



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL**

**Sede Santo Domingo**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL Y SISTEMAS DE GESTIÓN**

Tesis de grado previo a la obtención del título de:

**INGENIERO AGROINDUSTRIAL, MENCIÓN EN ALIMENTOS**

**CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS DOMÉSTICOS DE ESTACIÓN  
EXPERIMENTAL SANTO DOMINGO (INIAP) A SER UTILIZADOS EN LA  
PRODUCCIÓN DE GAS DE SÍNTESIS**

**Estudiante:**

MIGUEL ANGEL JARAMILLO CAMPOVERDE

**Director de Tesis:**

ING. JUAN Crespín

Santo Domingo de los Tsáchilas – Ecuador

ABRIL, 2015

**CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS DOMÉSTICOS DE ESTACIÓN  
EXPERIMENTAL SANTO DOMINGO (INIAP) A SER UTILIZADOS EN LA  
PRODUCCIÓN DE GAS DE SÍNTESIS**

Ing. Juan Crespín

**DIRECTOR DE TESIS**

---

**APROBADO**

Ing. Daniel Anzules

**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

---

Ing. Alejandro Bermúdez

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

---

Ing. Elsa Burbano

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

---

Santo Domingo .....de.....2015.

**Autor: MIGUEL ANGEL JARAMILLO CAMPOVERDE**  
**Institución: UNIVERSIDAD TECNOLÒGICA EQUINOCCIAL**  
**Título de Tesis: CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS**  
**DOMÉSTICOS DE ESTACIÓN EXPERIMENTAL**  
**SANTO DOMINGO (INIAP) A SER UTILIZADOS**  
**EN LA PRODUCCIÓN DE GAS DE SÍNTESIS**  
**Fecha: ABRIL, 2015**

El contenido del presente trabajo, está bajo la responsabilidad del autor.

---

Miguel Angel Jaramillo Campoverde  
C.I. 172138097-7

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL**  
**Sede Santo Domingo**

**INFORME DEL DIRECTOR DE TESIS**

Santo Domingo.....de.....del 2015

Ing. Daniel Anzules

**COORDINADOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL**

Estimado Ingeniero

Mediante la presente tengo a bien informar que el trabajo investigativo realizado por el señor: **MIGUEL ANGEL JARAMILLO CAMPOVERDE**, cuyo tema es: **CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS DOMÉSTICOS DE ESTACIÓN EXPERIMENTAL SANTO DOMINGO (INIAP) A SER UTILIZADOS EN LA PRODUCCIÓN DE GAS DE SÍNTESIS**; ha sido elaborado bajo mi supervisión y revisado en todas sus partes, por lo cual autorizo su respectiva presentación.

Particular que informo para fines pertinentes

Atentamente.

---

Ing. Juan Crespín  
**DIRECTOR DE TESIS**

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, pues habita en todas las cosas y producto de su enorme fuerza y de su bondadosa voluntad existo ahora mismo como ser humano integral y a punto de culminar con una sana ambición de toda la vida, la cual fue, es y será realizarme académicamente.

Se lo dedico también a mis primeros maestros, mis padres, Àngel y Amada porque desde el momento en que balbucee mis primeras palabras sembraron en mí el hambre del aprendizaje, se lo dedico a mis hermanos María Beatriz y Luis porque junto a mis padres son mi tesoro, mi razón de ser, y no me cansaría jamás de dedicarles cada logro que mi voluntad lograra, porque quiero que no solo lleguen a realizarse sino a superarme y a ser personas modelo en el servicio de la familia y del prójimo.

Finalmente dedico este trabajo a todas aquellas personas que han visto sus sueños amenazados por los azares de la vida, conviertan la lucha en su forma de ser y las derrotas en los ladrillos de su escalera, les puedo asegurar que las montañas más altas están ahí para ser vencidas, el esfuerzo vale la pena.

*Miguel Angel Jaramillo Campoverde*

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios, por enseñarme lecciones que sin su guía jamás hubiera podido aprender.

Agradezco a mamá y papá, Amada y Ángel por estar ahí siempre brindándome su apoyo incondicional, por confiar en mí y ser un motor de empuje y un ejemplo de lucha incansable y de amor infinito.

A mis hermanos Luis y Beatriz por compartir su vida conmigo y aprender juntos a formar nuestro carácter, por estar conmigo en los buenos y malos momentos.

A mis amigos de quien llevo muy gratos recuerdos de los días de aulas, supieron ser solidarios y receptivos cuando más lo necesité, gracias Paulina, Mafer, Sebas, Paul, Carlos, Leonardo, Klesman, Alex Sanchez, Daniel, Victor, Carla. A Andrea por todo su amor y su apoyo empujándome día a día a que cumpla mis sueños.

A mis demás familiares que pusieron su fe en mí y me sostuvieron cuando estuve caído, en especial a mi tía Vilma Jaramillo y a mi prima Anabel Zapater cuyo soporte en tiempo de crisis hizo viable la culminación de esta carrera universitaria.

A mis maestros de cuya sabiduría soy deudor, especialmente a mi director de tesis, el ingeniero Juan Crespín, de igual manera a las instituciones que me dieron cabida para formarme como profesional en primera instancia la UTE y en segunda el INER.

**Gracias.**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

TEMA	PÁG.
Portada.....	i
Sustentación y aprobación de los integrantes del tribunal.....	ii
Responsabilidad del autor.....	iii
Informe del director de tesis.....	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimiento.....	vi
Índice.....	vii
Resumen ejecutivo.....	xvii
Executive summary.....	xviii

### CAPÍTULO I

#### INTRODUCCIÓN

1.1	Enunciado del tema.....	1
1.1.1	Planteamiento del problema.....	1
1.1.2	Justificación.....	3
1.1.3	Alcance.....	5
1.1.4	Objetivos.....	5
1.1.4.1	Objetivo general.....	5
1.1.4.2	Objetivos específicos.....	5
1.2	Hipótesis.....	6
1.2.1	Ho: hipótesis nula.....	6
1.2.2	Ha: hipótesis alternativa.....	6
1.2.3	Metodología de la investigación.....	6
1.2.4	Operacionalidad de la hipótesis.....	7
1.2.5	Variables.....	7

1.2.5.1	VARIABLES INDEPENDIENTES .....	7
1.2.5.2	VARIABLES RESPUESTA .....	7
1.3	POBLACIÓN DE ESTUDIO .....	7
1.3.1	LA POBLACIÓN .....	7
1.3.2	FORMULACIÓN DE LA MUESTRA .....	8

## CAPÍTULO II

### MARCO DE REFERENCIA

2.1	MARCO CONCEPTUAL.....	9
2.1.1	RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	9
2.1.2	GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS. ....	9
2.1.3	ELEMENTOS FUNCIONALES DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS. ....	10
2.1.4	SEPARACIÓN, PROCESAMIENTO Y TRANSFORMACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS.....	10
2.1.5	VALORACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS .....	12
2.1.6	APROVECHAMIENTO TÉRMICO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS. ....	12
2.1.7	GASIFICACIÓN Y PIRÓLISIS DE RESIDUOS SÓLIDOS.....	13
2.1.8	PRINCIPIOS TERMOQUÍMICOS DE LA GASIFICACIÓN. ....	14
2.1.9	PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES POR LAS RUTAS TERMOQUÍMICAS - GASIFICACIÓN ....	17
2.1.9.1	HISTORIA .....	18
2.1.9.2	TIPOS DE GASIFICADORES .....	19
2.1.9.2.1	GASIFICADORES DE LECHO FIJO. ....	20
2.1.9.2.2	GASIFICADORES DE LECHO FLUIDIZADO.....	20
2.1.9.3	CALIDAD Y LIMPIEZA DEL GAS DE SÍNTESIS. ....	20
2.1.9.4	REACCIONES QUÍMICAS DENTRO DEL GASIFICADOR.....	21
2.1.9.5	PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES A PARTIR DEL GAS DE SÍNTESIS.....	22
2.1.9.6	CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS.....	23
2.1.9.6.1	ASPECTOS ENERGÉTICOS. ....	25
2.1.9.7	PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO POR LA REACCIÓN DE CAMBIO AGUA-GAS.....	26
2.1.9.8	PRODUCCIÓN DE METANOL .....	26
2.1.9.9	SÍNTESIS FISCHER-TROPSCH.....	27



2.1.10	Propiedades de los residuos sólidos domésticos.....	28
2.1.10.1	Poder calorífico.....	28
2.1.10.2	La humedad .....	28
2.1.10.3	Criterio de desconexión en el medidor de humedad.....	30
2.1.10.3.1	Pérdida de peso por unidad de tiempo .....	30
2.1.10.4	Granulometría .....	31

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

3.1	Marco metodológico.....	32
3.1.1	Diseño o tipo de investigación.....	32
3.2	Método de investigación.....	33
3.3	Técnica de investigación.....	33
3.4	Materiales, instrumentos y recursos. ....	34
3.4.1	Materiales .....	34
3.4.2	Equipos .....	34
3.4.3	Reactivos.....	35
3.5	Diagrama de flujo cualitativo de pre-proceso de gasificación de residuos sólidos domésticos.....	36
3.5.1	Memoria técnica para la clasificación de RSD a nivel de laboratorio en el INIAP.....	38
3.6	Composición de residuos sólidos domésticos de INIAP - estación experimental santo domingo. ....	41
3.6.1	Ubicación del sitio de estudio.....	41
3.6.2	Método de muestreo. ....	42
3.7	Diseño experimental .....	42
3.7.1.1	Factores y niveles para el diseño experimental. ....	43
3.7.1.2	Interacciones y tratamientos. ....	44
3.7.1.3	Variables a medir.....	45

3.8	Diagrama de flujo cuantitativo de pre-proceso de gasificación de residuos sólidos domésticos a nivel de laboratorio.....	46
3.9	Diagrama de flujo cuantitativo de proceso de gasificación de residuos sólidos domésticos a nivel de planta piloto. ....	48

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	Composición de residuos sólidos domésticos Estación Experimental Santo Domingo INIAP. ....	50
4.2	Método estándar de determinación de humedad de residuos sólidos domésticos mediante termo-balanza.....	51
4.2.1	Análisis de sensibilidad .....	51
4.2.1.1	Residuos de papel y derivados.....	52
4.2.1.2	Residuos plásticos.....	52
4.2.2	Métodos estándar de determinación de humedad.....	53
4.2.2.1	Fuentes de varianza y grados de libertad.....	53
4.2.3	Resultados y referencias de los análisis estadísticos. ....	55
4.2.3.1	Resultados obtenidos de humedad.....	55
4.2.3.2	Resultados obtenidos de tiempo. ....	57
4.2.3.3	Residuos sólidos orgánicos.....	58
4.2.3.4	Residuos de papel y derivados.....	60
4.2.3.5	Residuos plásticos.....	62
4.3	Análisis elementales y proximales de residuos sólidos domésticos. ....	63
4.3.1	Residuos sólidos orgánicos.....	63
4.3.2	Residuos de papel y derivados.....	63
4.3.3	Residuos plásticos.....	64
4.4	Obtención de datos de secado de RSD. ....	65
4.4.1	Datos y cálculos de laboratorio.....	65
4.4.1.1	Peso inicial de agua .....	65
4.4.1.2	Peso de agua de la masa seca.....	66

4.4.1.3	Peso inicial del agua .....	66
4.4.1.4	Peso de la muestra seca.....	66
4.4.1.5	Porcentaje de humedad inicial .....	66
4.4.1.6	Porcentaje de humedad final.....	67
4.4.1.7	XT Pérdida de humedad .....	67
4.4.1.8	Contenido de humedad .....	67
4.4.1.9	Velocidad de secado .....	68
4.4.1.10	Datos obtenidos de contenido de humedad en la curva de secado. ....	69
4.4.1.11	Tiempo teórico de secado. ....	69
4.5	Tabla de resultados. ....	71

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1	Conclusiones.....	72
5.2	Recomendaciones .....	73
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>75</b>
	<b>ANEXOS</b> .....	<b>79</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Principio químico de la gasificación.....	15
Figura 2: Etapas de la gasificación.....	15
Figura 3: Proceso de descomposición térmica por oxidación parcial. ....	16
Figura 4: Zonas de reacción en un gasificador.....	22
Figura 5: Ubicación de INIAP EESD, el marcador rojo corresponde a la ubicación de la planta dentro de la estación. ....	41
Figura 6: Superficie de respuestas para determinación de humedad en residuos orgánicos. ....	59
Figura 7: Superficie de respuestas para determinación de humedad en residuos de papel y derivados.....	61
Figura 8: Respuestas diseño experimental de residuos plásticos. ....	62
Figura 9: Velocidad de secado de RSD en secador de bandejas a nivel de laboratorio. ..	68
Figura 10: Contenido de humedad. ....	69
Figura 12: Ensayo termo-balanza versus estufa de secado.....	99
Figura 13: Gráfico comparativo termo-balanza versus estufa de secado .....	102
Figura 14: Rango de temperaturas para determinar humedad de residuos orgánicos mediante la termo-balanza.....	102
Figura 15: Termo-balanza versus estufa de secado con diferentes tamaños de partícula. ....	104
Figura 16: Tiempos de medición con diferentes tamaños de partículas.....	105
Figura 17: Influencia de la cantidad de masa en la determinación de humedad de residuos orgánicos.....	106
Figura 18: Diferencia de tiempos medios por la influencia de la cantidad de masa en la determinación de humedad de residuos orgánicos. ....	107
Figura 19: Fidelidad con el método de referencia según la cantidad de masa residuos orgánicos.....	107
Figura 20: Distribución de la muestra en el plato de aluminio.....	108
Figura 21: Precisión de criterios de desconexión en determinación de humedad de residuos orgánicos mediante termo-balanza. ....	111
Figura 22: Fidelidad con el método de referencia según la temperatura de residuos de papel y derivados.....	113

Figura 23: Precisión de criterios de desconexión para con el método de determinación de humedad referencial de residuos de papel y derivados. ....	114
Figura 24: Secador de bandejas. ....	115
Figura 25: Dimensiones secador de bandejas. ....	121
Figura 26: Área de paredes de secador de bandejas. ....	124
Figura 27: Superficie de bandejas. ....	130
Figura 28: Dibujo bloque de tubos de vapor. ....	145
Figura 29: Bloque de tubos de vapor. ....	146

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Análisis elemental de diferentes tipos de material residual. ....	24
Tabla 2:	Factores y niveles de estudio (residuos orgánicos). ....	43
Tabla 3:	Factores y niveles de estudio (residuos papel). ....	43
Tabla 4:	Factores y niveles de estudio (residuos plásticos). ....	43
Tabla 5:	Combinaciones de los tratamientos experimentales. ....	44
Tabla 6:	Combinaciones de los tratamientos experimentales. ....	44
Tabla 7:	Combinaciones de los tratamientos experimentales. ....	45
Tabla 8:	Variables dependientes. ....	45
Tabla 9:	Composición de RSD INIAP 2014. ....	50
Tabla 10:	Formulación para análisis de humedad (diseño experimental). ....	51
Tabla 11:	Rangos de variables de residuos sólidos orgánicos. ....	51
Tabla 12:	Rangos de variables de residuos de papel y derivados. ....	52
Tabla 13:	Rangos de variables de residuos de plástico. ....	52
Tabla 14:	Análisis de varianza humedad en residuos sólidos orgánicos. ....	53
Tabla 15:	Análisis de varianza humedad en papel y derivados. ....	53
Tabla 16:	Análisis de varianza humedad en plástico residual. ....	54
Tabla 17:	Análisis de varianza tiempo en residuos sólidos orgánicos. ....	54
Tabla 18:	Análisis de varianza tiempo en papel y derivados. ....	54
Tabla 19:	Análisis de varianza tiempo en residuos plásticos. ....	55
Tabla 20:	Resultados diseño experimental de residuos sólidos orgánicos. ....	55
Tabla 21:	Resultados diseño experimental de residuos de papel y derivados. ....	56
Tabla 22:	Resultados de diseño experimental de residuos plásticos. ....	56
Tabla 23:	Resultados de diseño experimental residuos sólidos orgánicos. ....	57
Tabla 24:	Resultados de diseño experimental residuos de papel y derivados. ....	57
Tabla 25:	Resultados de diseño experimental de residuos plásticos. ....	58
Tabla 26:	Respuestas diseño experimental de residuos plásticos. ....	62
Tabla 27:	Análisis elementales residuos orgánicos. ....	63
Tabla 28:	Análisis proximales residuos orgánicos. ....	63
Tabla 29:	Análisis elementales residuos de papel y derivados. ....	63
Tabla 30:	Análisis proximales residuos de papel y derivados. ....	64
Tabla 31:	Análisis elementales plástico residual. ....	64

Tabla 32: Análisis proximales plástico residual .....	64
Tabla 33: Datos de secado de RSD. ....	65
Tabla 34: XT Pérdida de la humedad. ....	67
Tabla 35: Velocidad de secado. ....	68
Tabla 36: Contenido de humedad.....	69
Tabla 37: Resumen de resultados obtenidos en los cálculos. ....	71
Tabla 38: Métodos estándar de determinación de humedad de RSD.....	72
Tabla 39: Dimensiones de secador de bandejas para RSD.....	73
Tabla 40: Comparación de los métodos de muestreo de RSD .....	91
Tabla 41: Composición de los RSD de INIAP EESD.....	94
Tabla 42: Composición en porcentajes por sub-categorías de residuos orgánicos.....	94
Tabla 43: Composición en porcentajes por sub-categorías de residuos de papel.....	95
Tabla 44: Composición en porcentajes por sub-categorías de los residuos plásticos. ....	95
Tabla 45: Ensayo termo-balanza versus estufa de secado.....	99
Tabla 46: Influencia de la temperatura en la determinación de humedad en residuos sólidos orgánicos mediante termo-balanza. ....	101
Tabla 47: Influencia del tamaño de partícula en la determinación de humedad para residuos sólidos orgánicos mediante termo-balanza.....	103
Tabla 48: Influencia de la cantidad de masa en la determinación de humedad para residuos sólidos orgánicos mediante termo-balanza.....	106
Tabla 49: Diferencias, muestra sin expandir y muestra expandida .....	109
Tabla 50: Influencia del criterio de desconexión en la determinación de humedad para residuos sólidos orgánicos mediante termo-balanza. ....	110
Tabla 51: Influencia de la temperatura en determinación de humedad de residuos de papel mediante termo-balanza.....	112
Tabla 52: Criterios de desconexión en residuos de papel y derivados. ....	114

## ÍNDICE DE ANEXOS.

- Anexo 1: Imágenes de muestreo y caracterización de RSD.
- Anexo 2: Análisis elemental y proximal de materia prima.
- Anexo 3: Comparación de métodos de muestreo de RSD.
- Anexo 4: Composición de residuos sólidos.
- Anexo 5: Comparación de la termo-balanza y la estufa de desecación.
- Anexo 6: Estudios preliminares de sensibilidad de termo-balanza.
- Anexo 7: Balance de energía a nivel de laboratorio, para el secado de RSD.
- Anexo 8: Diseño de un secador de bandejas para residuos sólidos domésticos.



## RESUMEN EJECUTIVO

El presente proyecto realizado en el INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias) sede Santo Domingo a cargo del INER (Instituto Nacional de eficiencia energética y energías renovables) tiene como finalidad la conversión de residuos sólidos domésticos (RSD) en materia prima para co-gasificación y obtención de gases de síntesis que a su vez serán utilizados en proceso de *Fischer-Tropsch* para elaboración de combustible líquido de alto rendimiento (biodiesel). Se contribuirá a la reducción de residuos sólidos generados por domicilios mediante su valorización energética. Se realizó durante 14 semanas muestreo aleatorio de los 33 domicilios ubicados en el INIAP Santo Domingo, de manera que, muestreando aleatoriamente 3 domicilios por semana se logró cubrir el 100% de la población durante el periodo de investigación. El método de muestreo escogido fue el NT Envir 001.

Se estandarizó métodos de determinación de humedad para los elementos de los RSD, los cuales son: residuos orgánicos, de papel y derivados y plásticos. La tirada del diseño experimental se realizó mediante la postulación de valores mínimos y máximos de las variables para obtener una superficie de respuestas. El método escogido para los residuos orgánicos fue 145°C, 3 gr de muestra y criterio de desconexión de 1 mg/50s, para el papel y sus derivados 130°C, 2 gr de muestra y criterio de desconexión de 1 mg/10s y para los plásticos residuales 100°C, 0,5 gr de muestra y criterio de desconexión de 1 mg/50s.

Se diseñó pre-proceso de conversión de RSD en materia prima de gasificación, se diseñó un secador de bandejas con capacidad de 100kg/6h con la temperatura ajustada a 80 °C. Se realizaron análisis proximales y elementales de las muestras secas para determinar su formulación.

## EXECUTIVE SUMMARY

The present project , which has been done in INIAP (National Institute of Agricultural Research) headquarters Santo Domingo by the INER, (National Institute of energetic efficiency and renewable energies) aims the conversion of household solid waste (HSW) into raw material for co-gasification and obtaining synthesis gas which in turn will be used in Fischer-Tropsch process for making high performance liquid fuel (biodiesel).It Will contribute to the reduction of solid waste generated by households through energy recovery. Random sampling of the 33 homes located in INIAP, Santo Domingo for 14 weeks, sampling randomly three homes per week managed to cover 100% of the population during the period of investigation. The sampling method chosen was NT Envir 001.

Moisture determination methods were standardized for the usable elements in the HSW such as: Organic waste, paper with its derivatives and plastics. The scheme of the experimental design was performed by application of minimum and maximum values of the variables to obtain a response surface. The method chosen for organic waste was 145 ° C, 3 g of sample and switch-off criterion of 1 mg / 50s, for paper and its derivatives 130 ° C, 2 g of sample and switch-off criterion of 1 mg / 10s and for waste plastic 100 ° C, 0.5 g of sample and switch-off criterion of 1 mg / 50s.

A pre-conversion process of HSW in gasification feedstock was designed, a tray dryer with capacity of 100kg / 6h with the temperature set at 80 ° C . Proximal and elementary analysis of the dried samples to determine their formulation were performed.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Enunciado del tema.

Caracterización de residuos sólidos domésticos de Estación Experimental Santo Domingo (INIAP) a ser utilizados en la producción de gas de síntesis.

#### 1.1.1 Planteamiento del problema.

El manejo de residuos sólidos en los países en vías de desarrollo ha presentado históricamente un derrotero común: la ineficiencia; alimentada por varios factores como el desmedido aumento poblacional, las crisis políticas, la corrupción institucional, entre otros ha significado que hasta el año 2010 en el Ecuador de un total de 221 municipios 160 de ellos almacenaban sus desechos en botaderos a cielo abierto, y todo el perjuicio que ello conlleva hacia la población como víctima directa e indirecta, los 61 municipios que restan, disponían sus desechos en rellenos sanitarios parcialmente controlados pero que sin embargo carecían de estudios especializados (MAE, 2011).

Para deshacerse de sus residuos el ciudadano común paga un impuesto al municipio para que se encargue de darles un destino, el costo de recolección y disposición por tonelada de residuo varía según el municipio, por ejemplo en Quito fluctúa entre \$20 y \$60 de los cuales se recupera apenas un 40% en cuestión de impuestos (Orbe et al.; 2006). Después de su recolección las empresas municipales de aseo se ocupan de confinar los residuos según el sistema que se aplique, en el Ecuador los sistemas de apilamiento que se aplican van desde el botadero común a cielo abierto hasta el relleno sanitario, sin embargo este último no siempre es bien ejecutado, pues en la mayoría de las veces se lleva a cabo sin una sistematización adecuada del apilamiento y la impermeabilidad con el ambiente, y sin el asesoramiento técnico necesario, por lo que generalmente se ubican los rellenos en zonas sensibles (ríos, recargas de acuíferos, bosques, humedales, etc) por lo tanto la palabra

“relleno sanitario” no sería aplicable para la mayoría de sistemas de apilamiento de basura en el Ecuador.

En el INIAP Santo Domingo se está investigando una nueva forma de lidiar con este problema, y así convertir los residuos sólidos domésticos (RSD) en recurso energético de carácter calorífico.

Se implementará un horno co-gasificador con el fin de aprovechar el poder calorífico de los residuos domésticos mezclados con carbón seco y mediante una combustión incompleta generar gases de síntesis que a su vez serán utilizados en el proceso de Fischer-Tropsch para elaborar un combustible líquido de alta calidad (biodiesel).

El problema puntual de esta investigación se centra en la primera fase del proceso: la co-gasificación de RSD y carbón, y más específicamente gira en torno a la importancia de la humedad dentro del proceso. Teóricamente un gasificador es capaz de producir un 70-80% del poder energético desprendido del material gasificado (Mendoza y Palomares, et al.; 2008). El resto de la energía introducida en el combustible se invierte en las reacciones endotérmicas, en las pérdidas de calor de los reactores, en el enfriamiento del gas de síntesis, eliminación de humedad y la filtración. Entonces, gran parte de la energía producible se pierde en la eliminación de humedad, lo que incide negativamente en el costo de producción del gas de síntesis, pues menor rendimiento es igual a una energía más costosa. Tampoco se requiere de una materia prima exenta de humedad pues un gran porcentaje del gas de síntesis que se busca producir es hidrógeno molecular. Entonces se deberá encontrar un equilibrio, la bibliografía (Cabildo, et al.; 2010: 75) indica un 15-30% de contenido de humedad en biomásas utilizadas en gasificadores destinados a la generación de electricidad, sin embargo en el caso del co-gasificador que se piensa instalar, se busca como resultado la producción de un combustible líquido, para esto es intrínsecamente necesaria una mayor concentración de hidrógeno molecular en el gas de síntesis. Entonces, a fin de favorecer la formación del combustible líquido, se sacrifica en cierta proporción el rendimiento de gasificación. Por lo tanto se desea encontrar un rango de humedad idóneo para la aplicación de RSD en este tipo de proceso, a fin de poder calcular la cantidad de carbón a añadir la materia para su ingreso al co-gasificador. A la vez calcular mediante análisis de laboratorio un estimado del poder

calorífico de los elementos a utilizar en gasificación, de manera que se pueda predecir con relativa eficacia el volumen y concentración de los gases expelidos.

La gasificación no es una tecnología nueva, se ha venido utilizando desde hace más de 200 años, sin embargo la producción de combustibles líquidos de alta calidad si es una tecnología nueva -al menos en nuestro país- que utiliza como operación unitaria la gasificación. No existe un método estándar regional para determinar la humedad de los RSD a fin de calcular la cantidad de carbón necesaria a adicionarse para ingresar al gasificador. Es necesario, primero: identificar los elementos de los RSD de la Estación Experimental Santo Domingo, segundo: obtener métodos estadísticamente comprobados para garantizar la fidelidad de la medida para los tres componentes principales de los RSD que serán utilizados por el gasificador: orgánicos, papel y derivados, y plásticos. De esta manera se logrará caracterizar los residuos y calcular así la fórmula para alimentación del co-gasificador

### **1.1.2 Justificación**

El proyecto de la planta piloto de co-gasificación busca disminuir el impacto ambiental del apilamiento desordenado de basura además de generar dividendos, se pretende convertir los RSD en productores de ingresos y lo que ello conlleva: generación de empleos y la supresión de los efectos que produciría el no gasificarlos y confinarlos de la manera convencional.

Los RSD serán utilizados como materia prima, primero para producir gases de síntesis (objeto de la presente investigación) y posteriormente para elaborar un combustible líquido de alta calidad calorífica que podría reemplazar al combustible convencional para motores de combustión interna (gasolina, diésel), por tanto, además de ahorrar espacio volumétrico en los rellenos sanitarios, se reducirán las emisiones de lixiviados y gases de descomposición que estos provocan.

El contenido de humedad de la materia prima (RSD) es crucial dentro del proceso pues de existir un contenido muy alto, el gasto energético de desprendimiento de vapor incidiría de manera negativa en el rendimiento de producción de gas de síntesis, y de ser muy bajo en

cambio, se afectaría al rendimiento final de producción de combustible líquido. Entonces se busca llegar a un equilibrio debido a que la humedad en los RSD está íntimamente relacionada con su poder calorífico (Gonzales J, et al.; 2007:30), Lo cual es corroborado en el libro Reciclado y Tratamiento de Residuos (UNED, et al.; 2008) "...los residuos alimentarios presentan valores entre 131 y 481 kg/m<sup>3</sup> con valores de humedad correspondientes a 50 y 80%, mientras que los RSU compactados en vertedero tienen valores entre 590 y 742 kg/m<sup>3</sup> con un contenido de humedad del 15 al 40%". Por lo tanto, mientras mayor densidad tienen los RSD, menor su contenido de humedad, aumenta su poder calorífico para gasificación. Esta afirmación también habla de la importancia de la caracterización de las partículas, no se pasará esta variable por alto pues si bien la humedad en los RSD es el motivo central de la investigación, esta está muy relacionada con la flexibilidad de la masa al pasar por un molino o por una peletizadora, un contenido de humedad relativamente bajo (a las condiciones de gasificación) conjugado con una granulometría de partículas demasiado pequeña podría obstruir el gasificador, los conductos o los molinos, entonces, la humedad equilibrada de los RSD además favorecerá a su fluidez en la fase sólida del proceso.

Un análisis eficiente del contenido de humedad y carbón ayuda en gran medida también a calcular el tiempo de residencia de la materia en el gasificador y así reducir al máximo los carbonosos no gasificados, aprovechando también al máximo el poder calorífico de la mezcla.

La determinación de humedad de los RSD antes de ingresar al gasificador deberá ser estandarizada a fin de calcular la cantidad de agua que este deberá eliminar y la cantidad de carbón a adicionar, se justifica el uso de un modelo de diseño experimental aplicable a cada uno de los elementos objetivo en la gasificación de los RSD: Orgánicos, papel y derivados, y plásticos, a fin de aminorar el tiempo de la operación de análisis una vez que la planta esté en pleno funcionamiento. Dado que el método convencional (estufa de desecación) arroja resultado en un intervalo mínimo de 4 horas, un método por termo balanza ajustado, previo diseño experimental puede arrojar resultados fieles al método convencional en intervalos de 5-15 minutos. Es por tanto necesario estandarizar un método para la determinación de la

humedad e integrarlo al funcionamiento de la planta de co-gasificación en la que ingresaran aproximadamente 10 kg/h de mezcla RSD/carbón seco.

### **1.1.3 Alcance**

Caracterización residuos sólidos de origen doméstico para su valorización como materias primas para co-gasificación carbón-RSD.

### **1.1.4 Objetivos**

#### **1.1.4.1 Objetivo general**

Caracterizar los residuos sólidos domésticos de INIAP EESD que serán utilizados en la producción de gas de síntesis a fin de garantizar un rendimiento óptimo y minimizar gastos de energía.

#### **1.1.4.2 Objetivos específicos**

- ✓ Diseñar muestreo de RSD en INIAP EESD para determinar su composición.
- ✓ Estandarizar un método de determinación de humedad para RSD a ser utilizados en la producción de gas de síntesis.
- ✓ Ejecutar un sistema de almacenamiento idóneo de RSD previo al ingreso al gasificador.
- ✓ Realizar balance de materia y energía del pre-proceso de gasificación de residuos sólidos domésticos.

## 1.2 Hipótesis

### 1.2.1 Ho: hipótesis nula.

Los residuos sólidos domésticos no son declarados aptos para gasificación una vez de que se ha realizado pre-proceso de caracterización y se han ajustado las variables críticas (%humedad, granulometría, poder calorífico, etc) para el aprovechamiento en gasificación.

### 1.2.2 Ha: hipótesis alternativa.

Los residuos sólidos domésticos son declarados aptos para gasificación una vez de que se ha realizado pre-proceso de caracterización y se han ajustado las variables críticas (%humedad, granulometría, poder calorífico, etc) para el aprovechamiento en gasificación.

### 1.2.3 Metodología de la investigación

El desarrollo del proyecto se hará necesario el uso de los siguientes métodos de investigación:

**Método estadístico:** necesario para cuantificar, comparar y graficar los resultados de la investigación con el fin de analizarlos y poder concluirlos.

**Método inductivo:** necesario debido a que el planteamiento de un problema y la elaboración del proyecto de investigación busca una solución al planteamiento inicial.

**Método experimental:** será necesario manipular variables a fin de estandarizar un método de determinación de humedad para RSD, por lo tanto se utilizará este método con el fin de encontrar la causalidad de las variables y así poder maximizar la precisión del método estándar.



## **1.2.4 Operacionalidad de la hipótesis**

Estandarización de método de determinación de humedad de residuos sólidos domésticos por termo-balanza.

## **1.2.5 Variables**

### **1.2.5.1 Variables independientes**

Temperatura de secado

Cantidad de muestra (masa)

Criterio de desconexión (factor configurable exclusivo de la termo-balanza digital que determina cuando se detiene el análisis).

### **1.2.5.2 Variables respuesta**

Porcentaje de humedad

Tiempo.

## **1.3 Población de estudio**

### **1.3.1 La población**

La investigación se llevó a cabo en el INIAP EESD (Estación Experimental Santo Domingo), la población cuantificada fueron 33 domicilios ocupados por los trabajadores de la estación.

### **1.3.2 Formulación de la muestra**

Se hizo un muestreo aleatorio de 3 domicilios por semana durante 14 semanas comprendidas entre el 6 de Septiembre de 2013 hasta el 6 de Diciembre de 2013, lo que dio como resultado 42 muestras que representan más del 100% de los domicilios y que al ser completamente aleatorias representan sin sesgos la composición habitual de los residuos domésticos producidos en esta región del Ecuador.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO DE REFERENCIA**

#### **2.1 Marco conceptual**

##### **2.1.1 Residuos sólidos urbanos.**

Los residuos sólidos urbanos son aquellos que se originan en los núcleos de población como consecuencia de la actividad habitual y diaria del ser humano. Se clasifican en dos grandes grupos: Residuos Sólidos Urbanos, RSU, y Aguas Residuales Urbanas, ARU. Las principales aplicaciones de estos residuos son como fuente de energía, aprovechándolos directamente o transformándolos en otras sustancias combustibles, o como materia prima, para someterlos a un proceso de reciclado y generar otros productos.

Los residuos sólidos urbanos constituyen un caso singular dentro de la biomasa. De acuerdo con la definición de biomasa, sólo la parte orgánica de los residuos sólidos urbanos puede ser considerada como tal. Los residuos sólidos domésticos se encuentran subcategorizados dentro de los residuos sólidos urbanos y corresponden mayoritariamente a biomasa producida por las zonas residenciales. La valoración energética de los residuos sólidos urbanos constituye el cuarto nivel de jerarquía en el proceso de eliminación de residuos sólidos (Tchobanogous et al, 2009:10).

##### **2.1.2 Gestión integral de residuos sólidos.**

La gestión integral de residuos sólidos (GIRS) puede ser definida como la selección y aplicación de técnicas, tecnologías y programas de gestión idóneos para lograr metas y objetivos específicos de gestión de residuos. (Tchobanogous et al, 2009:16). Este sistema es ampliamente utilizado en países desarrollados y pseudo-utilizado en países en vías de desarrollo.

### **2.1.3 Elementos funcionales de la gestión de residuos sólidos.**

Generación de residuos: abarca las operaciones en que los residuos son identificados como tal, “sin ningún valor adicional”, y/o son tirados y recogidos.

Manipulación de residuos y separación, almacenamiento y procesamiento en el origen: constituye el proceso de colocado en contenedores y de separación por materiales o categorías.

Recogida: este elemento no solo incluye la recogida sino también el transporte y vaciado en el lugar previsto.

Separación, procesamiento y transformación de residuos sólidos: constituye a la recuperación de los residuos separados y su transformación por distintos medios industriales o de carácter ambiental.

Transferencia y transformación.

Evacuación. (Tchobanogous et al, 2009).

### **2.1.4 Separación, procesamiento y transformación de residuos sólidos**

Corresponde al cuarto escaño en la jerarquía de una gestión de residuos sólidos sustentable, sin embargo en la última década su desarrollo se ha vuelto necesario para el vivir de los pueblos. Los residuos sólidos urbanos tienen una composición muy variable, pero el contenido en materia orgánica suele ser del orden del 50%, dependiendo sobre todo del tamaño de la población y de su nivel de vida. Al aumentar ambas magnitudes, la tendencia es una disminución en el contenido de materia orgánica. Los residuos sólidos, RSU, están formados por una gran variedad de sustancias, lo que exige que antes de ser utilizados con

finés energéticos sea necesario recurrir a un minucioso proceso de separación apartando sustancias como el vidrio, el plástico o los metales, que no sirven como fuente de energía.

Los principales elementos de los residuos sólidos urbanos son los siguientes:

**Materia orgánica.** Restos de comida, de jardinería y otros materiales fermentables constituyen el principal componente de los residuos, que tiende a disminuir en las sociedades más desarrolladas.

**Vidrio.** Botellas, envases de alimentos, etc. La recogida diferenciada de esta fracción está cada vez más extendida.

**Papel y cartón.** Periódicos, papel en general, cajas y envases. Esta fracción ha experimentado importantes incrementos en los últimos años y su recogida en origen está en expansión.

**Plásticos.** Botellas y envases para líquidos, envases y embalajes. Bajo este nombre se agrupan diferentes polímeros que, en general, pertenecen a alguno de los grupos que se relacionan a continuación: Policloruro de vinilo, polietileno tereftalato, polietileno de alta densidad, polietileno de baja densidad, polipropileno y poliestireno. La recuperación y reciclaje de los materiales plásticos aún no está generalizada.

**Otros componentes.** Madera, cenizas, textiles, goma, latas metálicas, etc.

La evolución de la composición de los RSD está íntimamente relacionado con el poder adquisitivo de cada colectividad. Cuanto más desarrollado es un país, mayor es la tendencia a consumir los bienes elaborados reduciendo la fracción típicamente orgánica e incrementando las fracciones complementarias de vidrio, papel, cartón y plásticos. Esta misma tendencia también se observa cuando se analizan las diferencias entre las grandes urbes y las localidades y pueblos que las rodean. Esto permite asegurar que la generación de basuras está íntimamente relacionada con cuestiones económicas, sociológicas y culturales.

El análisis de la composición de los residuos es un índice de la realidad social de los países, las ciudades y los hombres. (Ambientum, et al; 2007)

### **2.1.5 Valoración de residuos sólidos**

La valorización de un residuo es cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales, que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular, o que el residuo sea preparado para cumplir esa función en la instalación o en la economía en general (Cedano D., et al; 2012:45).

La valorización de residuos se lleva a cabo antes de su aplicación al campo industrial para diagnosticar si son aptos para ser utilizados como materias primas y en el calificarse como tal, determinar cuál es su nivel de aplicabilidad dentro del proyecto que se busca desarrollar. Generalmente el uso que se le da a los residuos sólidos en la actualidad está en el campo energético con variantes que fluctúan desde el reciclaje hasta la explotación termo-química.

### **2.1.6 Aprovechamiento térmico de los residuos sólidos.**

El primer sistema utilizado para aprovechar la energía contenida en los residuos sólidos fue la incineración que se basa en una combustión controlada en la que el elemento combustible son los propios residuos. El proceso tiene lugar con un gran desprendimiento de calor, suficiente para mantener el proceso de combustión.

Desde el punto de vista químico la incineración es un conjunto de reacciones de oxidación que tienen lugar preferentemente en medio gaseoso o mecanismos de radicales libres, lo que conduce a la recombinación de las diferentes especies químicas presentes. Existen otros mecanismos de vaporización y gasificación de compuestos volátiles, generalmente orgánicos. Las reacciones de oxidación y de destrucción térmica generan la producción de moléculas simples como el CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NO, etc. que son los componentes mayoritarios de los gases de combustión junto con el nitrógeno. Un elemento determinante en el tipo de

proceso térmico y en los resultados es la concentración de oxígeno presente en relación con las necesidades estequiometrias:

Si existe un exceso moderado de oxígeno puede hablarse de incineración. Las reacciones se producen a temperaturas elevadas, relativamente cercanas a las de combustión adiabática. Los productos de la reacción son las especies posibles más oxidadas  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}$ , etc. debido a la temperatura elevada parte de los compuestos inorgánicos volátiles estarán en las cenizas volantes. Los residuos sólidos estarán exentos de compuestos volátiles y los metales estarán en su fase oxidada, lo que, previsiblemente les confiere carácter inerte.

Si existe un defecto de oxígeno de forma deliberada o momentánea, los procesos combinados de transferencia de masa y de calor pueden desarrollarse en dos formas distintas:

Si la temperatura es lo suficientemente elevada se producirá una pirolisis, en la que las estructuras moleculares se rompen dando lugar a gases parcialmente oxidados:  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ , etc. y a residuos sólidos carbonizados. También suelen producirse vapores orgánicos que, al enfriarse condensan en forma de hidrocarburos pesados. No es segura la destrucción de todos los compuestos orgánicos vaporizados ni de que todos los metales no vaporizados estén en oxidación completa. Si la temperatura no es muy elevada no se produce la rotura molecular ni ningún tipo de reacción química sino la destilación y evaporación de sustancias volátiles que, en una posterior condensación dan lugar a líquidos y sólidos pastosos.

Si el exceso de oxígeno es muy elevado, la combustión tendrá lugar a temperatura baja, por la gran cantidad de inertes en la mezcla de gases (por la presencia de nitrógeno). Independientemente de la ineficacia de la recuperación energética, no puede garantizarse la destrucción de los compuestos orgánicos en la mezcla. (Centeno, et al; 2010:30-31).

### **2.1.7 Gasificación y pirólisis de residuos sólidos.**

Desde el punto de vista ambiental la gasificación deviene como una tecnología puntera ya que su aplicación produce una cantidad mínima de gases. Al tratarse de una combustión con

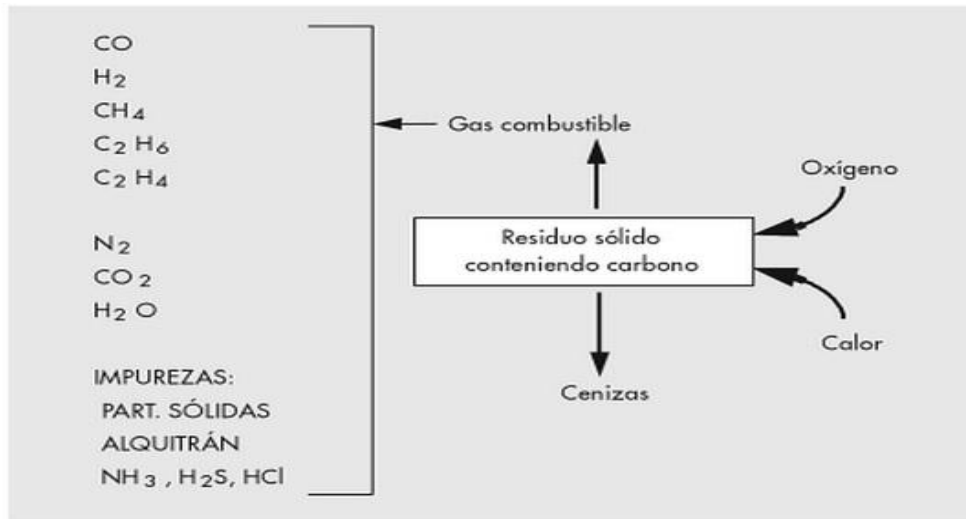
defecto de aire, en los productos de la combustión existirán inquemados que deberán ser oxidados posteriormente, las ventajas de esta aplicación son:

Transforma los combustibles sólidos en gaseosos. Se trata de un sistema flexible. El tamaño del grano de alimentación puede ser grande (hasta 50 mm según el tamaño del reactor y el origen del residuo). En lugar de aire, se puede inyectar aire enriquecido con  $O_2$  con lo que el caudal de gases a depurar será mínimo. En cuanto a los hornos en funcionamiento, habría que distinguir entre los que trabajan a presión atmosférica. Lechos fijos utilizados para residuos sólidos a granel. Reactores ciclónicos cuando el residuo contiene una gran cantidad de materia inorgánica. Lechos fluidizados, cuando el residuo ha sido pre-tratado o triturado o bien es de naturaleza fangosa.

### **2.1.8 Principios termoquímicos de la gasificación.**

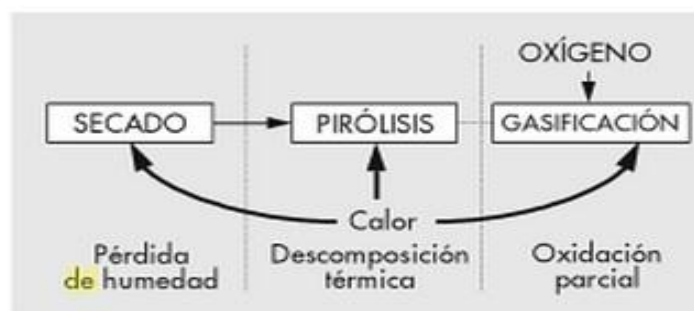
El gas obtenido por la oxidación contiene monóxido de carbono ( $CO$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), hidrógeno ( $H_2$ ), metano ( $CH_4$ ), pequeñas cantidades de otros hidrocarburos más pesados como el etano ( $C_2H_6$ ) y el etileno ( $C_2H_4$ ), agua ( $H_2O$ ) y nitrógeno ( $N_2$ ) (cuando se usa aire como agente oxidante) y diversos contaminantes como pequeñas partículas carbonosas, cenizas, alquitranes y aceites. La oxidación parcial se puede llevar a cabo utilizando aire, oxígeno, vapor, o una mezcla de estos. El  $CO$  y el hidrógeno confieren poder calorífico al gas ya que pueden reaccionar con el oxígeno (combustión en caldera, motor o turbina). El  $CO_2$  y el  $H_2O$  son productos indeseados pero inevitables. Aunque suele formarse en pequeñas cantidades, el metano es responsable de gran parte del contenido calorífico del gas.





**Figura 1:** Principio químico de la gasificación (Castells Xavier, Tratamiento Valorización Energética de Residuos, 2012).

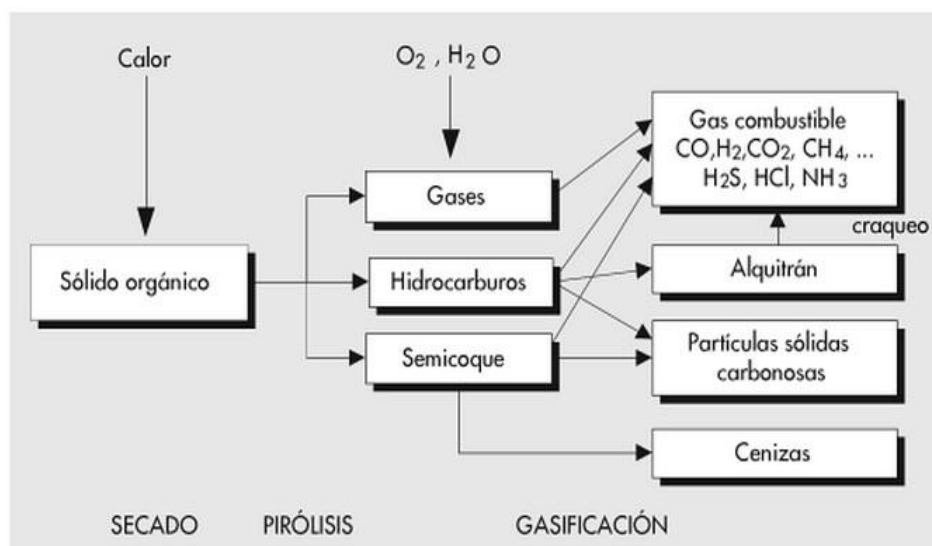
La composición del gas depende tanto de las condiciones del sólido gasificado como de las características del gasificador. La gasificación con aire produce un gas pobre superior entre 4 y 7 MJ/Nm<sup>3</sup> (950 a 1600 kcal/ Nm<sup>3</sup>) susceptible de ser quemado en un generador de vapor en un motor de combustión interna o en una turbina. En general no resulta económico su transporte para su uso lejos del gasificador. La gasificación con oxígeno produce un gas de síntesis con poder calorífico superior, entre 10 y 18 MJ/Nm<sup>3</sup> (2400 a 4300 kcal/ Nm<sup>3</sup>) en este caso puede pensarse en un transporte limitado o hasta en la síntesis de combustibles orgánicos tales como metanol o gasolina. En el proceso de gasificación de biomasa o residuos orgánicos tienen lugar tres etapas: secado (evaporación de la humedad contenida), pirólisis (descomposición térmica en ausencia de oxígeno), y gasificación (oxidación parcial de los productos de la pirólisis).



**Figura 2:** Etapas de la gasificación. (Castells X., Tratamiento y Valorización Energética de Residuos, 2012).

Cuando un combustible sólido se calienta a 300-500 °C en ausencia de un agente oxidante, piroliza. Los productos de la pirolisis son: carbón coque, hidrocarburos condensables o alquitrán y gases. Las proporciones relativas de los productos dependen en gran medida de la velocidad de calentamiento y de la temperatura final. En fin, la pirolisis tiene lugar mucho más rápido que la gasificación siendo esta última la etapa controlante del proceso. El gas líquido y carbón producidos en la pirolisis reaccionan con el agente oxidante (normalmente aire) para dar gases permanentes (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>) en menores cantidades hidrocarburos y olefinas. La gasificación del carbón de pirolisis es la combinación interactiva de diversas reacciones gas-sólido y gas-gas en las que el carbón sólido se oxida a monóxido y dióxido de carbono y el hidrógeno se produce por la reacción “shift” entre el gas y el agua.

Las reacciones gas-sólido son las reacciones más lentas limitando la velocidad del proceso, la composición final del gas está influenciada por factores como, por ejemplo, la composición de la alimentación, el contenido de agua, la temperatura de reacción (entre 600 y 110 °C). Cuando los productos de la pirolisis no son completamente convertidos en gas, aparecen alquitranes contaminantes en el gas. Esto ocurre en mayor medida en la gasificación de biomasa que en la de carbón (Castells X.;2012, 419-422).



**Figura 3:** Proceso de descomposición térmica por oxidación parcial (Castells X., Tratamiento y Valorización Energética de Residuos, 2012).

### 2.1.9 Producción de biocombustibles por las rutas termoquímicas - gasificación

Las rutas termoquímicas se basan en la utilización de calor como fuente de transformación de la biomasa, por dos abordajes básicos. El primero es la gasificación de la biomasa y su conversión en hidrocarburos y el segundo es la licuefacción de la biomasa directamente por pirólisis de alta temperatura o licuefacción de alta presión. Esos métodos han sido desarrollados para la conversión de la biomasa residual obtenida a partir de las actividades agrícolas y forestales y de las industrias de transformación agro-alimentaria y de la madera en energía útil. La elección del proceso de conversión depende del tipo y cantidad de biomasa disponible, de la forma deseada de la energía, es decir, las necesidades de uso final, de las normas ambientales, de factores económicos y otros factores específicos de proyecto. Aunque esas rutas no sean utilizadas para la producción de biocombustibles en escala industrial, actualmente existen algunas iniciativas de industrialización.

La gasificación es un proceso que convierte un insumo sólido o líquido en un gas (también llamado de *producir gas* o gas pobre) con características básicamente combustibles, por su oxidación parcial a temperaturas intermedias (400-900 °C), por encima de las recomendadas para pirólisis y por debajo de las recomendadas para combustión. Los principales compuestos resultantes son monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y nitrógeno (N<sub>2</sub>), cuyas concentraciones varían de acuerdo a las condiciones operacionales utilizadas. Ese gas es conocido como gas pobre, debido a la cantidad de aire inferior a la estequiométrica (mínimo teórico para la combustión) lo que significa que ese gas posee bajo poder calorífico. En el proceso son suministradas cantidades restringidas de oxígeno, en la forma de oxígeno puro o simplemente aire atmosférico, dependiendo, principalmente, del uso final del gas obtenido. El material sólido puede ser también gasificado en la presencia de cantidades relativas de vapor de agua súper calentado siendo incorporadas al agente de gasificación (oxígeno o aire), con el objetivo principal de producir una mezcla gaseosa especial, conocida como gas de síntesis (o *syngas*), básicamente rica en hidrógeno y monóxido de carbono y cuya combustión es más eficiente que aquella del combustible original. Así, el gas de síntesis puede ser quemado directamente en motores de combustión interna, usado para producir metanol e hidrógeno, o aún convertido en combustible sintético por el proceso Fischer-Tropsch.

La gasificación es considerada una técnica limpia de disposición de residuos y una tecnología importante para el desarrollo de energía renovable. El gas obtenido tiene como aplicaciones prácticas la combustión de motores alternativos de combustión interna y turbinas a gas para la generación de energía mecánica y eléctrica (accionamiento de máquinas de flujo); la generación directa de calor; o como materia prima en la obtención de combustibles líquidos. De esa manera, varios estudios están siendo realizados considerándose la gasificación de diversos tipos de biomasa tales como bagazo de caña, cáscara de arroz, residuos del café, carbón mineral y cáscara de madera. (Machado C. et al; 2010:24-25)

Para efectuar el cálculo de la conversión energética de los diversos tipos de biomasa, fueron establecidos diferentes tecnologías de conversión y considerando los respectivos poderes caloríficos de cada biomasa. Los resultados obtenidos son presentados en regiones separados por tipo de biomasa (Texeira, Gghilardi, Karniol, & da Rocha, 2008).

La creciente necesidad de obtener fuentes energéticas totalmente renovables, ha llevado a encontrar como solución al bioetanol que es una alternativa económica y viable, en Brasil se utiliza con regularidad en el sector automotriz desde 1931, alcanzado madurez y consistencia. Lo que se presenta en trabajo es las características de este biocombustible y de su agroindustria (BNDES, CGEE, FAO, & CEPA, 2008).

### **2.1.9.1 Historia**

La tecnología de conversión de material orgánico o carbonífero en gas combustible tuvo origen en las últimas décadas del siglo XVIII y la primera compañía de gas de carbón mineral inició sus operaciones en Londres en 1812 para iluminación pública. Con el perfeccionamiento de las técnicas de gasificación, la industria de manufactura de gas creció rápidamente, siendo gran responsable por la utilización industrial de carbón en gran escala. En la época de la Primera Guerra Mundial se gasificaban principalmente lignito y turfa, debido a su abundancia y a la posibilidad de ser proveídos en las especificaciones requeridas. En regiones donde esas materias primas no estaban disponibles, las instalaciones fueron

modificadas para uso de biomasa. Con el surgimiento de líneas de distribución de gas natural y sustitución en gran escala de combustibles derivados del petróleo, casi todas las plantas fueron desactivadas, siendo usadas solamente en situaciones excepcionales como en Sudáfrica y algunas regiones de la antigua URSS (Reed, 1981; Lora *et al.*, 2008).

La tecnología de gasificación tuvo poca evolución además de la etapa de desarrollo alcanzada al final de la 2da Guerra Mundial. Sin embargo, en el inicio de la década de 1970, debido a las crisis del petróleo, los esfuerzos de diversificación del uso de la biomasa crecieron substancialmente. Ya en los años 1990 comienza a aparecer un relevante interés por los sistemas combinados de generación de energía eléctrica y calor en los procesos (co-generación), abriendo una nueva y potencial ruta de oportunidades para la gasificación de biomasa principalmente en sistemas de grande porte.

Hoy existe un difundido y sustentado esfuerzo en todo el mundo para la mejoría de proyectos de gasificadores en los campos de aplicación de esta tecnología, principalmente direccionada para la generación de electricidad, biocombustibles líquidos y obtención de insumos de alto valor agregado por las rutas químicas adecuadas (Kirubakaran, 2009).

#### **2.1.9.2 Tipos de gasificadores**

Básicamente, una instalación de gasificación está constituida por los siguientes elementos: pre-procesamiento: estoque, transporte y reducción del tamaño de la biomasa; gasificación; tratamiento del gas - enfriamiento y limpieza; tratamiento de residuos.

Los reactores utilizados en los procesos de gasificación son clasificados conforme la presión de trabajo (baja presión o presurizados), el tipo de lecho (fijo o fluidizado), el tipo del agente gasificador (aire, vapor de agua, oxígeno o hidrógeno), la dirección del movimiento relativo de la biomasa y del agente gasificador (con corriente o flujo directo, contracorriente o contraflujo, flujo cruzado, lecho fluidizado y lecho arrastrado) y el tipo y forma de la biomasa utilizada (residuos agrícolas, residuos industriales, residuos sólidos urbanos, biomasa *in natura*, biomasa peletizada, biomasa pulverizada) (Goyal *et al.*, 2008; Lora *et al.*, 2008).

### **2.1.9.2.1 Gasificadores de lecho fijo.**

Entre las varias tecnologías de gasificación, la más difundida y dominada operacionalmente es basada en reactores de lecho fijo. En este sistema la materia a ser gasificada se mueve por acción de la gravedad, es decir, presenta un movimiento descendente en el interior del reactor. Los gasificadores de lecho fijo están divididos en contracorriente, con corriente y flujo cruzado. Esta tecnología presenta ventajas para la conversión de la biomasa en pequeña escala, además de presentar elevada eficiencia energética. Esos gasificadores son sistemas simples pudiendo trabajar con combustibles de alta densidad y baja granulometría (10-100 mm), tales como pequeños trozos de madera y carbón.

### **2.1.9.2.2 Gasificadores de lecho fluidizado**

Hace muchos años los gasificadores de lecho fluidizado son utilizados en la conversión termoquímica de la turfa. Actualmente, esos equipos utilizan como combustibles bagazo de caña, cáscara de arroz, serrín, etc. Estos equipos tienen como característica principal la utilización de un material inerte con granulometría con un promedio de  $250\mu\text{m}$ , cuya principal función en el lecho es posibilitar un mejor contacto entre sólido-gas, aumentar las tasas de reacción y consecuentemente, aumentar la eficiencia del proceso. Diferentemente de los gasificadores de lecho fijo, los gasificadores de lecho fluidizado son adecuados a la conversión de una mayor cantidad de biomasa (hasta 20 ton/h).

### **2.1.9.3 Calidad y limpieza del gas de síntesis.**

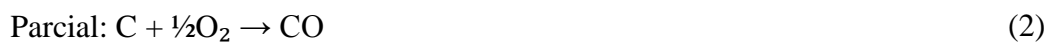
El gas producido en el proceso de gasificación contiene monóxido de carbono (CO), hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) y metano ( $\text{CH}_4$ ), siendo esos componentes fundamentales en la determinación del poder calorífico del gas obtenido. Además de estos componentes citados anteriormente, el gas generado en el proceso contiene diversos otros gases inertes, tales como: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), vapor de agua, etc. Esos contaminantes cuando no son removidos, causan graves problemas en los equipos que utilizan el gas como combustible. Uno de los mayores contaminantes presentes en el gas de biomasa es el

alquitrán, compuesto constituido de una compleja mezcla de hidrocarburos, principalmente aromáticos. El grado de alquitrán y partículas en el gas obtenido a través del proceso de gasificación, puede variar de acuerdo al tipo de reactor utilizado en la producción del gas (Fonseca, 2009). Los métodos de remoción del alquitrán pueden ser primarios o secundarios. En los métodos primarios ocurre un tratamiento interno al gasificador, con el objetivo de prevenir o convertir el alquitrán. Los secundarios son métodos de tratamiento químicos o físicos donde el alquitrán es removido después de la gasificación (CENBIO, 2002).

#### 2.1.9.4 Reacciones químicas dentro del gasificador.

Cuando el sólido es ingresado al gasificador, se produce rápidamente la pirolisis. El sólido suelta los compuestos volátiles y se forma un residuo carbonoso o char. Si bien el conjunto de reacciones es muy complejo, las reacciones limitantes de la velocidad global son las reacciones sólido-gas, por lo que son las únicas que suelen tenerse en cuenta, junto con las reacciones formación de hidrógeno (shift) y metano (metanización a partir de CO).

Combustión (reacciones exotérmicas)



Gasificación



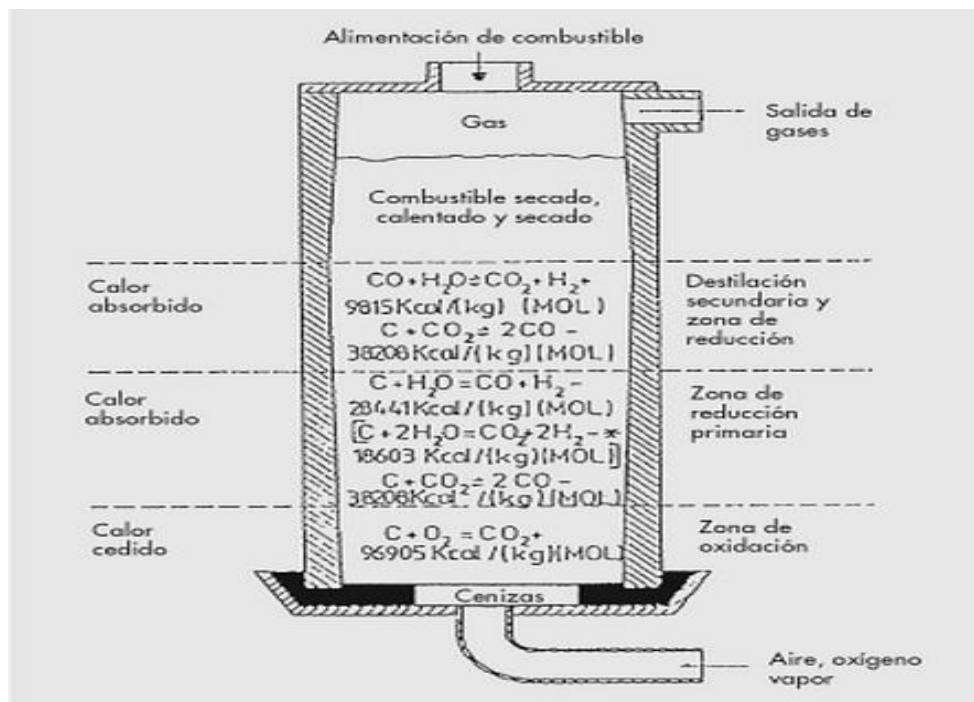
Shift (exotérmica)



Metanización (exotérmica)



El char en presencia de oxígeno tenderá a combustionar (reacción 1). Como quiera que el oxígeno introducido sea insuficiente, se favorece la formación de CO por combustión incompleta (reacción 2). El exceso de char reacciona con los gases presentes (principalmente CO<sub>2</sub> y agua, reacciones 3 y 5). Las reacciones 5 y 6 están favorecidas por la presencia de vapor d agua en el agente oxidante, por lo que la presencia de vapor favorece a la presencia de hidrógeno. La formación de metano (reacción 7) está favorecida por las altas presiones (Castells X.; 2012:423).



**Figura 4:** Zonas de reacción en un gasificador (Castells X., Tratamiento y Valorización Energética de Residuos, 2012).

### 2.1.9.5 Producción de biocombustibles a partir del gas de síntesis.

El gas de síntesis, compuesto básicamente por una mezcla de hidrógeno (H<sub>2</sub>) y monóxido de carbono (CO), es inodoro, incoloro y tóxico. Presenta una gama de aplicaciones, algunas en escala industrial y otras todavía en fase de investigación. Los procesos de síntesis de combustibles presentan una serie de requerimientos en relación a la presión, temperatura en el reactor, tipo de catalizador y relación H<sub>2</sub>/CO en el gas de síntesis. Otro factor importante es la calidad del gas respecto a los niveles de H<sub>2</sub>S y otros compuestos sulfurados, partículas, alquitrán y compuestos alcalinos. La calidad requerida del gas depende de cuál es el proceso



que utiliza el gas de síntesis como materia prima, pero, en general, las características y condicionamiento del gas de síntesis son más críticas para las aplicaciones de síntesis de combustibles y productos químicos que para las aplicaciones de hidrógeno y gas combustible (Goyal *et al.*, 2008).

#### 2.1.9.6 Caracterización de residuos sólidos.

La composición química del sólido a gasificar tiene una gran influencia en la marcha del proceso. No obstante esta composición es muy compleja y prácticamente imposible de determinar. El papel y el cartón están elaborados a partir de celulosa con diferentes cantidades de aditivos, según sus características. Los plásticos neumáticos son polímeros artificiales mucho más simples que la biomasa y contienen aditivos para aumentar sus prestaciones y modificar el color.

Una forma útil de caracterizar estos sólidos es a través de una análisis inmediato (humedad, carbono fijo, volátiles y cenizas) y análisis elemental (C, O, H, N, S), a partir del análisis elemental se pueden establecer balances de masa y el alcance de algunos efectos ambientales.

**Humedad:** los residuos orgánicos se caracterizan con un mayor contenido de humedad que el carbón. El agua, a partir de las reacciones propias de la gasificación favorece a la formación de hidrógeno. Su presencia es pues deseable ya que permite disminuir, sino erradicar la cantidad de vapor a añadir como agente oxidante, no obstante un exceso de humedad disminuye el rendimiento de proceso, ya que el agua que entra con el sólido consume energía al evaporarse. Si bien los límites dependen del gasificador, valores entre el 10 y el 30% son aceptables. Los fangos de depuradora y la fracción orgánica de los RSU sobrepasan estos valores.

**Volátiles:** un mayor contenido de volátiles favorece la velocidad global del proceso, ya que se desprenderán más gases en la etapa de pirolisis y, como se ha dicho, las reacciones gas-gas son mucho más rápidas que las reacciones sólido- gas. La biomasa, en contraste con algunos tipos de carbón tiene un alto contenido en volátiles, de orden del 70 al 80% en masa. Los fangos de depuradora se caracterizan por un alto contenido de volátiles.

**Cenizas:** las cenizas están formadas por compuestos inorgánicos que acompañan al sólido. Su presencia es indeseada por varios motivos. En primer lugar porque deben retirarse del gasificador, lo que complica el diseño mecánico del mismo. Una vez que salen del proceso, representan un nuevo residuo que debe de disponerse de manera no perjudicial para el medio ambiente. Por último la fusión de cenizas a alta temperatura en el seno del reactor puede provocar serios problemas (excepto en aquellos reactores especialmente dedicados a ello). Si bien el contenido de ceniza en biomasa (5% en masa) es muy inferior a las del carbón, las cenizas de la biomasa funden más fácilmente y a menor temperatura.

El contenido en cenizas y su punto de reblandecimiento y fusión es uno de los aspectos más importante en el diseño del reactor de gasificación.

**Tabla 1:** Análisis elemental de diferentes tipos de material residual.

	<b>C</b>	<b>O</b>	<b>H</b>	<b>N</b>
Biomasa	50-60	30-40	5-7	trazas
RSU: papel/cartón	44	44	6	0,3
Plástico	60	23	7	0
Textil	56	30	7	0,2
Madera	50	43	6	0,1
Mat. orgánica	50	38	6	0,4

**Fuente:** Castells Xavier Elías, Luis Velo Tratamiento y Valorización Energética de Residuos (2012), Madrid, España: Ed. Díaz De Santos, pág. 422.

El análisis elemental de la biomasa depende básicamente de las especies vegetales presentes en la alimentación, en el caso de biomasa animal, y de las impurezas que le acompañan. En el caso de los RSU, el análisis elemental promedio depende de la zona geográfica. Esto debido, en primer lugar a que la proporción de ciertos componentes varía según el nivel de vida de los habitantes de cada zona. En general mientras mayor es el nivel de vida, mayor es la cantidad de envases presentes en los RSU respecto a la materia orgánica. Un segundo factor son los desechos producidos por la industria que son asimilados como RSU.

**Nitrógeno:** el nitrógeno se encuentra en la materia orgánica formando compuestos de muy diversa índole. Generalmente se admite que todo el nitrógeno contenido forma amoniacó

(NH<sub>3</sub>). La presencia de amoníaco en el gas favorece la formación de óxidos de nitrógeno cuando este se oxida en una caldera, un motor o una turbina.

**Cloro:** si bien la presencia de cloro en la biomasa es muy reducida, puede no serlo para los RSU debido a la presencia de sal y de plásticos clorados. El cloro forma HCl, ácido clorado que favorece a la corrosión de los elementos que componen la planta. Debe reducirse hasta niveles admisibles antes de introducir el gas en un motor o turbina.

**Azufre:** forma H<sub>2</sub>S que al igual que el cloro es un gas ácido que debe reducirse hasta niveles admisibles. Su contenido es bajo tanto para la biomasa como para los RSU, pero no tanto para los fangos de depuradora. En general solo representa un problema para carbones de baja calidad como los carbones y lignitos.

#### **2.1.9.6.1 Aspectos energéticos.**

En el proceso de gasificación se parte de una materia prima de poder calorífico alto (carbones de alta calidad o biomasa), o moderado (carbones pobres o RSU) y se obtiene un gas caliente con un poder calorífico medio (gasificación con oxígeno o hidrógeno) o bajo (gasificación con aire). La principal característica desde el punto de vista energético, que diferencia a la gasificación de la combustión es que, si bien en la combustión toda la energía está contenida en forma de calor sensible, en la gasificación parte de la energía química contenida en la materia prima pasa al gas (se habla del calor latente del gas). No obstante no toda energía se aprovecha en forma de poder calorífico del gas, existe pues un rendimiento de gasificación que depende del tipo de gasificador utilizado y del agente oxidante. El principal motivo para la existencia de un rendimiento de gasificación es que el proceso descrito (secado, pirolisis, gasificación) es endotérmico, siendo necesario aportar energía. Esto puede realizarse en dos formas: mediante una fuente externa o por medio de la combustión de una parte del sólido a gasificar. Esta última alternativa que es la más utilizada industrialmente requiere un control cuidadoso de la relación sólido/aire (u oxígeno). En este caso, tienen lugar dentro del gasificador una serie de reacciones endotérmicas y exotérmicas. Si el proceso está correctamente controlado (a temperatura constante) el calor aportado por las reacciones

exotérmicas (combustión) compensa el calor absorbido por las reacciones endotérmicas. Se dice entonces que el proceso es auto térmico.

#### **2.1.9.7 Producción de hidrógeno por la reacción de cambio agua-gas.**

La producción industrial de hidrógeno, actualmente utilizado principalmente para la síntesis de amoníaco y reacciones petroquímicas, es la principal utilización del gas de síntesis hoy. El hidrógeno también puede ser usado como un combustible directamente en células a combustible y es un reagente esencial en diversas estrategias de conversión de biomasa así como también en las refinarías petroquímicas.

En la reacción de cambio agua gas (“Water Gas Shift” – WGS) el monóxido de carbono reacciona con el agua para formar CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub> y de esa forma la relación CO/H<sub>2</sub> del gas de síntesis es ajustada para otros usos. La producción industrial de hidrógeno por la reacción WGS es hecha en dos reactores en serie: Reactor de alta temperatura en WGS actuando a 350-500 °C, con un catalizador de óxido de hierro donde la concentración de CO disminuye para 2-3%. El segundo reactor WGS a baja temperatura (cerca de 200 °C), con un catalizador de cobre donde la concentración de CO llega a un 0,2%. Una purificación adicional del H<sub>2</sub> puede ser hecha, caso sea necesario, haciéndose adsorción membranas de paladio (Fonseca, 2009; Kirubakaran, 2009; Spath & Dayton, 2003).

#### **2.1.9.8 Producción de metanol**

El metanol puede ser usado directamente como combustible para transportes en motores de combustión o para alimentar células a combustible de metanol, pero constituye una parte muy limitada en los vehículos actuales. En Europa, el límite de mezcla es de un 3% en volumen de gasolina. Los beneficios incluyen mayor número de octano, la mejora de la calidad de las emisiones totales (menos de carbono y hidrógeno, más oxígeno), y una mayor eficiencia térmica que los combustibles fósiles de transporte (Balat *et al*, 2009). Desventajas del uso del metanol: el contenido energético significativamente menor en el combustible, en

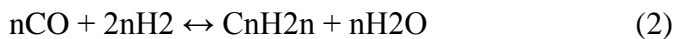
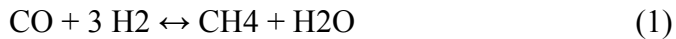
comparación a la gasolina, su alta toxicidad, y el aumento de las emisiones de combustión de NO<sub>x</sub> y de formaldehído (Demirbas A.; 2006).

La síntesis del metanol es hecha por la hidrogenación de los óxidos de carbono en la presencia de catalizadores basados en óxido de cobre, óxido de zinc, la presión de 60 bar y temperatura de 210 – 300°C. Esta reacción es altamente exotérmica, y, como subproducto del proceso es generado vapor (Ekbom *et al.*, 2005; Huber *et al.*, 2006).

#### **2.1.9.9 Síntesis Fischer-Tropsch.**

La tecnología conocida con Fischer-Tropsch puede ser considerada única en muchos sentidos debido a su proposición de “construir” cadenas de hidrocarburos más largas a partir de moléculas menores originadas de una materia prima carbonada como el carbón, por ejemplo, combinada con hidrógeno, en la forma de lo que se conoce como gas de síntesis. Después de “construidas”, las cadenas de hidrocarburos pueden ser convertidas en combustibles vehiculares líquidos para consumo final, como la gasolina y el óleo diesel, entre otros insumos, para la industria química y automotora.

Ese proceso fue descubierto en la década de 1920 y conquistó su lugar en el sector industrial en 1935 en una planta piloto que operaba en condiciones de presión atmosférica, construida por la empresa Ruhrchemie AG, en Alemania. En 1935, después del régimen nazista asumir el poder y iniciar su búsqueda por la independencia de petróleo, cuatro plantas FT de proporciones comerciales fueron construidas por la misma empresa, que juntas, llegarían a una capacidad de 720-868.000 barriles por día de gasolina, diesel, aceites lubricantes y productos petroquímicos. Esas plantas operaban en condiciones de presión atmosférica o presiones con un promedio de 5-15 atm, con temperaturas entre 180 y 200 oC y utilizaban el gas de síntesis proveniente de carbón mineral, con catalizador a base de cobalto. Otras plantas fueron construidas fuera del territorio alemán, en Francia, Japón y, más tarde, en Sudáfrica, EUA, Malasia y Qatar. Sin embargo, después de la II Guerra Mundial, con la caída del precio del petróleo, el proceso dejó de ser viable, y hoy existen pocas plantas que todavía utilizan la síntesis de Fischer-Tropsch.



La ecuación (1) corresponde a la metanación, la ecuación (2), a la producción de hidrocarburos más pesados que el metano, la (3), a la reacción de cambio agua–gas (water gas shift – WGS) y la ecuación (4) es la reacción Boudouard. La reacción de metanación y la reacción Boudouard son indeseables, mientras la reacción (2) es deseable, siendo la dominante cuando se aplica un catalizador compuesto de cobalto (Huber *et al.*, 2006; Balat *et al.*, 2009; Goyal *et al.*, 2008).

## **2.1.10 Propiedades de los residuos sólidos domésticos.**

### **2.1.10.1 Poder calorífico**

Este parámetro indica la cantidad de energía (en kWh) que se libera en forma de calor cuando la biomasa se quema completamente.

El valor calorífico se puede anotar de dos formas diferentes: bruto y neto. El bruto se define como la cantidad total de energía que se liberaría vía combustión, dividido por el peso. El neto es la cantidad de energía disponible después de la evaporación del agua en la biomasa; es decir, es la cantidad de energía realmente aprovechable, y siempre es menor que el poder calorífico bruto. Sin embargo, en la práctica, la humedad relativa es el factor más importante que determina el poder calorífico.

### **2.1.10.2 La humedad**

La humedad de una muestra *n* es toda sustancia que se vaporiza con la aplicación de calor, por lo tanto, los métodos termo-gravimétricos no determinan el contenido de agua, sino el contenido de humedad de una muestra. (Mettler-Toledo AG 2009).

Mendoza y Palomares (Ed. Univ. Politéc. Valencia, 2009) categorizan a la humedad en los RSU como “íntimamente relacionada con su poder calorífico”. Lo cual es corroborado en el libro *Reciclado y Tratamiento de Residuos* (et al. UNED, 2008) “...los residuos alimentarios presentan valores entre 131 y 481 kg/m<sup>3</sup> con valores de humedad correspondientes a 50 y 80%, mientras que los RSU compactados en vertedero tienen valores entre 590 y 742 kg/m<sup>3</sup> con un contenido de humedad del 15 al 40%”.

Los RSU están compuestos de materiales muy heterogéneos, lo que lleva a la necesidad de reagruparlos en categorías de cierta homogeneidad, se pueden encontrar tres grupos: Inertes (metales, vidrios), fermentables (orgánicos), combustibles (papel y derivados) (Mendoza y Palomares, et al.; 2009, pag. 104-105) Por lo tanto, antes de realizar cualquier medición con respecto a la humedad es necesario clasificar, sin la clasificación, un resultado dentro del rango de lo eficiente es muy difícil de lograr.

El método de determinación de humedad varía de las circunstancias en que se va a realizar: para qué se va a realizar, cuando y como se lo va a realizar. La humedad tiene vital importancia en el análisis de los RSU, primero, sirve como parámetro a grandes rasgos de las características químicas de los residuos, segundo, de un conocimiento bastante útil de la estructura física, tercero, para corroborar la aplicabilidad de la muestra en un determinado proceso. Gonzales Julián (2007, pág. 29).

Existen tres métodos para la determinación de la humedad:

a) Estufa de secado: la muestra es introducida a 80°C en una estufa con circulación forzada de aire, hasta obtención de peso constante. La diferencia entre el peso de entrada y salida es el peso de agua contenido en la muestra y el cociente de esta cantidad entre el peso en húmedo, multiplicado por 100, determina el % de agua que contiene la muestra. Este sistema es el más fiable y más comúnmente utilizado. Resulta adecuado preparar muestras por duplicado a efectos de comprobación. Estas serán de 10 a 15 Kg.

b) Rayos infrarrojos: la muestra es situada bajo la proyección de lámparas de infrarrojos, directamente sobre una balanza destinada al efecto, la cual da la lectura directa de la humedad contenida en la muestra. Este método permite obtener resultados más rápidos pero no es adecuado para secar muestras que van a analizar después, porque con él se pueden volatilizar otras sustancias además del agua. Estos equipos trabajan con cantidades muy pequeñas (25gr.) por lo que los resultados obtenidos, aunque rápidos, son dudosamente representativos.

c) Destilación de tolueno: este método se basa en la destilación del agua de una muestra de residuos que se ha sumergido en tolueno a la temperatura de ebullición (110,8°C). El tolueno y el agua se condensan y como no son miscibles se puede medir la cantidad de agua condensada. Este método es aún más rápido pero menos exacto que los anteriores. Al igual que el anterior opera con cantidades muy pequeñas de muestra (30 gr).”

### **2.1.10.3 Criterio de desconexión en el medidor de humedad**

El criterio de desconexión define cuándo el equipo (termo-balanza) debe concluir la desecación. Ello le evita tener que mirar el reloj e interrumpir manualmente la desecación.

#### **2.1.10.3.1 Pérdida de peso por unidad de tiempo**

En cuanto la pérdida de peso media no alcanza un valor prefijado durante un tiempo dado, el equipo considera terminada la desecación y cierra automáticamente el proceso de medida. Durante la desecación puede leer en el indicador de tiempo cuánto dura el proceso de medida. Durante los 30 primeros segundos el criterio de desconexión está inactivo. En la termo-balanza Mettler-Toledo están disponibles los 5 ajustes siguientes:

- 1) Ajuste útil para muestras de desecación muy rápida (humedad superficial) o para mediciones rápidas de tendencia (relativamente imprecisas).
- 2) Ajuste apropiado para muestras de desecación rápida.
- 3) Ajuste adecuado para la mayoría de las muestras.



- 4) Ajuste apropiado para muestras que se secan con rapidez intermedia.
- 5) Ajuste apropiado para muestras de desecación muy lenta (formadoras de películas). (Mettler-Toledo, 2011, pag 27).

Cabe indicar que las variables a ser utilizadas en la presente investigación serán las que se ajustan a la “Pérdida de peso por unidad de tiempo” entre las cuales constan las siguientes.

Criterio de desconexión 1: >1mg/10s

Criterio de desconexión 2: >1mg/20s

Criterio de desconexión 3: >1mg/50s

Criterio de desconexión 4: >1mg/120s

Criterio de desconexión 5: >1mg/140s

Cuando el extractor de humedad marque una pérdida de peso menor a 1 mg en los tiempos acá citados, la medición se dará por terminada, lo que influirá directamente sobre el tiempo y la calidad de secado. Mettler-Toledo, Manual de uso equipo HB43-S (2011, pag 22).

#### **2.1.10.4 Granulometría**

La segregación de los materiales y el tamaño físico de los componentes elementales de los residuos urbanos, constituyen un valor imprescindible para el dimensionado de los procesos mecánicos de separación y, en concreto, para definir cribas, tromeles y elementos similares que basan su separación exclusivamente en el tamaño. Las operaciones de recogida afectan al tamaño por efecto de la compresión o de mecanismos trituradores. En cada caso concreto es preciso efectuar los análisis pertinentes para adecuar la realidad de cada circunstancia al equipo que se desea dimensionar (Fernandez P., 2005).

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1 Marco metodológico.**

La presente investigación fue realizada en los laboratorios del INIAP Estación Experimental Santo Domingo ubicado en el km 38 vía Quinindé.

Los análisis proximales y elementales fueron realizados en el laboratorio de termovalorización del INER en Carapungo - Quito.

##### **3.1.1 Diseño o tipo de investigación.**

###### **Experimental**

Será necesario manipular variables a fin de estandarizar un método de determinación de humedad para RSD, por lo tanto se utilizará este método con el fin de encontrar la causalidad de las variables y así poder maximizar la precisión del método estándar.

###### **No observacional**

Debido a que se llevará a cabo selección y modificación de materia prima, además que se modificarán constantemente las variables (masa, temperatura, criterio de desconexión) a fin de considerar la mejor opción.

###### **Relacional**

Las variables tomadas en cuenta están implícitamente relacionadas una con la otra dentro del estudio y se afectan entre sí.

### **3.2 Método de investigación**

#### **Método de análisis**

La materia prima (residuos sólidos domésticos) será constantemente puesta en análisis tanto en base húmeda como en base seca que permitirán su correcta caracterización previa a la entrada al gasificador.

#### **Método experimental**

El principal método de la investigación será el experimental ya que se basa en establecer relaciones de causa-efecto entre los distintos tratamientos aplicados, ya que cada tratamiento contara con variables tanto dependientes como independientes que arrojarán distintos resultados.

#### **Método Sintético**

Finalmente, ya en posesión de todos los datos disponibles que le proporcionan los objetos en estudio, esta última fase se caracteriza por la realización, de una nueva elaboración teórico en función de dichos datos. Se vuelve así de la práctica a la teoría, del objeto al sujeto, cerrando así el ciclo del conocimiento, aunque no definitivamente, pues la nueva teoría construida solo podrá concebirse como un punto de arranque para el desenvolvimiento de nuevas investigaciones.

### **3.3 Técnica de investigación**

La técnica más utilizada de la presente investigación fue la bibliográfica debido a que en el Ecuador no se cuenta con estudios de caracterización de residuos sólidos domésticos, mediante esta se pudo obtener el método de muestreo más adecuado de residuos sólidos para la población bajo investigación, además se hizo estudio de campo, experimental e incluso la

técnica empírica que basada en las experiencias primarias de la investigación sirvió para corregir algunas variables.

### **Fuentes primarias**

En la presente investigaciones la fuente primaria cuenta con justa credibilidad debido a que las partes averiguadas fueron profesionales de tercer y cuarto nivel tanto de la UTE como del INER.

### **Fuentes secundarias**

En este tipo de fuente es conceptual, es decir su utiliza información ya que ha sido analizada y confirmada se la obteniendo de bibliotecas, artículos en revistas y libros, revisión de tesis semejantes o similares en ciertos aspectos así como artículos en internet.

## **3.4 Materiales, instrumentos y recursos.**

### **3.4.1 Materiales**

Mortero

Tijeras

Carretilla

Pala

Platos de aluminio

Papel absorbente

Espátula

### **3.4.2 Equipos**

Termobalanza Mettler-Toledo.

Bomba calorífica

Estufa de desecación

Refrigerador

Mufla

Espectrofotómetro

### **3.4.3 Reactivos**

Vapor de agua, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO.

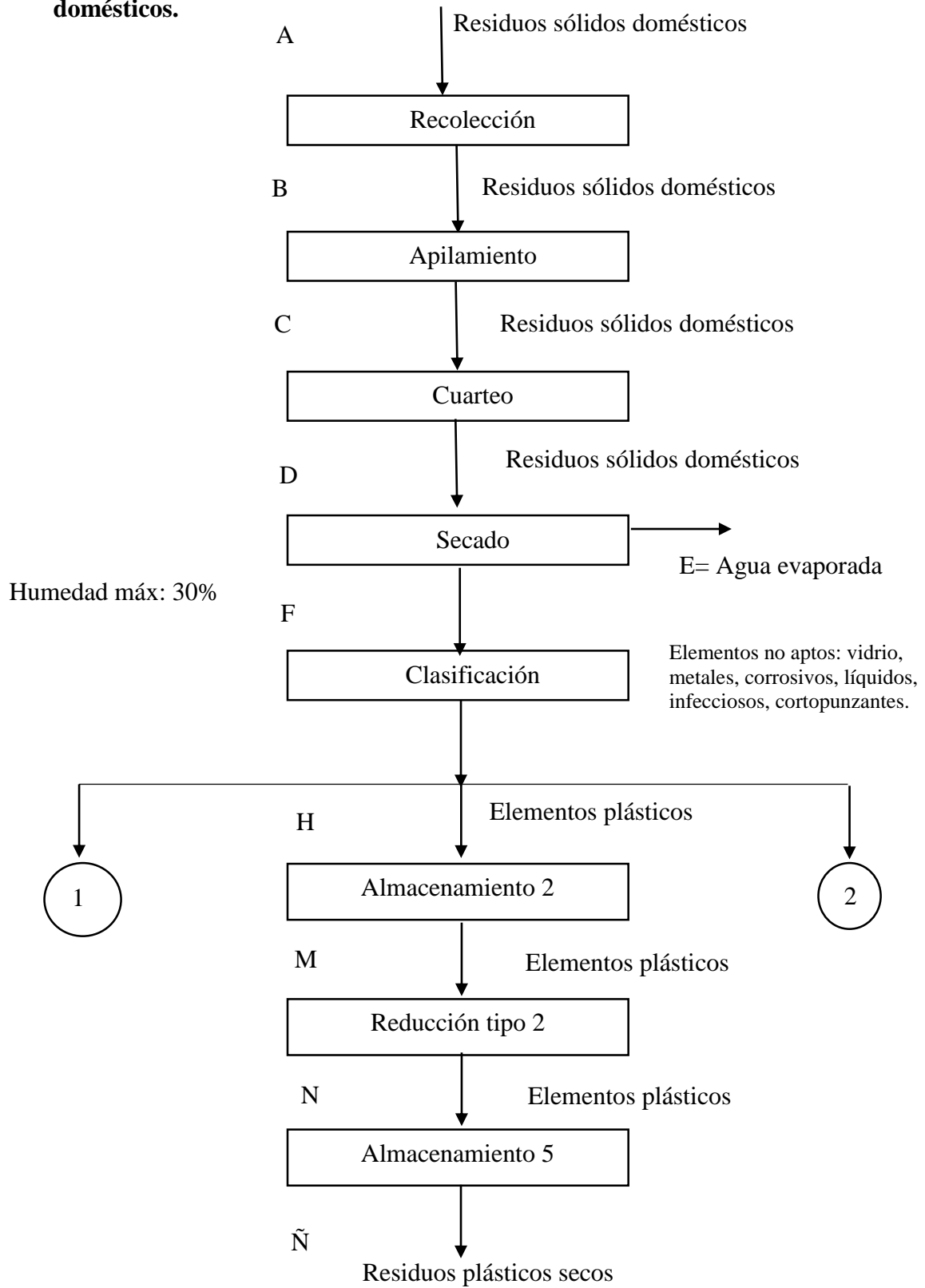
Materia prima: Residuos sólidos domésticos.

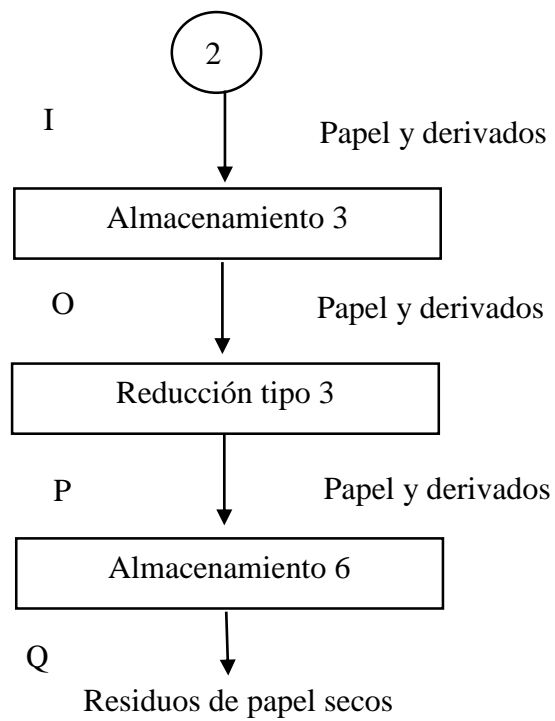
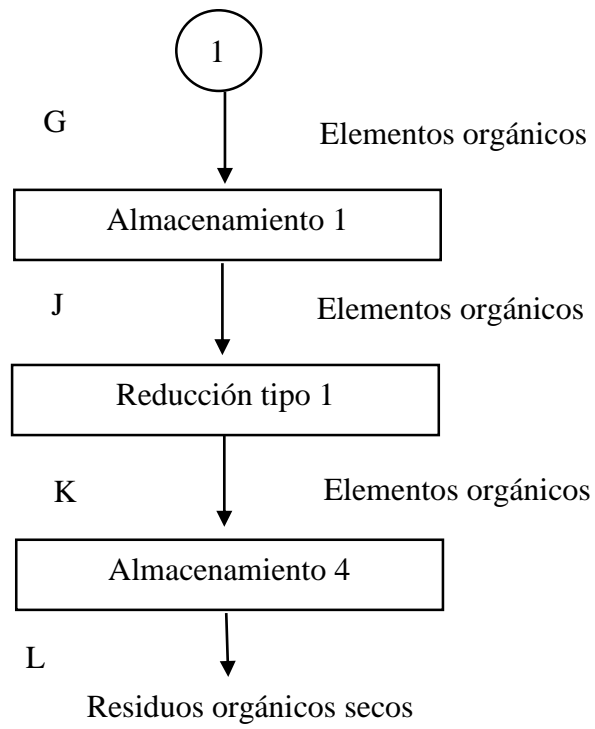
Orgánicos: cáscaras, restos de comida, descompuestos, etc.

Papel y derivados: papel de oficina, de uso doméstico, cartón, etc.

Plásticos: empaques desechables.

### 3.5 Diagrama de flujo cualitativo de pre-proceso de gasificación de residuos sólidos domésticos.





### 3.5.1 Memoria técnica para la clasificación de RSD a nivel de laboratorio en el INIAP.

**Recolección:** la recolección se hará directo de la fuente, es decir de las casas, por medio de un vehículo, este será transportado hasta un patio dispuesto para el apilamiento de los desechos, los residuos.

**Apilamiento:** se evitará almacenar al granel, la disposición de la materia prima será en pilas relativamente pequeñas, estas no deberán pasar de dos metros cúbicos, para hacer accesible el manipuleo. Los desechos no deberán estar contenidos en empaques impermeables (bolsas de basura) sino en contacto directo con el ambiente para facilitar la eliminación de humedad en exceso y favorecer la respiración de la materia orgánica. El canchón de acopio deberá contar con sistema de drenado, en el caso del INIAP, el patio se encuentra a 15° en desnivel y cuenta con canaletes para evacuación de lixiviados. Los desechos no podrán permanecer en patio por más de 48 horas para evitar el desarrollo de insectos, malos olores y pérdidas por descomposición.

**Cuarteo:** el cuarteo consiste en separar una pila cónica mediante cortes perpendiculares, de manera que se obtienen cuatro pilas de menor tamaño estas serán esparcidas sobre el patio de cemento a fin de favorecer el secado, el grosor de la capa de materia prima no deberá superar los 100 mm. En esta fase se identificarán elementos no categorizables para gasificación tales como residuos peligrosos, vidrios, arcillas, terrosos, de construcción o metálicos, los cuales serán debidamente separados. Así también los cuerpos excesivamente grandes (cartones, madera) deberán ser reducidos a un grosor máximo de 10 mm, pudiendo tratarse de películas.

**Secado:** el secado se realizará mediante un secador de bandejas, el grosor de la capa en la bandeja no podrá superar los 30 mm, la temperatura promedio de secado es de 80°C, las humedades máximas a obtener serán respectivamente: elementos orgánicos (40%), papel y derivados (10%), plástico residual (1%). El tiempo promedio de secado previsto es de 6 horas, pero podrá reducirse ostensiblemente dependiendo de la composición de los desechos.

**Muestreo:** será realizado mediante el método NT ENVIR 001 cuyas especificaciones están descritas en el capítulo III de este proyecto.



Se realizará análisis de humedad siendo apta para gasificación una materia prima cuyo contenido de humedad esté por debajo del 30%, el método estándar a utilizarse será el descrito en el capítulo III de este proyecto.

**Clasificación:** se la realizará de forma manual esta servirá para realizar la formulación de entrada al gasificador, los elementos a tomar en cuenta serán los siguientes:

Elementos orgánicos: por lo general cáscaras de alimentos ricos en carbohidratos como el plátano, la yuca o la papa, además desechos blandos de animales como la grasa, o residuos de cocidos, residuos de verduras y legumbres, residuos de alimentos procesados, etc.

Elementos de papel y cartón: residuos de oficina, papel de uso doméstico y de uso higiénico, restos de cartón corrugado, cartón prensado, etc. También serán considerados en esta categoría residuos de textiles y madera debido al tratamiento posterior.

Elementos plásticos y de origen industrial: empaques, embalajes o contenedores de productos. El operador deberá llevar en todo momento los implementos de seguridad adecuados: guantes de cuero, gafas protectoras, mono de seguridad, para evitar el contacto con superficies infecciosas, cortopunzantes o peligrosas.

**Almacenamiento 1:** correspondiente a los residuos orgánicos secos y sin reducir (humedad < 40%, humedad relativa máx.: 60%).

**Almacenamiento 2:** correspondiente a los residuos de plásticos secos y sin reducir (humedad <1% humedad relativa máx.: 60%).

**Almacenamiento 3:** correspondiente a los residuos de papel, cartón, textiles y restos de madera secos (humedad <10% humedad relativa máx.: 60%).

**Reducción tipo 1 (materia orgánica):** se realizará con un sistema de transporte con rompetorta, con el objetivo de pulverizar la materia previamente secada para que pueda ser gasificada de manera homogénea y controlada. Los cuerpos orgánicos relativamente grandes (>100 mm) deberán ser apilados a parte y reducidos en una cortadora de madera hasta alcanzar una tamaño relativamente pequeño (<50 mm) previo a su ingreso al tornillo rompetorta para evitar atascamientos y daños del equipo. La materia pulverizada será depositada en el silo de almacenamiento número 4.

**Reducción tipo 2 (residuos plásticos):** se realizará pulverización con cortadora de madera previamente a su ingreso al silo de almacenamiento 5, las partículas generadas deberán tener un tamaño máximo de 30 mm para favorecer la gasificación uniforme.

**Reducción tipo 3 (residuos de papel y cartón):** debido a su naturaleza laminar (papel de oficina, cartones, textiles y restos de madera) este tipo de tejidos deberán ser reducidos si lo requieren a un tamaño relativamente loable para el transporte por rompetorta (<100 mm) por ello los cuerpos grandes deberán ser separados y pasados por la cortadora de madera antes de entrar al rompetorta. Los residuos de papel domésticos (de higiene personal, de cocina) y los de un tamaño menor a 100 mm ingresarán al rompetorta directamente junto a los elementos reducidos en la cortadora de madera antes descritos. Los residuos pulverizados serán depositados en el silo de almacenamiento número 6.

**Almacenamiento 4:** correspondiente a los residuos orgánicos secos pulverizados (humedad < 40%, humedad relativa máx.: 60%, temperatura promedio: 35°C). El silo de almacenamiento estará dispuesto encima del gasificador, tendrá una compuerta en la parte inferior para dosificar materia prima según lo necesite el proceso.

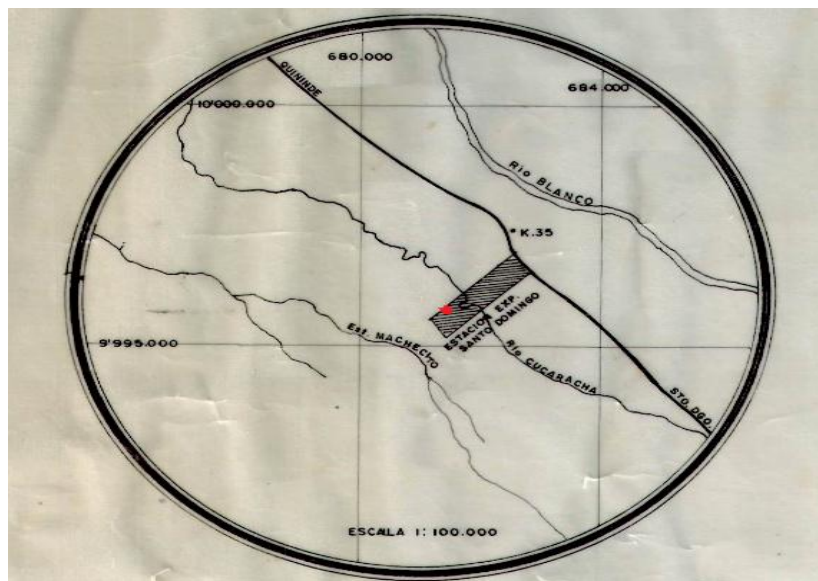
**Almacenamiento 5:** correspondiente a los residuos de plásticos pulverizados (humedad < 1%, humedad relativa máx.: 60%, temperatura promedio: 35°C). El silo de almacenamiento estará dispuesto encima del gasificador, tendrá una compuerta en la parte inferior para dosificar materia prima según lo necesite el proceso.

**Almacenamiento 6:** correspondiente a los residuos de papel, cartón, textiles y restos de madera pulverizados (humedad < 1%, humedad relativa máx.: 60%, temperatura promedio: 35°C). El silo de almacenamiento estará dispuesto encima del gasificador, tendrá una compuerta en la parte inferior para dosificar materia prima según lo necesite el proceso.

### 3.6 Composición de residuos sólidos domésticos de INIAP - estación experimental santo domingo.

#### 3.6.1 Ubicación del sitio de estudio.

La investigación se llevó a cabo en el INIAP EESD (Estación Experimental Santo Domingo), específicamente en el área de laboratorio y en la planta de gasificación ubicada en el sector suroeste de la estación.



**Figura 5:** Ubicación de INIAP EESD, el marcador rojo corresponde a la ubicación de la planta dentro de la estación.

Las muestras fueron extraídas del bloque domiciliario ocupado por los trabajadores de la estación y sus familias, el cual consta de 33 viviendas incluyendo el comedor de la estación.

Al momento de realizarse esta investigación la planta de co-gasificación de residuos sólidos y carbón no se encuentra instalada. El recinto donde se instalará la planta de co-gasificación fue construido como planta piloto para extracción de aceite de palma africana, proyecto ejercido por el INIAP, quedan de aquel proyecto el galpón que consta de tres niveles en forma de escalera, oficinas, planta de generación de electricidad y estructura metálicas para tránsito humano y de materia prima.

Los equipos presentes actualmente corresponden al segundo proyecto que se llevó a cabo en la planta, puesto en marcha por la CIE (Corporación para la investigación energética) con el fin de aprovechar el poder energético del cuesco de nuez de palmiste para producir energía eléctrica. Quedan de este proyecto los siguientes equipos: horno de carbón, molino de martillos, cortadora de madera, peletizador, gasificador de lecho móvil, filtro de partículas gruesas para gases, filtro de partículas finas para gases, generador.

### **3.6.2 Método de muestreo.**

Se evaluó dos métodos de muestreo de residuos sólidos urbanos, el método francés MODECOME y el NT ENVIR 001 noruego. En el caso de las viviendas ubicadas en la estación experimental INIAP EESD (33 en total) se buscaba aplicar un método de muestreo que facilite el análisis de muestras pequeñas. Tanto MODECOME como NT ENVIR 001 tienen muchos puntos en común, y algunas diferencias pequeñas pero sustanciales. Se utilizó el método Noruego de caracterización de residuos sólidos urbanos (NT Envir 001) previamente evaluado.

### **3.7 Diseño experimental**

La tirada del diseño experimental se realizó mediante la fijación de una superficie de respuesta, es decir, se postularon los valores mínimos y máximos de las variables para obtener un rango de respuestas razonables. Para ello se realizó análisis de sensibilidad de las variables a fin de poder ajustarlas a su modelo más preciso.

### 3.7.1.1 Factores y niveles para el diseño experimental.

**Tabla 2:** Factores y niveles de estudio (residuos orgánicos).

<b>FACTORES</b>	<b>NIVELES</b>
<b>A: TEMPERATURA</b>	A1: 130°C A2: 140°C A3: 150°C
<b>B: CANTIDAD DE MASA</b>	B1: 1gr B2: 2gr B3: 3gr
<b>C: CRITERIO DE DESCONEXIÓN</b>	C1: >1mg/10s C2: >1mg/30s C3: >1mg/50s

**Tabla 3:** Factores y niveles de estudio (residuos papel).

<b>FACTORES</b>	<b>NIVELES</b>
<b>A: TEMPERATURA</b>	A1: 100°C A2: 115°C A3: 130°C
<b>B: CANTIDAD DE MASA</b>	B1: 1gr B2: 2gr B3: 3gr
<b>C: CRITERIO DE DESCONEXIÓN</b>	C1: >1mg/10s C2: >1mg/30s C3: >1mg/50s

**Tabla 4:** Factores y niveles de estudio (residuos plásticos).

<b>FACTORES</b>	<b>NIVELES</b>
<b>A: TEMPERATURA</b>	A1: 100°C A2: 110°C A3: 120°C
<b>B: CANTIDAD DE MASA</b>	B1: 0,5gr B2: 1gr B3: 1,5gr
<b>C: CRITERIO DE DESCONEXIÓN</b>	C1: >1mg/50s C2: >1mg/120s C3: >1mg/140s

### 3.7.1.2 Interacciones y tratamientos.

#### Residuos orgánicos

**Tabla 5:** Combinaciones de los tratamientos experimentales.

Std	Muestras	A	B	C	Unidad experimental
1	1	130°C	1gr	1mg/50s	10kg/h
15	2	140°C	2 gr	1mg/10s	10kg/h
6	3	140°C	1 gr	1mg/30s	10kg/h
2	4	150°C	1 gr	1mg/10s	10kg/h
3	5	130°C	1 gr	1mg/10s	10kg/h
14	6	150°C	3 gr	1mg/50s	10kg/h
13	7	130°C	3 gr	1mg/50s	10kg/h
9	8	150°C	3 gr	1mg/10s	10kg/h
4	9	130°C	3 gr	1mg/10s	10kg/h
12	10	140°C	2.5 gr	1mg/30s	10kg/h
16	11	150°C	3 gr	1mg/10s	10kg/h
18	12	130°C	1 gr	1mg/50s	10kg/h
11	13	150°C	2 gr	1mg/30s	10kg/h
8	14	140°C	3 gr	1mg/50s	10kg/h
17	15	130°C	3 gr	1mg/10s	10kg/h
10	16	150°C	1 gr	1mg/50s	10kg/h
5	17	140°C	2 gr	1mg/10s	10kg/h
7	18	130°C	2 gr	1mg/30s	10kg/h

#### Residuos de papel y derivados.

**Tabla 6:** Combinaciones de los tratamientos experimentales.

Std	Run	A	B	C	Unidad experimental
4	1	100°C	1gr	1mg/50s	10kg/h
13	2	100°C	3 gr	1mg/50s	10kg/h
3	3	100°C	3 gr	1mg/10s	10kg/h
1	4	130°C	1 gr	1mg/10s	10kg/h
15	5	100°C	3 gr	1mg/10s	10kg/h
6	6	115°C	1 gr	1mg/30s	10kg/h
2	7	100°C	1 gr	1mg/10s	10kg/h
7	8	100°C	2 gr	1mg/30s	10kg/h
16	9	130°C	1 gr	1mg/10s	10kg/h
8	10	115°C	3 gr	1mg/50s	10kg/h
5	11	115°C	2 gr	1mg/10s	10kg/h
10	12	130°C	3 gr	1mg/30s	10kg/h
17	13	100°C	1 gr	1mg/50s	10kg/h
18	14	100°C	1 gr	1mg/10s	10kg/h
14	15	130°C	3 gr	1mg/50s	10kg/h
9	16	130°C	1 gr	1mg/50s	10kg/h
12	17	130°C	3 gr	1mg/10s	10kg/h
11	18	122.5°C	2 gr	1mg/40s	10kg/h

## Residuos plásticos.

**Tabla 7:** Combinaciones de los tratamientos experimentales.

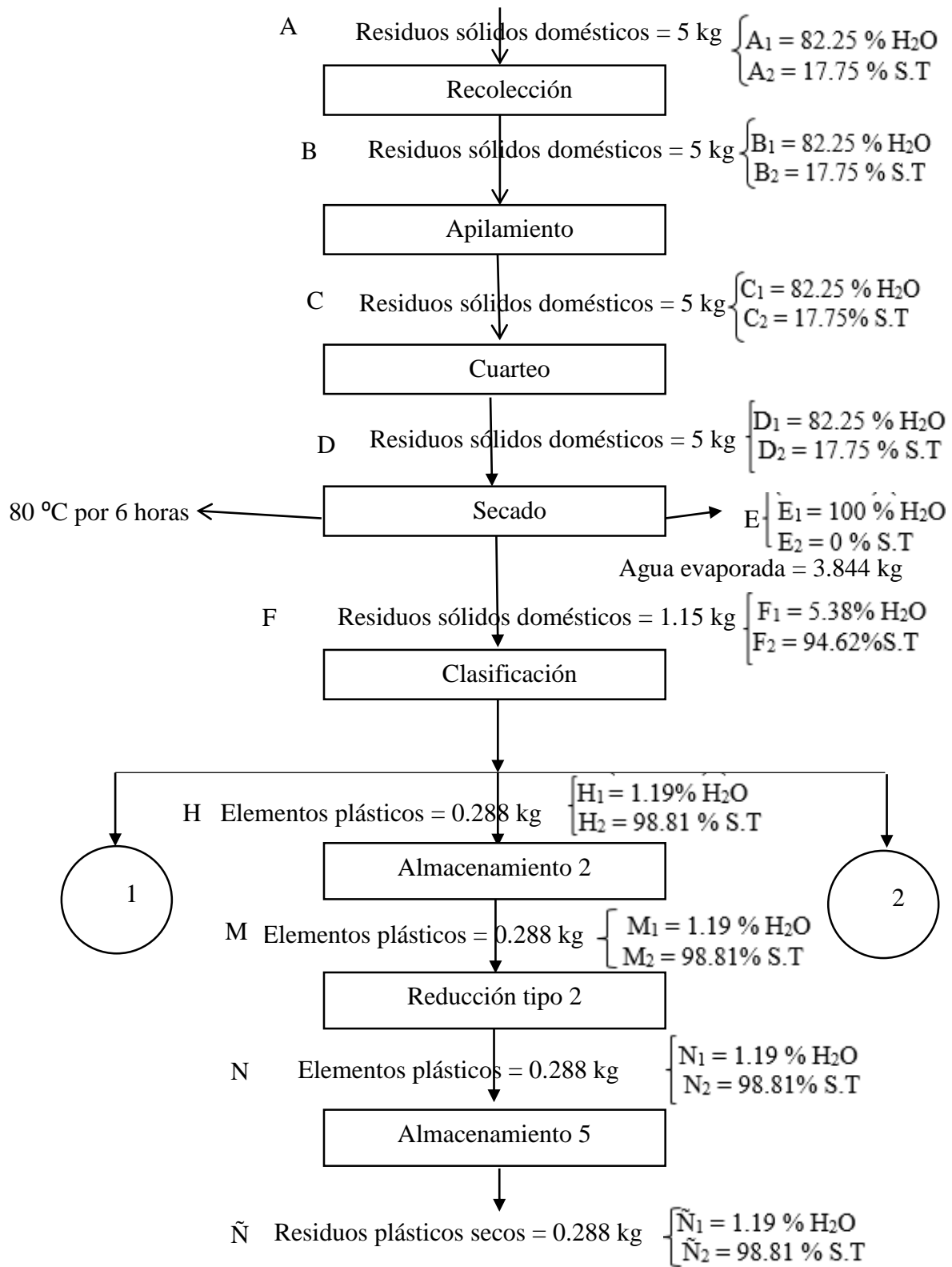
Std	Run	A	B	C	Unidad experimental
12	1	115°C	1gr	1mg/95s	10kg/h
5	2	110°C	1gr	1mg/50s	10kg/h
15	3	110°C	1.5gr	1mg/95s	10kg/h
7	4	100°C	1gr	1mg/95s	10kg/h
1	5	100°C	0.5gr	1mg/50s	10kg/h
18	6	100°C	0.5gr	1mg/50s	10kg/h
3	7	120°C	0.5gr	1mg/95s	10kg/h
8	8	120°C	1.5gr	1mg/50s	10kg/h
16	9	120°C	1.5gr	1mg/140s	10kg/h
10	10	100°C	0.5gr	1mg/140s	10kg/h
4	11	100°C	1.5gr	1mg/140s	10kg/h
9	12	120°C	1.5gr	1mg/140s	10kg/h
11	13	110°C	1gr	1mg/140s	10kg/h
14	14	120°C	0.5gr	1mg/140s	10kg/h
13	15	120°C	0.5gr	1mg/50s	10kg/h
2	16	100°C	1.5gr	1mg/50s	10kg/h
17	17	120°C	1.5gr	1mg/50s	10kg/h
6	18	110°C	1.5gr	1mg/95s	10kg/h

### 3.7.1.3 Variables a medir

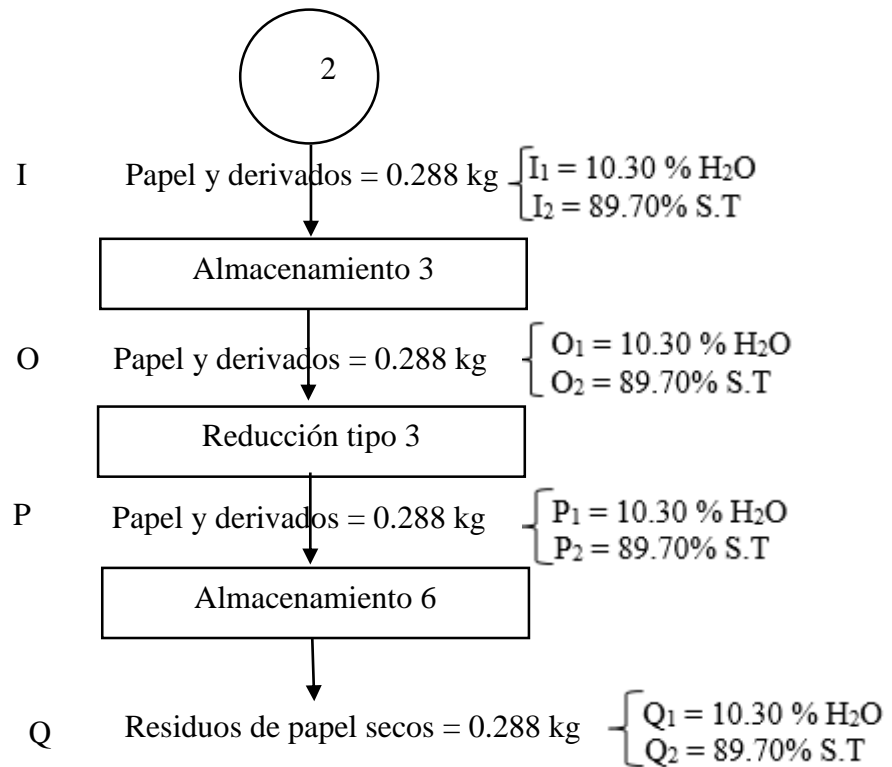
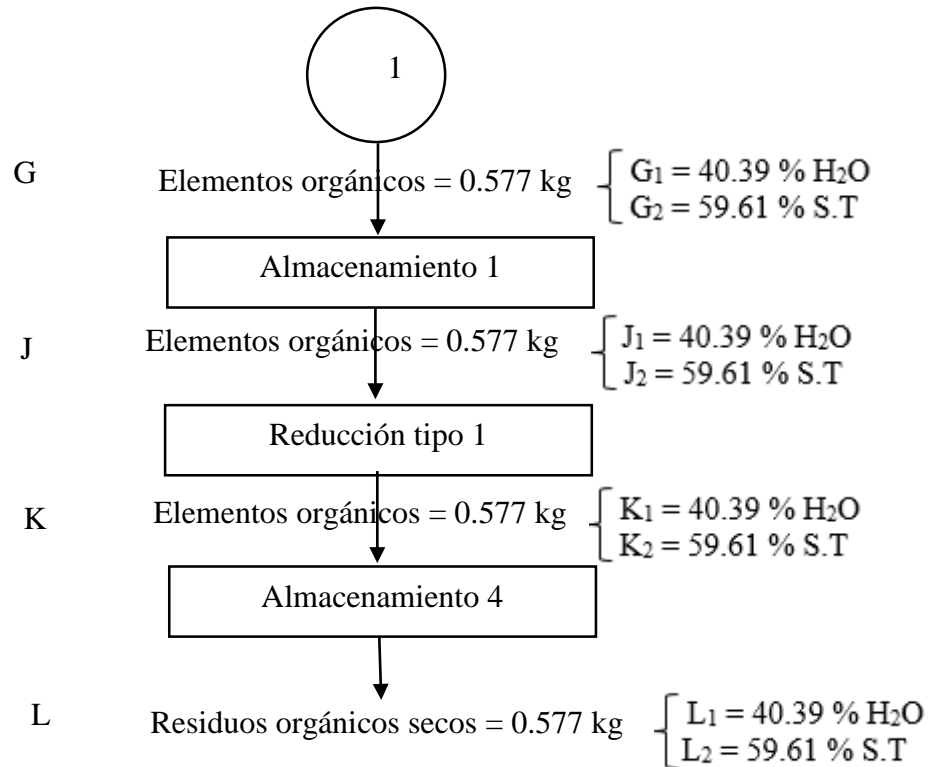
**Tabla 8:** Variables dependientes

Variables	Unidades de medida	Frecuencia de medición
<b>Humedad</b>	%	Producto seco
<b>Tiempo</b>	Minutos	Producto seco

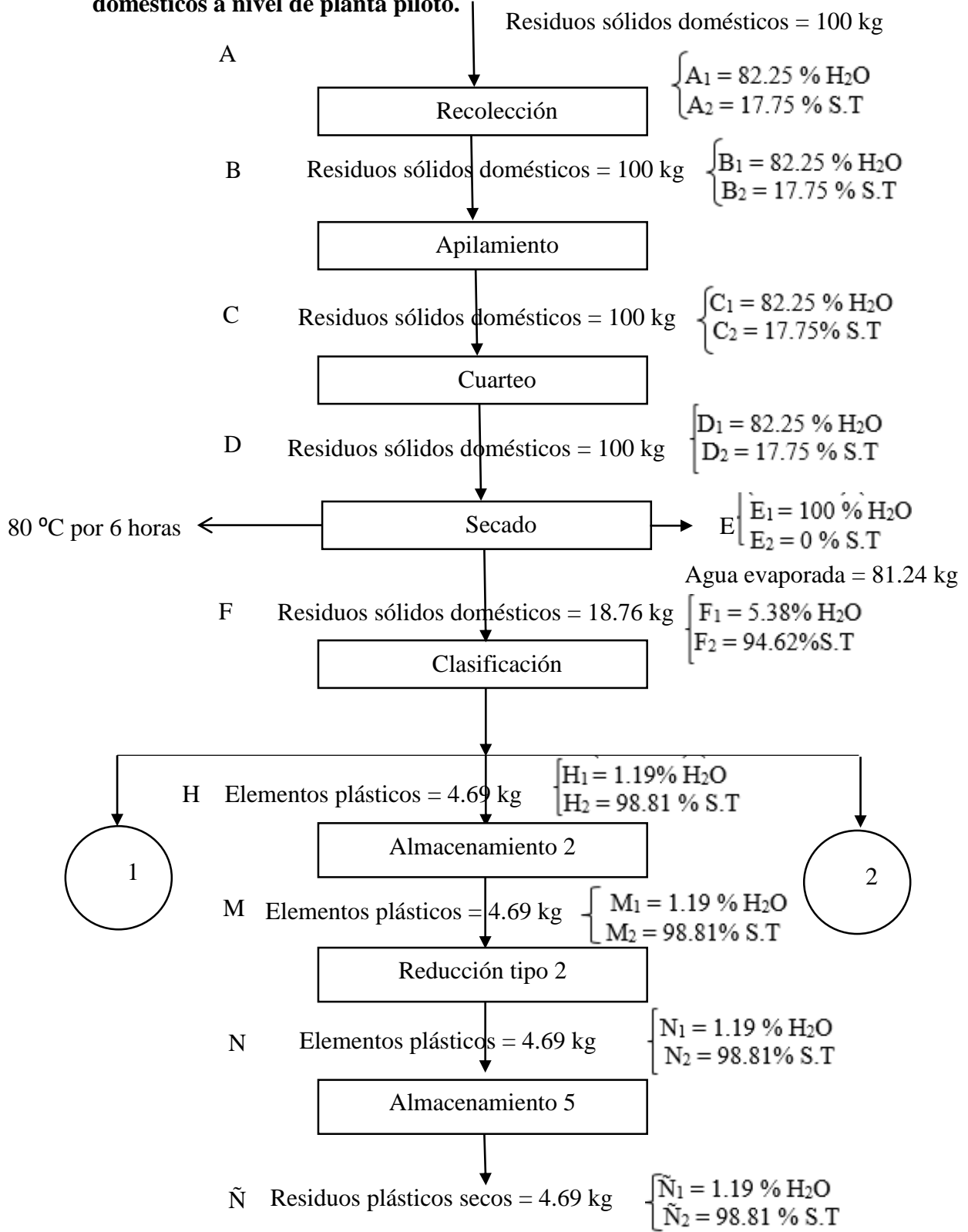
### 3.8 Diagrama de flujo cuantitativo de pre-proceso de gasificación de residuos sólidos domésticos a nivel de laboratorio.

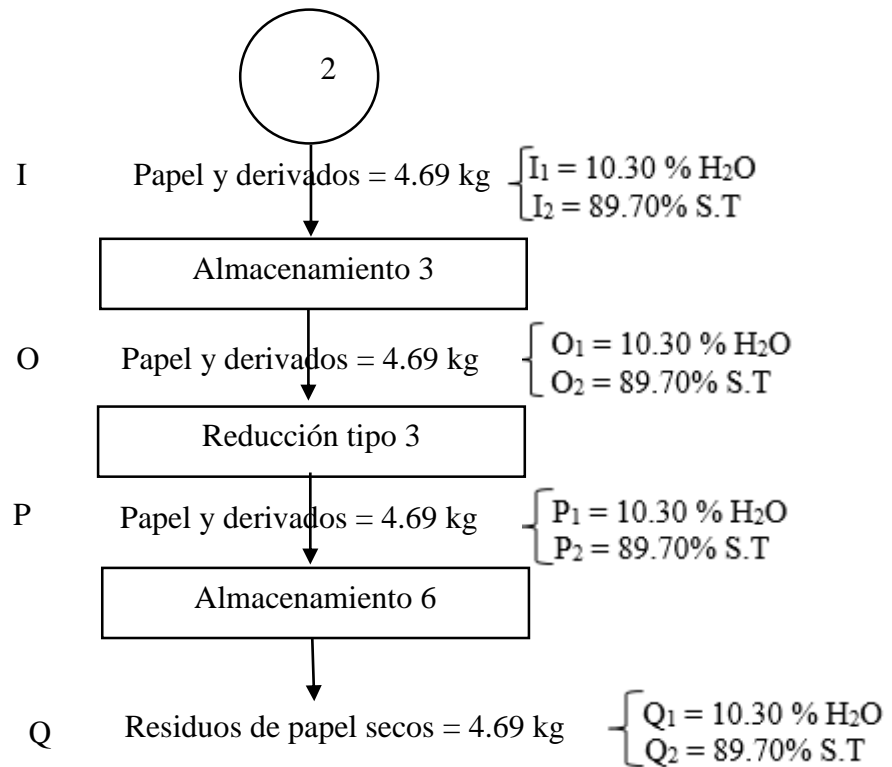
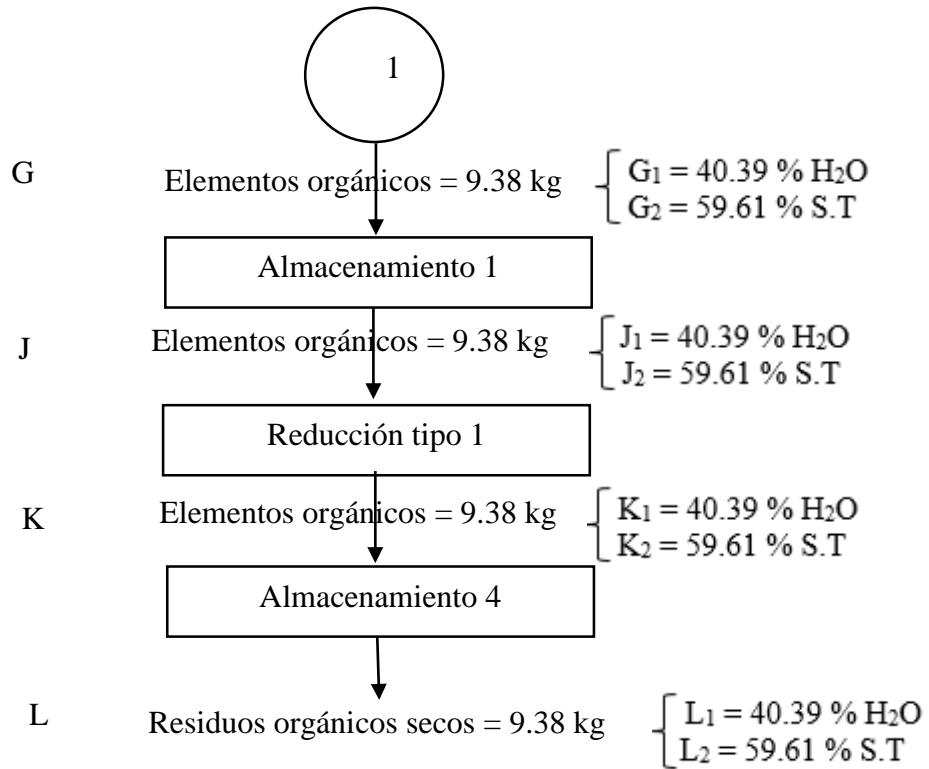






**3.9 Diagrama de flujo cuantitativo de proceso de gasificación de residuos sólidos domésticos a nivel de planta piloto.**





## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Composición de residuos sólidos domésticos Estación Experimental Santo Domingo INIAP.

De un total de 441.39 kg de materia analizada durante las 14 fechas de muestreo se obtuvo la siguiente composición promedio de los residuos sólidos producidos por las 33 viviendas que conforman la estación experimental.

**Tabla 9:** Composición de RSD INIAP 2014.

% Residuos orgánicos	% Papel y derivados	% Plásticos residuales	% Otros residuos
72.079	9.867	8.088	9.203

El resultado de este estudio no puede tomarse por canónico sin embargo si sirve para dar una idea lo bastante acertada del comportamiento de consumo del habitante rural de la región costa, y para enfocar la humedad de los residuos sólidos como piedra angular de su caracterización debido al alto porcentaje de materia orgánica presente.

De manera secundaria a la composición se realizó sub-categorización, de manera que las composiciones obtenidas mediante el muestreo se mantengan durante la tirada experimental y garantizar la precisión y repetitividad de los resultados.

**Tabla 10:** Formulación en porcentajes para análisis de humedad (diseño experimental).

Residuos orgánicos				Residuos de papel				Residuos plásticos	
Masa Cáscaras de frutas	Masa cáscaras y desechos de alimentos ricos en almidones (papa, yuca, plátano, cereales.)	Masa desechos de verduras y legumbres (hojas, corazones, etc.)	Masa desechos animales (tejidos no óseos)	Masa papel periódico	Masa papel de oficina	Masa cartón	Masa papel de baño y papel de cocina	Masa polietileno	Masa poliestireno
17.22	44.78	31.82	6.17	36.00	10.85	22.34	30.70	80.24	19.38

## 4.2 Método estándar de determinación de humedad de residuos sólidos domésticos mediante termo-balanza.

### 4.2.1 Análisis de sensibilidad

**Tabla 11:** Rangos de variables de residuos sólidos orgánicos

Tamaño de partículas	Temperatura		Masa		Criterio de desconexión	
Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
< 2 mm radio	130 °C	150 °C	1 gr	3 gr	1 mg/10s	1 mg/50s

Tamaño de partículas: el maceramiento acelera la desecación de la muestra, así como impide que se formen películas que impidan la salida de humedad.

Temperatura: Los residuos sólidos orgánicos por lo general son ricos en azúcares por lo tanto a temperaturas altas tienden a caramelizarse e impedir la salida de humedad, a temperatura demasiado baja en cambio afecta el factor tiempo.

Masa: el rango fue escogido de manera experimental siguiendo el siguiente patrón: a mayor masa, mayor precisión, a mayor masa, mayor tiempo de desecación.

Criterio de desconexión: al tratarse de tejidos mixtos, puede ocurrir que la velocidad de desecación varíe de análisis a análisis, por lo tanto se escoge un rango de desconexión

obtenido de manera experimental de acuerdo al comportamiento de desecación de la materia orgánica.

#### 4.2.1.1 Residuos de papel y derivados.

**Tabla 12:** Rangos de variables de residuos de papel y derivados.

Tamaño de partículas	Temperatura		Masa		Criterio de desconexión	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
< 2 mm espesor	100 °C	130 °C	1 gr	3 gr	1 mg/10s	1 mg/50s

Tamaño de partículas: el espesor no deberá sobrepasar los 2 mm sin embargo se puede ser de forma laminar.

Temperatura: obtenida de forma experimental.

Masa: obtenida de forma experimental según el siguiente patrón, a mayor masa, mayor volumen, a mayor masa, mayor tiempo.

Criterio de desconexión: la pulpa de papel es un tejido homogéneo proclive a desecarse con facilidad por lo que no se utilizó desconexión lenta.

#### 4.2.1.2 Residuos plásticos.

**Tabla 13:** Rangos de variables de residuos de plástico

Tamaño de partículas	Temperatura		Masa		Criterio de desconexión	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
< 2 mm espesor	100 °C	120 °C	0.5 gr	1.5 gr	1 mg/50s	1 mg/140s

Tamaño de partículas: el plástico es una sustancia homogénea de desecación lenta, por ello las partículas no podrán sobrepasar los 2 mm de espesor, sin embargo pueden ser laminares.

Temperatura: se escogieron temperaturas relativamente bajas para evitar la combustión y proteger los platos de aluminio.

Masa: la cantidad de masa de plástico no es significativa en la precisión del resultado.

Criterio de desconexión: se trabajó con desconexión lenta por tratarse de una sustancia resistente a la desecación. (Mettler-Toledo).

## 4.2.2 Métodos estándar de determinación de humedad

### 4.2.2.1 Fuentes de varianza y grados de libertad

**Tabla 14:** Análisis de varianza humedad en residuos sólidos orgánicos.

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Modelo	20.6324136	3	6.8774712	7.57357085	0.0030	significant
A	0.08780381	1	0.08780381	0.09669083	0.7604	
B	12.9061517	1	12.9061517	14.2124411	0.0021	
C	10.3131068	1	10.3131068	11.3569425	0.0046	
Residual	12.7132364	14	0.90808832			
Lack of Fit	12.1521975	10	1.21521975	8.66406787	0.0259	significant
Error exp.	0.56103889	4	0.14025972			
Total	33.34565	17				

Fuente: Desing-Expert. Versión 6.0.1

**Tabla 15:** Análisis de varianza humedad en papel y derivados..

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Modelo	17.818631	3	5.93954366	35.0379985	< 0.0001	significant
A	15.5731801	1	15.5731801	91.8678427	< 0.0001	
B	0.18994317	1	0.18994317	1.12049494	0.3077	
AB	2.94432783	1	2.94432783	17.3689024	0.0009	
Residual	2.3732409	14	0.16951721			
Lack of Fit	2.30709031	10	0.23070903	13.9505338	0.0108	significant
Error exp.	0.0661506	4	0.01653765			
Total	20.1918719	17				

Fuente: Desing-Expert. Versión 6.0.1

**Tabla 16:** Análisis de varianza humedad en plástico residual.

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	0.32623633	1	0.32623633	19.9797414	0.0004	significant
A	0.32623633	1	0.32623633	19.9797414	0.0004	
Residual	0.26125369	16	0.01632836			
Lack of Fit	0.24159919	12	0.02013327	4.09743633	0.0922	not significant
Pure Error	0.0196545	4	0.00491363			
Cor Total	0.58749002	17				

Fuente: Desing-Expert. Versión 6.0.1

**Tabla 17:** Análisis de varianza tiempo en residuos sólidos orgánicos.

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	105.902786	4	26.4756964	36.6355214	< 0.0001	significant
A	15.2896222	1	15.2896222	21.1568856	0.0005	
B	62.8948346	1	62.8948346	87.0301965	< 0.0001	
C	26.7917721	1	26.7917721	37.0728885	< 0.0001	
AB	7.53219314	1	7.53219314	10.4226087	0.0066	
Residual	9.39481792	13	0.7226783			
Lack of Fit	9.3266103	9	1.03629003	60.7726919	0.0006	significant
Pure Error	0.06820761	4	0.0170519			
Cor Total	115.297604	17				

Fuente: Desing-Expert. Versión 6.0.1

**Tabla 18:** Análisis de varianza tiempo en papel y derivados.

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	4.50665802	2	2.25332901	18.0274652	0.0001	significant
B	1.68882054	1	1.68882054	13.5111888	0.0022	
C	2.53862284	1	2.53862284	20.3099214	0.0004	
Residual	1.87491334	15	0.12499422			
Lack of Fit	1.53630462	11	0.13966406	1.64985773	0.3335	not significant
Pure Error	0.33860873	4	0.08465218			
Cor Total	6.38157136	17				

Fuente: Desing-Expert. Versión 6.0.1



**Tabla 19:** Análisis de varianza tiempo en residuos plásticos.

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	8.78691929	4	2.19672982	32.262839	< 0.0001	significant
A	1.27365343	1	1.27365343	18.7058395	0.0008	
B	1.14075306	1	1.14075306	16.753964	0.0013	
C	6.29008903	1	6.29008903	92.3810147	< 0.0001	
AC	0.55757012	1	0.55757012	8.18889741	0.0134	
Residual	0.88515111	13	0.06808855			
Lack of Fit	0.87024575	9	0.09669397	25.9487836	0.0034	significant
Pure Error	0.01490536	4	0.00372634			
Cor Total	9.67207039	17				

Fuente: Desing-Expert. Versión 6.0.1

### 4.2.3 Resultados y referencias de los análisis estadísticos.

#### 4.2.3.1 Resultados obtenidos de humedad.

**Tabla 20:** Resultados diseño experimental de residuos sólidos orgánicos

Tratamientos	A	B	C	R1	R2	R3	Media %
1	130°C	1gr	1mg/50s	79.08	80.92	76.8	78.9333333
2	140°C	2 gr	1mg/10s	76.41	77.81	73.91	76.0433333
3	140°C	1 gr	1mg/30s	75.27	75.78	77.49	76.18
4	150°C	1 gr	1mg/10s	75.95	77.42	76.92	76.7633333
5	130°C	1 gr	1mg/10s	75.02	74.8	74.15	74.6566667
6	150°C	3 gr	1mg/50s	79.51	78.89	79.64	79.3466667
7	130°C	3 gr	1mg/50s	79.2	78.82	78.85	78.9566667
8	150°C	3 gr	1mg/10s	77.55	77.04	77.32	77.3033333
9	130°C	3 gr	1mg/10s	79.17	78.61	78.31	78.6966667
10	140°C	2.5 gr	1mg/30s	79.48	78.42	79.01	78.97
11	150°C	3 gr	1mg/10s	77.47	77.19	77.56	77.4066667
12	130°C	1gr	1mg/50s	76.23	79.95	78.83	78.3366667
13	150°C	2 gr	1mg/30s	78.38	78.68	78.82	78.6266667
14	140°C	3 gr	1mg/50s	79.27	79.85	79.12	79.4133333
15	130°C	3 gr	1mg/10s	77.98	79.75	78.8	78.8433333
16	150°C	1 gr	1mg/50s	76.27	76.34	77.15	76.5866667
17	140°C	2 gr	1mg/10s	76.77	76.12	77.81	76.9
18	130°C	2 gr	1mg/30s	75.57	76.06	77.11	76.2466667
<b>Valor de referencia estufa de secado (residuos orgánicos)</b>							<b>79.666667 %</b>

**Tabla 21:** Resultados diseño experimental de residuos de papel y derivados

Tratamientos	A	B	C	R1	R2	R3	Media %
1	100°C	1gr	1mg/50s	8.26	7.6	7.98	7.94666667
2	100°C	3 gr	1mg/50s	7.59	7.25	7.37	7.40333333
3	100°C	3 gr	1mg/10s	6.8	7.09	7.48	7.12333333
4	130°C	1 gr	1mg/10s	10.5	9.23	9.15	9.62666667
5	100°C	3 gr	1mg/10s	6.8	7.1726	7.331	7.1012
6	115°C	1 gr	1mg/30s	8.37	8.78	8.57	8.57333333
7	100°C	1 gr	1mg/10s	8.81	9.2	8.96	8.99
8	100°C	2 gr	1mg/30s	9.01	8.59	8.86	8.82
9	130°C	1 gr	1mg/10s	10.5	9.23	9.15	9.62666667
10	115°C	3 gr	1mg/50s	8.6	8.45	8.58	8.54333333
11	115°C	2 gr	1mg/10s	9.27	8.97	8.71	8.98333333
12	130°C	3 gr	1mg/30s	11.04	9.99	10.12	10.38333333
13	100°C	1gr	1mg/50s	7.93	8.33333	8.186666	8.14999867
14	100°C	1 gr	1mg/10s	8.97	9.956666	7.141	8.689222
15	130°C	3 gr	1mg/50s	10.13	9.85	10.22	10.0666667
16	130°C	1 gr	1mg/50s	10.3	9.27	10.26	9.94333333
17	130°C	3 gr	1mg/10s	10.94	10.65	10.94	10.84333333
18	122.5°C	2 gr	1mg/40s	9.59	9.36	9.41	9.45333333
<b>Valor de referencia estufa de secado (residuos de papel y derivados)</b>							<b>10.03 %</b>

**Tabla 22:** Resultados de diseño experimental de residuos plásticos

Tratamientos	A	B	C	R1	R2	R3	Media %
1	115°C	1gr	1mg/95s	1.72	1.47	1.67	1.62
2	110°C	1gr	1mg/50s	1.38	1.27	1.27	1.30666667
3	110°C	1.5gr	1mg/95s	1.33	1.29	1.34	1.32
4	100°C	1gr	1mg/95s	1.15	1.15	1.27	1.19
5	100°C	0.5gr	1mg/50s	1.21	1.09	1.31	1.20333333
6	100°C	0.5gr	1mg/50s	0.997	1.01	1.21	1.07233333
7	120°C	0.5gr	1mg/95s	1.79	1.55	1.82	1.72
8	120°C	1.5gr	1mg/50s	1.82	1.16	1.31	1.43
9	120°C	1.5gr	1mg/140s	1.49	1.22	1.85	1.52
10	100°C	0.5gr	1mg/140s	1.3	1.12	1.42	1.28
11	100°C	1.5gr	1mg/140s	1.21	1.13	1.17	1.17
12	120°C	1.5gr	1mg/140s	1.49	1.17	1.977666	1.54588867
13	110°C	1.5gr	1mg/40s	1.47	1.23	1.3	1.33333333
14	120°C	0.5gr	1mg/140s	1.0555	1.17	1.166333	1.130611
15	120°C	0.5gr	1mg/50s	1.48	1.31	1.68	1.49
16	100°C	1.5gr	1mg/50s	1.17	1.2	1.21	1.19333333
17	120°C	1.5gr	1mg/50s	1.45	1.6	1.66	1.57
18	110°C	1.5gr	1mg/95s	1.33	1.38	1.38	1.36333333
<b>Valor de referencia estufa de secado (residuos plásticos)</b>							<b>1.1944 %</b>

#### 4.2.3.2 Resultados obtenidos de tiempo.

**Tabla 23:** Resultados de diseño experimental residuos sólidos orgánicos.

Tratamientos	A	B	C	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Media minutos
1	130°C	1 gr	1mg/50s	9.066	10.25	9.65	9.65333333
2	140°C	2 gr	1mg/10s	8.1	8.066	8.75	8.30533333
3	140°C	1 gr	1mg/30s	7.32	6.66	7.23	7.07
4	150°C	1 gr	1mg/10s	6.65	5.42	6	6.02333333
5	130°C	1 gr	1mg/10s	6.283	7	6.483	6.58866667
6	150°C	3 gr	1mg/50s	10.883	10.583	11.23	10.89866667
7	130°C	3 gr	1mg/50s	13.5	13.88	13.966	13.782
8	150°C	3 gr	1mg/10s	8.616	8.65	8.85	8.70533333
9	130°C	3 gr	1mg/10s	12.8	13.8	12.583	13.061
10	140°C	2.5 gr	1mg/30s	12.2	11.8	11.58	11.86
11	150°C	3 gr	1mg/10s	8.67	8.232	9.02	8.64066667
12	130°C	1 gr	1mg/50s	9.39	9.95	9.88	9.74
13	150°C	2 gr	1mg/30s	9.77	10	9.77	9.84666667
14	140°C	3 gr	1mg/50s	15.5	15.533	14.633	15.222
15	130°C	3 gr	1mg/10s	12.1	14.65	13.36	13.37
16	150°C	1 gr	1mg/50s	8.283	9.283	9.75	9.10533333
17	140°C	2 gr	1mg/10s	7.89	8.17	8.34	8.13333333
18	130°C	2 gr	1mg/30s	11.366	11.816	10.966	11.38266667
<b>Valor de referencia estufa de secado (residuos orgánicos)</b>							<b>360 minutos</b>

**Tabla 24:** Resultados de diseño experimental residuos de papel y derivados

Tratamientos	A	B	C	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Media minutos
1	100°C	1 gr	1mg/50s	1.483	1.35	1.35	1.39433333
2	100°C	3 gr	1mg/50s	2.066	2.466	2.183	2.23833333
3	100°C	3 gr	1mg/10s	1.3	0.916	0.95	1.05533333
4	130°C	1 gr	1mg/10s	0.683	0.72466667	0.76633333	0.72466667
5	100°C	3 gr	1mg/10s	1.78	1.6	2.238	1.87266667
6	115°C	1 gr	1mg/30s	0.85	0.89166667	0.93333333	0.89166667
7	100°C	1 gr	1mg/10s	0.683	0.72466667	0.76633333	0.72466667
8	100°C	2 gr	1mg/30s	0.716	0.716	0.7	0.71066667
9	130°C	1 gr	1mg/10s	0.781	0.76666333	0.877733	0.80846544
10	115°C	3 gr	1mg/50s	2.266	2.25	2.266	2.26066667
11	115°C	2 gr	1mg/10s	0.683	0.72466667	0.76633333	0.72466667
12	130°C	3 gr	1mg/30s	1.3	1.283	1	1.19433333
13	100°C	1 gr	1mg/50s	1.35	1.35	1.35	1.35
14	100°C	1 gr	1mg/10s	0.7663333	0.683333	0.76633333	0.73866654
15	130°C	3 gr	1mg/50s	2.6	2.6	2.85	2.68333333
16	130°C	1 gr	1mg/50s	1.35	1.4	1.366	1.372
17	130°C	3 gr	1mg/10s	0.833	0.866	0.866	0.855
18	122.5°C	2 gr	1mg/40s	1.183	1.22466667	1.26633333	1.22466667
<b>Valor de referencia estufa de secado (residuos de papel y derivados)</b>							<b>360 minutos</b>

**Tabla 25:** Resultados de diseño experimental de residuos plásticos.

Tratamientos	A	B	C	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Media minutos
1	115°C	1gr	1mg/95s	2.016	2.05766667	2.09933333	2.05766
2	110°C	1gr	1mg/50s	0.85	0.9	0.85	0.86666
3	110°C	1.5gr	1mg/95s	2.183	2.116	2.1	2.133
4	100°C	1gr	1mg/95s	2.016	2.05766667	2.09933333	2.05766
5	100°C	0.5gr	1mg/50s	0.683	0.716	0.683	0.694
6	100°C	0.5gr	1mg/50s	0.76666	0.68333	0.68333	0.71110
7	120°C	0.5gr	1mg/95s	1.35	1.4	1.35	1.36666
8	120°C	1.5gr	1mg/50s	0.95	0.9	0.85	0.9
9	120°C	1.5gr	1mg/140s	2.183	2.116	2.15766667	2.15222222
10	100°C	0.5gr	1mg/140s	2.766	2.583	2.7	2.683
11	100°C	1.5gr	1mg/140s	2.95	2.99166667	3.03333333	2.99166667
12	120°C	1.5gr	1mg/140s	2.62333	2.116	1.8776666	2.20566553
13	110°C	1.5gr	1mg/40s	2.77666	2.1576666	2.583	2.50577553
14	120°C	0.5gr	1mg/140s	0.7666	1.17	1.1583	1.03163333
15	120°C	0.5gr	1mg/50s	0.66	0.683	0.72466667	0.68922222
16	100°C	1.5gr	1mg/50s	1.35	1.45	1.49166667	1.43055556
17	120°C	1.5gr	1mg/50s	0.95	1.1	1.116	1.05533333
18	110°C	1.5gr	1mg/95s	2.016	2.116	2.116	2.08266667
<b>Valor de referencia estufa de secado (residuos de papel y derivados)</b>							<b>360 minutos</b>

#### 4.2.3.3 Residuos sólidos orgánicos

Hubo interacción ( $P < 0,0001$ ) entre la temperatura, masa y criterio de desconexión con la humedad, observándose el siguiente modelo:  $\text{Humedad (\%)} = 77.6873889 - 0.08286556A + 1.003629616B + 0.875655105C$ . Se puede observar en la superficie de respuesta que ajustando la termo-balanza a 145 °C, 3 gr de muestra y criterio de desconexión de 1 mg/50s se logra fidelidad máxima con el método de determinación de humedad por estufa (79.66 % hum.). La cantidad de masa tiene un comportamiento lineal respecto al resultado, es decir, mientras menos masa se utilice menor será la probabilidad de obtener un resultado fiel al método de referencia, el mejor resultado se lo obtuvo utilizando 3 gr de muestra. La temperatura interactúa con la cantidad de masa de esta manera la menor masa (1 gr) y la mayor temperatura (150 °C) muestran el método que más se aleja del de referencia. En cambio si se observan los métodos en que se utiliza 3 gr de masa, las temperaturas entre 140 y 150 °C son las que más se acercan al valor de referencia. Se puede observar sin embargo que a 130 °C la cantidad de masa no afecta al resultado, se puede decir que a menor temperatura menor interacción existe con la cantidad de masa. El método estándar de determinación de humedad designado tiene una duración de análisis de 9.59 minutos.

DESIGN-EXPERT Plot

Humedad (%)

X = A: Temperatura (°C)

Y = B: Masa (g)

Actual Factor

C: Desconexion (mg/s) = 50.00

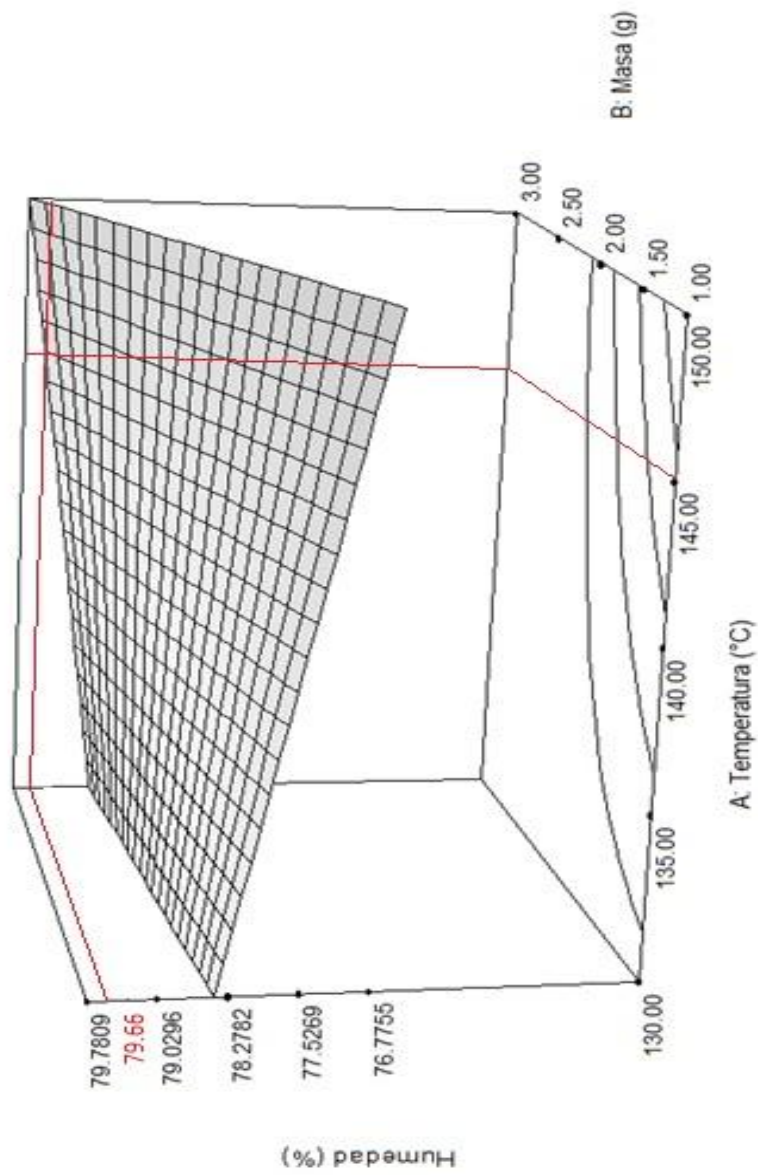


Figura 6: Superficie de respuestas para determinación de humedad

#### 4.2.3.4 Residuos de papel y derivados.

Hubo interacción ( $P < 0,0001$ ) entre la temperatura y masa con la humedad, observándose el siguiente modelo:  $\text{Humedad (\%)} = 8.447193374 + 0.00641633^a - 3.785567039B + 0.031933671AB$ . Se puede observar en la superficie de respuesta que ajustando la termobalanza a 130 °C, 2 gr de muestra y criterio de desconexión de 1 mg/10s se logra fidelidad máxima con el método de determinación de humedad por estufa (10.03 % hum.).

Existe una recta de métodos que coinciden con el de referencia que esta entre 122.5-130 °C y 2-3 gr, dentro de este intervalo se obedece el siguiente patrón: a mayor temperatura, menor masa, y viceversa, donde, por ejemplo se pueden encontrar distintos métodos como por ejemplo: 125 °C y 2.75 gr de muestra, 122.5 °C con 3 gr de muestra, o 128 °C y 2.25 gr de muestra de papel, y son todos igualmente válidos.

La pulpa de papel es una sustancia homogénea de fácil desecación, por lo tanto la cantidad de masa no tiene influencia en la precisión del resultado, por lo tanto se puede tomar del intervalo de soluciones aquella que describe la cantidad de masa más baja (2 gr).

El método escogido tiene una duración de análisis de 0.81 minutos.

DESIGN-EXPERT Plot

Humedad (%)

X = A: Temperatura (°C)

Y = B: Masa (g)

Actual Factor

C: Desconexion (mg/s) = 10.00

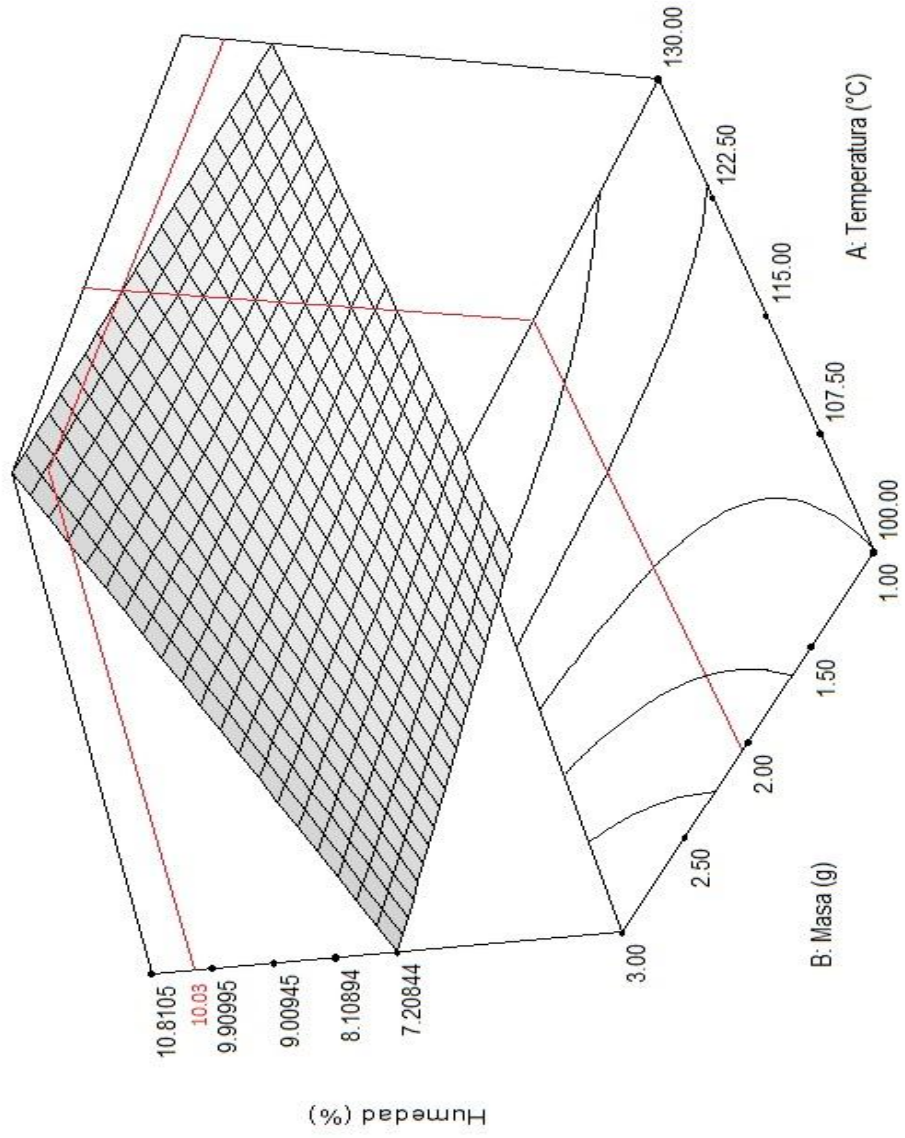


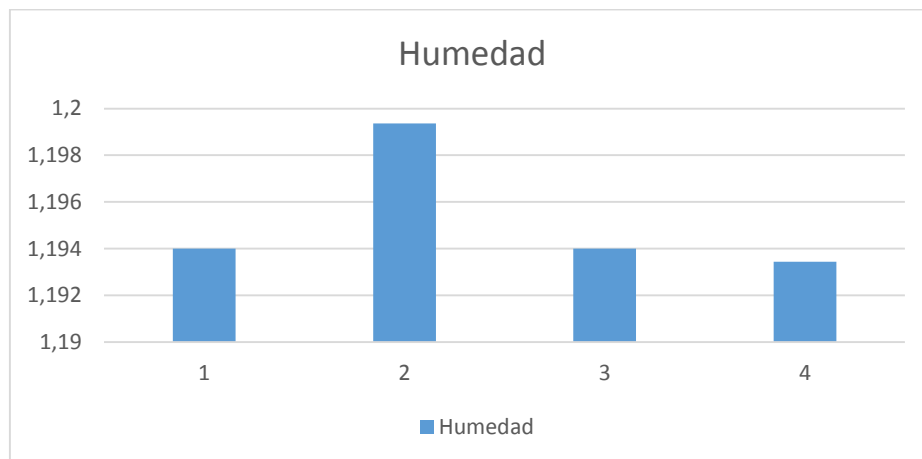
Figura 7: Superficie de respuestas para determinación de humedad en residuos de papel

#### 4.2.3.5 Residuos plásticos.

Hubo interacción ( $P < 0,0001$ ) entre la temperatura y la humedad, observándose el siguiente modelo:  $\text{Humedad (\%)} = -0.388554081 + 0.015765818A$ . el software Design Expert 6.0.1 arrojó 4 métodos respuesta válidos.

**Tabla 26:** Respuestas diseño experimental de residuos plásticos.

	Temperatura (°C)	Masa (g)	Desconexión (mg/s)	Tiempo (min)	Humedad (%)	Desirability
<b>1</b>	100.38	0.50	50.01	0.778232	1.194	0.98048009
<b>2</b>	100.72	0.50	50.30	0.781321	1.19936	0.97479495
<b>3</b>	100.38	0.56	50.00	0.816021	1.194	0.97207448
<b>4</b>	100.34	0.50	57.67	0.936248	1.19345	0.9426971



**Figura 8:** Respuestas diseño experimental de residuos plásticos.

De los cuales el método 4 muestra la mayor fidelidad al método de referencia (1.19%).



### 4.3 Análisis elementales y proximales de residuos sólidos domésticos.

#### 4.3.1 Residuos sólidos orgánicos.

**Tabla 27:** Análisis elementales residuos orgánicos.

Matriz de ensayo	Ensayo	Método	Resultado
Residuos sólidos urbanos	Carbono %	BS EN 15104:2011	40.39
	Hidrógeno %	BS EN 15104:2012	5.15
	Nitrógeno %	BS EN 15104:2013	5.87
	Azufre %	BS EN 15104:2014	0.61
	Oxígeno %	Análisis proximal	45.82

Fuente: INER 2014.

**Tabla 28:** Análisis proximales residuos orgánicos.

Matriz de ensayo	Ensayo	Método	Resultado
Residuos sólidos urbanos	Humedad %	BS EN 14774-3:2009	1.72
	Carbón volátil %	BS EN 15148:2009	79.07
	Carbón fijo %		1.71
	Cenizas %	BS EN 15148:2009	17.5
	Poder calorífico MJ/kg		15.95

Fuente: INER 2014.

#### 4.3.2 Residuos de papel y derivados

**Tabla 29:** Análisis elementales residuos de papel y derivados.

Matriz de ensayo	Ensayo	Método	Resultado
Residuos sólidos urbanos	Carbono %	BS EN 15104:2011	38.02
	Hidrógeno %	BS EN 15104:2012	5.08
	Nitrógeno %	BS EN 15104:2013	4.9
	Azufre %	BS EN 15104:2014	0.49
	Oxígeno %	Análisis proximal	49.35

Fuente: INER 2014.

**Tabla 30:** Análisis proximales residuos de papel y derivados.

Matriz de ensayo	Ensayo	Método	Resultado
Residuos sólidos urbanos	Humedad %	BS EN 14774-3:2009	4.66
	Carbón volátil %	BS EN 15148:2009	82.02
	Carbón fijo %		0.74
	Cenizas %	BS EN 15148:2009	12.58
	Poder calorífico MJ/kg		15.58

Fuente: INER 2014.

### 4.3.3 Residuos plásticos.

**Tabla 31:** Análisis elementales plástico residual

Matriz de ensayo	Ensayo	Método	Resultado
Residuos sólidos urbanos	Carbono %	BS EN 15104:2011	83.51
	Hidrógeno %	BS EN 15104:2012	9.02
	Nitrógeno %	BS EN 15104:2013	3.9
	Azufre %	BS EN 15104:2014	0.94
	Oxígeno %	Análisis proximal	2.63

Fuente: INER 2014.

**Tabla 32:** Análisis proximales plástico residual

Matriz de ensayo	Ensayo	Método	Resultado
Residuos sólidos urbanos	Humedad %	BS EN 14774-3:2009	75.49
	Carbón volátil %	BS EN 15148:2009	96.53
	Carbón fijo %		-
	Cenizas %	BS EN 15148:2009	3.83
	Poder calorífico MJ/kg		39.48

Fuente: INER 2014.

Según Xavier Elías Castells estos son los poderes caloríficos para los elementos residuales que hemos analizado. Papel: 17.17 MJ/kg, Verduras: 7.54 MJ/kg, Plásticos: 37.68 MJ/kg, en conclusión los resultados son lo bastante conformes con la bibliografía, excepto en los compuestos orgánicos cuyo ítem comparativo más parecido, las verduras, muestran un valor muy inferior al obtenido, esto se debe principalmente a que los residuos orgánicos como objeto engloban desde verduras a residuos animales y de jardín, por lo tanto es de esperarse

que, con la presencia de grasas y madera el poder calorífico de los residuos caracterizados en este proyectos sea de 15.58 MJ/kg. La humedad máxima de ignición de la mezcla recomendada por Castells es de 30 %, en ensayo de laboratorio la humedad final obtenida fue 23.19%.

#### 4.4 Obtención de datos de secado de RSD.

**Tabla 33:** Datos de secado de RSD.

Tiempo (hrs)	Muestra (kg)	H2O evap. (kg)	H2O total (kg)	XT perdida de humedad (kg)	X Cantidad de humedad kg H2O/kg m.s.	Contenido de humedad media kg H2O/kg m.s.	Velocidad kg/hr*m2
0	0.502						
0.5	0.409	0.093	0.093				
1	0.325	0.084	0.177	0.215214781	1.960325649		
1.5	0.255	0.07	0.247	0.145214781	1.322717047	1.64152135	1.04947526
2	0.205	0.05	0.297	0.095214781	0.867282332	1.09499969	0.74962519
2.5	0.164	0.041	0.338	0.054214781	0.493825866	0.6805541	0.61469265
3	0.139	0.025	0.363	0.029214781	0.266108508	0.37996719	0.37481259
3.5	0.125	0.014	0.377	0.015214781	0.138586788	0.20234765	0.20989505
4	0.12	0.005	0.382	0.010214781	0.093043316	0.11581505	0.07496252
4.5	0.118	0.002	0.384	0.008214781	0.074825928	0.08393462	0.02998501
5	0.117	0.001	0.385	0.007214781	0.065717233	0.07027158	0.0149925
5.5	0.116	0.001	0.386	0.006214781	0.056608539	0.06116289	0.0149925
6	0.116	0	0.386	0.006214781	0.056608539	0.05660854	0

#### 4.4.1 Datos y cálculos de laboratorio

Producto húmedo: 82.25 %

Producto seco: 5.36%

##### 4.4.1.1 Peso inicial de agua

Peso inicial de H<sub>2</sub>O = P. H<sub>2</sub>O eliminada + P. H<sub>2</sub>O masa seca

Peso H<sub>2</sub>O eliminada = Peso muestra Humedad – Peso muestra seca

Peso H<sub>2</sub>O eliminada = 0.502 – 0.116

Peso H<sub>2</sub>O eliminada = 0.386 Kg

#### 4.4.1.2 Peso de agua de la masa seca

Peso H<sub>2</sub>O de masa seca = Peso de masa seca \* %H<sub>2</sub>O de masa seca

Peso H<sub>2</sub>O de masa seca = 0.116 \* 0.0535

Peso H<sub>2</sub>O de masa seca = 0.0062

#### 4.4.1.3 Peso inicial del agua

Peso inicial del H<sub>2</sub>O = Peso H<sub>2</sub>O eliminada + Peso H<sub>2</sub>O masa seca

Peso inicial del H<sub>2</sub>O = 0.386 + 0.0062

Peso inicial del H<sub>2</sub>O = 0.392 Kg

#### 4.4.1.4 Peso de la muestra seca

Peso de la materia seca = Peso del producto seco – Peso del H<sub>2</sub>O del masa seca.

Peso de la materia seca = 0.116 – 0.00621

Peso de la materia seca = 0.1098 Kg.

#### 4.4.1.5 Porcentaje de humedad inicial

$$\% \text{ Humedad inicial del producto} = \frac{\text{Peso inicial de agua} * 100}{\text{Peso de la muestra húmeda}}$$

$$\% \text{ Humedad inicial del producto} = \frac{0.392 \text{ Kg} * 100}{0.502 \text{ Kg}}$$

% Humedad inicial del producto = 82.25 %

#### 4.4.1.6 Porcentaje de humedad final

% Humedad final del producto =  $\frac{\text{Peso de agua de la muestra seca} * 100}{\text{Peso del producto seco}}$

$$\% \text{ Humedad final del producto} = \frac{0.00621 \text{ Kg} * 100}{0.116 \text{ Kg}}$$

$$\% \text{ Humedad final del producto} = 5.357 \%$$

% Humedad final del producto = 5.357 %

#### 4.4.1.7 XT Pérdida de humedad

H<sub>2</sub>O Total = Peso inicial del H<sub>2</sub>O – XT Pérdida de humedad

XT Pérdida de humedad = Peso inicial del H<sub>2</sub>O – H<sub>2</sub>O Total

**Tabla 34:** XT pérdida de la humedad.

Tiempo (hrs)	Peso Inicial H <sub>2</sub> O (kg)	H <sub>2</sub> O total (kg agua)	XT Pérdida de humedad
1	0.39221	0.177	0.21521
1.5	0.39221	0.247	0.14521
2	0.39221	0.297	0.09521
2.5	0.39221	0.338	0.05421
3	0.39221	0.363	0.02921
3.5	0.39221	0.377	0.01521
4	0.39221	0.382	0.01021
4.5	0.39221	0.384	0.00821
5	0.39221	0.385	0.00721
5.5	0.39221	0.386	0.00621
6	0.39221	0.386	0.00621

#### 4.4.1.8 Contenido de humedad

Contenido de humedad (x) =  $\frac{\text{XT Pérdida de humedad}}{\text{Masa total seca}}$

$$\text{Contenido de humedad (x)} = \frac{0.21521}{0.1098}$$

Contenido de humedad (x) = 1.9603 Kg H<sub>2</sub>O/ Kg. Masa seca

#### 4.4.1.9 Velocidad de secado

$$V = \frac{XT1 - XT2}{\text{Tiempo (Hrs)} * \text{Área (m}^2\text{)}}$$

#### Datos obtenidos de la velocidad de secado

**Tabla 35:** Velocidad de secado.

Tiempo (hrs)	Velocidad de secado (kg H <sub>2</sub> O/hrs*m <sup>2</sup> )
1.5	1.04948
2	0.74963
2.5	0.61469
3	0.37481
3.5	0.20990
4	0.07496
4.5	0.02999
5	0.01499
5.5	0.01499
6	0.00000

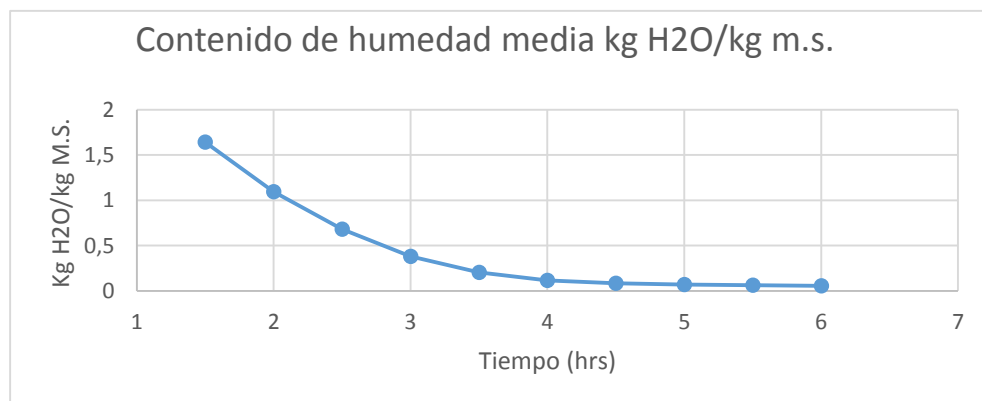


**Figura 9:** Velocidad de secado de RSD en secador de bandejas a nivel de laboratorio.

#### 4.4.1.10 Datos obtenidos de contenido de humedad en la curva de secado.

**Tabla 36:** Contenido de humedad

Tiempo (hrs)	Contenido de humedad media kg H <sub>2</sub> O/kg m.s.
1.5	1.64152135
2	1.09499969
2.5	0.6805541
3	0.37996719
3.5	0.20234765
4	0.11581505
4.5	0.08393462
5	0.07027158
5.5	0.06116289
6	0.05660854



**Figura 10:** Contenido de humedad.

#### 4.4.1.11 Tiempo teórico de secado.

$$\theta_1 = \int \frac{x_f}{x_1} dx/dq$$

$$\theta_1 = \frac{S}{A} * \frac{(X_1 - X_2)}{V}$$

$$\theta_1 = \frac{0.116 \text{ kg masa seca}}{0.1334 \text{ m}^2} * \frac{(1.960325649 - 1.322717047) \frac{\text{kgH}^2\text{O}}{\text{kg masa seca}}}{1.049475262 \text{ Kg H}_2\text{O/ Hrs} * \text{m}^2}$$

$$\theta_2 = \frac{S}{A} \int \frac{xf}{x1}$$

$$\theta_2 = \frac{0.116 \text{ kg masa seca}}{0.1334 \text{ m}^2} * (1.322717047 - 0.056608539) \frac{\text{kgH}^2\text{O}}{\text{kg masa seca}}$$

$$X \left\{ \frac{1}{\frac{1.049475262}{0.5}} + \frac{1}{0.614692654} + \frac{1}{\frac{0.209895052}{0.5}} \right\}$$

$$\theta^2 = 5.68 \text{ hrs}$$

$$\theta_1 = 0.53 \text{ hrs}$$

$$\theta_2 = 5.68 \text{ hrs}$$

$$\theta \text{ Total} = \theta_1 + \theta_2$$

$$\theta \text{ Total} = 0.53 + 5.68$$

$$\theta \text{ Total} = 6.21 \text{ hrs}$$

Tiempo teórico de secado = **6.21 hrs.**



#### 4.5 Tabla de resultados.

**Tabla 37:** Resumen de resultados obtenidos en los cálculos.

<b>Especificaciones</b>	<b>Resultados</b>
Humedad inicial	82.25
Tiempo teórico de secado	6.21 Horas
Tiempo practico de secado	6 Horas
Energía utilizada	155.69 W
Eficiencia del proceso	91.36%
Q practico del proceso	170.42 W
Q sensible	1.52 W
Q latente	146.76 W
Q producto teórico	155.69 W
U (coeficiente de transferencia de calor)	19.01 W/(m <sup>2</sup> *C)
<b>Datos de cálculos del diseño de un secador de residuos sólidos domésticos</b>	
Mpe	18.76 kg
Cpe	1.5318 KJ/kg*C
Tpe	85 °C
Tpi	25 °C
Ma	803.002 kg
Ca	1.00569 KJ/kg*C
Tae	85 °C
Tai	26 °C
Wai	0.01291 kg vapor/kg aire seco
Hve	2651.9 KJ/kg
Hvi	2547.2 KJ/kg
Mevap.	81.24 kg de agua evaporada
Hli	104.89 KJ/kg
Qp	10%
Q	13.16 Kw → 13163.9104 Watt
A (área de transferencia)	5.87 m <sup>2</sup>
Masa promedio por bandeja	6.25 kg
Ancho de bandeja	0.4891 m
Largo de bandeja	0.978 m
Alto de bandeja	3 cm
Masa promedio por estante	50 kg
Ancho interno del secador	1.421 m

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

- ✓ Los residuos sólidos domésticos pueden ser utilizados como materia prima para co-gasificación siempre y cuando el contenido de materiales combustibles (plástico, papel y cartón) tengan al menos la misma proporción que los elementos orgánicos, es decir 50:50. Debido a la baja capacidad de combustión de los últimos que son considerados por Xavier Elías Castells como de bajo rendimiento energético.
- ✓ Mediante diseño experimental se determinaron modelos estándar para análisis de humedad de residuos sólidos domésticos mediante termo-balanza, encontrando además las siguientes interacciones:

**Tabla 38:** Métodos estándar de determinación de humedad de residuos sólidos domésticos.

	Temperatura	Masa	Criterio de desconexión	Interacciones
<b>Residuos orgánicos</b>	145 °c	3 gr	1mg/50s	Temperatura, masa y criterio de desconexión.
<b>Papel</b>	130 °c	2 gr	1mg/10s	Temperatura y masa
<b>Plásticos</b>	100 °c	0.5 gr	1mg/50s	Temperatura

- ✓ Se realizó muestreo sistematizado in situ en el INIAP Santo Domingo, se obtuvo la siguiente composición de residuos: residuos orgánicos: 72.079%, residuos de papel y derivados: 9.87%, plástico residual: 8.088%, elementos no reactivos: 9.203%.
- ✓ La humedad promedio de los residuos sólidos domésticos dio un promedio de 82.25%, por lo que se diseñó un secador de bandejas y un sistema de adecuación de materia prima (RSD) para su correcto almacenamiento antes de ingresar al gasificador, se realizó

balance de materia del pre-proceso a nivel de laboratorio tomando como base de cálculo 5 kg de residuos sólidos domésticos, la humedad total final fue 23,19%, se realizó balance de energía del sistema de secado obteniendo una eficiencia de 91.36%.

- ✓ Se diseñó un secador de bandejas para residuos sólidos domésticos con una base de cálculo de 100 kg, obteniendo las siguientes dimensiones.

**Tabla 39:** Dimensiones de secador de bandejas para RSD.

<b>Número de bandejas</b>	16
<b>Ancho de bandejas</b>	0.4891 m
<b>Largo de bandejas</b>	0.9780 m
<b>Alto de bandejas</b>	0.3000 m
<b>Número de estantes</b>	2
<b>Número de bandejas por estante</b>	8
<b>Área total de transferencia de calor</b>	5.87 m <sup>2</sup>
<b>Volumen por bandeja</b>	0.01380 m <sup>3</sup>
<b>Alto del equipo</b>	1.0392 m
<b>Ancho del equipo</b>	1.5151 m
<b>Largo del equipo</b>	1.3661 m

## 5.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda que la humedad máxima de los residuos sólidos domésticos al salir del secador sea de 30% para posibilitar la ignición de la combustión incompleta.

Se recomienda el uso de mascarilla en el laboratorio para evitar la inhalación de sustancias volátiles presentes en los residuos, así mismo el uso de guantes de cuero en la manipulación fuera del laboratorio y guantes de latex en los procesos de laboratorio.

Se recomienda no mantener en hacinamiento la basura por más de dos días para evitar reacciones de fermentación, hidrólisis y por lo tanto la producción de lixiviados.

Se recomienda tomar en cuenta las interacciones obtenidas en las investigaciones experimentales que produjeron los métodos estándar de determinación de humedad de residuos sólidos domésticos por termo-balanza, esto sujeto a que pudieran entrar en proceso

elementos que no fueron caracterizados en esta investigación porque no estaban presentes en las muestras tomadas, ejemplo: restos de muebles de madera.

Se recomienda ubicar en la zona donde opere el secador de residuos sólidos ventanillas, ductos de ventilación o que el recinto sea abierto para evitar efecto invernadero dentro de la planta con sustancias volátiles tóxicas presentes en la basura como el metano producido por la fermentación natural de la materia en descomposición.

## BIBLIOGRAFÍA.

- Balat, M; Balat, M. (2009), Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 2: Gasification systems *Energy Conversion and Management* 50(12): 3158-3168.
- BNDES, CGEE, FAO, & CEPA (2008), Bioetanol de caña de azúcar una energía para el desarrollo, Brasil.
- Borja Velásquez Martí (2006), *Aprovechamiento de los residuos forestales para uso energético*, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Cabildo M., Claramunt R., Cornago M., Escolastico C., Santos S., Farrán M. (2010), *Reciclado y Tratamiento de Residuos*, Madrid, España: UNED (Universidad Nacional de Educación a Distancia).
- Castells Xavier Elías (2013), *Energía, Agua, Medioambiente, Territorialidad y Sostenibilidad*, Madrid España: Ed. Díaz de Santos.
- Castells Xavier Elías (2012), Luis Velo *Tratamiento y Valorización Energética de Residuos*, Madrid, España: Ed. Díaz de Santos.
- Cedano de León Diana Carolina (2012), *Valorización energética de residuos como combustibles alternativos en plantas cementeras*, Valencia, España: Universitat Politécnica de Valencia.
- Chang N., Davila E. (2007), Municipal solid waste characterizations and management strategies for the Lower Rio Grande Valley, Texas, U.S.A Elsevier Magazine.
- Clair J., Folkman S. (1990), *Fundamentos de la Ingeniería de los alimentos*, México D.F., México: Editorial Continental.
- Demirbas A. (2006), Oily products from mosses and algae via pyrolysis. *Energy Sources Part A Recovery Utilization and Environmental Effects*, U.S.A.: Elsevier Magazine.
- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) (2005), *Métodos para el mantenimiento de alimentos perecederos*, pags. 71-73.
- Eastern Research Group, I. (2007), *Estudio de Prefactibilidad del Potencial del Biogás Relleno Pinchacay*. Cuenca-Ecuador.
- Ekbohm, T., Berglin, N. 2005 *Black Liquor Gasification with Motor Fuels Production - BLGMF II - A Techno-economic feasibility study on catalytic Fischer-Tropsch synthesis for synthetic diesel production in comparison with methanol and DME as transport fuels*. 2005.

- Fogler S., Elements of Chemical Reaction Engineering, Ed. Prentice Hal, (2004) New Delhi, India.
- Fonseca, A. D. (2009), Biomass-to-liquids: uma contribuição ao estudo da obtenção de biocombustíveis sintéticos através da síntese Fischer-Tropsch Dissertação (Mestrado - Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia) São Paulo-Brasil. Pag. 143.
- Fuentes-Grunewald, C., Garcés, E., Alacid, E., Rossi, S., & Camp, J. (2010), *La producción de biodiesel en Chile. Socializar Conocimientos*, Chile, pags 107-113.
- Gonzales Julián (2010), *Módulo I: Contaminación Ambiental - Residuos Sólidos Urbanos*, España: EOI (Escuela de Negocios), pag. 30.
- González Velasco J. (2010), *Energías renovables*, España: Ed. Reverte.
- Goyal, HB; Seal, D. Saxena, RC. (2008), Biofuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Procedia Magazine.
- Huber, G. W.; Iborra, S.; Corma, A (2007), Synthesis of Transportation Fuels from Biomass: Chemistry, Catalysts, and Engineering. Chemical Reviews.
- IDEA (Instituto Para la Diversificación y Ahorro de la Energía) (2010), *Biomasa Gasificación*, Madrid, España: Besel S.A.
- INTI (2010), *Valoración de RSU*, Argentina: INTI.
- Kirubakarana, V.; Sivaramakrishnanb, V.; Nalinic, R.; Sekard, T.; Premalathae, M.; Subramaniane, P. 2009, *A review on gasification of biomass. Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Procedia Magazine.
- Lora, E. E. S.; Andrade, R. V. (2008) *Gaseificação. In. Biomassa para energia*. Eds. Cortez, I. A. B.; Lora, E. E. S. & Gómez, E. O. Campinas: Ed. da Unicamp. p.241-332.
- Machado Monteiro Cristina María (2010), *Situación de los Biocombustibles de 2da y 3era Generación en América Latina y Caribe, Brasilia, Brasil*: Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) e Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- MEER, (2007) *Estudio de perfiles de proyectos para aprovechamiento de basura y plásticos residuales para generación de energía eléctrica y/o térmica, diésel y otros subproductos*. Informe de consultoría, DNB, Quito.
- Mendoza Roca José Antonio, Antonio Eduardo Palomares Gimeno (2009), *Ciencia y tecnología del medio ambiente*, Valencia, España: Ed. Univ. Politéc. Valencia.
- Mettler-Toledo A.G. *Manual de manejo medidor de humedad HB43-S* (2011) Greifensee, Suiza: Mettler-Toledo A.G.

- Ministerio del ambiente (2011), Programa nacional para la gestión integral de desechos sólidos (PNGIDS), Quito.
- Miranda, I., y Amaris, O. (2009), Aprovechamiento del potencial energético de la biomasa residual obtenida de la extracción del aceite de palma en Colombia. Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- Nonhebel G. (2012), *El secado de sólidos en la industria química*, (2002) España: Ed. Reverte.
- OPS, CEPIS, Guía para caracterización de residuos sólidos domiciliarios, anexo 2 (2012) España, pags 67-69.
- Orbe S. (2006), Diseño de un proyecto de gestión integral de residuos sólidos domésticos para la parroquia de Guayllabamba, Quito, Universidad Central del Ecuador.
- Perez Bayer J. (2013), Gasificación de biomasa. Estudios teórico-experimentales en lecho fijo, Colombia, Universidad de Antioquia.
- Ramos, T. (2008), Proyecto MDL de Generación de energía por biomasa. Perú.
- Rodrigo M., Centeno L., Muruais J., Ramirez J., Vallina D., Tolosa E. (2010) *Guía de valorización energética de residuos*, Madrid, España: Gráficos Arias Montano.
- Rodríguez, M.(2011), Biomasa como fuente de energía. Chile
- Spath, P.L. and Dayton, D. C. (2003), Preliminary Screening -- Technical and Economic Assessment of Synthesis Gas to Fuels and Chemicals with Emphasis on the Potential for Biomass-Derived Syngas. NREL Report No. TP-510-34929.
- Stehlík Petr (2009), *Contribution to advances in waste-to-energy technologies, Journal of Cleaner Production, Volume 17, Issue 10*, U.S.A. Pages 919-931.
- Texeira, S., Gghilardi, M. B., Karniol, A., & da Rocha, M. (2008), Centro Nacional de Referência em Biomassa – CENBIO. Brasil.
- Vieira Andrade, R., & Silva Lora, E. E. (2011), *Laboratório de Gaseificação e Combustão do Grupo de Pesquisas NEST*. São José dos Campos, Brasil.
- Zwart, R. (2011), *Large Scal Fischer Tropsch Diesel Production*. Netherlands.

### **Fuentes de internet.**

- Fernandez P. (2005), Propiedades físicas de los RSU, 13 de noviembre de 2005, de <http://residuosurbarri.blogspot.com/2005/11/granulometra.html>.

Green Tal S.A. (2013), Enciclopedia medioambiental online, de [http://www.ambientum.com/enciclopedia\\_medioambiental/suelos/composicion\\_de\\_los\\_rsu.asp](http://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/suelos/composicion_de_los_rsu.asp)

NT ENVIR 001 (1995), Solid Waste, Municipal: sampling and characterisation. [http://www.nordtest.info/images/documents/nt-methods/environment/NT%20envir%20001\\_Solid%20waste,%20municipal\\_Sampling%20and%20characterisation\\_Nordtest%20Method.pdf](http://www.nordtest.info/images/documents/nt-methods/environment/NT%20envir%20001_Solid%20waste,%20municipal_Sampling%20and%20characterisation_Nordtest%20Method.pdf)



# ANEXOS

## ANEXO 1: IMÁGENES DE MUESTREO Y CARACTERIZACIÓN DE RSD.

### Cuarteo de residuos sólidos.



### Muestreo y caracterización de residuos sólidos domésticos.





**Equipos de análisis**





**Secado de residuos sólidos domésticos.**




**Gasificador de lecho móvil INIAP Santo Domingo**



**Planta de gasificación INIAP Santo Domingo.**



## ANEXO 2: ANÁLISIS ELEMENTAL Y PROXIMAL DE MATERIA PRIMA.



**INER**  
Instituto Nacional de  
Eficiencia Energética y  
Energías Renovables

**INSTITUTO NACIONAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES**  
**LABORATORIO PARA TERMOVALORIZACIÓN DE BIOMASAS Y RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS**

**INFORME DE ENSAYOS N° LTB-20-2014**

<b>SOLICITANTE</b>	INER	<b>FECHA DE RECEPCIÓN</b>	2014-09-04
<b>MUESTRA</b>	Materia orgánica	<b>FECHA DE INFORME</b>	2014-09-22
<b>NÚMERO</b>	LTB-110	<b>ENVASE</b>	Bolsas plásticas
<b>ENSAYO REQUERIDO</b>	Análisis Elemental de los RSU		
<b>DOCUMENTO</b>			
<b>TÉCNICO ASIGNADO</b>	V. Ramírez		


**RESULTADOS**

MATRIZ DE ENSAYO	ENSAYO	MÉTODO	MÍNIMO	MÁXIMO	RESULTADO
Residuos Sólidos Urbanos	Carbono, % (p-p)	BS EN 15104:2011	a	a	40,39
	Hidrógeno, % (p-p)	BS EN 15104:2011	a	a	5,15
	Nitrógeno, % (p-p)	BS EN 15104:2011	a	a	5,87
	Azufre, % (p-p)	BS EN 15104:2011	a	a	0,61
	Oxígeno % (p-p)	BS EN 15104:2011	a	a	45,82

Los ensayos fueron realizados en base a la muestras receiptadas en el laboratorio y bajo los métodos mencionados.  
a: El método utilizado no presente valores de mínimo y máximo para estos ensayos



MSc. Ricardo Narváez  
Director de Investigación Científica y Tecnológica



**Análisis elemental: Materia orgánica**



**INSTITUTO NACIONAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES**  
**LABORATORIO PARA TERMOVALORIZACIÓN DE BIOMASAS Y RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS**


**INFORME DE ENSAYOS N° LTB-19-2014**

<b>SOLICITANTE</b>	INER	<b>FECHA DE RECEPCIÓN</b>	2014-09-04
<b>MUESTRA</b>	Plástico residual	<b>FECHA DE INFORME</b>	2014-09-22
<b>NÚMERO</b>	LTB-109	<b>ENVASE</b>	Bolsas plásticas
<b>ENSAYO REQUERIDO</b>	Análisis Elemental de los RSU		
<b>DOCUMENTO</b>			
<b>TÉCNICO ASIGNADO</b>	V. Ramírez		

**RESULTADOS**

MATRIZ DE ENSAYO	ENSAYO	MÉTODO	MÍNIMO	MÁXIMO	RESULTADO
Residuos Sólidos Urbanos	Carbono, % (p-p)	BS EN 15104:2011	a	a	83,51
	Hidrógeno, % (p-p)	BS EN 15104:2011	a	a	9,02
	Nitrógeno, % (p-p)	BS EN 15104:2011	a	a	3,90
	Azufre, % (p-p)	BS EN 15104:2011	a	a	0,94
	Oxígeno % (p-p)	Análisis Proximal	a	a	2,63

Los ensayos fueron realizados en base a la muestras receiptadas en el laboratorio y bajo los métodos mencionados.  
 a: El método utilizado no presente valores de mínimo y máximo para estos ensayos

  
 MSc. Ricardo Narváz

Director de Investigación Científica y Tecnológica



**Análisis elemental: Plástico residual.**



INSTITUTO NACIONAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES  
LABORATORIO PARA TERMOVALORIZACIÓN DE BIOMASAS Y RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

INFORME DE ENSAYOS N° LTB-24-2014


SOLICITANTE	INER	FECHA DE RECEPCIÓN	2014-09-04
MUESTRA	Papel	FECHA DE INFORME	2014-09-22
NÚMERO	LTB-111	ENVASE	Bolsas plásticas
ENSAYO REQUERIDO	Análisis Proximal de los RSU	MUESTREO	Miguel Jaramillo
DOCUMENTO			
TÉCNICO ASIGNADO	P. Cují, D. Chulde		

RESULTADOS

MATRIZ DE ENSAYO	ENSAYO	MÉTODO	MÍNIMO	MÁXIMO	RESULTADO
Residuos Sólidos Urbanos	Humedad, % (p-p)	BS EN 14774-3:2009	a	a	4,66
	Carbón volátil, % (p-p)	BS EN 15148:2009	a	a	82,02
	Carbón Fijo, % (p-p)	BS EN 15148:2009	a	a	0,74
	Cenizas, % (p-p)	BS EN 15148:2009	a	a	12,58
	Poder Calórico, MJ/kg	BS EN 15148:2009	a	a	15,58

Los ensayos fueron realizados en base a la muestras receptoras en el laboratorio y bajo los métodos mencionados.

a: El método utilizado no presente valores de mínimo y máximo para estos ensayos

  
MSc. Ricardo Narváez

Director de Investigación Científica y Tecnológica



**Análisis elemental: Papel y derivados.**





INSTITUTO NACIONAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES  
LABORATORIO PARA TERMOVALORIZACIÓN DE BIOMASAS Y RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

INFORME DE ENSAYOS N° LTB-23-2014

SOLICITANTE	INER	FECHA DE RECEPCIÓN	2014-09-04
		FECHA DE INFORME	2014-09-22
MUESTRA	Materia orgánica	ENVASE	Bolsas plásticas
NÚMERO	LTB-110	MUESTREO	Miguel Jaramillo
ENSAYO REQUERIDO	Análisis Proximal de los RSU		
DOCUMENTO			
TÉCNICO ASIGNADO	D. Chulde		

RESULTADOS

MATRIZ DE ENSAYO	ENSAYO	MÉTODO	MÍNIMO	MÁXIMO	RESULTADO
Residuos Sólidos Urbanos	Humedad, % (p-p)	Equipo Termobalanza	a	a	1,72
	Carbón volátil, % (p-p)	BS EN 15148:2009	a	a	79,07
	Carbón Fijo, % (p-p)	-	a	a	1,71
	Cenizas, % (p-p)	BS EN 14715:2009	a	a	17,50
	Poder Calórico, MJ/kg	-	a	a	15,95

Los ensayos fueron realizados en base a la muestras receiptadas en el laboratorio y bajo los métodos mencionados.

a: El método utilizado no presente valores de mínimo y máximo para estos ensayos

MSc. Ricardo Narváez

Director de Investigación Científica y Tecnológica



**Análisis proximal: materia orgánica**



**INSTITUTO NACIONAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES  
LABORATORIO PARA TERMOVALORIZACIÓN DE BIOMASAS Y RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS**

**INFORME DE ENSAYOS N° LTB-22-2014**

<b>SOLICITANTE</b>	INER	<b>FECHA DE RECEPCIÓN</b>	2014-09-04
		<b>FECHA DE INFORME</b>	2014-09-22
<b>MUESTRA</b>	Plástico	<b>ENVASE</b>	Bolsas plásticas
<b>NÚMERO</b>	LTB-109	<b>MUESTREO</b>	Miguel Jaramillo
<b>ENSAYO REQUERIDO</b> Análisis Proximal de los RSU			
<b>DOCUMENTO</b>			
<b>TÉCNICO ASIGNADO</b> D. Chulde			

**RESULTADOS**

MATRIZ DE ENSAYO	ENSAYO	MÉTODO	MÍNIMO	MÁXIMO	RESULTADO
Residuos Sólidos Urbanos	Humedad, % (p-p)	Equipo Termobalanza	a	a	75,49
	Carbón volátil, % (p-p)	BS EN 15148:2009	a	a	96,53
	Carbón Fijo, % (p-p)	-	a	a	-
	Cenizas, % (p-p)	BS EN 14774:2009	a	a	3,83
	Poder Calórico, MJ/kg	-	a	a	39,48

Los ensayos fueron realizados en base a la muestras receptadas en el laboratorio y bajo los métodos mencionados.

a: El método utilizado no presente valores de mínimo y máximo para estos ensayos



MSc. Ricardo Narváez

Director de Investigación Científica y Tecnológica



**Análisis proximal: plástico residual**



**INSTITUTO NACIONAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES  
LABORATORIO PARA TERMOVALORIZACIÓN DE BIOMASAS Y RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS**

**INFORME DE ENSAYOS N° LTB-21-2014**

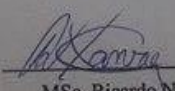
<b>SOLICITANTE</b>	INER	<b>FECHA DE RECEPCIÓN</b>	2014-09-04
<b>MUESTRA</b>	Papel	<b>FECHA DE INFORME</b>	2014-09-22
<b>NÚMERO</b>	LTB-111	<b>ENVASE</b>	Bolsas plásticas
<b>ENSAYO REQUERIDO</b>	Análisis Elemental de los RSU		
<b>DOCUMENTO</b>			
<b>TÉCNICO ASIGNADO</b>	V. Ramírez		

**RESULTADOS**

MATRIZ DE ENSAYO	ENSAYO	MÉTODO	MÍNIMO	MÁXIMO	RESULTADO
Residuos Sólidos Urbanos	Carbono, % (p-p)	BS EN 15104:2011	a	a	38,02
	Hidrógeno, % (p-p)	BS EN 15104:2011	a	a	5,08
	Nitrógeno, % (p-p)	BS EN 15104:2011	a	a	4,90
	Azufre, % (p-p)	BS EN 15104:2011	a	a	0,49
	Oxígeno % (p-p)	Análisis Proximal	a	a	49,35

Los ensayos fueron realizados en base a la muestras receptadas en el laboratorio y bajo los métodos mencionados.

a: El método utilizado no presente valores de mínimo y máximo para estos ensayos

  
 MSc. Ricardo Narváez  
 Director de Investigación Científica y Tecnológica

**Análisis proximal: papel y derivados**

Nota: todos los análisis presentados son un promedio de tres tomas de muestras diferentes enviadas en fechas secuenciales a los laboratorios del INER en Quito.

### **ANEXO 3: COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE MUESTREO DE RSD.**

#### **Evaluación del método de muestreo.**

Se evaluó dos métodos de muestreo de residuos sólidos urbanos, el método francés MODECOME y el NT ENVIR 001 noruego. En el caso de las viviendas ubicadas en la estación experimental INIAP EESD (33 en total) se buscaba aplicar un método de muestreo que facilite el análisis de muestras pequeñas. Tanto MODECOME como NT ENVIR 001 tienen muchos puntos en común, y algunas diferencias pequeñas pero sustanciales.

El mapa de recolección lo conforman 33 domicilios ocupados por los trabajadores de la estación, la basura es recolectada una vez a la semana por los camiones de sanidad municipal del cantón La Concordia, cuyo destino es el relleno sanitario del cantón Quinindé de la provincia de Esmeraldas. Con el fin de obtener la mayor cantidad de muestras y optimizar el uso de los recursos disponibles, se hizo un muestreo aleatorio de 3 domicilios por semana durante 14 semanas, lo que nos dio como resultado 42 muestras que representan más del 100% de los domicilios y que al ser completamente aleatorias representan sin sesgos la composición habitual de los residuos domésticos producidos en esta región del Ecuador.

**Tabla 40:** Comparación de los métodos de muestreo MODECOM y NT ENVIR 001 en laboratorio.

Características	NT ENVIR 001	MODECOM
<b>Categorización según la composición</b>	11 categorías: Residuos domésticos, residuos voluminosos de hogares, residuos de jardín, residuos de parques, desechos zona pública, residuos de la calle, residuos comerciales, residuos de hielo, residuos industriales, residuos institucionales (escuelas, hospitales, etc), residuos de hoteles y restaurantes, residuos de buques y puerto.	9 categorías: putrescibles, papel y cartón, textiles y textiles sanitarios, plásticos, vidrios, metales, combustibles no clasificados, incombustibles no clasificados y desechos especiales.
<b>Sub-categorización</b>	12 subcategorías: Papel (podría ser dividido en diferentes calidades), cartón (podría ser dividido en diferentes calidades), residuos degradables, incluyendo: vegetales, animales, otros (cocina, papel), plásticos (pueden ser divididos en diferentes tipos de plásticos), Servilletas y toallas sanitarias, Otros combustibles (textiles, cauchos, cuero, madera, etc), vidrios, metales, otros no combustibles (minerales, fusibles, bombillas, etc.), residuos peligrosos (químicos, cortantes infecciosos), partículas finas o terrosas.	3 categorías de desechos según su tamaño: grandes (>100 mm), medianos (>100-20 mm), pequeños (<20 mm),
<b>Cantidad de muestra recomendada</b>	5 kg después de descuartizado para efectos de investigación en el laboratorio.	130 kg después del descuartizado, aunque puede variar dependiendo de los objetivos del estudio.
<b>Método de muestreo</b>	Recolección, mezcla, descuartizado y clasificación de sub-categorías.	Recolección, mezcla y descuartizado.
<b>Método de determinación de humedad</b>	No especifica.	AFNOR (1996)
<b>Método de cuarteado</b>	Cuarateado múltiple, la categorización se hace al final del cuarteado.	Se cuarteo una vez, de ahí se toman muestras según la categorización y por el tamaño de los residuos.

El método NT ENVIR 001 está un nivel por encima de Modecom en cuanto a la especificidad de muestreo, por cuanto el primero busca detallar el origen del residuo (sea doméstico, industrial, etc), lo cual requiere de una observación minuciosa en la recolección para etiquetar los residuos según su proveniencia, o bien podría, de manera más práctica, solo estudiarse una de las once categorías, que es precisamente lo que se hará en la presente investigación, que fue consignada a los residuos domésticos provenientes de las 33 viviendas ubicadas en la Estación Experimental INIAP SD.

MODECOM por otro lado obvia la primera categorización referente al origen funcional de la basura (industrial, público, doméstico, etc) y se limita a darle un origen geográfico, por ejemplo: barrios, manzanas, zonas, etc. Esto facilita en gran medida el muestreo, pero dificulta la investigación si por ejemplo se desea llevar un registro de la actividad que produjo el desecho estudiado, es decir, podrá calcularse una tasa de producción de desechos por barrios, pero no se especificará si los desechos del barrio N son producidos únicamente por domicilios, o si en aquel barrio se encuentra un matadero, o una planta textil.

El muestreo se lo realizó mediante el método NT ENVIR 001 debido a que es específico para investigación de composiciones proximales de residuos, a diferencia de MODECOM que es un método más global y que generalmente se lo utiliza como antesala para decidir cómo utilizar los RSU, se utilizaría MODECOM si por ejemplo se desearía saber cómo emplear los residuos domésticos generados en INIAP SD, entonces a raíz de la composición obtenida, de la clasificación por tamaños y elementos se podría emplear la basura para reciclaje, compostaje, gasificación o cualquier tipo de tratamiento industrial.

En la presente investigación se desea obtener residuos utilizables en un co-gasificador para producir gases de síntesis que a su vez servirán de materia prima para producir biocombustible líquido por proceso de *Fischer-Tropsch*.

MODECOM es una guía viable para investigaciones de caracterización en ciudades grandes, la clasificación por tamaños implica que se desea obtener datos estadísticos con el fin de decidir cómo disponer de los residuos, es decir, si son viables para ser industrializados y convertidos en energía, reciclaje, compostaje, relleno sanitario, etc. En el método noruego solo se hace referencia al tamaño de partícula al momento de sub-categorizar, es decir, si dentro de la muestra se encuentran materiales demasiados finos como para ser identificados visualmente (polvo, objetos terrosos), para efectos de la investigación, se necesita hacer una subcategorización por elementos más que por tamaños, debido a que se va a estudiar el comportamiento de cada elemento en desecación para obtener curvas de secado y métodos estándar para determinación de humedad, por lo tanto NT ENVIR 001 es una guía viable para caracterización, muestreo y análisis adaptable a poblaciones pequeñas como en el caso de la EE INIAP SD.

#### **ANEXO 4: COMPOSICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS.**

Se estudiaron sustancias combustibles y comunes, es decir, en primer lugar se excluyen sustancias “inertes” o perjudiciales para el equipo como el vidrio y el metal y otras combustibles que suelen estar presentes en la basura doméstica pero con muy poca frecuencia como los textiles, polvos, sustancias infecciosas cortopunzantes o de peligro médico como jeringas, gasas usadas, etc. También se excluyeron sustancias de difícil manejo y resistentes al calor como residuos de hormigón y de construcción.

Hechas las acotaciones anteriores, los elementos que sí entraron en análisis fueron los residuos domésticos comunes de la región: elementos orgánicos (por lo general cáscaras de alimentos ricos en carbohidratos y presentes en el menú diario de los concordenses como el plátano, la yuca o la papa, además desechos blandos de animales como la grasa, o residuos de cocidos, residuos de verduras y legumbres, etc.), de pasta de papel y plásticos (utilizados en general como empaques, embalajes o contenedores de productos).

Si se trata de una aleación de materiales como por ejemplo: los multicapas presentes en los envases para leche o etiquetas de productos compuestas por materiales como papel, plásticos e inclusive capas de metales como el aluminio, pues se categorizó según el elemento de mayor porcentaje de masa dentro de la aleación, es decir: si el cartón es el elemento más representativo de la aleación el desecho entero será categorizado como cartón, si, en cambio, es el metal el elemento sobresaliente de la aleación, el residuo no será categorizado como no gasificable a pesar de contar con un porcentaje bajo de pasta de papel en su composición, esto con el fin de simplificar el análisis de sustancias poco comunes en los desechos del ciudadano promedio de La Concordia, una zona poco industrializada en la producción de alimentos de consumo diario. Si se trata de una sustancia derivada del papel cuyo uso común ha generado un residuo húmedo con restos de materia orgánica adherida (servilletas de cocina, papel higiénico, toallas de cocina, elementos de aseo, etc.) el conjunto será categorizado como papel puesto que, como se comprobará más adelante en la investigación, la presencia de sustancia orgánica adherida, y una humedad ganada en el papel no afecta a la velocidad de secado, pues al tratarse de una sustancia homogénea (pasta) la humedad sale de igual manera como fue adquirida.

**Tabla 41:** Composición en porcentajes por categorías de los residuos sólidos domésticos de INIAP EESD.

Fecha de muestreo	Número de domicilios muestreados (aleatorio)	Masa en bruto de la muestra	Masa final de la muestra	Masa residuos orgánicos (final)	Masa residuos de papel	Masa residuos de plásticos	Masa otros residuos	% orgánicos	% Papel	% Plásticos	% Otros residuos
06/09/2013	3	30.62	4.18	2.72	0.55	0.27	0.64	65.07	13.16	6.46	15.31
13/09/2013	3	26.86	3.14	1.96	0.34	0.56	0.11	62.42	10.83	17.83	3.50
20/09/2013	3	32.35	4.05	3.2	0.47	0.32	0.06	79.01	11.60	7.90	1.48
27/09/2013	3	37.43	5.41	4.12	0.35	0.35	0.59	76.16	6.47	6.47	10.91
04/10/2013	3	27.52	4.75	2.72	0.88	0.18	0.77	57.26	18.53	3.79	16.21
11/10/2013	3	33.07	3.96	2.83	0.41	0.6	0.27	71.46	10.35	15.15	6.82
18/10/2013	3	29.45	3.5	3.07	0.09	0.23	0.1	87.71	2.57	6.57	2.86
25/10/2013	3	24.57	3.35	2.45	0.32	0.29	0.29	73.13	9.55	8.66	8.66
01/11/2013	3	28.83	4.2	3.1	0.38	0.56	0.27	73.81	9.05	13.33	6.43
08/11/2013	3	34.21	4.74	3.24	0.34	0.38	0.48	68.35	7.17	8.02	10.13
15/11/2013	3	41.27	5.89	4.94	0.55	0.27	0.13	83.87	9.34	4.58	2.21
22/11/2013	3	33.52	4.77	3.87	0.32	0.21	0.37	81.13	6.71	4.40	7.76
29/11/2013	3	26.59	3.62	2.31	0.33	0.09	0.89	63.81	9.12	2.49	24.59
06/12/2013	3	35.6	4.75	3.13	0.65	0.36	0.57	65.89	13.68	7.58	12.00
Valores medios		31.564	4.308	3.119	0.427	0.334	0.396	72.079	9.867	8.088	9.203

**Tabla 42:** Composición en porcentajes por sub-categorías de los residuos orgánicos domésticos de INIAP EESD.

Residuos orgánicos						
Fecha de muestreo	Número de domicilios muestreados (aleatorio)	Masa residuos orgánicos	Masa Cáscaras de frutas	Masa desechos de alimentos ricos en almidones (papa, yuca, plátano, cereales.)	Masa desechos de verduras y legumbres (hojas, corazones, etc.)	Masa desechos animales (tejidos no óseos)
06/09/2013	3	2.72	0.43	1.21	0.96	0.12
13/09/2013	3	1.96	0.56	0.88	0.4	0.12
20/09/2013	3	3.2	0.42	1.66	1.08	0.03
27/09/2013	3	4.12	0.57	1.81	1.36	0.37
04/10/2013	3	2.72	0.39	1.25	0.88	0.21
11/10/2013	3	2.83	0.53	1.46	0.74	0.13
18/10/2013	3	3.07	0.55	1.15	1.09	0.28
25/10/2013	3	2.45	0.45	1.075	0.83	0.1
01/11/2013	3	3.1	0.8	1.24	1.05	0.01
08/11/2013	3	3.24	0.51	1.52	1.12	0.09
15/11/2013	3	4.94	0.95	2.18	1.3	0.51
22/11/2013	3	3.87	0.42	1.68	1.35	0.39
Valores medios		3.19	0.55	1.43	1.01	0.20
Porcentajes		100.00	17.22	44.78	31.82	6.17



**Tabla 43:** Composición en porcentajes por sub-categorías de los residuos de papel domésticos de INIAP EESD.

Residuos de papel						
Fecha de muestreo	Número de domicilios muestreados (aleatorio)	Masa residuos de papel	Masa papel periódico	Masa papel de oficina	Masa cartón	Masa papel de baño y papel de cocina
06/09/2013	3	0.55	0.19	0.061	0.160	0.1395
13/09/2013	3	0.34	0.11	0.037	0.000	0.1926
20/09/2013	3	0.47	0.17	0.052	0.140	0.1083
27/09/2013	3	0.35	0.09	0.039	0.090	0.1315
04/10/2013	3	0.88	0.37	0.097	0.220	0.1932
11/10/2013	3	0.41	0.15	0.045	0.107	0.1079
18/10/2013	3	0.09	0.04	0.010	0.000	0.0401
25/10/2013	3	0.32	0.11	0.035	0.000	0.1748
01/11/2013	3	0.38	0.13	0.042	0.090	0.1182
08/11/2013	3	0.34	0.12	0.034	0.080	0.106
15/11/2013	3	0.55	0.21	0.061	0.230	0.054
22/11/2013	3	0.32	0.11	0.031	0.000	0.169
Valores medios		0.42	0.15	0.045	0.09	0.13
Porcentajes		100.00	36.00	10.85	22.34	30.70

**Tabla 44:** Composición en porcentajes por sub-categorías de los residuos de plásticos domésticos de INIAP EESD.

Residuos plásticos				
Fecha de muestreo	Domicilios muestreados (aleatorio)	Masa residuos plásticos	Masa polietileno	Masa poliestireno
06/09/2013	3	0.27	0.27	0
13/09/2013	3	0.56	0.421	0.127
20/09/2013	3	0.32	0.32	0
27/09/2013	3	0.35	0.267	0.081
04/10/2013	3	0.18	0.18	0
11/10/2013	3	0.6	0.413	0.187
18/10/2013	3	0.23	0.177	0.053
25/10/2013	3	0.29	0.29	0
01/11/2013	3	0.56	0.429	0.129
08/11/2013	3	0.38	0.256	0.124
15/11/2013	3	0.27	0.208	0.062
22/11/2013	3	0.21	0.155	0.055
Valores medios		0.35	0.28	0.07
Porcentajes		100.00	80.24	19.38

El principal volumen de desechos de INIAP EESD lo conforman los desechos orgánicos (72,08%) provenientes de la alimentación humana este alto porcentaje se debe a que la zona estudiada se caracteriza por el consumo de alimento no procesados, por el contrario un estudio de caracterización de residuos sólidos urbanos realizado en Lower Rio Grande Valley, Texas en 2007 arrojó los siguientes porcentajes luego de los muestreos respectivos: Desechos de papel (30,3%), plásticos (19,3%), residuos de alimentos (10,3%), otros orgánicos (19,6%), otros residuos (28%). El desecho orgánico en países desarrollados en su gran mayoría es utilizado por la industria como recurso energético, subproductos o para re-procesos, mientras que en el Ecuador el gran volumen de cortezas, raíces, follaje y tejidos no comestibles pasan a formar parte de los botaderos a cielo abierto.

El papel y sus derivados, sea cartón corrugado, periódico, de higienización, etc. conforma el 9,867% de los residuos producidos por las viviendas de la estación, una cifra un baja comparada con la de Lower Rio Grande (30,3%), y esto debido a que los desechos de papel que en Texas ocupa una gran cantidad de nichos de consumo, en Ecuador se limita a la industria del aseo personal o los insumos de oficina. Algo parecido sucede con la producción de residuos plásticos en la estación (8,088%) en comparación con la de Lower Rio Grande (19,3%) en nuestro país el plástico si se utiliza para empaque de alimentos en masa, pero se sigue una red de distribución muy corta que inicia desde la sierra ecuatoriana y termina en la mesa del ecuatoriano promedio un par de cientos de kilómetros después, no se hace necesario un tratamiento de conservación, y es mucho más barato no hacerlo, sino simplemente procurar que el alimento llegue fresco a su destino, el consumo de alimentos empaquetados en plástico generalmente pertenece a las minorías de clase media alta, y en la mayoría de la población su consumo no obedece al empaque de alimentos de consumo masivo sino mayoritariamente de snacks o de envases contenedores no desechables.

Todas estas comparaciones conforman un marco de conclusiones empíricas pero no por ello ilícitas, los resultados dejan en claro que una caracterización de residuos sólidos domésticos en el Ecuador es necesaria si se pretende emprender un cambio de matriz energética, se debe conocer el comportamiento de consumo del ecuatoriano promedio. El porcentaje de residuos combustibles de una región es proporcional a su nivel de industrialización, siendo el alto porcentaje de residuos combustibles procesados (papel, plásticos) directamente proporcional

a una economía industrializada, y el alto porcentaje de residuos orgánicos alimenticios inversamente proporcional a una industria alimenticia poco desarrollada, lo que no significa ineficiencia, ni subdesarrollo, sino que se cuenta con una red de distribución cerrada y sistematizada.

### **Muestreo a nivel de laboratorio.**

Una vez realizada la categorización, la planificación y la recolección aleatoria se procede a realizar un muestreo por conificación y descuartizado, recomendada para muestrear residuos sólidos que luego se piensa dividir en categorías de análisis.

Este tipo de muestreo consiste en reunir todos los residuos obtenidos en una sola montaña en forma de cono, luego se procede a dividir (o descuartizar) la montaña en cuatro partes iguales divididas por dos líneas transversales y a separar por orden del azar, puede ser mediante una moneda o sorteo, dos de los cuartos opuestos por el vértice de manera que la muestra se reduzca a la mitad. Se repite el descuartizado hasta que se haya obtenido un volumen de muestra considerable para llevar al laboratorio.

La muestra obtenida será llevada en el laboratorio donde será pesada y categorizada para su análisis. El método NT Envir 001 denota que una muestra para laboratorio deberá tener una masa mínima de 5 kg.

El primer paso en el laboratorio fue separar lo desechos orgánicos de los no orgánicos. Una vez separados elementos a analizar procedimos a evaluar la composición de los residuos y a crear pequeñas muestras proporcionales para el pre-análisis de humedad.

Se separan los distintos elementos presentes en la muestra obtenida, con el pesado semanal de estos elementos se pudo comprobar el porcentaje que ocupaban en masa y por lo tanto sacar muestras proporcionales para uso inmediato ya que para la determinación de humedad se requiere que la muestra haya sido preparada (macerada, recortada, triturada) momentos antes del análisis con el fin de reducir pérdidas de humedad por evaporación, por ello se

toma una muestra proporcional para utilizar en el momento y el resto se guarda en el refrigerador con sello hermético. Con el objetivo de que el experimento resulte lo más fiel posible a resultados reales, todas las muestras que se maceran deben contener los mismos elementos presentes en los muestreos anteriores obtenidos mediante conificación y descuartizamiento.

Y luego se procede al análisis de humedad, siempre utilizando un método de referencia para avalar el rendimiento de la termo-balanza, en este caso el método de referencia será la estufa de secado.

En cuanto a la preparación de la muestra, al tamaño de partícula, distribución en el plato, temperatura óptima y otras variables que ofrece la termo-balanza se buscará fijar rangos de variables mediante estudios separados con el objetivo de fijar rangos de medición para cada una de las categorías.

#### **ANEXO 5: COMPARACIÓN DE LA TERMO-BALANZA Y LA ESTUFA DE DESECACIÓN EN LAS MISMAS CONDICIONES PARA DETERMINACIÓN DE HUMEDAD.**

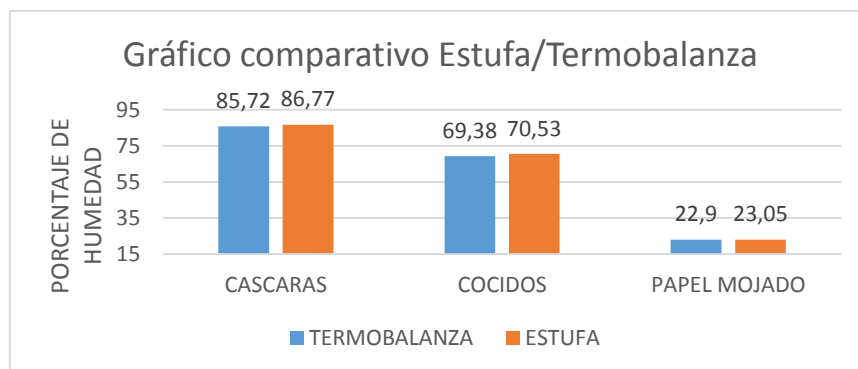
El presente estudio se lo realiza a fin de poder comprobar si la termo-balanza es capaz de determinar resultados de humedad fieles a los que arroja el método que se usa como referencia (estufa de desecación) para este fin utilizaremos los mismos parámetros (masa, temperatura) para ambos métodos de desecación.

Las muestras no fueron tomadas arbitrariamente, se ha puesto énfasis en los principales componentes de los residuos sólidos domésticos en este caso los residuos orgánicos y los derivados del papel. Se determinará la humedad de: Cáscara de naranja, alimentos cocidos, papel mojado. El método de muestreo utilizado fue el NT ENVIR 001 específico para muestrear residuos sólidos urbanos.

**Tabla 45:** Ensayo termo-balanza versus estufa de secado.

	Cáscaras 1	Cocidos 1	Papel mojado 1	Cáscaras 2	Cocidos 2	Papel mojado 2
<b>Método</b>	Termobalanza, método de fabrica	Termobalanza, método de fabrica	Termobalanza, método de fabrica	Estufa de desecación	Estufa de desecación	Estufa de desecación
<b>Masa inicial (gr)</b>	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
<b>Humedad (%)</b>	86.57	68.68	22.57	86.66	71.09	22.66
	85.14	69.1	21.82	86.5	70	23.5
	85.45	70.35	24.32	87.16	70.5	23
<b>Media humedad</b>	85.72	69.38	22.90	86.77	70.53	23.05
<b>Temperatura (°C)</b>	105	105	105	105	105	105
<b>Tiempo (minutos)</b>	26:06	20:24	18:20	240:00	240:00	240:00
	30:15	23:56	15:54	240:00	240:00	240:00
	25:30	19:15	15:00	240:00	240:00	240:00
<b>Media tiempo</b>	27:17	21:19	16:25	240:00	240:00	240:00

La masa de la muestra se escogió por ser una cantidad recomendada por la bibliografía para determinación de humedad. La temperatura escogida es la temperatura estándar para determinar humedad de sustancias de muy elevada humedad en estufa de desecación.

**Figura 11:** Ensayo termo-balanza versus estufa de secado.

Puede concluirse en que determinar humedad mediante una termo-balanza es fiable para con el método de referencia pues la fluctuación de resultados está dentro lo de permitido, sobre todo si se menciona que las muestras no son del todo heterogéneas y mejora en el factor tiempo.

Los siguientes estudios analizarán las variables más relevantes para la determinación de humedad en RSU de origen orgánico: **temperatura, tamaño de partículas, cantidad de muestra, programa de secado y criterio de desconexión** estas dos últimas exclusivas del método de determinación de humedad mediante la termo-balanza Mettler-Toledo HB43-S. Esto a fin de fijar rangos para las variables y atributos que he presentado y así eliminar tratamientos con temperaturas demasiado bajas, o con demasiada, o muy poca cantidad de masa que supondrían una pérdida de tiempo y harían más complicado hallar un método de determinación de humedad coherente con las sustancias que entrarán al gasificador.

Se analizó primero los elementos orgánicos pues son los que ocupan mayor porcentaje tanto de volumen como de humedad dentro del conjunto de los RSU.

## **ANEXO 6: ESTUDIOS PRELIMINARES DE SENSIBILIDAD DE TERMO-BALANZA.**

### **Residuos orgánicos**

Influencia de la temperatura en la determinación de humedad para residuos sólidos orgánicos mediante termo-balanza.

El presente estudio se hace con el fin de encontrar un rango idóneo de temperaturas con las que trabajar una vez que se haya puesto en marcha los tratamientos del diseño experimental.

Las temperaturas propuestas (130, 150, 170) se adoptaron con el fin de observar el comportamiento de secado de las materias orgánicas a temperaturas superiores a 105°C, que son las utilizadas en el método tradicional (estufa de desecación), puesto que, como quedó comprobado en el estudio anterior una temperatura “suave” de secado no es idónea para la medición mediante una termo-balanza debido a que toma un tiempo que no entraría dentro de los rangos de aceptación de este proyecto en el que se va a trabajar con un flujo de 10kg/h de RSU.

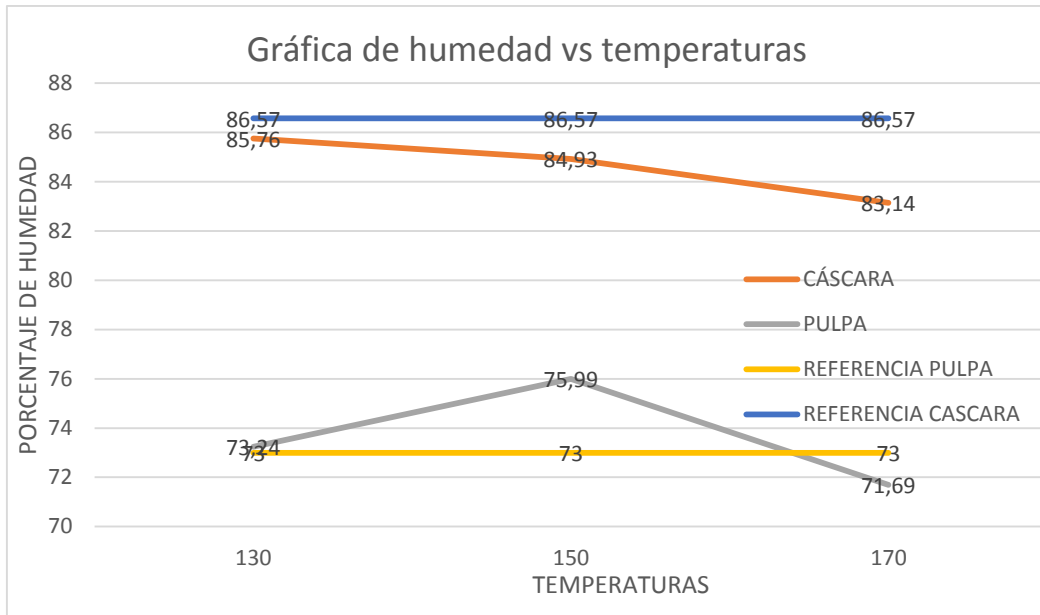
Para el presente estudio se utilizó como materia prima desechos de maracuyá, de los que se identificó dos tipos de muestra, con presumible diferencia en el contenido de humedad: cáscara y pulpa. Se realizaron cinco repeticiones para cada variación de parámetro.

CD3: Criterio de desconexión 3, hace referencia al punto en el que terminará la extracción, el criterio de secado número 3 hace que la termo-balanza se detenga cuando se haya alcanzado una velocidad de secado menor a 1mg/50s.

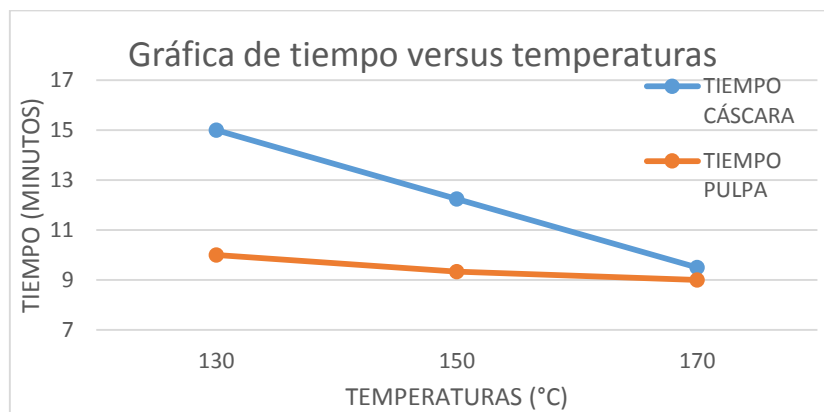
Se hizo un ensayo de determinación de humedad mediante estufa de desecación a manera de fiscalizar la eficiencia de la termo-balanza.

**Tabla 46:** Influencia de la temperatura en la determinación de humedad para residuos orgánicos.

	C1	P1	C2	P2	C3	P3	C4	P4
<b>Método</b>	Estufa de desecación	Estufa de desecación	Termobalanza (cd3)	Termobalanza (cd3)	Termobalanza (cd3)	Termobalanza (cd3)	Termobalanza (cd3)	Termobalanza (cd3)
<b>Masa inicial (gr)</b>	2	2	2	2	2	2	2	2
<b>% Humedad</b>	87.00	72.50	86.56	73.75	85.18	75.21	82.80	72.69
	86.00	75.50	85.46	72.60	84.92	78.50	84.12	72.45
	86.50	71.00	83.84	73.21	84.84	73.79	79.92	70.67
	87.00	73.00	85.48	74.42	85.08	75.33	83.57	71.88
	86.33	73.00	86.11	72.23	84.62	77.12	85.30	70.76
<b>Media %h</b>	86.57	73.00	85.49	73.24	84.93	75.99	83.14	71.69
<b>Tiempo (minutos)</b>	240:00	240:00	16:45	11:33	12:12	9:13	8:05	9:37
	240:00	240:00	17:16	10:20	12:40	10:05	10:20	8:40
	240:00	240:00	13:17	9:35	11:46	8:40	9:37	9:08
	240:00	240:00	14:45	10:13	11:56	9:40	9:55	9:15
	240:00	240:00	13:08	8:40	12:27	9:06	9:14	8:25
<b>Media tiempo</b>	240:00	240:00	15:02	10:02	12:12	9:21	9:26	9:03
<b>Descripción de partículas</b>	Desmenuzadas	Desmenuzadas	Desmenuzadas	Desmenuzadas	Desmenuzadas	Desmenuzadas	Desmenuzadas	Desmenuzadas
<b>Temperatura (°c)</b>	105	105	130	130	150	150	170	170



**Figura 12:** Gráfico comparativo termo-balanza versus estufa de secado a diferentes temperaturas.



**Figura 13:** Rango de temperaturas para determinar la humedad de residuo orgánicos mediante la termo-balanza.

El método en el que se secó con una temperatura de 130 °C es el que más se acerca a los valores de referencia con fluctuaciones que en promedio no sobrepasan un entero porcentual. En el diseño experimental no se incluyó tratamientos a temperaturas constantes demasiado altas debido a que las muestras a analizar (orgánicas) son heterogéneas, es decir presentan gran variedad de tejidos, lo que significa que entre ellos podrán estar presentes tejidos sensibles al calor (caramelizables, formadores de películas) que mediante la formación de costras impedirán una extracción precisa de la humedad. La temperatura es inversamente proporcional al tiempo de secado aunque esto no significa que los resultados sean fieles a los de referencia. Se puede observar que la variación de tiempo no es la misma cuando se analizó la cáscara a cuando se analizó la pulpa, deba al tamaño de partículas puesto que las



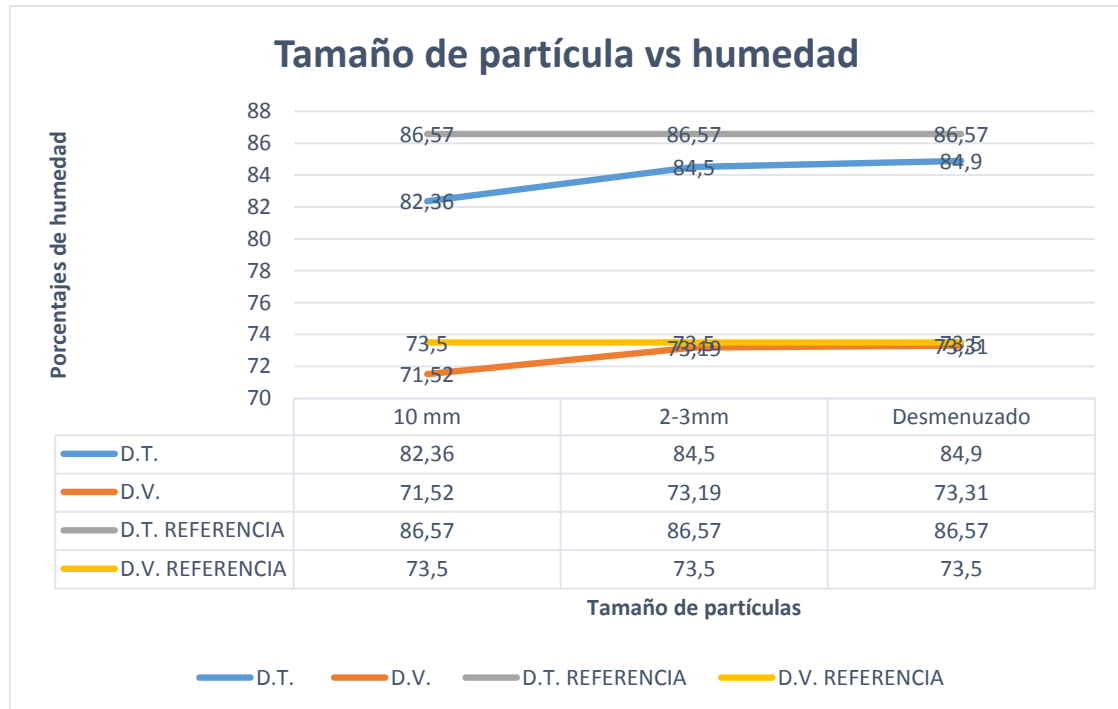
cascaras son más ricas en celulosa y por lo tanto de paredes celulares más difíciles de romper, por lo tanto el tiempo de secado puede mejorar mucho si se prepara de mejor manera la muestra, es decir si se desmenuza hasta lograr una sustancia homogénea de partículas menores a 2 mm.

Influencia del tamaño de partícula en la determinación de humedad para residuos sólidos urbanos orgánicos mediante termo-balanza.

El presente estudio se hizo con el fin de juzgar el tamaño partículas como variables de estudio para la estandarización de un método de determinación de humedad de residuos sólidos domésticos, para esto se utilizaron tres tamaños de partícula: 10 mm, 2-3mm y desmenuzamiento, es decir macerado hasta alcanzar una masa uniforme. Para el presente estudio se utilizó como materia prima desechos de tubérculos y de verduras, por tratarse de sustancias de diferente textura. Se realizaron cinco repeticiones para cada variación de parámetro.

**Tabla 47:** Influencia del tamaño de partícula en la determinación de humedad para residuos orgánicos.

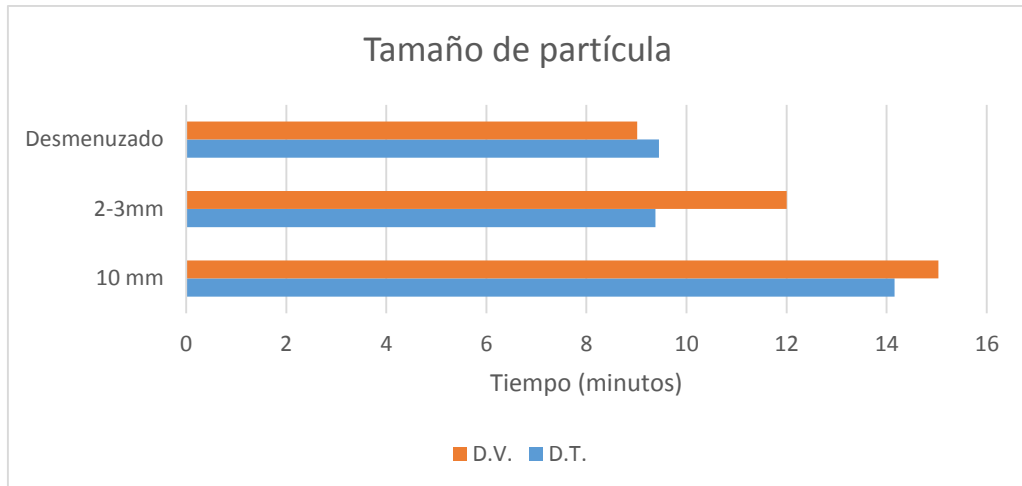
	D.T.1	D.V.1	D.T.2	D.V.2	D.T.3	D.V.3	D.T.4	D.V.4
<b>Método</b>	Estufa de desecación	Estufa de desecación	Termobalanza (cd3)	Termobalanza (cd3)	Termobalanza (cd3)	Termobalanza (cd3)	Termobalanza (cd3)	Termobalanza (cd3)
<b>Masa inicial (gr)</b>	2	2	2	2	2	2	2	2
<b>% Humedad</b>	87.00	72.50	83.56	70.12	85.18	73.21	84.80	75.69
	86.00	75.50	82.46	72.60	84.92	74.50	84.90	72.45
	86.50	73.00	83.84	73.21	84.84	73.79	85.92	73.67
<b>Media %h</b>	86.57	73.50	82.36	71.52	84.93	73.19	84.50	73.31
<b>Tiempo (minutos)</b>	240:00	240:00	16:45	11:33	12:12	9:13	8:05	9:37
	240:00	240:00	17:16	10:20	12:40	10:05	10:20	8:40
	240:00	240:00	13:17	9:35	11:46	8:40	9:37	9:08
<b>Media tiempo</b>	240:00	240:00	14:10	15:02	12:00	9:23	9:27	9:01
<b>Descripción de partículas</b>	2-3 mm	2-3mm	10mm	10mm	2-3mm	2-3mm	Desmenuzado	Desmenuzado
<b>Temperatura (°c)</b>	103	103	150	150	150	150	150	150



**Figura 14:** Gráfico comparativo termo-balanza versus estufa de secado con diferentes tamaños de partícula.

En la Figura 15 se observa la extracción real de humedad de la termo-balanza en comparación con el método de referencia (estufa de secado), tanto los desechos de verduras como los de tubérculos tienen un comportamiento similar dependiendo del tamaño de partícula, así las partículas de mayor grosor (10 mm) generan mayor dificultad de análisis para la termo-balanza y las de menor grosor (partículas maceradas) muestran una relativa lealtad para con el método de referencia.

El comportamiento de desecación de tejidos intactos (10 mm) y de tejidos desmenuzados, en los primeros el equipo al ser incapaz de seguir extrayendo da por finalizado el análisis sin haber extraído toda la humedad, en los segundos, lo contrario el equipo extrae casi la totalidad de la humedad.



**Figura 15:** Gráfica comparativa de tiempos de medición con diferentes tamaños de partículas.

El tamaño de partícula de los RSU para determinación de humedad no fue categorizado como una variable sino como un atributo dado que los resultados arrojados del estudio muestran en claro beneficio el maceramiento de todas las muestras, esto no solo que provocará la lectura más precisa de la humedad sino que agilizará la investigación permitiendo recortar los tiempos de análisis.

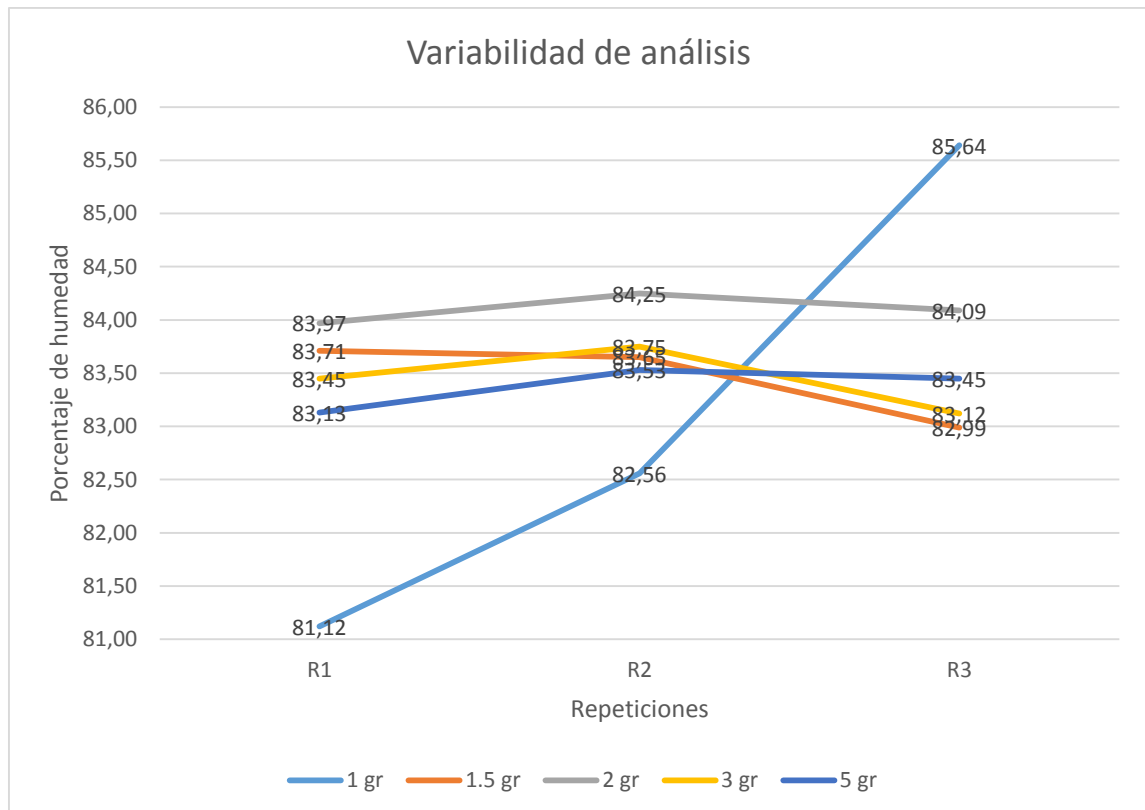
La reducción de las muestras a su mínima expresión posible es necesaria de tal manera que la muestra preparada pueda literalmente untarse sobre el plato de aluminio. Instrumentos a utilizar tijeras y mortero para maceración.

### **Influencia de la cantidad de masa en la determinación de humedad para residuos sólidos urbanos orgánicos mediante termo-balanza.**

El presente estudio se realizó con el fin de calcular la fidelidad de la termo-balanza con el método de referencia (estufa) según la cantidad de masa que se le suministre para analizar, teóricamente mientras menos masa analice el equipo, menos tiempo le tomará, sin embargo la variación de resultados será mayor pues a menor cantidad de masa mayor probabilidad de una muestra no uniforme, es decir: a menor masa, mayor variabilidad de resultados, y viceversa, a mayor cantidad de masa menor variabilidad de resultados. El objetivo principal de este estudio será encontrar un rango de masa adecuado para garantizar la repetitividad de los resultados.

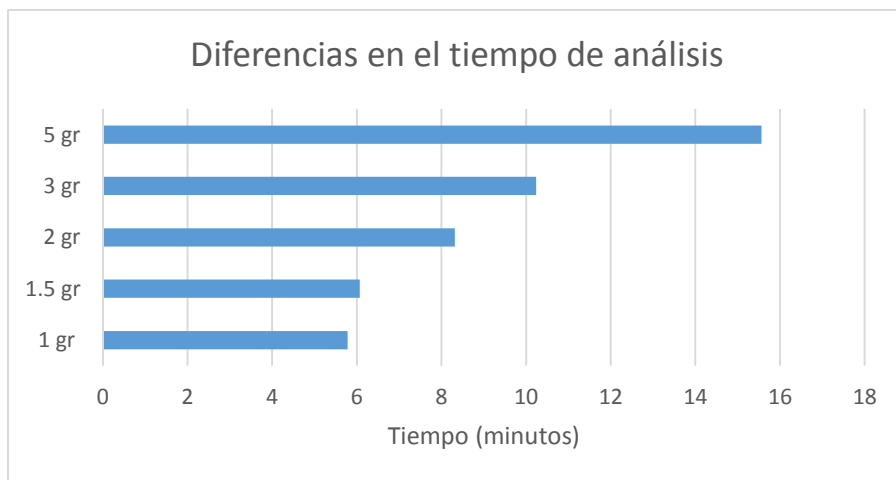
**Tabla 48:** Influencia de la cantidad de masa en la determinación de humedad para residuos orgánicos.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6
<b>Método</b>	Termobalanza (sr, cd3)	Termobalanza (sr, cd3)	Termobalanza (sr, cd3)	Termobalanza (sr, cd3)	Termobalanza (sr, cd3)	Estufa de desecación
<b>Masa inicial (gr)</b>	1	1.5	2	3	5	3
<b>% Humedad</b>	81.12	83.71	83.97	83.45	83.13	84.00
	82.56	83.65	84.25	83.75	83.53	84.00
	85.64	82.99	84.09	83.12	83.45	84.33
<b>Media %h</b>	83.11	83.45	84.10	83.44	83.37	84.11
<b>Tiempo (minutos)</b>	5:29	6:25	8:23	11:35	13:58	240:00
	6:20	6:01	8:18	9:13	17:09	240:00
	5:29	5:47	8:16	9:51	15:32	240:00
<b>Media tiempo</b>	5:47	6:04	8:19	10:13	15:33	240:00
<b>Descripción de partículas</b>	Desmenuzado	Desmenuzado	Desmenuzado	Desmenuzado	Desmenuzado	Desmenuzado
<b>Temperatura (°c)</b>	150	150	150	150	150	105

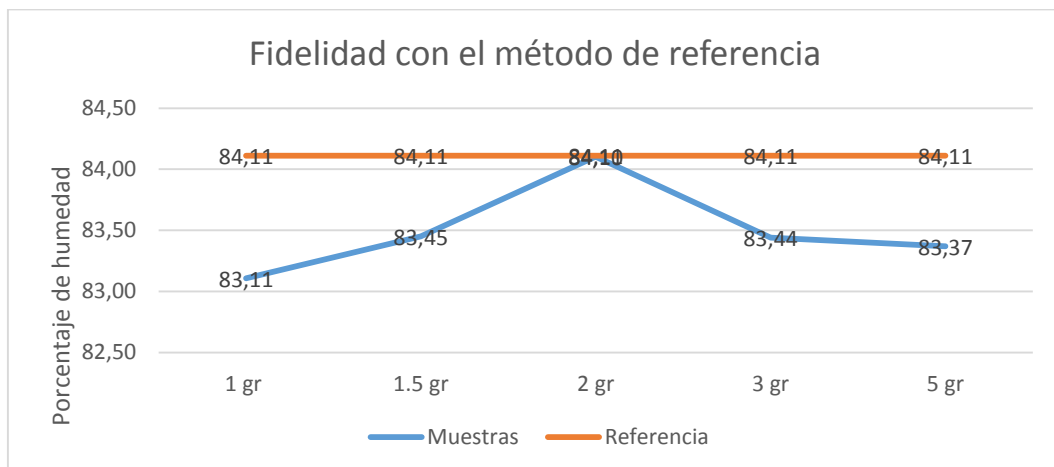


**Figura 16:** Variabilidad de análisis en la influencia de la cantidad de masa en la determinación de humedad de residuos orgánicos.

En la figura 17 se define lo que teóricamente se había predicho, a menor cantidad de muestra, mayor variabilidad de resultados, de manera que es sencillo comparar la muestra de 1 gr con la de 5 gr y los resultados que arrojaron, podría afirmarse que a partir de 1,5 gr se obtuvo resultados más o menos paralelos, sin embargo la media de la muestra de 1 gr es muy parecida a la de referencia lo que quiere decir que si bien existe variación de resultados parciales, el final no se ve afectado en gran medida, lo que si se ve afectado es el tiempo de medición.



**Figura 178:** Diferencia de tiempos medios por la influencia de la cantidad de masa en la determinación de humedad de residuos orgánicos.



**Figura 18:** Fidelidad con el método de referencia según la cantidad de masa residuos orgánicos.

La Figura 19 muestra una especie de equilibrio en la precisión de la termo-balanza, mientras que con baja cantidad de masa la variabilidad de mediciones afecta al promedio y lo aleja

del resultado real, en muestras con alto contenido de masa en cambio sucede que el grosor de muestra sobre el plato de aluminio impide que la radiación infrarroja extraiga toda la humedad contenida y el resultado también varía del real, sin embargo con 2 gr de muestra hay un equilibrio de precisión entre la termo-balanza y la estufa de desecación.

### **Distribución de la muestra en el plato.**

Independientemente de la cantidad de masa que se desee analizar está la distribución en el plato que deberá ser uniforme y cubrir la mayor cantidad de área posible.



**Figura 19:** Distribución de la muestra en el plato de aluminio.

Mientras que la distribución de una muestra de 2gr cubre toda el área del plato (foto), lo que causa que todo el calor emitido actúe sobre muestra y no se pierda, la muestra de 1 gr no cubre la totalidad del plato, lo que provoca que lo rayo infrarrojos emitidos no cumplan con su objetivo y el tiempo, esto no quiere decir que la cantidad de masa sea el problema, sino únicamente su distribución.

Si se desea acortar el tiempo de medición aplicando menos cantidad de muestra, de nada servirá si no se llena toda la superficie del plato, pues si la muestra no está expandida, el grosor de las zonas aglomeradas impedirá que la lámpara halógena extraiga con rapidez la humedad.

Se hizo un experimento con dos muestras de 1 gr cada una ambas con la misma composición de sustancias, mientras que en la primera no se puso énfasis en la distribución en el plato, y quedaron algunos grumos, en la segunda se cubrió la mayor cantidad de área posible, estos fueron los resultados.

**Tabla 49:** Diferencias, muestra sin expandir y muestra expandida en el plato de aluminio.

	Humedad (%)	Tiempo de análisis (minutos)
<b>Muestra sin expandir</b>	84.35	10:37
<b>Muestra expandida</b>	84.18	3:57
<b>Valor de referencia</b>	84.11	240:00

El rango de variables para el diseño experimental se fijó en mínimo 1 gr y máximo 2 gr de muestra respectivamente con el fin de hallar una medición confiable y rápida.

Es conveniente para obtener un mejor tiempo de análisis expandir completamente la muestra en el plato con el fin de que todos los rayos infrarrojos emitidos generen extracción de humedad de la muestra y no reboten en el plato de aluminio.

### **Influencia del criterio de desconexión en la determinación de humedad para residuos sólidos orgánicos mediante termo-balanza.**

El criterio de desconexión define cuándo el equipo (termo-balanza) debe concluir la desecación. Ello le evita tener que mirar el reloj e interrumpir manualmente la desecación. Pueden elegirse los siguientes ajustes para el criterio de desconexión:

Criterio de desconexión 1: >1mg/10s

Criterio de desconexión 2: >1mg/20s

Criterio de desconexión 3: >1mg/50s

Criterio de desconexión 4: >1mg/120s

Criterio de desconexión 5: >1mg/140s

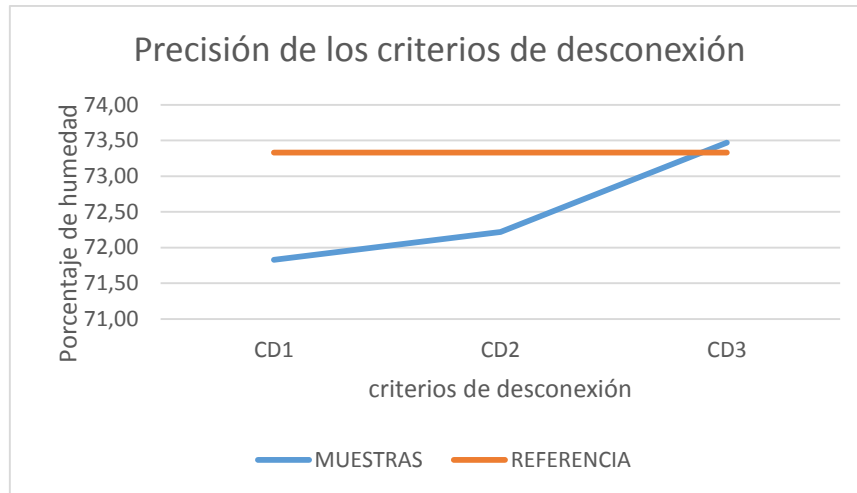
Cuando el extractor de humedad marque una pérdida de peso menor a 1 mg en los tiempos acá citados, la medición se dará por terminada, lo que influirá directamente sobre el tiempo y la calidad de secado. Esta variable es fundamental si se tiene varias categorías que analizar, por ejemplo, en sustancias de secado lento sería conveniente utilizar un criterio de desconexión “lento” debido a que la velocidad de secado tal vez podría bajar mucho pero no parar, en cambio para sustancias homogéneas, no formadoras de películas ni resistentes al calor (como el papel) convendría utilizar criterios de desconexión “rápidos” pues hay la particularidad de que una vez que la velocidad decrece es porque toda la humedad ha sido extraída.

En este caso, al tener los residuos orgánicos una amplia gama de texturas y tejidos, es necesario conocer que criterios de desconexión trabajarían mejor con esta categoría de residuos. El muestreo se hizo mediante el método NT ENVIR 001, se hicieron tres repeticiones por cada tratamiento.

**Tabla 50:** Influencia del criterio de desconexión en la determinación de humedad para residuos sólidos orgánicos mediante termo-balanza.

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
<b>Método</b>	Termobalanza (cd1)	Termobalanza (cd2)	Termobalanza (cd3)	Estufa de desecación
<b>Masa inicial (gr)</b>	2	2	2	2
<b>% Humedad</b>	73.15	74.23	73.61	73.50
	71.50	73.22	73.66	73.50
	72.85	73.99	73.15	73.00
<b>Media %h</b>	72.50	73.81	73.47	73.33
<b>Tiempo (minutos)</b>	5:47	5:54	6:39	240:00
	6:10	5:30	6:36	240:00
	5:42	6:09	7:10	240:00
<b>Media tiempo</b>	5:53	5:51	6:48	240:00
<b>Descripción de partículas</b>	Desmenuzado	Desmenuzado	Desmenuzado	Desmenuzado
<b>Temperatura (°c)</b>	140	140	140	105





**Figura 20:** Precisión de criterios de desconexión en determinación de humedad de residuos orgánicos mediante termo-balanza.

La grafica muestra claramente la precisión que ofrecen los tres tipos de criterios de desconexión analizados, y como se van volviendo minuciosos según vaya aumentando el tiempo de desconexión.

Los criterios de desconexión no ayudan en sí a mejorar la precisión de cualquier muestra, sino que deben ser elegidos dependiendo de la composición y el comportamiento de secado de la muestra que se desee analizar, por ejemplo: la pasta de papel es bastante uniforme, por lo tanto la velocidad de secado también lo es y una vez que decrece lo hace hasta cero, sin embargo en sustancias tan mixtas como los desechos orgánicos, la curva de secado puede fluctuar por lo tanto se requiere de un criterio de secado equilibrado que no decaiga en un análisis lento sino dinámico.

En este caso el criterio de desconexión más adecuado sería el CD3 que termina la desecación una vez que en durante 50 segundos la balanza haya captado menos de un miligramo de pérdida de peso.

## Papel y derivados.

### Influencia de la temperatura en la determinación de humedad para residuos de papel y derivados mediante termo-balanza.

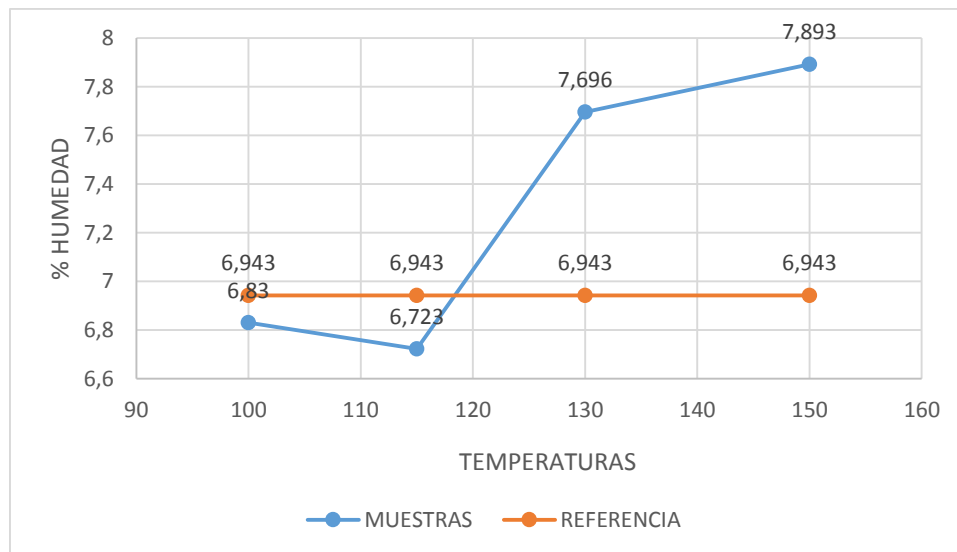
El presente estudio se realizó con el fin de encontrar un rango idóneo de temperaturas con las que trabajar en la marcha experimental.

Las temperaturas propuestas (100, 115, 130, 150) se adoptaron con el fin de observar el comportamiento de secado de los desechos de papel -en este caso papel bond tomado directamente de los basureros de las oficinas- tomando muy en cuenta que este tipo de elemento es considerado volátil y por lo tanto se debe tener cuidado omitiendo el uso de temperaturas demasiado altas o exponiendo a la termo-balanza a corrientes de aire durante el proceso de desecación pues esto podría provocar que el papel combustione, lo que a su vez podría afectar a la lámpara halógena. Escogió el criterio cinco de desconexión por ser la primera vez que se trabaja con papel entonces deseo tener resultados exactos. La desecación está programada para terminar si en un lapso de 140 segundos la cantidad de masa extraída es inferior a 1 miligramo.

**Tabla 51:** Influencia de la temperatura en la determinación de humedad para residuos de papel y derivados mediante termo-balanza.

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
<b>Programa de secado</b>	Estandar	Estandar	Estandar	Estandar	Estuda de desecación
<b>Criterio de desconexión</b>	Cr 5	Cr 5	Cr 5	Cr 5	Cr 5
<b>Temperatura</b>	100 °c	115 °c	130 °c	150 °c	105 °c
<b>Masa</b>	1 gr	1 gr	1 gr	1 gr	1 gr
<b>Porcentaje de humedad</b>	7	6.69	8.1	7.8	7
	6.69	6.79	7.69	7.78	7
	6.8	6.69	7.3	8.1	6.83
<b>Media humedad</b>	6.83	6.72333333	7.69666667	7.89333333	6.94333333
<b>Tiempo (minutos)</b>	2:51	3:17	2:51	2:51	4 h
	2:51	2:51	2:51	2:58	4 H
	2:51	2:51	2:51	2:51	4 H
<b>Media tiempo</b>	02:51	03:00	02:51	02:53	4 h

El tiempo no varió en más de 20 segundos en cada medición, incluso en muchas de ellas hubo una medida de tiempo exactamente igual, lo que puede ser debido a que se trataba de un material homogéneo, pero también porque según se observa el papel suelta humedad con mucha facilidad, por lo que el tiempo de medición además de ser muy bajo, también resulta ser el mismo en 10 de las 12 mediciones realizadas a pesar de ser tratadas con diferentes temperaturas.



**Figura 21:** Fidelidad con el método de referencia según la temperatura de residuos de papel y derivados.

Se puede observar que las temperaturas más fieles a la referencia fueron las más bajas. El papel es una pasta predominantemente celulósica proclive a ganar humedad, y de hecho si se lo junta con desechos como por ejemplo los orgánicos, que desprenden gran cantidad de líquido por hidrólisis, se va a trabajar con papel o cartón húmedos. Sin embargo esto no afecta a la mecánica de extracción, puesto que al tratarse de humedad adicionada, es más fácil de eliminar que la humedad arraigada inter o intracelular en los desechos orgánicos.

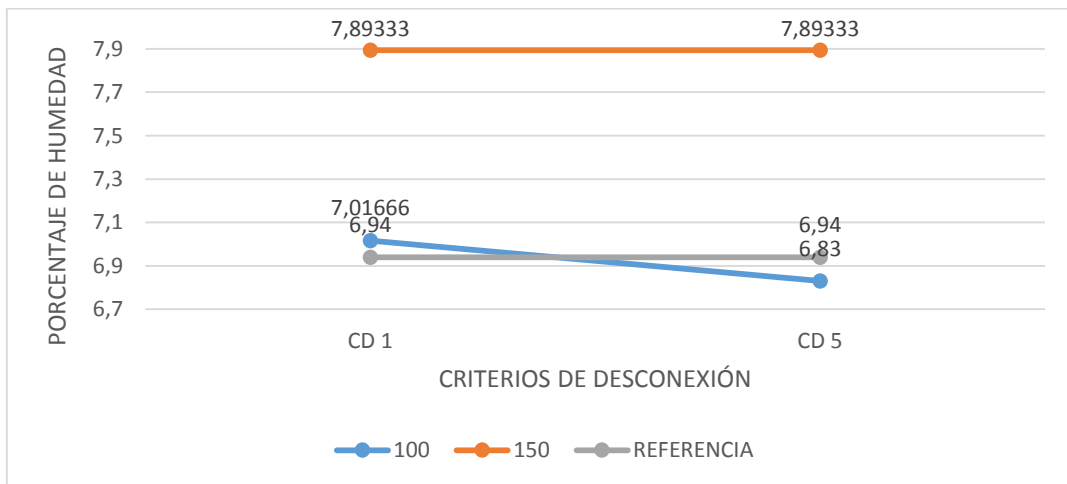
Obviamente que a mayor humedad, mayor tiempo de desecación, sin embargo lo que se intenta decir es que usar un papel o derivado con alto contenido de humedad (ganado) no altera el método de determinación que se pretende estandarizar.

**Criterio de desconexión.**

Para comprobar los efectos del criterio de desconexión en la determinación de humedad de papel y derivados mediante termo-balanza se tomaron dos nuevas muestras del mismo material (papel bond), se aplicaron temperaturas de desecación de 100 y 150 °C con criterio de desconexión 1. Configurando criterio de desconexión 1 la termo-balanza dará por terminada la desecación si durante 10 segundos se ha extraído una cantidad de masa menor a 1 miligramo.

**Tabla 52:** Criterios de desconexión en residuos de papel y derivados.

	M1	M2
<b>Criterio de desconexión</b>	CD 1	CD 5
<b>Masa</b>	1 GR	1 GR
<b>Humedad</b>	7.03 7.13 6.89	7.7 7.49 8.49
<b>Media humedad</b>	7.01666667	7.89333333
<b>Temperatura</b>	100 °C	150 °C
<b>Tiempo</b>	0:44 0:41 0:41	2:51 2:51 2:56
<b>Media tiempo</b>	00:42	2:53



**Figura 22:** Precisión de criterios de desconexión para con el método de determinación de humedad referencial de residuos de papel y derivados.

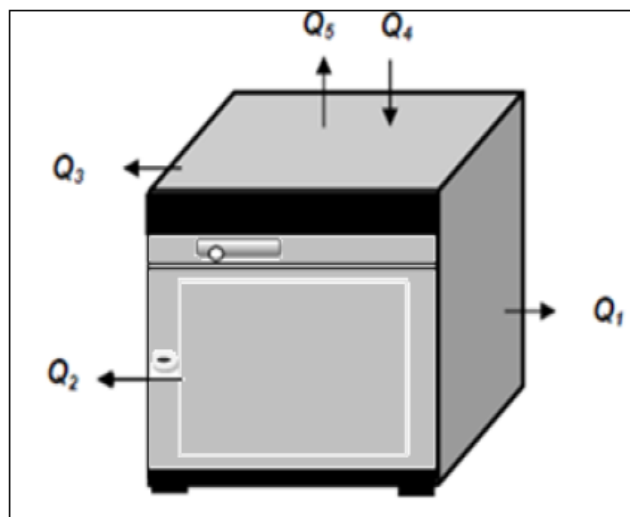
Cuando se determina humedad en papel o derivados la desecación es rápida, y llegado a un pico de velocidad, esta baja hasta cero, por lo tanto puede darse por terminada la medición.

En cuanto a la **cantidad de masa** se puede utilizar tanta masa como lo permita volumétricamente el equipo, es decir, el papel y sus derivados son sustancias voluminosas y por ello al ser colocadas en el plato de aluminio para su desecación ocupan mucho espacio, por lo tanto se recomienda utilizar máximo 2 gr de muestra.

Finalmente en cuanto al **tamaño** de partículas se puede decir que no es relevante debido a la presentación laminar del papel y derivados, y que siempre y cuando el grosor de estos no supere los 3mm no se requiere un macerado detallado del papel.

#### **ANEXO 7: BALANCE DE ENERGÍA A NIVEL DE LABORATORIO, PARA EL SECADO DE RSD.**

##### **Balance de energía del secador**



**Figura 23:** Secador de bandejas.

## Secador

$M$  (RSD) = 3.0 kg

$T$  = 6 horas  $\rightarrow$  360 min

$T_1$  = 21.55 °C

$T_2$  = 23.6 °C

$T_3$  = 23.6 °C

$T_4$  = 23.6 °C

## Nomenclatura

$T$  = Tiempo de proceso

$T_1$  = Temperatura ambiente

$T_2$  = Temperatura de las paredes verticales laterales.

$T_3$  = Temperatura las paredes verticales frontal y posterior.

$T_4$  = Temperatura las paredes horizontales superior e inferior.

**El calor 1 o (Q1):** Es el que se pierden por las paredes verticales laterales “Izaquieda – Derecha” del secador.

**El calor 2 o (Q2):** Es el que se pierden por las paredes verticales Anterior y Posterior.

**El calor 3 o (Q3):** Es el que se pierden por las paredes horizontales Superior e Inferior.

$Q_s$  = Calor sensible del producto.

$Q_l$  = Calor latente del producto

$Q_{\text{Resistencia Eléctrica}}$  = Calor que ingresa por medio de la electricidad al secador.

$U$  = Coeficiente de transferencia de calor.

## Dimensiones del equipo

$a \rightarrow$  Alto = 0.5138 mts.

$P \rightarrow$  Profundo = 0.5138 mts.

$L \rightarrow$  Ancho - Largo = 0.5657 mts.

### Dimensiones de las bandejas

**L** → Largo = 0.29 mts.

**a** → Ancho = 0.23 mts.

**#** → Número de bandejas = 2

### Ecuación general a utilizar para el balance de energía.

$$Q_{\text{practico del proceso}} = (Q_{\text{Resistencia Eléctrica}} - Q_1 - Q_2 - Q_3)$$

$$Q_{\text{producto}} = (Q_s + Q_l) * 1.05$$

### Calor perdido por la parte de evaporación.

### Balance total de energía.

$$Q_{\text{entra}} = Q_{\text{sale}}$$

$$Q_{\text{Resistencia Eléctrica}} = Q_{\text{(H}_2\text{O)}} + Q_{\text{(perdido)}}$$

$$Q_{\text{Resistencia Eléctrica}} = Q_{\text{(H}_2\text{O)}} + Q_{\text{(v)}} + Q_1 + Q_2 + Q_3$$

### Cpm. Del proceso de secado de los RSD

$$C_{pm} = \%H_2O * C_{p.H_2O} + \%S.T * C_{p.S.T}$$

$$C_{pm} = 0.0538 * \frac{4.201 \text{ kJ}}{\text{Kg K}} + 0.9432 * \frac{1.38 \text{ kJ}}{\text{kg K}}$$

$$C_{pm} = \frac{1.5276 \text{ kJ}}{\text{kg K}}$$

Datos:

$M_1 = 0.3189 \text{ Kg} / 6 \text{ horas}$

$C_{pm} \text{ mezcla} = 1.5276 \text{ KJ/Kg C}$

$$\Delta T = (85 - 17.8) = 67.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Tomado de: Análisis proximal INER.

Calor sensible

$$Q_s = m (\text{cp.}) * (T_2 - T_1)$$

$$Q_s = 0.3189 \text{ kg} * \frac{1.5276 \text{ kJ}}{\text{Kg } ^{\circ}\text{K}} * (85 - 17.8) ^{\circ}\text{K}$$

$$Q_s = \frac{32.74 \text{ kJ}}{6 \text{ hora}} * \frac{1 \text{ hora}}{3600 \text{ s}}$$

$$Q_s = 0.00152 \text{ kW} \rightarrow 1.52 \text{ watt}$$

Tomado de: fundamentos de la ingeniería. Clair Batty Pág. 201 – 202.

Calor de vaporización o latente que corresponde al agua eliminada.

Datos:

$$M_v = 1.3811 \text{ kg} \rightarrow 81.24 \%$$

$$H_{fg\ 85\text{C}} = 2295.3 \text{ KJ/Kg}$$

$$T = 6 \text{ hora}$$

$$Q_v = \frac{M_v * H_{fg}}{T}$$

$$Q_v = \frac{1.3811 \text{ kg} * 2295.3 \text{ kJ /kg} * 1 \text{ hora}}{6 \text{ hr} * 3600 \text{ s}}$$

$$Q_v = 0.14676 \text{ kW} \rightarrow 146.76 \text{ watt}$$

**El calor 1 o (Q1):** es el que se pierden por las paredes verticales laterales del equipo, de igual manera se lo realiza a temperatura laminar.

Fundamentos de la Ingeniería. J. Clair Batty. Pág. 201 – 202.



Datos

$$T_{\text{sup.}} = 23.6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{amb.}} = 21.55 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_f = \frac{T_s + T_{\text{amb}}}{2}$$

$$T_f = \frac{23.6 + 21.55}{2} = 22.58 + 273.15 = 295.73$$

Se evaluarán las propiedades del aire a 295.73 K

### Nomenclatura

$T_s$ . = Temperatura de la superficie  $\rightarrow$  ( $^\circ\text{C}$ ).

$T_a$ . = Temperaturas de la corriente de aire  $\rightarrow$  ( $^\circ\text{C}$ ).

$K$  = Coeficiente de transferencia de calor del aire  $\rightarrow$  W/ m C.

$C_p$ . = Coeficiente de transferencia de calor del alimento  $\rightarrow$  KJ/ kg C.

$B$  = Coeficiente isobárico  $\rightarrow k^{-1}$ .

$U$  = Viscosidad del aire  $\rightarrow$  kg/m\*s.

$\delta$  = Densidad del aire  $\rightarrow$  kg/m<sup>3</sup>.

$Pr$  = Numero a dimensional de Prandtl.

$L$  = Longitud  $\rightarrow$  m.

$G$  = Gravedad  $\rightarrow$  m/s.

$Gr$  = Numero a dimensional de Grashof

$$K = 0.02590 \text{ W/ m C}$$

$$C_p. = 1.0057 \text{ KJ/ kg C}$$

$$B = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{295.73} = 0.003381 \text{ } k^{-1}$$

$$U = 1.940 * 10^5 \text{ kg/m*s}$$

$$\delta = 1.200 \text{ kg/m}^3$$

$$Pr = 0.709$$

$$a = 0.5138 \text{ mts.}$$

$$g = 9.78 \text{ m/s}$$

Tomado de: fundamentos de la ingeniería. Clair Batty tabla C-9 Apéndice 306.

$$Gr = \frac{g * B (Ts - Ta) \delta^2 * L^3}{U^2}$$

$$Gr = \frac{9.78 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0.003381 \text{ K}^{-1} * (23.6 - 21.55) * \left( \frac{1.200 \text{ kg}}{\text{m}^3} \right)^2 * (0.5138 \text{ m})^3}{\left( \frac{1.940 * 10^{-5} \text{ kg}}{\text{m} * \text{s}} \right)^2}$$

$$Gr = 3.5 * 10^7$$

$$Gr * Pr = 3.5 * 10^7 * 0.709$$

$$Gr * Pr = 2.4 * 10^7$$

$$\text{Log}_{10} (Gr Pr) = 7.40$$

$$\text{Log}_{10}(\text{Nu}) = 1.6$$

$$\text{Nu} = 10^{1.6} \rightarrow 38.81$$

Dónde:

Nu = Numero de Nusselt.

H = Coeficiente de transferencia de calor.

L = Longitud.

K = Transferencia de calor del aire.

$$Nu = \frac{H * L}{K}$$

$$h = \frac{Nu * K}{L}$$

$$h = \frac{38.81 * 0.02590 \frac{\text{W}}{\text{M} * \text{C}}}{0.5138 \text{ m}}$$

$$h = 2.007 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * \text{C}}$$

### Área de las paredes verticales laterales.

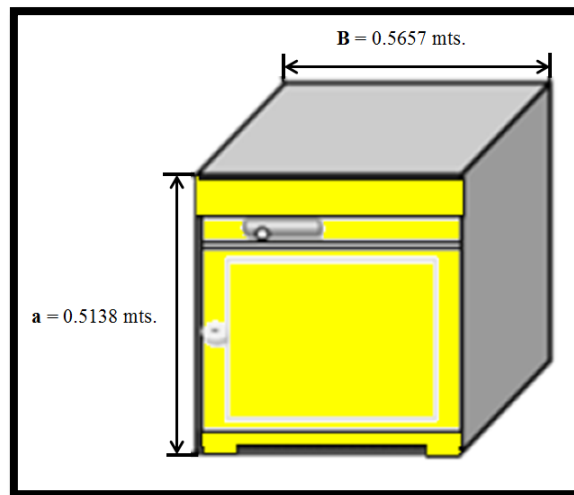
Dónde:

A = Área

B= Base

a = Altura

$$Area = (B * a) * 2$$



**Figura 24:** dimensiones secador de bandejas.

$$Area = (B * a) * 2$$

$$Area = (0.5138 \text{ m} * 0.5138 \text{ m}) * 2$$

$$Area = 0.264 \text{ m}^2$$

### Calor de las paredes verticales del secador.

Calor 1

$$Q1 = H * A (Ts - Ta)$$

$$Q_1 = 2.007 \frac{W}{m^2 * C} * 0.264 m^2 * (85.00 - 21.55) ^\circ K$$

$$Q_1 = 33.62 \text{ watt} \rightarrow 0.034 \text{ kW}$$

**El calor 2 o (Q2):** es el que se pierden por las paredes verticales frontal y posterior del equipo, de igual manera se lo realiza a temperatura laminar.

Fundamentos de la Ingeniería. J. Clair Batty. Pág. 201 – 202.

Datos

$$T_{\text{sup.}} = 23.6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{amb.}} = 21.55 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_f = \frac{T_s + T_{\text{amb}}}{2}$$

$$T_f = \frac{23.6 + 21.55}{2} = 22.58 + 273.15 = 295.73$$

Se evaluarán las propiedades del aire a 295.73 K

### Nomenclatura

$T_s$ . = Temperatura de la superficie  $\rightarrow$  ( $^\circ\text{C}$ ).

$T_a$ . = Temperaturas de la corriente de aire  $\rightarrow$  ( $^\circ\text{C}$ ).

$K$  = Coeficiente de transferencia de calor del aire  $\rightarrow$  W/ m C.

$C_p$ . = Coeficiente de transferencia de calor del alimento  $\rightarrow$  KJ/ kg C.

$B$  = Coeficiente isobárico  $\rightarrow k^{-1}$ .

$U$  = Viscosidad del aire  $\rightarrow$  kg/m\*s.

$\delta$  = Densidad del aire  $\rightarrow$  kg/m<sup>3</sup>.

$Pr$  = Numero a dimensional de Prandtl.

$L$  = Longitud  $\rightarrow$  m.

$G$  = Gravedad  $\rightarrow$  m/s.

$Gr$  = Numero a dimensional de Grashof

Tomado de: fundamentos de la ingeniería. Clair Batty tabla C-9 Apéndice 306

$$K = 0.02590 \text{ W/ m C}$$

$$C_p = 1.0057 \text{ KJ/ kg C}$$

$$B = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{295.73} = 0.003381 \text{ K}^{-1}$$

$$U = 1.940 * 10^5 \text{ kg/m*s}$$

$$\delta = 1.200 \text{ kg/m}^3$$

$$Pr = 0.709$$

$$\text{Base} = 0.5657 \text{ mts.}$$

$$g = 9.78 \text{ m/s}$$

$$Gr = \frac{g * B (T_s - T_a) \delta^2 * L^3}{U^2}$$

$$Gr = \frac{9.78 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0.003381 \text{ K}^{-1} * (23.6 - 21.55) * \left( \frac{1.200 \text{ kg}}{\text{m}^3} \right)^2 * (0.5657 \text{ m})^3}{\left( \frac{1.940 * 10^{-5} \text{ kg}}{\text{m} * \text{s}} \right)^2}$$

$$Gr = 4.6 * 10^7$$

$$Gr * Pr = 4.6 * 10^7 * 0.709$$

$$Gr * Pr = 3.3 * 10^7$$

$$\text{Log}_{10} (Gr Pr) = 7.52$$

$$\text{Log}_{10}(\text{Nu}) = 1.63$$

$$\text{Nu} = 10^{1.63} \rightarrow 42.66$$

Dónde:

Nu = Numero de Nusselt.

H = Coeficiente de transferencia de calor.

L = Longitud.

K = Transferencia de calor del aire.

$$Nu = \frac{H * L}{K}$$

$$h = \frac{Nu * K}{L}$$

$$h = \frac{42.66 * 0.02590 \frac{W}{M * C}}{0.5657 \text{ m}}$$

$$h = 1.953 \frac{W}{m^2 * C}$$

**Área de las paredes verticales frontal y posterior.**

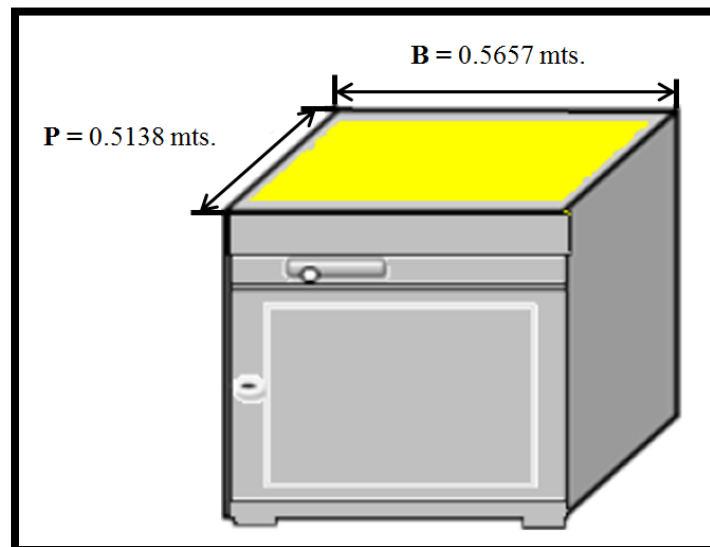
Dónde:

A = Área

B= Base

a = Altura

$$Area = (B * a) * 2$$



**Figura 25:** área de paredes de secador de bandejas.

$$Area = (B * a) * 2$$

$$Area = (0.5657 \text{ m} * 0.5657 \text{ m}) * 2$$

$$Area = 0.6400 \text{ m}^2$$

### Calor de las paredes verticales frontal y posterior del secador.

#### Calor 2

$$Q2 = H * A (Ts - Ta)$$

$$Q2 = 1.953 \frac{W}{m^2 * C} * 0.6400 m^2 * (85.00 - 21.55) ^\circ K$$

$$Q2 = 79.31 \text{ watt} \rightarrow 0.08 \text{ kW}$$

**El calor 3 o (Q3):** es el que se pierden por las paredes horizontales superior e inferior del equipo, de igual manera se lo realiza a temperatura laminar.

Fundamentos de la Ingeniería. J. Clair Batty. Pág. 201 – 202

Datos

T sup. = 23.6 °C

T amb. = 21.55 °C

$$Tf = \frac{Ts + Tamb}{2}$$

$$Tf = \frac{23.6 + 21.55}{2} = 22.58 + 273.15 = 295.73$$

Se evaluarán las propiedades del aire a 295.73 K

#### Nomenclatura

Ts. = Temperatura de la superficie → (°C).

Tα. = Temperaturas de la corriente de aire → (°C).

K = Coeficiente de transferencia de calor del aire → W/ m C.

Cp. = Coeficiente de transferencia de calor del alimento → KJ/ kg C.

B = Coeficiente isobárico →  $k^{-1}$ .

$U$  = Viscosidad del aire  $\rightarrow$  kg/m\*s.

$\delta$  = Densidad del aire  $\rightarrow$  kg/m<sup>3</sup>.

Pr = Numero a dimensional de Prandtl.

$L$  = Longitud  $\rightarrow$  m.

$G$  = Gravedad  $\rightarrow$  m/s.

Gr = Numero a dimensional de Grashof

Tomado de: fundamentos de la ingeniería. Clair Batty tabla C-9 Apéndice 306

$K = 0.02590$  W/ m C

$C_p = 1.0057$  KJ/ kg C

$$B = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{295.73} = 0.003381 \text{ K}^{-1}$$

$U = 1.940 * 10^5$  kg/m\*s

$\delta = 1.200$  kg/m<sup>3</sup>

Pr = 0.709

$L = 0.5138$  mts.

$g = 9.78$  m/s

$$Gr = \frac{g * B (T_s - T_a) \delta^2 * L^3}{U^2}$$

$$Gr = \frac{9.78 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0.003381 \text{ K}^{-1} * (23.6 - 21.55) * \left( \frac{1.200 \text{ kg}}{\text{m}^3} \right)^2 * (0.5138 \text{ m})^3}{\left( \frac{1.940 * 10^{-5} \text{ kg}}{\text{m} * \text{s}} \right)^2}$$

$$Gr = 3.5 * 10^7$$

$$Gr * Pr = 3.5 * 10^7 * 0.709$$

$$Gr * Pr = 2.4 * 10^7$$

$$\text{Log}_{10} (Gr Pr) = 7.40$$

$$\text{Log}_{10}(\text{Nu}) = 1.6$$

$$\text{Nu} = 10^{1.6} \rightarrow 38.81$$



Dónde:

Nu = Numero de Nusselt.

H = Coeficiente de transferencia de calor.

L = Longitud.

K = Transferencia de calor del aire.

$$Nu = \frac{H * L}{K}$$

$$h = \frac{Nu * K}{L}$$

$$h = \frac{38.81 * 0.02590 \frac{W}{M * C}}{0.5138 \text{ m}}$$

$$h = 2.007 \frac{W}{m^2 * C}$$

**Área de las paredes verticales laterales.**

Dónde:

A = Área

L = Largo

a = Ancho

$$Area = (B * a) * 2$$

**Área de las paredes horizontales superior e inferior.**

$$Area = (B * a) * 2$$

$$Area = (0.5138 \text{ m} * 0.5138 \text{ m}) * 2$$

$$Area = 0.264 \text{ m}^2$$

**Calor de las paredes horizontales superior e inferior.**

**Calor 3**

$$Q_3 = H * A (T_s - T_a)$$

$$Q_3 = 2.007 \frac{W}{m^2 * C} * 0.264 m^2 * (85.00 - 21.55) ^\circ K$$

$$Q_3 = 33.61 \text{ watt} \rightarrow 0.034 \text{ kW}$$

**Cálculo de la cantidad de energía que ingresa al secador.**

Dónde:

A<sup>0</sup> = Amperaje.

V = Voltaje.

T = Tiempo.

Datos.

Amp = 10.5

V = 115

T = 6 Horas

$$Q_r = V * Amp$$

$$Q_r = (115 * 10.5)W$$

$$Q_r = (1207.5)W + 5\%$$

$$Q_r = (1267.88)W$$

$$Q_r = \frac{1267.88 \text{ w}}{\text{dia}} * \frac{1 \text{ dia}}{24 \text{ horas}} * 6 \text{ horas}$$

$$Q_r = 316.97 W$$

**Secado de los RSD.**

$$Q_{\text{práctico del proceso}} = (Q_r - Q_1 - Q_2 - Q_3)$$

$$Q_{\text{práctico del proceso}} = 316.97 - (33.62 + 79.31 + 33.62) \text{ Watt}$$

$$Q_{\text{práctico del proceso}} = 170.42 \text{ Watt}$$

$$\text{Calor del producto es} = (\text{calor sensible} + \text{calor latente}) * 1.05$$

$$Q_{\text{producto}} = (Q_s + Q_l) * 1.05$$

$$Q_{\text{producto}} = (1.52 + 146.76) \text{ watt}$$

$$Q_{\text{producto}} = 148.28 \text{ watt} * 1.05$$

$$Q_{\text{producto}} = 155.69 \text{ watt}$$

**Porcentaje de error**

$$\% \text{ Error} = 100 - \left( \frac{\text{Calor del producto}}{\text{Calor práctico del proceso}} * 100 \right)$$

$$\% \text{ Error} = 100 - \left( \frac{155.69 \text{ watt}}{170.42 \text{ watt}} * 100 \right)$$

$$\% \text{ Error} = 100 - 91.36 = 8.64 \%$$

$$\% \text{ Eficiencia} = 91.36 \%$$

**Cálculo del coeficiente total de transferencia de calor**

Dónde:

A = Área

L = Largo → 0.29 mts.

a = Ancho → 0.23 mts.

$$\text{Area} = (B * a) * 2$$

$$\text{Area} = (0.29 \text{ m} * 0.23 \text{ m}) * 2$$

$$Area = 0.1334 m^2$$

Área de la superficie de la bandeja utilizada para secar

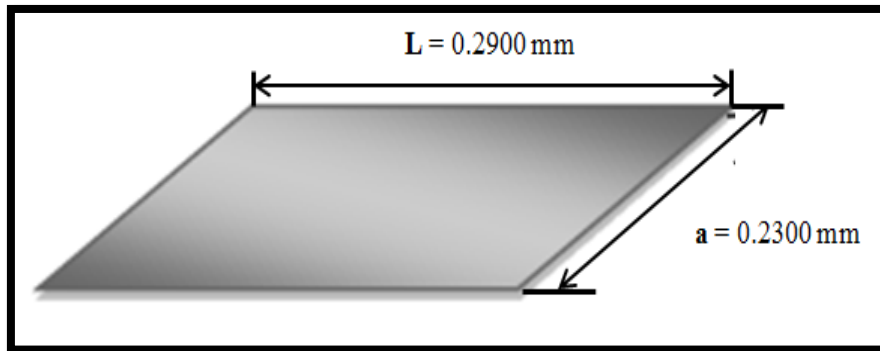


Figura 26: superficie de bandejas.

Coefficiente de transferencia de calor del proceso de secado de RSD

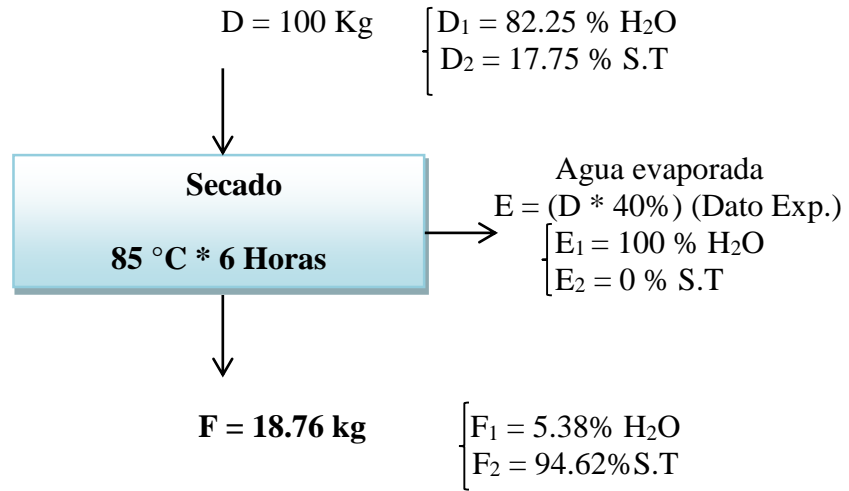
$$Q = U * A * \Delta T$$

$$U = \frac{Q}{A * \Delta T}$$

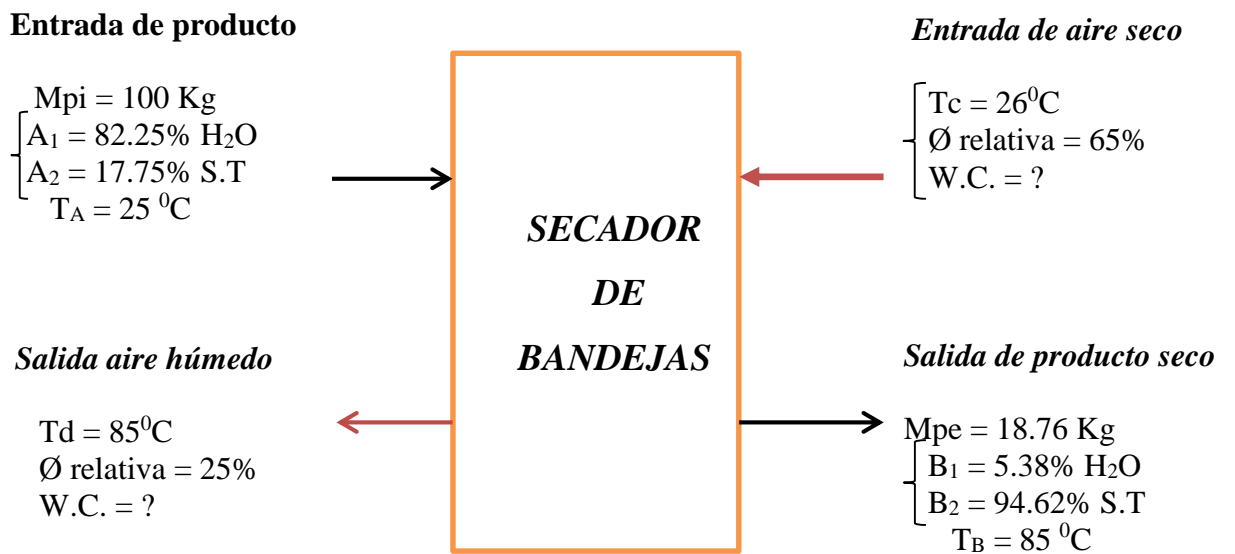
$$U = \frac{170.42 \text{ W}}{0.1334 m^2 * (85.00 - 17.8)^\circ\text{C}}$$

$$U = 19.0105 \frac{1\text{W}}{m^2 * ^\circ\text{C}}$$

**ANEXO 8: DISEÑO DE UN SECADOR DE BANDEJAS PARA RESIDUOS SÓLIDOS DOMÉSTICOS.**



**Flujo másico de aire.**



**Calculo de la humedad absoluta del aire que ingresa al equipo.**

$$\text{Ø}_i = \frac{P_{vi}}{P_{gi}}$$

$$P_g (26 \text{ }^\circ\text{C}) = 3.169 \text{ Kpa}$$

$$\phi_i * P_{gi} = P_{vi}$$

$$(0.65) * (3.169) = 2.0599 \text{ Kpa}$$

$$P_a = P - P_v$$

$$P_a = 101.3 - 2.0599 = 99.2401 \text{ Kpa}$$

$$W_i = \frac{P_{vi}}{P_a} * 0.622$$

$$W_i = \frac{2.0599}{99.2401} * 0.622$$

$$W_i = 0.01291 \frac{\text{Kg de vapor}}{\text{Kg de Aire seco}}$$

**Cálculo de la humedad absoluta del aire que sale del equipo.**

$$\phi_i = \frac{P_{vi}}{P_{gi}}$$

$$P_g(85 \text{ }^\circ\text{C}) = 57.83 \text{ Kpa}$$

$$\phi_i * P_{gi} = P_{vi}$$

$$(0.25) * (57.83) = 14.458 \text{ Kpa}$$

$$P_a = P - P_v$$

$$P_a = 101.3 - 14.458 = 86.842 \text{ Kpa}$$

$$W_i = \frac{P_{vi}}{P_a} * 0.622$$

$$W_i = \frac{14.458}{86.842} * 0.622$$

$$W_i = 0.1036 \frac{\text{Kg de vapor}}{\text{Kg de Aire seco}}$$

**Cálculo del balance húmedo del sistema de secado.**

**Balance general**

$$\begin{aligned}
 A + C &= B + D \\
 A - B &= D - C \\
 100 - 18.76 &= D - C \\
 C &= D - 81.24
 \end{aligned}$$

**Balance parcial de agua**

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A (wA) + C (wC) = B (wB) + D (wD)} \\
 100 (0.8225) + (D - 81.24)(0.01291) &= 18.76 (0.0538) + D (0.1036) \\
 82.25 + 0.01291 D - 1.0488 &= 1.0093 + 0.1036 D \\
 82.25 - 1.0488 - 1.0093 &= 0.1036 D - 0.01291 D \\
 D &= \frac{80.1919}{0.09069} \\
 D &= 884.242 \text{ Kg de Aire Húmedo}
 \end{aligned}$$

**Balance total**

$$\begin{aligned}
 C &= D - 81.24 \\
 C &= 884.242 - 81.24 \\
 C &= 803.002 \text{ Kg de Aire Seco}
 \end{aligned}$$

**Cpm. Del proceso de secado de residuos sólidos domésticos.**

$$\begin{aligned}
 \mathbf{Cpm} &= \%H_2O * C_{p.H_2O} + \%S.T * C_{p.S.T} \\
 \mathbf{Cpm} &= 0.0538 * \frac{4.201 \text{ kJ}}{\text{Kg K}} + 0.9462 * \frac{1.38 \text{ kJ}}{\text{kg K}}
 \end{aligned}$$

$$C_{pm} = \frac{1.5318 \text{ kJ}}{\text{kg K}}$$

**Cantidad de calor total del secador de bandejas.**

$$Q = M_{pe} * C_{pe} (T_{pe} - T_{pi}) + M_a(C_a(T_{ae} - T_{ai})) + W_{ai}(H_{ve} - H_{vi}) + M_{evap.}(H_{vei} - H_{li}) + Q_{perdido}$$

**Nomenclatura:**

**Q** = Calor necesario que se necesita para llevar a cabo el proceso.

**M<sub>pe</sub>** = Velocidad de flujo de la masa del producto que sale del sistema → Kg.

**C<sub>pe</sub>** = Calor específico del producto de salida →  $\frac{Kj}{Kg * C}$

**T<sub>pe</sub>** = Temperatura del producto de salida → °C.

**T<sub>pi</sub>** = Temperatura del producto a la entrada. → °C.

**M<sub>a</sub>** = Velocidad de flujo de masa del aire seco a la entrada del secador → Kg.

**C<sub>a</sub>** = Calor específico a la presión constante del aire seco →  $\frac{Kj}{Kg * C}$

**T<sub>ae</sub>** = Temperatura del aire a la salida → °C.

**T<sub>ai</sub>** = Temperatura del aire a la entrada → °C.

**W<sub>ai</sub>** = Humedad absoluta del aire que entra al secador →  $\frac{Kg \text{ de vapor}}{Kg \text{ de aire seco}}$

**H<sub>ve</sub>** = Entalpia del vapor de agua en la salida del aire →  $\frac{Kj}{Kg}$

**H<sub>vi</sub>** = Entalpia del vapor de agua a la entrada del aire →  $\frac{Kj}{Kg}$

**M<sub>evap.</sub>** = Velocidad de evaporación dentro del secador → Kg.

**H<sub>li</sub>** = Entalpia del agua líquida en la entrada del producto →  $\frac{Kj}{Kg}$

**Q<sub>p</sub>** = Perdida de calor a través de la paredes por fuga del aire → %



Datos:

$$Q = ?$$

$$M_{pe} = 18.76 \text{ Kg.}$$

$$C_{pe} = 1.5318 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg} * \text{C}}$$

$$T_{pe} = 85 \text{ }^{\circ}\text{C.}$$

$$T_{pi} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$M_a = 803.002 \text{ Kg}$$

$$C_a = 1.00569 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg} * \text{C}}$$

$$T_{ae} = 85 \text{ }^{\circ}\text{C.}$$

$$T_{ai} = 26 \text{ }^{\circ}\text{C.}$$

$$W_{ai} = 0.01291 \frac{\text{Kg de vapor}}{\text{Kg de Aire seco}}$$

$$H_{ve} = 2651.9 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}}$$

$$H_{vi} = 2547.2 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}}$$

$$M_{evap.} = 81.24 \text{ Kg de agua evaporada.}$$

$$H_{li} = 104.89 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}}$$

$$Q_p = 10\%.$$

$$\begin{aligned} Q = & 18.76 \text{ kg} * 1.5318 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg} \text{ C}} (85 - 25)^{\circ}\text{C} \\ & + 803.002 \text{ kg} (1.00569 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg} \text{ C}} (85 - 26)^{\circ}\text{C}) \\ & + 0.01291 \frac{\text{Kg de vapor}}{\text{Kg de Aire seco}} \left( 2651.9 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}} - 2547.2 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}} \right) \\ & + 81.24 \text{ kg} \left( 2651.9 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}} - 104.89 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}} \right) + Q_{perdido} \end{aligned}$$

$$Q = (1724.194 \text{ Kj} + 47646.6938 \text{ Kj} + 1.3517 \text{ Kj} + 206919.0924 \text{ Kj}) + Q_{perdido}$$

$$Q = (258491.3319 \text{ Kj}) + 10\%$$

$$Q = (258491.3319 \text{ Kj}) + 25849.1332 \text{ Kj}$$

$$Q = 284340.4651 \text{ Kj}$$

$$Q = 284340.4651 \frac{\text{Kj}}{6 \text{ Hora}} * \frac{1 \text{ Hora}}{3600 \text{ segundos}}$$

$$Q = 13.16 \text{ Kw} \rightarrow 13163.9104 \text{ watt}$$

$$Q = 13.16 \text{ Kw} * \frac{1 \text{ Kw}}{9.811 \text{ BHP}}$$

$$Q = 1.34 \text{ BHP}$$

### Determinación de la capacidad de secado.

$$\text{Densidad de los residuos organicos domesticos} = 453 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

**Obtenido de:** Gonzales Julián (2010), Módulo I: Contaminación Ambiental - Residuos Sólidos Urbanos, España: EOI.

### Dimensionamiento de una bandeja.

Datos.

Mt = 100 kg .

Secadores de bandeja = 1

Masa por secador = 100 kg.

Densidad del producto =  $453 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$

Numero de estantes = 2

Volumen  $\rightarrow V = ?$

Cálculos:

$$\text{Masa por bandeja} = \frac{\text{Masa total a secar}}{\# \text{ de Bandejas totales}}$$

$$\text{Masa por bandeja} = \frac{\text{Masa total a secar}}{16 \text{ bandejas}}$$

$$\text{Masa por bandeja} = \frac{100 \text{ Kg}}{16 \text{ bandejas}}$$

*Masa por bandeja = 6.25 Kg de producto por cada bandeja*

$$V = \frac{\text{Masa}}{\text{Densidad}}$$

$$V = \frac{6.25 \text{ Kg}}{453 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}$$

$$V = 0.01380 \text{ m}^3$$

### Dimensiones de las bandejas

Asumimos  $\rightarrow$  "H = 3 cm" constante y "L = 2a"

$$L = 2 * a$$

$$V = L * a * H$$

Ancho

$$V_{\text{Bandeja}} = L * a * H$$

$$0.01380 \text{ m}^3 = 2a * a * 0.03\text{m}$$

$$2a^2 = \frac{0.01380\text{m}^3}{0.03 \text{ m}}$$

$$a^2 = \frac{0.460\text{m}^2}{2}$$

$$a = \sqrt[2]{0.230 \text{ m}^2}$$

$$a = 0.4795 \text{ m}$$

$$a = 0.4795 \text{ m} * 2\%$$

$$a = 0.4891 \text{ m}$$

Longitud

$$L = 2 * a$$

$$L = 2 * 0.4795 \text{ m}$$

$$L = 0.959 \text{ m} * 2\%$$

$$L = 0.978 \text{ m}$$

Comprobación de las medidas de las bandejas con respecto al volumen.

$$V_{\text{Producto}} = L * a * H$$

$$V_{\text{Producto}} = 0.978 \text{ m} * 0.4795 \text{ m} * 0.03 \text{ m}$$

$$V_{\text{Producto}} = 0.01380 \text{ m}^3$$

Volumen de producto por estante

$$V_{\text{Producto}} = 0.01380 \text{ m}^3 * 16$$

$$V_{\text{Producto}} = 0.221 \text{ m}^3$$

Masa total de producto

$$V = \frac{\text{Masa}}{\text{Densidad}}$$

$$\text{Masa} = \text{Volumen} * \text{Densidad}$$

$$\text{Masa} = 0.221 \text{ m}^3 * 453 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Masa} = 100 \text{ Kg de producto}$$

### Area de las bandejas a usarse

**Nota:** se usan 2 estantes de 8 bandejas cada uno.

Resultados:

16 bandejas

Área total de transferencia de calor =  $5.87 \text{ m}^2$

Ancho = 0.4897 mts.

Largo = 0.978 mts.

Alto = 3 cm  $\rightarrow$  0.03 mts.

Volumen total del producto por bandeja =  $0.01380 \text{ m}^3$

### Determinación de la masa promedio

$$M = \text{Volumen} * \text{Densidad}$$

$$M = 0.01380 \text{ m}^3 * 453 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$M = 6.2514 \text{ Kg} * 16 \text{ Bandejas}$$

$$M = 100.02 \text{ Kg}$$

Altura de la estantería  $\rightarrow$  un carrito.

Asumimos la altura de separación ( $H_{\text{sep.}}$ ) = 6 cm

Espesor del tubo cuadrado ( $E_{\text{tubo}}$ ) = 2.5 cm

Espesor del ángulo ( $E_{\text{ángulo}}$ ) = 0.2 cm

Altura total =  $H_T$

Altura de la bandeja ( $H_{\text{bandeja}}$ ) = 3 cm

$$H_T = (8 * H_{\text{bandeja}}) + (8 * H_{\text{sep.}}) + (2 * E_{\text{tubo}}) + (8 * E_{\text{ángulo}}) + \text{Ruedas}$$

$$H_T = (8 * 3\text{cm}) + (8 * 6\text{cm}) + (2 * 2.5\text{cm}) + (8 * 0.2\text{cm}) + 8\text{cm}$$

$$H_T = 24 \text{ cm} + 48 \text{ cm} + 5 \text{ cm} + 1.6 \text{ cm} + 8 \text{ cm}$$

$$HT = (86.6 \text{ cm}) + \text{Espacio superior de ventilacion.}$$

$$HT = (86.6 \text{ cm}) + 20\%$$

$$HT = (86.6 \text{ cm}) + 17.32 \text{ cm}$$

$$HT = 103.92 \text{ cm} \rightarrow 1039.2 \text{ mm}$$

### **Determinación del ancho interno el secador sin considerar aislante.**

Datos

# Número de estantes = 2

Espacios laterales  $\rightarrow 2 = 30\%$  del ancho de la bandeja

Espacio interno entre estantes  $\rightarrow 1 = 30\%$  del ancho de la bandeja

$$A_T = (\text{Ancho}_{\text{Bandejas}} * 2) + (\text{Espacios internos} * 1) + (\text{Espacios laterales} * 2)$$

$$A_T = (0.4897 \text{ mts.} * 2) + (0.1469 \text{ mts.} * 1) + (0.1469 \text{ mts.} * 2)$$

$$A_T = 0.9794 \text{ mts.} + 0.1469 \text{ mts.} + 0.2938 \text{ mts.}$$

$$A_T = 1.4201 \text{ mts.} \rightarrow 1420.1 \text{ mm}$$

### **Determinación del largo interno del secador sin considerar aislante.**

Datos

# Número de estantes = 1

Espacios laterales  $\rightarrow 1 = 15\%$  del ancho de la bandeja

$$L_T = (\text{Largo}_{\text{Bandejas}} * 1) + (\text{Espacios posterior y anterior} * 2)$$

$$L_T = (0.978 \text{ mts.} * 1) + (0.1467 \text{ mts.} * 2)$$

$$L_T = 0.978 \text{ mts.} + 0.2934 \text{ mts.}$$

$$L_T = 1.2714 \text{ mts.} \rightarrow 1271.4 \text{ mm}$$

### Cálculo del aislante térmico del secador.

Datos:

$$\text{Condición térmica} = \frac{30 \text{ watt}}{\text{m}^2}$$

$$K_{\text{lana de vidrio}} = \frac{0.038 \text{ watt}}{\text{m}^2 * C}$$

$$\Delta T = (25 - 100)C$$

$$\Delta X = ? \text{ Lana de vidrio}$$

$$\frac{Q}{A} = -K \frac{\Delta T}{\Delta X}$$

$$X = -\frac{0.038 \text{ watt}}{\text{m}^2 * C} * \frac{(25 - 100)C}{30 \frac{\text{watt}}{\text{m}^2}}$$

$$X = 0.095 \text{ mts.} \rightarrow 9.5 \text{ cm} \rightarrow 95 \text{ mm. por cada lado del secador}$$

### Dimensiones del secador considerando el aislante.

#### Nomenclatura:

$H_T =$  *Altura total del equipo*

$A_T =$  *Ancho total del equipo*

$L_T =$  *Largo total del equipo*

$$H_T = 1039.2 \text{ mm}$$

$$A_T = 1420.1 \text{ mm} + \text{Aislante térmico}$$

$$A_T = 1420.1 \text{ mm} + 95 \text{ mm}$$

$$A_T = 1515.1 \text{ mm}$$

$$L_T = 1271.4 \text{ mm} + \text{Aislante térmico}$$

$$L_T = 1271.4 \text{ mm} + 95 \text{ mm}$$

$$L_T = 1366.1 \text{ mm}$$

### Cálculo del área de transferencia de calor.

Datos:

$$U = 38.02 \frac{W}{m^2 * C}$$

$$\Delta T = 59 C$$

$$Q_{total} = 13163.9104 W$$

$$Q = U * A * \Delta T$$

$$A = \frac{Q}{U * \Delta T}$$

$$A = \frac{13163.9104 W}{38.02 \frac{W}{m^2 * C} * (85 - 26)c}$$

$$A = 5.87 m^2$$

### Cantidad de vapor

Datos

$$Hfg_{85 C} = 2290.0 \frac{Kj}{Kg}$$

$$Q_{total requerido} = 13163.9104 W$$

$$Presión_{85 C} = 57.83 Kpa$$

$$Qv = \frac{Mv * Hfg}{T}$$

$$Mv * Hf = Q * T$$

$$Mv = \frac{Q * T}{Hfg}$$

$$Mv = \frac{13.16 \frac{Kj}{s}}{2290.0 \frac{Kj}{kg}}$$

$$Mv = \frac{0.005748 Kg \text{ de vapor}}{\text{segundo}}$$



Cantidad de vapor para 21600 segundos de proceso → 6 horas

Datos:

**T** = 360 minutos → 21600 segundos

$$Mv = \frac{0.005748 \text{ Kg de vapor}}{\text{segundo}} * 21600 \text{ segundos}$$

$$\text{Masa de vapor total requerida} = 124.17 \text{ KG}$$

Área de transferencia de calor →  $5.87 \text{ m}^2$

**Nota:** Se colocara un serpentín como transferente de calor el mismo que ira anclado a las paredes internas del equipo por el cual circulara vapor, el mismo que calentara el aire dentro del secador.

**Longitud de la tubería.**

$$\emptyset \text{ de tubería} = 3 \text{ Pulg.} * \frac{2.54 \text{ cm}}{1 \text{ Pulg.}} = 7.62 \text{ cm} \rightarrow 0.0762 \text{ m}$$

$$A = \pi * \emptyset * L$$

$$L = \frac{A}{\pi * \emptyset}$$

$$L = \frac{5.87 \text{ m}^2}{\pi * 0.0762 \text{ m}}$$

$$L = 24.52 \text{ m}$$

**Nota:** Se dimensionara la longitud de los tubos y su diámetro en función del ancho del secador y la altura del mismo.

### Dimensiones del secador considerando aislante.

Datos

$$H_T = \text{Altura total del equipo} \rightarrow 1039.2 \text{ mm}$$

$$A_T = \text{Ancho total del equipo} \rightarrow 1515.1 \text{ mm}$$

$$L_T = \text{Largo total del equipo} \rightarrow 1366.1 \text{ mm}$$

Longitud de los tubos  $\rightarrow$  1.00 metros

$$\# \text{ De vueltas} = \frac{\text{Longitud total}}{\text{Longitud de los tubos}}$$

$$\# \text{ De vueltas} = \frac{24.52 \text{ m}}{1.00 \text{ m}}$$

$$\# \text{ De vueltas} = 24.52 \sim 25$$

### Cantidad de tubos por la altura de la pared interna del secador.

Datos

$$H_T = \text{Altura total del equipo} \rightarrow 1039.2 \text{ mm}$$

Se deja un 20% de la altura total.

### Cantidad de tubos por bloques.

$$C = \frac{\text{Alto de la pared} - 20 \%}{\text{Diámetro de los tubos} + \text{Espacio entre tubos.}}$$

$$C = \frac{1038.2 \text{ mm} - 207.64 \text{ mm}}{76.2 \text{ mm} + 30 \text{ mm}}$$

$$C = 7.82 \sim 8$$

### Cantidad de bloques

$$B = \frac{\# \text{ De vueltas}}{\# \text{ Tubos}}$$

$$B = \frac{25}{8}$$

$$B = 3.125 \text{ Bloques} \sim 3$$

**Nota:** Se usaran 3 bloques de tubos de 1.20 metros de largo con un diámetro de 3 pulgadas por el cual circulara el vapor para secado de los residuos sólidos domésticos, se deberá calcular una buena dimensión del profundo o largo del equipo ya que se verá afectado por el diámetro de 3 bloques de tubería.

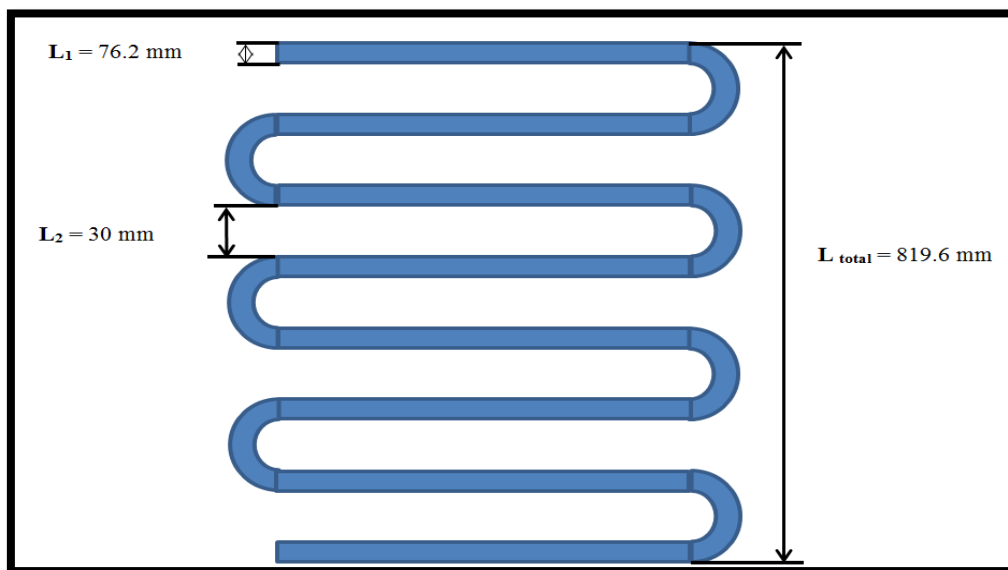
Datos:

Número de bloques = 3

Espacio entre tubos y pares, tubos y bandejas  $\rightarrow 2 = 2$  pulgadas.

Espacio interno entre tubos  $\rightarrow 1 = 2\%$  del ancho de la bandeja

*Largo o Profundo del secador: 1513.1 mm*



**Figura 27:** dibujo bloque de tubos de vapor.



**Figura 28:** Bloque de tubos de vapor.

$$3 \text{ Bloques de tubos de 3 Pulgadas} = 3 * 3 \text{ pulg.} * \frac{2.54 \text{ cm.}}{1 \text{ pulg.}} = 22.86 \text{ cm} \rightarrow 228.6 \text{ mm}$$

$$\text{Espacios internos entre bloques} = 2 * 2 \text{ pulg.} * \frac{2.54 \text{ cm.}}{1 \text{ pulg.}} = 10.16 \text{ cm} \rightarrow 101.6 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \text{Espacios entre los bloques de tubo y la pared} &= 2 * 2 \text{ pulg.} * \frac{2.54 \text{ cm.}}{1 \text{ pulg.}} = 10.16 \text{ cm} \\ &\rightarrow 101.6 \text{ mm} \end{aligned}$$

### **Cálculo del nuevo largo interno del secador.**

$$\begin{aligned} L_T &= (\text{Largo}_{\text{Bandejas}} * 1) + (\text{Espacios posterior} * 2) + \text{Ancho de tubos} \\ &\quad + (\text{Espacio entre bloques} * 2) \\ &\quad + \text{Espacio entre bloque y pared del secador} \end{aligned}$$

$$L_T = (0.978 \text{ mts.} * 1) + (0.1467 \text{ mts.} * 2) + (0.2286 \text{ mts.} + (0.1016 * 2) \text{ mts.} + 0.1016 \text{ mts.})$$

$$L_T = 0.978 \text{ mts.} + 0.2934 \text{ mts.} + 0.5334 \text{ mts.}$$

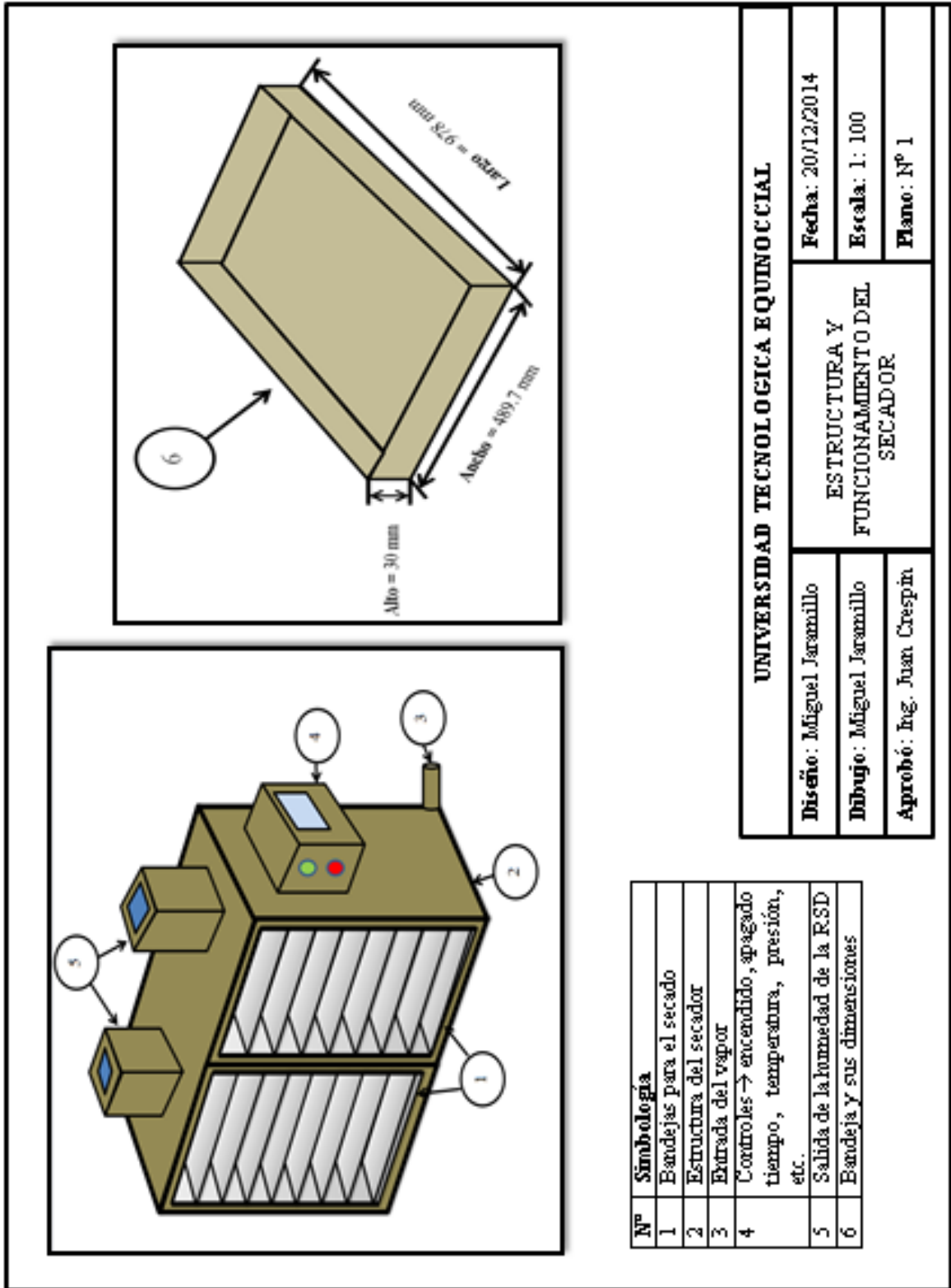
$$L_T = 1.8047 \text{ mts.} \rightarrow 1804.7 \text{ mm}$$

**Calculo del nuevo largo externo del secador.**

$$L_T = 1804.7mm + \text{Aislante termico}$$

$$L_T = 1804.7mm + 95 mm$$

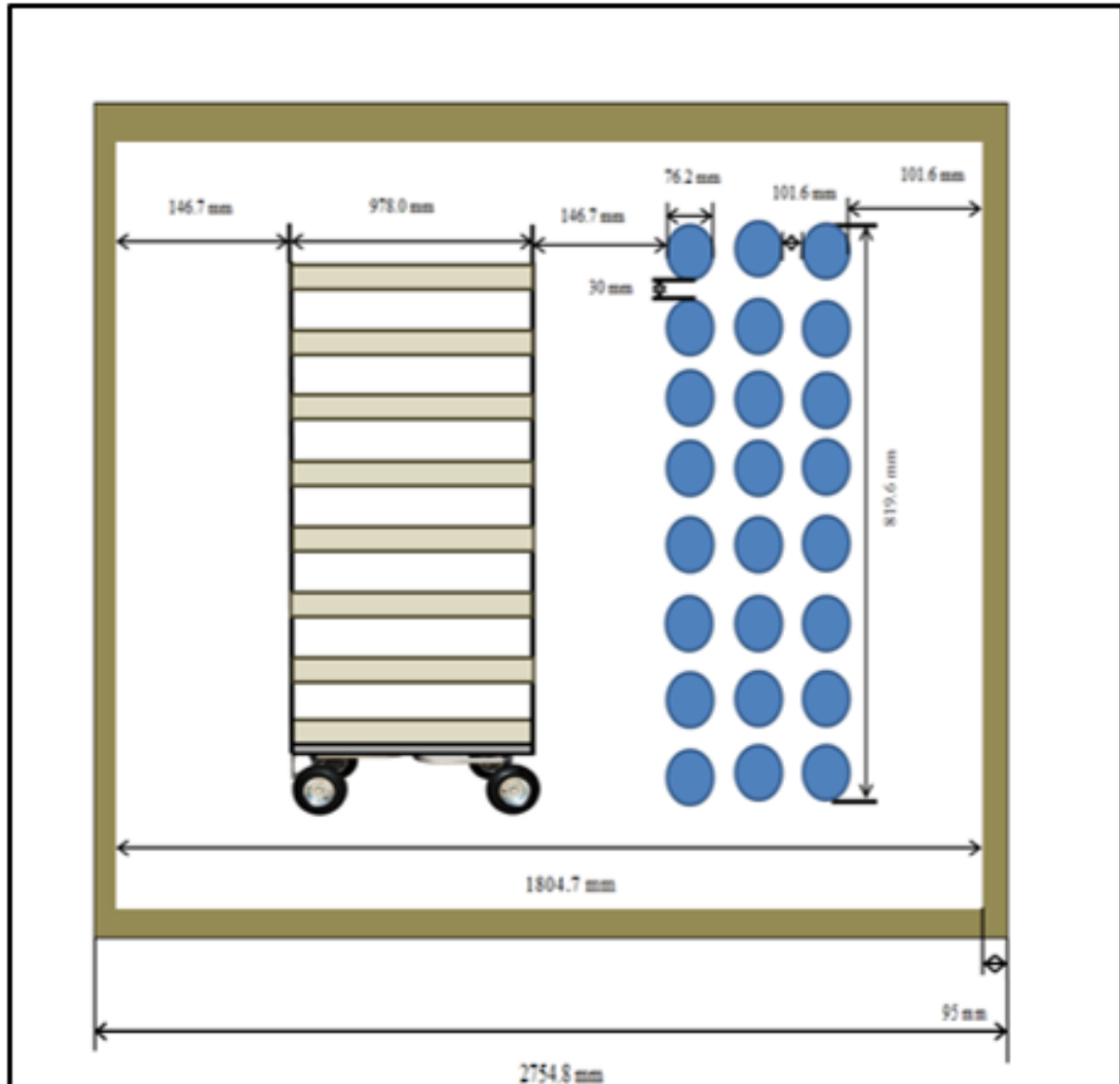
$$L_T = 2754.8mm$$



Nº	Simbología
1	Bandejas para el secado
2	Estructura del secador
3	Entrada del vapor
4	Controles → encendido, apagado tiempo, temperatura, presión, etc.
5	Salida de la humedad de la RSD
6	Bandeja y sus dimensiones

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL**

<b>Diseño:</b> Miguel Jaramillo	<b>ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO DEL SECADOR</b>	<b>Fecha:</b> 20/12/2014
<b>Dibujo:</b> Miguel Jaramillo		<b>Escala:</b> 1: 100
<b>Aprobó:</b> Ing. Juan Crespin		<b>Plano:</b> Nº 1



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL**

**Dibujo:** Miguel Jaramillo

**Diseño:** Miguel Jaramillo

**Aprobó:** Ing. Juan Crespin

VISTA LATERAL  
DE LAS BANDEJAS  
Y EL SECADOR

**Fecha:** 20/12/2014

**Escala:** 1: 100

**Plano:** N° 2

