos, primero que todo porque aprovecha las propiedades del lodo como: humedad (requerimiento común e indispensable para toda las alternativas planteadas), pH, materia orgánica, nutrientes y carbonato de calcio principalmente, además porque no requiere de tanto capital económico y es fácilmente aplicable. Los rellenos a pesar de ser un método económico y que no requiere de operaciones adicionales, no es recomendable porque disminuye el aprovechamiento de varios componentes y materiales útiles para otras alternativas, reduce el área de disposición de otro tipo de residuos aprovechables y no aprovecha las propiedades del lodo papelerero.

Por último el análisis multicriterio elegido para seleccionar las alternativas es un buen método para este estudio, que ha sido ampliamente estudiado y depende del uso que se le dé, estableciendo los óptimos criterios y pesos. Cabría anotar que los resultados están condicionados a los criterios y ponderación asignados en el estudio, y pueden variar dependiendo de quienes utilizan el método, en ese sentido es importante el aporte de todos los actores relacionados como asesores, expertos en el tema, personal responsable del residuo en la industria, empresas de disposición de residuos, autoridades ambientales, etc.

8. RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta los análisis y las conclusiones se determinó que es importante priorizar el manejo de los lodos papeleros, debido a la alta cantidad de toneladas producidas diariamente (38 Ton/Día). También se debe realizar la caracterización de los desechos separados mecánicamente y determinar cómo se deben tratar y disponer teniendo en cuenta lo realizado en este estudio.

Otra recomendación es conocer a mayor profundidad las características físicas y químicas de los lodos papeleros para futuros estudios, porque facilitaría la implementación de diferentes alternativas, además es necesario llevar a cabo un estudio económico de cada una de las alternativas estudiadas para determinar su aplicabilidad. También es necesario incluir factores económicos en el método multicriterio para seleccionar la mejor alternativa evitando que los resultados condicionen a los criterios y ponderación asignados en el estudio.

Por otra parte, se debe caracterizar por aparte los lodos provenientes del Papel Kraft y del Papel Tisú, para conocer si las características de este residuo cambiarían frente a lo consultado y revisado para este proyecto de grado, también sería necesario montar pruebas de compostaje piloto para determinar la calidad del compost y realizar entrevistas en la industria de Unibol S.A para conocer la percepción de los dueños frente a la importancia de cada criterio o la incorporación.

Por último, es necesario investigar y adquirir más conocimiento sobre los usos del lodo paplero, especialmente para la fabricación de materiales de construcción utilizando como insumos este residuo, y crear redes o alianzas con industrias incineradoras, ladrilleras y cementeras logrando un beneficio mutuo, disminuyendo los costos de otros productos y generando el mínimo desperdicio.

9. REFERENCIAS

Ahmadi, B. & Al-Khaja, W. (2001) Utilization of paper waste sludge in the building construction industry. *Resour. Conserv. Rec*, 32, 105–113.

Alvarez, J. (s.f) Manual del Compostaje para agricultura ecologica, Junta de Andalucia.

Alonso et al. (2003) *Manual para la gestión de los residuos urbanos*, Madrid, Ecoiuris.

Arroyabe, L. (2010) Propuestas de Alternativas de Gestión Ambiental para la Apropiación e Implementación del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos del municipio de Turbaco – Bolívar. Tesis de Maestría en Gestión Ambiental, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.

Aspapel Naturalmente Papel (2008). Guía de Gestión de Residuos (Fábricas de Pasta, Papel y Cartón), España, Aspapel.

Barrios, J. (2009). Aspectos generales del manejo de lodos. [en línea], [citado 3 de Mayo de 2013] <http://academiadeingenieriademexico.mx/archivos/talleres/aprovechamiento-lodos/Aspectos%20Generales%20del%20Manejo%20de%20Lodos.pdf> disponible en:

Bonoli, A & Dall'Ara, A. (2011) A bioremediation case of an ex-quarry area restored by paper sludge. *Journal of Biotechnology*, 157, 499-504.

Betanzos, P. (2006) Análisis del proceso de producción de papel reciclado en la planta, Industrias Centauro de Durango, DGO. Título de Ingeniero en Tecnología de la madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, San Nicolás de Hidalgo.

Cadreja, J. (2001) Medio Ambiente para todos. Bogotá, Colombia.

Caputo, A.C. & Pelegagge, P.M. (2000), Waste-to-energy plant for paper industry sludges disposal: technical-economic study, *Journal of Hazardous Materials*, 81, 265-283.

Charest, M.H., Antoun, H. Beauchamp, C.J. (2003) Dynamics of water-soluble carbón substances and microbial populations during the composting of de-inking paper sludge, *Bioresourse Technology*, 91, 53-67.

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2005, 23 de Marzo) “Decreto número 838 de 2005. *Diario Oficial*, núm. 44.893, 28 de Marzo de 2005, Bogotá.

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2005, 30 de Diciembre) “Decreto 4741 de 2005. *Diario Oficial*, núm. 46137, 30 de Diciembre de 2005, Bogotá.

Colombia, Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (2008), “Construcciones de criterios técnicos para el apto aprovechamiento y valorización de residuos sólidos orgánicos con altas tasas de biodegradación, plásticos, vidrio, papel y cartón” [documento de trabajo]

Colomer, F.J., Gallardo, A., Bovea, M.D., Carlos, M. & Herrera, L. *et al.* (2009). Characterization of different sludge from municipal and industrial sewages treatment plants. *Ingeniería*, 14, 235-245.

Conesa, F. (1997), Los instrumentos de la gestión ambiental en la empresa, Madrid, Mundi-Prensa.

CONPES, (2008) Documento Conpes 3530: Lineamientos y estrategias para fortalecer el servicio público de aseo en el marco de la gestión integral de residuos sólidos.

Corporación Autónoma del Atlántico [CRA], (2009) Resolución N° 000266.

Corporación Autónoma del Atlántico [CRA], (2011) Resolución N° 000953.

Díaz, Y., Martirena, J. & Betancur, D. (2011). Evaluación del uso del carbonato de calcio como aditivo fundente en la producción de ladrillos de cerámica roja. Investigación y Desarrollo, Universidad Central “Marta Abreu” de las villas, Santa Clara.

Environmental Sciences Division (ESD), (1999), Standars and Guidelines for the land application of mechanical pulp mil sludge to agricultural land, Alberta Environmental Protection.

EPA (1989) CFR-40 Cap 503 Propuesta de norma. Directrices lodos. 09 1989 Registro Federal, revisado y publicado como CFR-40 503 cap. Regla Final. Febrero 1993.

EPA (2012) CFR Cap 261 Propuesta de norma. Identificación y el listado de los residuos peligrosos. 07 2012 Registro Federal, revisado y publicado como CFR-40 Cap 261. Regla Final. Septiembre 2012.

Esparza Rodríguez, J.P. (2004), Uso de lodo biológico proveniente del tratamiento de efluentes de la industria de la celulosa como mejorador de suelos degradados [tesis de maestría], Temuco-Chile, Universidad de la Frontera, Maestría en Ciencias de Recursos Naturales.

European Commission (2006), Waste Incineration, Europe.

Food and Agriculture Organizations of the UNITED Nations (FAO) (s.f) “Conservación de los recursos naturales para una agricultura sostenible. Manejo de la humedad del suelo”.

Garcia Monica, M. *et al.* (2010), Fundamentos del diseño en la ingeniería, México, Limusa.

GC GOMA-CAMPS (2011) La gestión de residuos como subproductos. Fangos de Depuradora para fabricar ladrillos [en línea], [citado 13 de Julio de 2012] disponible en: http://www20.gencat.cat/docs/arc/Home/LAgencia/Agenda/2011/09-20%20Jornada%20de%20supproductes/Ponencies/Goma%20Camps_es.pdf.

Gea, T., Artola, A. & Sanchez, A. (2004) Composting of de-inking sludge from the recycled paper manufacturing industry, *Bioresource Technology*, 96, 1161-1167.

Government of Alberta (2010) “Standars for landfills in Alberta”.

Hernández, I. & Hernández., J. (2010) Control Automático de Flujos Químicos para el Acondicionamiento del Secador Yankee. Tesis para obtener título de Ingeniero en Control y Automizacion, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Profesional “Adolfo López Mateos”, México.

Ingeniería en Sistemas Energéticos y Ambientales ISEA (2012) Relleno Sanitario [en línea], [citado 15 de Octubre de 2012] disponible en: http://isea.webcindario.com/index_archivos/rsu.htm.

Jiménez, B.E. (2001) La contaminación ambiental en México causas, efectos y tecnología apropiada. Limusa Noriega Editores. México.

Kuniholm, P. (s.f) Basic Landfill Bioreactor Kinetic Model [en línea], [citado 14 de Mayo de 2012] disponible en: [http://www.scsengineers.com/Papers/Archived_Papers/Kuniholm_\(2002\)_Basic_Landfill_Bioreactor_Kinetic_Model-WasteCon.pdf](http://www.scsengineers.com/Papers/Archived_Papers/Kuniholm_(2002)_Basic_Landfill_Bioreactor_Kinetic_Model-WasteCon.pdf)

Lozano Brazo, J.E. (2005), Memoria Técnica de la Implementación del Sistema de Tratamiento Externo de Efluentes en Papelera Nacional S.A [trabajo de grado], Quayaquil, Escuela Superior Politécnica del litoral, Carrera de Ingeniería Mecánica.

Lund, H. 1996. Manual McGraw-Hill de Reciclaje. Madrid.

Luo, W., Chen, T.B., Zheng, G.D., Gao, D., Zhang, Y.A. & Gao W. et al. (2007). Effect of Moisture adjustments on vertical temperature distribution during forced-aeration static-pile composting of sewage sludge, *Resources Conversion Recycling*, 52, 635-642.

Marche, T., Schnitzer, M., Dinel, H., Pare, T., Champagne, P., Schulten, H. R. & Facey, G. (2003). Chemical changes during composting of a paper mill sludge-hardwood sawdust mixture, *Geoderma*, 116, 345-356.

Maripapel (s.f) “Química del Extremo Húmedo: Carbonato de Calcio” [en línea] [citado 7 de mayo de 2013], disponible en: <http://www.maripapel.com/200807181246/articulos/papel-y-tisú/quimica-del-extremo-humedo-carbonato-de-calcio.html>.

Marmolejo, L., Torres, P., Oviedo, R., García, M., & Díaz L. (2011). Análisis del funcionamiento de plantas de manejo de residuos sólidos en el norte de valle del cauca, Colombia. *Revista EIA*, 16, 163-174.

Martínez, J. (2003). Ecología Industrial y Metabolismo Socioeconómico: concepto y evolución histórica. *Economic Industrial*, N° 351.

Martinez, C., Cotes, T. & Corpas F.A. (2011), Recovering wastes from the paper industry: Development of ceramic materials, *Fuel Processing Technology*, 103, 117-124

McManus, P., & Gibbs, D. (2008). ¿Industrial ecosystems? The use of tropes in the literature of industrial ecology and eco-industrial parks. *Progress in Human Geography*, 32, 525-540.

Monte, M.C., Fuente, E. & Negro, B.C (2008), Waste management from pulp and paper production in the European Union. *Waste Management*, 29, 293-308.

“Noticias” (2012), [emisión radial], Pérez, C., Radio UNAM Noticias, México.

Nutini, D.L. & Kinman, R.N (1991). Use of screw-pressed paper sludge as landfill cover. *Waste Materials in Construction*, 637-642.

Ochoa de Alda, J. A. G. (2008). Feasibility of recycling pulp and paper mill sludge in the paper and board industries. *Resources, Conservation and Recycling*, 52, 965-972.

Papeles Higiénicos del Centro, S.A. de C.V. (s.f) Proyecto: Planta de Elaboración de Papel Higiénico, en el Municipio de Tepeapulco, Hidalgo. Papeles Higiénicos del Centro, S.A. de C.V. México.

Pearce, T.G., Budd, T., Hayhoe, J.M., Sleep, D. & Clasper, P. *et al.*, (2003) Earthworms of a land restoration site treated with paper mill sludge, *Pedobiologia*, 47, 792-795.

Phillips V.R., Kirkpatrick, N., Scotford, I.M., White, R.P. & Burton, R.G. *et al*, (1997) The use of paper-mill sludges on agricultural land, *Bioresourse Technology*, 60, 73-80.

Pope, K. (1999). Paper Sludge – Waste Disposal Problem or Energy Opportunity. *Energy Products of Idaho*.

Quinchia, A., Valencia M. & Giraldo, J. (2007), Uso de lodos provenientes de la industria papelera en la elaboración de paneles prefabricados para la construcción, *Revista EIA*, 8, 9-19.

Ramírez, J., Carrillo, A., Campos, E. & Herrera G. (2009). Desarrollo de un sistema para la quema de diferentes residuos y desechos en un lecho fluidizado. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 5, 92-97.

Rajput, D., Bhagade, S.S., Raut, S.P., Ralegaonkar, R.V & Mandavgane, S.A. *et al*, (2012) Reuse of cotton and recycle paper mill waste as building material, *Construction and Building Materials*, 34, 470-475.

Rashid, M.T., Barry, D. & Goss M. (2006) Paper mill biosolids application to agricultural lands: benefits and environmental concerns with special reference to situation in Canada, *Soil and Environment*, 25, 85-98.

Rato, J., Cabral, F. & Lopez, A. (2007) Short-term effects on soil properties and wheat production from secondary paper sludge application on two Mediterranean agricultural soils, *Bioresource Technology*, 99, 4935-4942.

Ribeiro, P., Albuquerque, A., Quinta, L. & Cavaleiro, V. (2010) Recycling pulp mill sludge to improve soil fertility using GIS tools, *Resour. Conserv. Rec*, 54, 1303-1311.

Roca, L. (2003) Compostaje. *Revista Perspectiva Ambienta*, 28, 1-34.

Rodríguez, M. & Espinoza G. (2002) Gestión ambiental en América Latina y el Caribe: Evolución, tendencias y principales prácticas. Banco Interamericano de Desarrollo, Washington.

Sarmiento, M., correo electronico msarmiento@unibol.con.co, Febrero 18, 2013.

Scott, G. (1995) Sludge characteristics and disposal alternatives for the pulp and paper industry. International environmental conference, 269-279.

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (2010) Situación de la Disposición final de Residuos Sólidos en Colombia.

Tchonbanoglous, G., Theisen, H. & Vigil, S. (1996) Gestión Integral de Residuos Sólidos. Volumen I. McGraw-Hill. España.

Torras Papel S.A (s.f). Formación Fabricación del Papel. [en línea], [citado 7 de mayo de 2013] disponible en: <http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1348-central-rsu>.

“Textos Científicos” (s.f) [en línea], [citado 3 de mayo de 2013] disponible en <http://www.textoscientificos.com/papel/pulpa/blanqueo>.

Universidad Pontificia Bolivariana (2010). Análisis de Peligrosidad Lodo UPB.

Werther, J. & Ogada, J. (1997), Sewage sludge combustion, *Progress in energy and combustion science*, 25, 55-116.

10. ANEXOS

10.1 FOTOGRAFIAS INDUSTRIA UNIBOL S.A

Ilustración 1. Transporte materia prima seleccionada (Papel Recuperado y Fibra Virgen)



Ilustración 2. Materia prima seleccionada de Papel Recuperado y Fibra Virgen (Unibol S.A)



Ilustración 3. Fabricación Papel Tisú. Fases de Secado, Crepado y Enrollado (Unibol S.A)



Ilustración 4. Rollo de papel tisú listo para ir a la sección de Conversión. (Unibol S.A)



Ilustración 5. Diagrama del Sistema Productivo del Papel Tisú y Kraft

