

**UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN**  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



*Una Institución Adventista*

**Aplicación de la metodología de superficie de respuesta en el  
rendimiento de biocombustible etanol a partir de residuos  
lignocelulósicos de la cáscara de arroz (*Oryza sativa*)**

Por:

Dilma Lucinda Infante Valdivia  
Edison Newton Pampa Ayala

Asesor:

PhD. Noé Benjamín Pampa Quispe

**Lima, octubre de 2019**

**DECLARACIÓN JURADA  
DE AUTORIA DEL INFORME DE TESIS**

*Noé Benjamin Pampa Quispe*, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

**DECLARO:**

Que el presente informe de investigación titulado: ***“APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA EN EL RENDIMIENTO DE BIOCOMBUSTIBLE ETANOL A PARTIR DE RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS DE LA CÁSCARA DE ARROZ (*Oryza sativa*)”*** constituye la memoria que presentan la **Bachiller Dilma Lucinda Infante Valdivia** y el **Bachiller Edison Newton Pampa Ayala** para aspirar al título de **Ingeniero Ambiental** ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente constancia en *Lima*, a los *11 días de enero* del año 2020

  
\_\_\_\_\_  
Noé Benjamin Pampa Quispe

Aplicación de la metodología de superficie de respuesta en el  
rendimiento de biocombustible etanol a partir de residuos  
lignocelulósicos de la cáscara de arroz (*Oryza sativa*)

## TESIS

Presentada para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

### JURADO CALIFICADOR

  
Mg. Iliana Del Carmen Gutierrez Rodriguez  
**Presidenta**

  
Mg. Jackson Edgardo Perez Carpio  
**Secretario**

  
Mg. Joel Hugo Fernandez Rojas  
**Vocal**

  
Ing. Orlando Alán Poma Porras  
**Vocal**

  
Dr. Noé Benjamín Pampa Quispe  
**Asesor**

Lima, 14 de octubre de 2019

## DEDICATORIA

*Con amor y gratitud a mis padres Lucinda Valdivia y Francisco Infante por darme la vida, por el ejemplo de esfuerzo constante y por el amor que siempre he recibido de ellos y de mis hermanas(os).*

*Agradezco en primer lugar a Dios, a mis padres Walter Pampa y María Ayala, por sus sacrificios y esfuerzos, por darme una carrera para mi futuro y apoyarme en cada etapa de mi vida, a mi hermana Andly Pampa a mi hermano Franklin Abarca, a mis abuelitas María Huamán que en paz descanse y Nieves Quispe, a mis abuelitos Faustino Ayala y Florentino Pampa y familia en general.*

*A Andrea Olazabal por apoyarme y darme también aliento, a mis compañeros y amigos presentes y pasados, quienes sin esperar nada a cambio compartieron su conocimiento, alegrías y tristezas y a todas aquellas personas que durante toda mi etapa universitaria estuvieron apoyándome.*

## **AGRADECIMIENTO**

*A Dios por las bendiciones que nos brinda día a día, a nuestros padres y familiares por ser el soporte para que se concluya esta investigación.*

*Al Ph.D. Noé Pampa Quispe por la dirección y asesoría para la realización de este trabajo de investigación.*

*A los Ingenieros Marita Díaz y Miguel Luna porque fueron los pilares de la parte experimental, para el desarrollo del presente estudio de investigación, y por su cordialidad que nos brindaron en el laboratorio, así mismo a todas las personas que contribuyeron para que este trabajo sea concluido.*

## ÍNDICE

RESUMEN.....	XXIII
ABSTRACT .....	XXIV
CAPÍTULO I.....	26
EL PROBLEMA .....	26
1.1. Identificación del problema.....	26
1.2. Justificación de la investigación.....	29
1.3. Preposición filosófica .....	32
1.4. Objetivos.....	33
1.4.1. Objetivo general .....	33
1.4.2. Objetivos específicos.....	33
CAPÍTULO II .....	35
REVISIÓN DE LA LITERATURA .....	35
2.1. Antecedentes de la investigación .....	35
2.1.1. Antecedentes internacionales .....	35
2.1.2. Antecedentes Nacionales.....	38
2.2. Base teórica .....	39
2.2.1. Energía renovable .....	39
2.2.2. Protocolo de Kyoto.....	41
2.2.3. Crisis energética .....	42
2.2.4. Biocombustible bioetanol.....	43
2.2.6 Residuos sólidos .....	49
2.2.7 Arroz.....	52

2.2.8	Cáscara de arroz .....	56
2.2.9	Producción del arroz.....	63
2.2.10	Usos de la cáscara de arroz.....	64
2.2.11	Procesos para la obtención del bioetanol.....	65
2.2.12	Biorreactor .....	71
2.2.13	Metodología de superficie de respuesta .....	73
2.2.14	Diseño de Box-Behnken.....	74
2.3	Aspecto de responsabilidad .....	76
CAPÍTULO III .....		78
MATERIALES Y MÉTODOS .....		78
3.1.	Lugar de ejecución .....	78
3.2.	Materiales y equipos.....	79
3.3.	Diseño experimental para la obtención de bioetanol .....	83
3.3.1.	Diseño del biorreactor .....	84
3.3.2.	Pretratamiento mecánica .....	86
3.3.3.	Hidrólisis ácida.....	88
3.3.4.	Pérdida de biomasa.....	89
3.3.5.	Proceso de fermentación.....	89
3.3.6.	Proceso de destilación .....	90
3.3.7.	Determinación del grado etanólico.....	90
3.3.8.	Determinación del rendimiento etanólico .....	91
3.3.9.	Determinación del rendimiento etanólico/biomasa .....	91
3.4.	Diseño de experimentos de superficie de respuesta .....	91
3.4.1.	Diseño estadístico.....	91
3.4.2.	Análisis estadístico .....	93

3.5. Diseño del trabajo de investigación.....	94
CAPÍTULO IV .....	95
RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	95
4.1. Resultados de las propiedades físicoquímicas de fibras celulósicas .....	95
4.1.1. Cenizas de la cáscara .....	96
4.1.2. Humedad de la cáscara .....	97
4.2. Resultado pérdida en la biomasa .....	98
4.3. Resultado de la variable grado etanólico.....	99
4.4. Resultado de la variable rendimiento etanólico.....	109
4.5. Rendimiento de la variable etanólico/ biomasa.....	119
4.6. Cinética del pH, conductividad eléctrica, temperatura y sólidos solubles .....	129
4.6.1. Cinética del pH en función del tiempo.....	129
4.6.2. Cinética de la conductividad eléctrica en función del tiempo.....	138
4.6.3. Cinética de la temperatura en función del tiempo.....	147
4.6.4. Cinética de los sólidos solubles en función del tiempo.....	155
CAPÍTULO V .....	163
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	163
5.1 Conclusiones.....	163
5.2 Recomendaciones .....	164
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	165
ANEXO .....	182

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Fuentes de energía renovable .....	40
Tabla 2 Composición de la generación de residuos sólidos en diferentes ciudades .....	51
Tabla 3 Producción anual promedio de arroz.....	55
Tabla 4 Contenido de celulosa de diversas materias primas de bioetanol .....	58
Tabla 5 Descripción de las propiedades bioquímicas de la cáscara de arroz en función de la ubicación geográfica .....	62
Tabla 6 Niveles de diseño de Box-Behnken .....	75
Tabla 7 Densidad del agua .....	91
Tabla 8 Diseño de experimentos Box-Behnken de 3 factores, 1 bloque, 15 ejecuciones, +3 puntos centrales por bloque .....	93
Tabla 9 Análisis de cenizas de la cascara de arroz.....	96
Tabla 10 Resultados de humedad de la cascara de arroz .....	97
Tabla 11 Resultado de la pérdida en la biomasa .....	98
Tabla 12 Resultados en la variable dependiente Grado etanólico del diseño de experimentos Box-Behnken.....	99
Tabla 13 Análisis de Variancia (ANOVA) para Grado etanólico.....	101
Tabla 14 Tabla de coeficiente de regresión de la variable grado etanólico .....	103
Tabla 15 Resultados en la variable dependiente de rendimiento etanólico del diseño de experimentos Box-Behnken .....	109
Tabla 16 ANOVA de la variable Rendimiento etanólico .....	111
Tabla 17 Tabla de coeficiente de regresión de la variable rendimiento etanólico .....	113
Tabla 18 Resultado de la variable dependiente rendimiento etanólico/ biomasa del diseño de experimentos Box-Behnken de 3 factores, 1 bloque, 15 ejecuciones, +3 puntos centrales por bloque .....	119
Tabla 19 ANOVA de la variable rendimiento etanólico/ biomasa .....	122
Tabla 20 Tabla de coeficiente de regresión de la variable rendimiento etanólico/ biomasa... ..	124

Tabla 21 Cinética del pH en función del tiempo en los distintos tratamientos.....	130
Tabla 22 Análisis de varianza de la variable pH, tratamiento 1.....	133
Tabla 23 Análisis de varianza de la variable pH, tratamiento 2.....	133
Tabla 24 Análisis de varianza de la variable pH, tratamiento 3.....	134
Tabla 25 Análisis de varianza de la variable pH, tratamiento 4.....	134
Tabla 26 Análisis de varianza de la variable pH, tratamiento 5.....	134
Tabla 27 Análisis de varianza de la variable pH, tratamiento 6.....	135
Tabla 28 Análisis de varianza de la variable pH, tratamiento 7.....	135
Tabla 29 Análisis de varianza de la variable pH, tratamiento 8.....	135
Tabla 30 Análisis de varianza de la variable pH, tratamiento 9.....	136
Tabla 31 Análisis de varianza de la variable pH, tratamiento 10.....	136
Tabla 32 Análisis de varianza de la variable pH, tratamiento 11.....	136
Tabla 33 Análisis de varianza de la variable pH, tratamiento 12.....	137
Tabla 34 Análisis de varianza de la variable pH, tratamiento 13.....	137
Tabla 35 Cinética de la conductividad eléctrica en función del tiempo en los distintos tratamientos .....	139
Tabla 36 Análisis de varianza de la variable conductividad eléctrica, tratamiento 1.....	142
Tabla 37 Análisis de varianza de la variable conductividad eléctrica, tratamiento 2.....	142
Tabla 38 Análisis de varianza de la variable conductividad eléctrica, tratamiento 3.....	142
Tabla 39 Análisis de varianza de la variable conductividad eléctrica, tratamiento 4.....	143
Tabla 40 Análisis de varianza de la variable conductividad eléctrica, tratamiento 5.....	143
Tabla 41 Análisis de varianza de la variable conductividad eléctrica, tratamiento 6.....	143
Tabla 42 Análisis de varianza de la variable conductividad eléctrica, tratamiento 7.....	144
Tabla 43 Análisis de varianza de la variable conductividad eléctrica, tratamiento 8.....	144
Tabla 44 Análisis de varianza de la variable conductividad eléctrica, tratamiento 9.....	144

Tabla 45	Análisis de varianza de la variable conductividad eléctrica, tratamiento 10 .....	145
Tabla 46	Análisis de varianza de la variable conductividad eléctrica, tratamiento 11 .....	145
Tabla 47	Análisis de varianza de la variable conductividad eléctrica, tratamiento 12 .....	145
Tabla 48	Análisis de varianza de la variable conductividad eléctrica, tratamiento 13 .....	146
Tabla 49	Cinética de la temperatura en función del tiempo en los distintos tratamientos .....	147
Tabla 50	Análisis de varianza de la variable temperatura, tratamiento 1 .....	150
Tabla 51	Análisis de varianza de la variable temperatura, tratamiento 2 .....	150
Tabla 52	Análisis de varianza de la variable temperatura, tratamiento 3 .....	150
Tabla 53	Análisis de varianza de la variable temperatura, tratamiento 4 .....	151
Tabla 54	Análisis de varianza de la variable temperatura, tratamiento 5 .....	151
Tabla 55	Análisis de varianza de la variable temperatura, tratamiento 6 .....	151
Tabla 56	Análisis de varianza de la variable temperatura, tratamiento 7 .....	152
Tabla 57	Análisis de varianza de la variable temperatura, tratamiento 8 .....	152
Tabla 58	Análisis de varianza de la variable temperatura, tratamiento 9 .....	152
Tabla 59	Análisis de varianza de la variable temperatura, tratamiento 10 .....	153
Tabla 60	Análisis de varianza de la variable temperatura, tratamiento 11 .....	153
Tabla 61	Análisis de varianza de la variable temperatura, tratamiento 12 .....	153
Tabla 62	Análisis de varianza de la variable temperatura, tratamiento 13 .....	154
Tabla 63	Cinética de los sólidos solubles en función del tiempo en los distintos tratamientos..	155
Tabla 64	Análisis de varianza de la variable sólidos solubles, tratamiento 1 .....	158
Tabla 65	Análisis de varianza de la variable sólidos solubles, tratamiento 2 .....	158
Tabla 66	Análisis de varianza de la variable sólidos solubles, tratamiento 3 .....	158
Tabla 67	Análisis de varianza de la variable sólidos solubles, tratamiento 4 .....	159
Tabla 68	Análisis de varianza de la variable sólidos solubles, tratamiento 5 .....	159
Tabla 69	Análisis de varianza de la variable sólidos solubles, tratamiento 6 .....	159

Tabla 70 Análisis de varianza de la variable sólidos solubles, tratamiento 7 .....	160
Tabla 71 Análisis de varianza de la variable sólidos solubles, tratamiento 8 .....	160
Tabla 72 Análisis de varianza de la variable sólidos solubles, tratamiento 9 .....	160
Tabla 73 Análisis de varianza de la variable sólidos solubles, tratamiento 10 .....	161
Tabla 74 Análisis de varianza de la variable sólidos solubles, tratamiento 11 .....	161
Tabla 75 Análisis de varianza de la variable sólidos solubles, tratamiento 12 .....	161
Tabla 76 Análisis de varianza de la variable sólidos solubles, tratamiento 13 .....	162
Tabla 77 Resumen estadístico del pH, tratamiento 1 .....	182
Tabla 78 Resumen de regresión del pH para la variable dependiente, tratamiento 1 .....	182
Tabla 79 Resumen estadístico de la C.E, tratamiento 1 .....	183
Tabla 80 Resumen de regresión de la C.E para la variable dependiente, tratamiento 1 .....	183
Tabla 81 Resumen estadístico de la Temperatura, tratamiento 1 .....	184
Tabla 82 Resumen de regresión de la Temperatura para la variable dependiente, tratamiento 1	184
Tabla 83 Resumen estadístico de SS.SS, tratamiento 1 .....	185
Tabla 84 Resumen de regresión de SS.SS para la variable dependiente, tratamiento 1 .....	185
Tabla 85 Resumen estadístico del pH, tratamiento 2 .....	186
Tabla 86 Resumen de regresión del pH para la variable dependiente, tratamiento 2 .....	186
Tabla 87 Resumen estadístico de la C.E., tratamiento 2 .....	187
Tabla 88 Resumen de regresión de la C.E. para la variable dependiente, tratamiento 2 .....	187
Tabla 89 Resumen estadístico de la Temperatura, tratamiento 2.....	188
Tabla 90 Resumen de regresión de la Temperatura para la variable dependiente, tratamiento 2	188
Tabla 91 Resumen estadístico de SS.SS, tratamiento 2 .....	189
Tabla 92 Resumen de regresión de SS.SS para la variable dependiente, tratamiento 2 .....	189
Tabla 93 Resumen estadístico del pH, tratamiento 3 .....	190
Tabla 94 Resumen de regresión del Ph para la variable dependiente, tratamiento 3 .....	190

Tabla 95 Resumen estadístico de la C.E., tratamiento 3 .....	191
Tabla 96 Resumen de regresión de la C.E. para la variable dependiente, tratamiento 3 .....	191
Tabla 97 Resumen estadístico de la Temperatura, tratamiento 3.....	192
Tabla 98 Resumen de regresión de la Temperatura para la variable dependiente, tratamiento 3	192
Tabla 99 Resumen estadístico de SS.SS, tratamiento 3 .....	193
Tabla 100 Resumen de regresión de SS.SS para la variable dependiente, tratamiento 3 .....	193
Tabla 101 Resumen estadístico del pH, tratamiento 4 .....	194
Tabla 102 Resumen de regresión del pH para la variable dependiente, tratamiento 4 .....	194
Tabla 103 Resumen estadístico del C.E., tratamiento 4.....	195
Tabla 104 Resumen de regresión de la C.E. para la variable dependiente, tratamiento 4 .....	195
Tabla 105 Resumen estadístico de la Temperatura, tratamiento 4.....	196
Tabla 106 Resumen de regresión de la Temperatura para la variable dependiente, tratamiento 4 .....	196
Tabla 107 Resumen estadístico de SS.SS, tratamiento 4 .....	197
Tabla 108 Resumen de regresión de SS.SS para la variable dependiente, tratamiento 4 .....	197
Tabla 109 Resumen estadístico del pH, tratamiento 5 .....	198
Tabla 110 Resumen de regresión del pH para la variable dependiente, tratamiento 5 .....	198
Tabla 111 Resumen estadístico de la C.E., tratamiento 5 .....	199
Tabla 112 Resumen de regresión de la C.E. para la variable dependiente, tratamiento 5 .....	199
Tabla 113 Resumen estadístico de la Temperatura, tratamiento 5.....	200
Tabla 114 Resumen de regresión de la Temperatura para la variable dependiente, tratamiento 5 .....	200
Tabla 115 Resumen estadístico de SS.SS, tratamiento 5 .....	201
Tabla 116 Resumen de regresión de SS.SS para la variable dependiente, tratamiento 5 .....	201
Tabla 117 Resumen estadístico del pH, tratamiento 6 .....	202
Tabla 118 Resumen de regresión del pH para la variable dependiente, tratamiento 6 .....	202

Tabla 119 Resumen estadístico de la C.E., tratamiento 6 .....	203
Tabla 120 Resumen de regresión de la C.E. para la variable dependiente, tratamiento 6 .....	203
Tabla 121 Resumen estadístico de la Temperatura., tratamiento 6.....	204
Tabla 122 Resumen de regresión de la Temperatura. para la variable dependiente, tratamiento 6 .....	204
Tabla 123 Resumen estadístico de SS.SS., tratamiento 6 .....	205
Tabla 124 Resumen de regresión de SS. SS para la variable dependiente, tratamiento 6 .....	205
Tabla 125 Resumen estadístico de pH, tratamiento 7 .....	206
Tabla 126 Resumen de regresión del pH para la variable dependiente, tratamiento 7 .....	206
Tabla 127 Resumen estadístico de la C.E., tratamiento 7 .....	207
Tabla 128 Resumen de regresión de la C.E. para la variable dependiente, tratamiento 7 .....	207
Tabla 129 Resumen estadístico de la Temperatura., tratamiento 7.....	208
Tabla 130 Resumen de regresión de la Temperatura para la variable dependiente, tratamiento 7 .....	208
Tabla 131 Resumen estadístico de SS.SS, tratamiento 7 .....	209
Tabla 132 Resumen de regresión de SS.SS para la variable dependiente, tratamiento 7 .....	209
Tabla 133 Resumen estadístico del pH, tratamiento 8 .....	210
Tabla 134 Resumen de regresión del pH para la variable dependiente, tratamiento 8 .....	210
Tabla 135 Resumen estadístico de la C.E., tratamiento 8 .....	211
Tabla 136 Resumen de regresión de la C.E para la variable dependiente, tratamiento 8 .....	211
Tabla 137 Resumen estadístico de la Temperatura, tratamiento 8.....	212
Tabla 138 Resumen de regresión de la Temperatura para la variable dependiente, tratamiento 8 .....	212
Tabla 139 Resumen estadístico de SS.SS, tratamiento 8 .....	213
Tabla 140 Resumen de regresión de SS.SS para la variable dependiente, tratamiento 8 .....	213
Tabla 141 Resumen estadístico del pH, tratamiento 9 .....	214

Tabla 142 Resumen de regresión del pH para la variable dependiente, tratamiento 9 .....	214
Tabla 143 Resumen estadístico de la C.E., tratamiento 9 .....	215
Tabla 144 Resumen de regresión de la C.E. para la variable dependiente, tratamiento 9 .....	215
Tabla 145 Resumen estadístico de la Temperatura., tratamiento 9.....	216
Tabla 146 Resumen de regresión de la Temperatura para la variable dependiente, tratamiento 9 .....	216
Tabla 147 Resumen estadístico de SS.SS, tratamiento 9 .....	217
Tabla 148 Resumen de regresión de SS.SS para la variable dependiente, tratamiento 9 .....	217
Tabla 149 Resumen estadístico del pH, tratamiento 10.....	218
Tabla 150 Resumen de regresión del pH para la variable dependiente, tratamiento 10 .....	218
Tabla 151 Resumen estadístico de la C.E., tratamiento 10.....	219
Tabla 152 Resumen de regresión de la C.E. para la variable dependiente, tratamiento 10 .....	219
Tabla 153 Resumen estadístico de la Temperatura, tratamiento 10.....	220
Tabla 154 Resumen de regresión de la Temperatura para la variable dependiente, tratamiento 10 .....	220
Tabla 155 Resumen estadístico de SS.SS, tratamiento 10 .....	221
Tabla 156 Resumen de regresión de SS.SS para la variable dependiente, tratamiento 10 .....	221
Tabla 157 Resumen estadístico del pH, tratamiento 11 .....	222
Tabla 158 Resumen de regresión del pH para la variable dependiente, tratamiento 11 .....	222
Tabla 159 Resumen estadístico de la C.E., tratamiento 11 .....	223
Tabla 160 Resumen de regresión de la C.E. para la variable dependiente, tratamiento 11 .....	223
Tabla 161 Resumen estadístico de la Temperatura., tratamiento 11.....	224
Tabla 162 Resumen de regresión de la Temperatura para la variable dependiente, tratamiento 11 .....	224
Tabla 163 Resumen estadístico de SS.SS, tratamiento 11 .....	225
Tabla 164 Resumen de regresión de SS. SS, para la variable dependiente, tratamiento 11 .....	225

Tabla 165 Resumen estadístico del pH, tratamiento 12 .....	226
Tabla 166 Resumen de regresión del pH para la variable dependiente, tratamiento 12 .....	226
Tabla 167 Resumen estadístico de la C.E., tratamiento 12 .....	227
Tabla 168 Resumen de regresión de la C.E. para la variable dependiente, tratamiento 12 .....	227
Tabla 169 Resumen estadístico de la Temperatura, tratamiento 12.....	228
Tabla 170 Resumen de regresión de la Temperatura para la variable dependiente, tratamiento 12 .....	228
Tabla 171 Resumen estadístico de SS. SS, tratamiento 12 .....	229
Tabla 172 Resumen de regresión de SS.SS para la variable dependiente, tratamiento 12 .....	229
Tabla 173 Resumen estadístico del pH, tratamiento 13 .....	230
Tabla 174 Resumen de regresión del pH para la variable dependiente, tratamiento 13 .....	230
Tabla 175 Resumen estadístico de la C.E., tratamiento 13 .....	231
Tabla 176 Resumen de regresión de la C.E. para la variable dependiente, tratamiento 13 .....	231
Tabla 177 Resumen estadístico de la Temperatura, tratamiento 13.....	232
Tabla 178 Resumen de regresión de la Temperatura para la variable dependiente, tratamiento 13 .....	232
Tabla 179 Resumen estadístico de SS.SS, tratamiento 13 .....	233
Tabla 180 Resumen de regresión de SS.SS para la variable dependiente, tratamiento 13 .....	233
Tabla 181 Resumen de resultado de las variables dependientes del diseño de experimentos Box-Behnken de 3 factores, 1 bloque, 15 ejecuciones, +3 puntos centrales por bloque .....	234

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Comparativo de áreas sembradas de arroz en las diferentes regiones (Velázquez, 2014).</i>	54
<i>Figura 2. Estructura química de la celulosa (Rodríguez, 2012).</i>	57
<i>Figura 3. Estructura química de la hemicelulosa (Rodríguez, 2012).</i>	59
<i>Figura 4. Estructura química de la lignina (Rodríguez, 2012).</i>	60
<i>Figura 5. Proceso bioquímico de fermentación alcohólica (Villadsen, Nielsen y Lidén 2011).</i>	69
<i>Figura 6. Representación gráfica de Box-Behnken</i>	74
<i>Figura 7. Mapa del distrito de Tambopata</i>	78
<i>Figura 8. Flujograma para el rendimiento de biocombustible etanol a partir de residuos lignocelulósicos de la cáscara de arroz (Oryza sativa)</i>	83
<i>Figura 9. Diseño del biorreactor</i>	85
<i>Figura 10. Esquema del diseño del trabajo de investigación</i>	94
<i>Figura 11. Diagrama de Pareto para grado etanólico</i>	102
<i>Figura 12. Superficie de respuesta, variable Grado etanólico, variables independientes Ácido sulfúrico (%) vs Saccharomyces cerevisiae (g/100ml)</i>	105
<i>Figura 13. Superficie de respuesta, variable Grado etanólico, variables independientes Ácido sulfúrico (%) vs Saccharomyces cerevisiae (g/100ml)</i>	105
<i>Figura 14. Superficie de respuesta, variable Grado etanólico, variables independientes Fibra celulósica (g/100mL) vs Saccharomyces cerevisiae (g/100ml)</i>	106
<i>Figura 15. Superficie de respuesta, variable Grado etanólico, variables independientes Fibra celulósica (g/100mL) vs Saccharomyces cerevisiae (g/100ml)</i>	106
<i>Figura 16. Superficie de respuesta, variable Grado etanólico, variables independientes Fibra celulósica (g/100mL) vs Ácido sulfúrico (%)</i>	107
<i>Figura 17. Superficie de respuesta, variable Grado etanólico, variables independientes Fibra celulósica (g/100mL) vs Ácido sulfúrico (%)</i>	107
<i>Figura 18. Diagrama de Pareto para variable Rendimiento etanólico</i>	112

<i>Figura 19.</i> Superficie de respuesta, variable Rendimiento etanólico, variables independientes Ácido sulfúrico (%) vs Saccharomyces cerevisiae (g/100ml) .....	115
<i>Figura 20.</i> Superficie de respuesta, variable Rendimiento etanólico, variables independientes Ácido sulfúrico (%) vs Saccharomyces cerevisiae (g/100ml) .....	115
<i>Figura 21.</i> Superficie de respuesta, variable Rendimiento etanólico, variables independientes Fibra celulósica (g/100mL) vs Saccharomyces cerevisiae (g/100ml) .....	116
<i>Figura 22.</i> Superficie de respuesta, variable Rendimiento etanólico, variables independientes Fibra celulósica (g/100mL) vs Saccharomyces cerevisiae (g/100ml) .....	116
<i>Figura 23.</i> Superficie de respuesta, variable Rendimiento etanólico, variables independientes Fibra celulósica (g/100mL) vs Ácido sulfúrico (%) .....	117
<i>Figura 24.</i> Superficie de respuesta, variable Rendimiento etanólico, variables independientes Fibra celulósica (g/100mL) vs Ácido sulfúrico (%) .....	117
<i>Figura 25.</i> Diagrama de Pareto para variable rendimiento etanólico/ biomasa.....	123
<i>Figura 26.</i> Superficie de respuesta, variable Rendimiento etanólico/biomasa, variables independientes Ácido sulfúrico (%) vs Saccharomyces cerevisiae (g/100ml) .....	126
<i>Figura 27.</i> Superficie de respuesta, variable Rendimiento etanólico/biomasa, variables independientes Ácido sulfúrico (%) vs Saccharomyces cerevisiae (g/100ml) .....	126
<i>Figura 28.</i> Superficie de respuesta, variable Rendimiento etanólico/biomasa, variables independientes Fibra celulósica (g/100mL) vs Saccharomyces cerevisiae (g/100mL) .....	127
<i>Figura 29.</i> Superficie de respuesta, variable Rendimiento etanólico/biomasa, variables independientes Fibra celulósica (g/100mL) vs Saccharomyces cerevisiae (g/100mL) .....	127
<i>Figura 30.</i> Superficie de respuesta, variable Rendimiento etanólico/biomasa, variables independientes Ácido sulfúrico (%) vs Fibra celulósica (g/100mL).....	128
<i>Figura 31.</i> Superficie de respuesta, variable Rendimiento etanólico/biomasa, variables independientes Ácido sulfúrico (%) vs Fibra celulósica (g/100mL).....	128
<i>Figura 32.</i> Cinética del pH de todos los tratamientos en función del tiempo .....	131
<i>Figura 33.</i> Cinética de la conductividad eléctrica de todos los tratamientos en función del tiempo .....	140
<i>Figura 34.</i> Cinética de la temperatura de todos los tratamientos en función del tiempo .....	148
<i>Figura 35.</i> Cinética de la temperatura de todos los tratamientos en función del tiempo .....	156
<i>Figura 36.</i> Cinética del pH en función del tiempo, tratamiento 1 .....	235

<i>Figura 37.</i> Cinética del pH en función del tiempo, tratamiento 2 .....	236
<i>Figura 38.</i> Cinética del pH en función del tiempo, tratamiento 3 .....	236
<i>Figura 39.</i> Cinética del pH en función del tiempo, tratamiento 4 .....	237
<i>Figura 40.</i> Cinética del pH en función del tiempo, tratamiento 5 .....	237
<i>Figura 41.</i> Cinética del pH en función del tiempo, tratamiento 6 .....	238
<i>Figura 42.</i> Cinética del pH en función del tiempo, tratamiento 7 .....	238
<i>Figura 43.</i> Cinética del pH en función del tiempo, tratamiento 8 .....	239
<i>Figura 44.</i> Cinética del pH en función del tiempo, tratamiento 9 .....	239
<i>Figura 45.</i> Cinética del pH en función del tiempo, tratamiento 10 .....	240
<i>Figura 46.</i> Cinética del pH en función del tiempo, tratamiento 11 .....	240
<i>Figura 47.</i> Cinética del pH en función del tiempo, tratamiento 12 .....	241
<i>Figura 48.</i> Cinética del pH en función del tiempo, tratamiento 13 .....	241
<i>Figura 49.</i> Cinética de la conductividad eléctrica en función del tiempo, tratamiento 1 .....	242
<i>Figura 50.</i> Cinética de la conductividad eléctrica en función del tiempo, tratamiento 2 .....	242
<i>Figura 51.</i> Cinética de la conductividad eléctrica en función del tiempo, tratamiento 3 .....	243
<i>Figura 52.</i> Cinética de la conductividad eléctrica en función del tiempo, tratamiento 4 .....	243
<i>Figura 53.</i> Cinética de la conductividad eléctrica en función del tiempo, tratamiento 5 .....	244
<i>Figura 54.</i> Cinética de la conductividad eléctrica en función del tiempo, tratamiento 6 .....	244
<i>Figura 55.</i> Cinética de la conductividad eléctrica en función del tiempo, tratamiento 7 .....	245
<i>Figura 56.</i> Cinética de la conductividad eléctrica en función del tiempo, tratamiento 8 .....	245
<i>Figura 57.</i> Cinética de la conductividad eléctrica en función del tiempo, tratamiento 9 .....	246
<i>Figura 58.</i> Cinética de la conductividad eléctrica en función del tiempo, tratamiento 10 .....	246
<i>Figura 59.</i> Cinética de la conductividad eléctrica en función del tiempo, tratamiento 11 .....	247
<i>Figura 60.</i> Cinética de la conductividad eléctrica en función del tiempo, tratamiento 12 .....	247
<i>Figura 61.</i> Cinética de la conductividad eléctrica en función del tiempo, tratamiento 13 .....	248

<i>Figura 62.</i> Cinética de la temperatura en función del tiempo, tratamiento 1 .....	249
<i>Figura 63.</i> Cinética de la temperatura en función del tiempo, tratamiento 2 .....	249
<i>Figura 64.</i> Cinética de la temperatura en función del tiempo, tratamiento 3 .....	250
<i>Figura 65.</i> Cinética de la temperatura en función del tiempo, tratamiento 4 .....	250
<i>Figura 66.</i> Cinética de la temperatura en función del tiempo, tratamiento 5 .....	251
<i>Figura 67.</i> Cinética de la temperatura en función del tiempo, tratamiento 6 .....	251
<i>Figura 68.</i> Cinética de la temperatura en función del tiempo, tratamiento 7 .....	252
<i>Figura 69.</i> Cinética de la temperatura en función del tiempo, tratamiento 8 .....	252
<i>Figura 70.</i> Cinética de la temperatura en función del tiempo, tratamiento 9 .....	253
<i>Figura 71.</i> Cinética de la temperatura en función del tiempo, tratamiento 10 .....	253
<i>Figura 72.</i> Cinética de la temperatura en función del tiempo, tratamiento 11 .....	254
<i>Figura 73.</i> Cinética de la temperatura en función del tiempo, tratamiento 12 .....	254
<i>Figura 74.</i> Cinética de la temperatura en función del tiempo, tratamiento 13 .....	255
<i>Figura 75.</i> Cinética de los sólidos solubles en función del tiempo, tratamiento 1 .....	256
<i>Figura 76.</i> Cinética de los sólidos solubles en función del tiempo, tratamiento 2 .....	256
<i>Figura 77.</i> Cinética de los sólidos solubles en función del tiempo, tratamiento 3 .....	257
<i>Figura 78.</i> Cinética de los sólidos solubles en función del tiempo, tratamiento 4 .....	257
<i>Figura 79.</i> Cinética de los sólidos solubles en función del tiempo, tratamiento 5 .....	258
<i>Figura 80.</i> Cinética de los sólidos solubles en función del tiempo, tratamiento 6 .....	258
<i>Figura 81.</i> Cinética de los sólidos solubles en función del tiempo, tratamiento 7 .....	259
<i>Figura 82.</i> Cinética de los sólidos solubles en función del tiempo, tratamiento 8 .....	259
<i>Figura 83.</i> Cinética de los sólidos solubles en función del tiempo, tratamiento 9 .....	260
<i>Figura 84.</i> Cinética de los sólidos solubles en función del tiempo, tratamiento 10 .....	260
<i>Figura 85.</i> Cinética de los sólidos solubles en función del tiempo, tratamiento 11 .....	261
<i>Figura 86.</i> Cinética de los sólidos solubles en función del tiempo, tratamiento 12 .....	261

<i>Figura 87. Cinética de los sólidos solubles en función del tiempo, tratamiento 13 .....</i>	<i>262</i>
<i>Figura 88. Biorreactor anaerobio para la fermentación .....</i>	<i>263</i>
<i>Figura 89. Molienda con molino manual.....</i>	<i>264</i>
<i>Figura 90. Molienda con molino tipo Wylle .....</i>	<i>264</i>
<i>Figura 91. Determinación de cenizas por método de calcinación .....</i>	<i>265</i>
<i>Figura 92. Determinación de cenizas por método AOAC,2000.....</i>	<i>265</i>
<i>Figura 93. Pretratamiento químico-álcalis diluido .....</i>	<i>266</i>
<i>Figura 94. Ebullición en el pretratamiento químico-álcalis diluido .....</i>	<i>266</i>
<i>Figura 95. Lavado de biomasa deslignificada con agua destilada hasta tener un pH neutro .....</i>	<i>267</i>
<i>Figura 96. Hidrólisis ácida.....</i>	<i>267</i>
<i>Figura 97. Lavado de biomasa celulósica .....</i>	<i>268</i>
<i>Figura 98. Secado de biomasa celulósica en estufa por 24 horas a 80 °C.....</i>	<i>268</i>
<i>Figura 99. Proceso de fermentación .....</i>	<i>269</i>
<i>Figura 100. Proceso de destilación.....</i>	<i>269</i>
<i>Figura 101. Medición del grado etanólico .....</i>	<i>270</i>

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. ANNOVA de cada parámetro por tratamientos .....	182
Anexo 2. Resumen de las variables independientes y dependientes de la metodología de superficie de respuesta en el biocombustible etanol .....	234
Anexo 3. Gráficos de cinéticas de parámetros durante el proceso fermentativo .....	235
Anexo 3. Galería de figuras del proceso de obtención de bioetanol .....	263

## RESUMEN

Debido al aumento de la población a nivel mundial y en consecuencia, genera mayor la demanda de energía fósil, tasa de concentración de residuos sólidos que generan efectos perjudiciales al medio ambiente y la salud, es un hecho la dependencia mundial del combustible fósil está causando efectos desfavorables, como la disminución de la reserva de petróleo crudo, la disminución de la calidad del aire, el aumento de la temperatura global, el cambio climático impredecible, etc, en la actualidad es necesaria la busca de nuevas fuentes de energías renovables, como de los residuos lignocelulósicos o también denominado de segunda generación. Debido a ello el objetivo de la presente investigación fue evaluar los parámetros en la obtención del bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos de la cáscara de arroz empleando diseño de experimentos de superficie de respuesta de Box-Behnken. La producción de bioetanol de segunda generación de la cascarilla de arroz (*Oryza sativa*), se realizó los siguientes procedimientos tecnológicos: pretratamiento, hidrólisis ácida, fermentación y destilación; los resultados de los parámetros optimizados fue de 0.2 g/100mL de *Saccharomyces cerevisiae*, 5.5 % para la variable ácido sulfúrico y 3.5 g/100mL de fibra celulósica, que se obtuvieron 41.2 %, 22.7 g/L y 10.5 mg/g de grado etanólico, rendimiento etanólico y rendimiento etanólico/ biomasa, respectivamente.

**Palabras clave:** Residuo lignocelulósico, celulosa, lignina, hemicelulosa, deslignificación, Bioetanol

## ABSTRACT

Due to the increase of the population worldwide and consequently, it generates greater demand for fossil energy, a concentration rate of hazardous waste that affects the harmful effects on the environment and health, it is a fact that the world dependence on fossil fuel is affecting unfavorable effects, such as the decrease in the reserve of crude oil, the decrease in air quality, the increase in global temperature, unpredictable climate change, etc., so that it is currently necessary to find new sources of renewable energy . Due to this, the objective of the present investigation was to evaluate the parameters in obtaining bioethanol from lignocellulosic residues of the rice husk using the design of Box-Behnken response surface experiments. The production of second generation bioethanol from rice husk (*Oryza sativa*), the following technological procedures were performed: pretreatment, acid hydrolysis, fermentation and distillation; The results of the optimized parameters were 0.2 g / 100mL of *Saccharomyces cerevisiae*, 5.5% for the variable sulfuric acid and 3.5 g / 100mL of cellulosic fiber, which obtained 41.2%, 22.7 g / L and 10.5 mg / g of ethanolic grade, ethanolic yield and ethanolic / biomass yield, respectively.

**Keywords:** Lignocellulosic residue, cellulose, lignin, hemicellulose, delignification, bioethanol

# CAPÍTULO I

## EL PROBLEMA

### 1.1. Identificación del problema

Hace una década, la temperatura media global ha aumentado en 0,7 °C (Molion, 2008), se estima para fin del siglo XXI el aumento de la temperatura por encima de 5 °C, desencadenando escenarios extremos y alarmantes cambios climáticos como: la reducción de las masas de hielo y nieve, aumento del nivel del mar, olas de calor, sequías, etc (Vargas, 2009). Este aumento está siendo atribuido a la intensificación del efecto invernadero por las propiedades antrópicas, como quema de combustibles fósiles y bosques tropicales, que emiten monóxido, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>, CO) y gases de efecto invernadero (GEI), los cuales asciende su concentración de 280 ppmv a 380 ppmv en el mismo período (Molion, 2008). El Perú se encuentra entre los diez países más vulnerables ante los cambios climáticos ( Brooks y Adger, 2003).

Las controversias sobre las posibles causas y efectos del calentamiento global todavía son poco divulgadas, sin embargo, no pueden ser ignoradas. Las medidas de previsión para el calentamiento global, así como sus causas y consecuencias, implican cuestiones complejas sobre las que la propia comunidad científica aún no ha llegado a un consenso. Este fenómeno climático es provocado por factores internos (composición físico-química atmosférica, el tectonismo, la actividad solar y el vulcanismo) y externos (emisión de gases de efecto invernaderos por combustión de combustibles fósiles, principalmente carbón y derivados del petróleo, parque automotor, quemaduras de las industrias, refinerías, etc.) (Silva y Paula, 2009).

Dando un enfoque centrado en la sociedad y los combustibles fósiles, con el aumento global de la población, la demanda de energía producida por los combustibles, se transforma en un problema mundial (Kang, Appels, Tan y Dewil, 2014). Al transcurrir el tiempo y con el avance de la tecnología, los científicos descubrieron que el uso de combustibles fósiles (carbón mineral; después, el petróleo) puede aumentar las preocupaciones ambientales, por ejemplo, son los impactos de contaminación atmosférica, que alcanzó proporciones mundiales, además son severamente notados en las comunidades y en el ambiente, a quienes afecta negativamente de manera constante por los altos niveles de contaminación del aire (Instituto Unibanco, 2003).

El sector del transporte, inevitablemente, contribuye más al aumento del consumo de petróleo, que está íntimamente ligada a impactos ambientales nocivos. El consumo de combustibles fósiles por sector del transporte representa el 60% a nivel mundial, en consecuencia contribuye a la generación masiva contaminación al medio ambiente (International Energy Agency [IEA], 2008).

Por otra parte, el sector de transporte global contribuye el 19 % de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), es decir alrededor de 8 kg  $\text{CO}_2$ /gasolina galón, y más de 70 % de monóxido de carbono (CO) (Goldemberg, 2007 y Balat et al., 2009).

Teixeira, Feltes y Santana (2008) afirman que los vehículos automotores causan emisiones con gran variedad de sustancias tóxicas, las cuales suman a la problemática ambiental del calentamiento global. El aumento exponencial de la flota de vehículos, nace como consecuencia del crecimiento de la población, la inadecuación de los sistemas viales para atender las demandas de tránsito y transporte y la ineficiencia de los transportes colectivos vienen causando un proceso de saturación de las vías de tráfico de los centros urbanos de forma continua.

El incremento de la emisión de gases contaminantes causados por el mantenimiento inadecuado de los motores, el deterioro y la adulteración de los sistemas de fuga de los vehículos, en estas vías se ve agravado por la disminución de la velocidad media de los vehículos, ocasionando a menudo niveles de contaminación superiores a los estándares de calidad ambiental (Dutra, Valle, Gomes y Fiorante, 2017). Visto todo ello se afirma que los vehículos son los principales contribuyentes a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), especialmente CO<sub>2</sub>. En 2010, las emisiones mundiales procedentes de la circulación de vehículos representaron el 16,4 % de las emisiones totales de CO<sub>2</sub>. Varios países hicieron esfuerzos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y ozono (O<sub>3</sub>), que se han considerado una de las principales causas del calentamiento global y el cambio climático (Seo y Seong, 2013).

Aunado a la problemática que se desarrolla por los combustibles fósiles se tiene la generación de residuos, desde que comenzó a existir el hombre, se genera residuos provenientes de las actividades que realiza, sin embargo, al transcurrir el tiempo estas actividades se incrementaron por el hecho de estar en constante cambio (De Gante, 2013), en la actualidad debido al consumismo, al crecimiento poblacional, la urbanización acelerada y el desarrollo económico que se tiene, la generación de los residuos sólidos se ha convertido en problema que al mismo tiempo es uno de los temas más prominentes que afronta el planeta, el cual se ve más en las capitales y ciudades debido a la mayor densidad poblacional, que en las franjas rurales. Se debe agregar que para el año 2025 se predice un incremento del 70 % en los montos de residuos urbanos (Banco Mundial 2013).

Calculando el promedio mundial de generación de residuos sólidos por cada persona, supera el kilogramo diario (Muñoz y Bedoya, n.d.), esta cifra de los datos son preocupantes ya que la población mundial asciende los 7 391 463 745 habitantes (United States Census Bureau, 2017).

Por otro lado, la disposición final de los residuos se da muchas veces en lo que se conoce comúnmente como tiraderos a cielo abierto. Estos sitios son lugares improvisados en donde se depositan y acumulan los residuos sólidos sin ningún control técnico, sanitario y operativo (Sedesol, 1996). Donde se producen lixiviados a causa de la descomposición que se da por la mezcla entre los residuos orgánicos y los demás como el papel, cartón, plásticos, etc., trayendo así trascendentales problemas ambientales (De Barros, 2008).

En el Perú la cantidad de residuos sólidos domiciliarios generados anualmente es de 4, 96 toneladas (t) (Ministerio del Ambiente, 2014). Con una población de 31 millones de habitantes (United States Census Bureau, 2016). Siendo los habitantes de la costa los que producen mayor cantidad de residuos. Situándose solo en Lima, la capital, se genera un promedio de 2, 074 toneladas de residuos al año, dando así 5 684 t/día de residuos. Cada persona en promedio genera 0.61 kilos al día, el cual es un crecimiento significativo de los residuos sólidos (Ministerio del Ambiente, 2014).

Asimismo, el componente con mayor predominancia de los residuos sólidos son los residuos orgánicos con el 50, 43% de total, así mismo el 23, 7 % son residuos de los cuales se conocen su aprovechamiento como es el reciclaje para el plástico, cartón, papel, metales y vidrio. Los residuos orgánicos son aprovechables de igual modo pero existe pobreza en los conocimientos sobre estos métodos (Ministerio del Ambiente, 2014).

## **1.2. Justificación de la investigación**

En los últimos años a nivel mundial se enfrenta el agotamiento progresiva de recursos energéticos, fundamentalmente en combustibles no renovables, debido a ello la biotecnología ofrece múltiples alternativas tecnológicas como, la producción de los llamados biocombustibles

líquidos como: el bioetanol, utilizando la materia prima de los convencionales cultivos agrícolas (primera generación), cultivos lignocelulósicos y residuos agrícolas no utilizados (segunda generación) o microscópicos organismos (tercera generación) (Mastny, 2007).

A medida que la demanda de energía renovable aumenta exponencialmente, la viabilidad de la materia prima de primera generación es tentativa y limitada por la competencia directa de los biocombustibles con los alimentos del ser humano y la alimentación animal, por lo tanto, no es prioridad para producción de biocombustible. Sin embargo, las materias primas de segunda generación no son comestibles y comprenden materias primas derivadas de la biomasa lignocelulósica y residuos de residuos agrícolas de varios procesos agrícolas y forestales (Margeot, Hahn-Hagerdal, Edlund, Slade y Monot, 2009; Nigam y Singh, 2011). Estas materias primas son mucho más ideales para la producción de combustible ya que su utilización no afectará a la industria alimentaria. Finalmente, si los residuos agrícolas y forestales acumulados se procesan de forma eficiente para la producción de biocombustible, en dónde reducirá en gran medida los problemas ambientales que se vive en estos últimos años (Margeot et al., 2009; Balat, 2011).

La producción de bioetanol como combustible a partir de residuos lignocelulósicos de la cáscara de arroz, es ecológicamente correcta ya que posee aspectos favorables a la sociedad, al ambiente y a la economía. El bioetanol es un combustible limpio que es considerado por tener mucha influencia positiva para una mejor calidad de vida (Kang et al., 2014).

Una de las soluciones para reducir el impacto ambiental es mediante el uso de biocombustibles, es decir, sustituyendo o adicionando un porcentaje (%) a los combustibles fósiles. Simplemente, el biodiesel se utiliza para reemplazar el diésel mientras que el bioetanol utilizado para sustituir la gasolina (Silitonga et al., 2013; Adewale, Dumont y Ngadi, 2015).

El bioetanol es un combustible líquido renovable y sostenible que se espera que tenga un futuro prometedor en la lucha contra la crisis energética global actual y el empeoramiento de la calidad del medio ambiente. En 2011, la producción mundial de bioetanol, fue más de 100 mil millones de litros, se espera que se incremente de 3 a 7 % anualmente del 2012 a 2015, se demuestra que el bioetanol ya está siendo visto como una fuente de energía alternativa preferible a sustituir a los combustibles fósiles (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2012).

El bioetanol también ayuda a reducir el CO<sub>2</sub> emisión de hasta un 80 % en comparación con el uso de gasolina, por lo tanto promueve un entorno más limpio para el futuro (Lashinsky y Schwartz, 2006). El aprovechamiento de residuos orgánicos celulósicos puede presentar un elevado potencial por ser un recurso de biomasa muy prometedor visto que son constituidos principalmente de carbohidratos polimerizados, los cuales pueden ser utilizados como materia prima para la producción de bioetanol. Dichos residuos anteriormente carecían de un valor, porque se desechaban como desperdicio, pero en la actualidad tienen un gran valor económico, además se ve como una oportunidad en la industria de la producción. El bioetanol es considerado como un combustible limpio de mucha influencia, por tanto, las alternativas para la producción de bioetanol a partir de las materias primas no tradicionales son necesarias para no contribuir a la contaminación ambiental.

La importancia de la metodología de superficie de respuesta (MSR) es para analizar los efectos de varias variables independientes (Myers, Montgomery y Cook, 2016). MSR ayuda a investigar el efecto interactivo de las variables del proceso en el bioetanol y a construir un modelo matemático que describa con precisión el proceso, ayudando así a encontrar los niveles que maximicen el rendimiento del bioetanol (Myers et al., 2016).

### **1.3. Preposición filosófica**

Es frecuente en estos tiempos escuchar hablando a las personas sobre el desequilibrio del ecosistema por la actividad humana que está alterando la salud del planeta como nunca en la historia. Cuanto más amenazadores se vuelven los problemas como el calentamiento global y otras dificultades relacionadas con el medio ambiente., mayores son los esfuerzos por hallar una solución.

Entonces es un buen momento para reflexionar, estamos viendo que suceden todo eso y que hemos hecho de manera individual para buscar el equilibrio, somos cristianos y nuestro deber es cuidar la obra de la creación de Dios, para nosotros esa es la principal motivación para cuidar del ambiente en que vivimos, Dios hizo todo y dijo que era bueno en gran manera, además ordenó que el hombre cuidara del jardín del edén, ¿será que estamos cuidando nuestro jardín? ¿será que hoy al mirar nuestro planeta Dios todavía cree que todo es bueno de gran manera? con seguridad NO.

Es nuestra responsabilidad señorear el medio ambiente de la obra de nuestro Dios, pequeñas acciones pueden causar gran impacto junto a la comunidad enfocadas a la preservación del medio ambiente, y así formar una nueva generación de ciudadanos conscientes de su papel en el mundo.

Confiamos en las promesas bíblicas de la recreación de ese mundo por Dios con el regreso de Jesucristo, allí esperamos vivir en un mundo sin las actuales degradaciones mientras tanto, es nuestro deber es cuidar de la creación existente, por ello el presente proyecto sugiere una razón potencial, para tener una preocupación intrínseca por el sufrimiento del ser humano, los seres vivos y el ambiente es decir para el bienestar en general.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Evaluar los parámetros en la obtención del bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos de la cáscara de arroz empleando diseño de experimentos de la metodología de superficie de respuesta de Box-Behnken.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Diseñar y construir un biorreactor anaerobio en escala piloto.
- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de las materias primas.
- Determinar la pérdida de la biomasa comprendida desde el pretratamiento mecánico hasta el proceso de hidrólisis.
- Evaluar la cinética en el proceso de fermentación de los siguientes parámetros: pH, conductividad eléctrica, temperatura y sólidos solubles con relación al tiempo.
- Determinar las variables optimizadas aplicando superficie de respuesta en los grados etanólicos, rendimiento etanólico y rendimiento etanólico/biomasa del bioetanol.

## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LA LITERATURA

#### 2.1. Antecedentes de la investigación

##### 2.1.1. Antecedentes internacionales

Stuart, Smart y Cook (2015) produjeron bioetanol de los granos gastados por los cerveceros (BSG) se obtuvieron de la fábrica de cerveza en Reino Unido a partir de un proceso de elaboración de la cerveza de alta gravedad usando 100 % de cebada malteada. A continuación, la BSG se secó durante la noche a 105 ° C y se muele hasta un tamaño de partícula de menos de 212 µm. para asegurar la homogeneidad.

Verardi, Blasi, Molino y Calabrò (2018) afirman que en Italia se utilizó peróxido de hidrógeno, un agente de impregnación verde, para pretratar la biomasa lignocelulósica del bagazo de caña mediante explosión de vapor. Se investigaron dos concentraciones diferentes del peróxido (0.2 % y 1 %). Luego, la biomasa se hidrolizó después del pretratamiento usando celulasa. La cantidad liberada de: celobiosa; monosacáridos, como glucosa, xilosa, arabinosa y manosa; subproductos derivados de lignocelulosa, como furanos y pequeños ácidos orgánicos (ácido acético, fórmico y levulínico), fueron evaluadas. Al agregar peróxido de hidrógeno en el pretratamiento con vapor, el rendimiento promedio aumentó en 12 % para la glucosa y 34 % para la xilosa, y el rendimiento de la celobiosa disminuyó aproximadamente en un 30 %. No se apreciaron aumentos significativos en el rendimiento de arabinosa y manosa. Además, el peróxido de hidrógeno no parece aumentar la formación de subproductos derivados de lignocelulosa durante el proceso de pretratamiento, con la excepción del ácido levulínico.

Bastos (2015) informa que la producción de bioetanol en Río de Janeiro (Brasil), realizaron a partir de materia prima como la biomasa lignocelulósica, realiza procesos químicos (ácidos) para quebrar las moléculas de celulosa y producción de azúcares, para entonces producir el etanol por medio de procesos fermentativos alcohólicos.

En la Universidad de Cartagena en la ciudad de Bolívar en Colombia obtuvieron bioetanol utilizando como materias primas los residuos de cáscaras de naranja y piña, los cuales son materiales lignocelulósicos, para la remoción de la lignina se usó sulfato de calcio e hidróxido de sodio. La fermentación se dio por *Saccharomyces cerevisiae* en un reactor con agitación por 7 horas. Se usó microdestilación para la separación del etanol producido. El resultado fue que el material lignocelulósico de la naranja produjo 8,4mg/g de etanol siendo este mayor a la producción de etanol por la cáscara de piña con 1,0mg/g. (Tejeda et al. 2010).

Santos, Souza, Farias y Garcia (2016) alegan que en la Universidad Federal de Alagoas (UFAL) en Maceió de Brasil, utilizaron las cáscaras de coco verde como material lignocelulósico para la producción de combustibles renovables. Las fibras del coco tuvieron un pretatamiento alcalino, se hidrolizaron enzimáticamente y posterior a ello se hizo la fermentación con levaduras comerciales de *Saccharomyces cerevisiae*. A pesar de la pérdida significativa de celulosa (4,42 % en relación a la fibra y 17,9% con respecto al contenido original de celulosa), el pretratamiento alcalino dio una solubilización eficaz de la lignina en un 80% convirtiendo así las fibras de coco en una materia prima factible para la producción de bioetanol. La hidrólisis enzimática convirtió el 87% de los azúcares y la fermentación etanólica consumió el 81% del sustrato en el hidrolizado, dando lugar a una eficiencia de conversión de azúcar a etanol del 59,6%. Finalmente, estos

resultados muestran que las cáscaras de coco verde son una excelente alternativa para la producción de energía renovable.

En España en la ciudad de Valencia trabajaron con los residuos de la cáscara de piña para la obtención de bioetanol, a diferencia de los demás, ellos hicieron tratamientos previos con microondas a las cuales se le aplicaron distintas potencias (4,25, 6,375 y 8,5 W/g) y tiempos de exposición (1, 2, 5, 10 y 15 min). Los resultados indicaron que hacer un pretratamiento con microondas, dando potencias y tiempos correctos, puede beneficiar la liberación de azúcares fermentables en la hidrólisis enzimática que se da consecutivamente, y que a dichas potencias y tiempos no se liberan compuestos tóxicos los cuales inhiben la fermentación (Azaf, Conesa y Seguí, 2016).

Soacha el segundo municipio más poblado del departamento de Cundinamarca en Colombia se hizo producción de etanol a partir de residuos provenientes de la cáscara de naranja, plátano y maracuyá usando la levadura *Candida utilis*, donde se adecuaron procesos como la hidrólisis alcalina para la deslignificación e hidrólisis ácida. Los experimentos muestran que se tiene un 99% de producción de bioetanol con la cáscara de naranja a las 20 horas del proceso. Además, que la *Candida utilis* presenta extensas capacidades para adaptarse y aprovechar estos residuos orgánicos para su crecimiento y actividad (Murillo et al., 2016).

Li., Jiang, Fei, Yu y Cai (2012) el objetivo de este estudio en Beijing, China fue examinar la viabilidad de los pretratamientos de hidróxido de potasio (KOH) con ayuda de microondas para mejorar la hidrólisis enzimática del bambú. El pretratamiento se llevó a cabo sumergiendo el bambú en soluciones de KOH (12% y 8% p / p de bambú) y exponiendo la lechada al poder de radiación de microondas de 400 W durante 30 min. Se analizó la composición química de los

sustratos pretratados y el licor agotado. Los sustratos pretratados fueron hidrolizados enzimáticamente y se analizaron glucosa y xilosa en el hidrolizado. Los resultados mostraron que el sustrato pretratado con KOH asistido por microondas tenía un rendimiento de azúcar significativamente mayor que las muestras no tratadas. Los inhibidores de la fermentación ácido fórmico, furfural, hidroximetilfurfural (HMF) y ácido levulínico fueron mucho más bajos que el pretratamiento con ácido informado.

### **2.1.2. Antecedentes Nacionales**

Bardales et al. (2011) realizaron en Trujillo la producción de etanol utilizando residuo lignocelulósico del espárrago, se trató previamente la peladilla físicamente, químicamente y fisicoquímicamente. Una vez terminado los pretratamientos se determinó los Azúcares Reductores Totales, obteniendo una concentración de 7g/L. Previamente se construyó un biorreactor de 16 cm. de altura tipo tanque agitado con turbina Rushton y se procedió a la preparación del inóculo del inóculo con la cepa *Candida utilis*. El medio de cultivo fue formulado a partir de diluciones de azúcares reductores totales desde 7.0 hasta 0.85 g/L, se llevó el proceso a una temperatura de 25-25°C, controlando el pH de 4.0 a 4.5 y finalizando las 72 horas de la fermentación se procedió a determinar el porcentaje de etanol. Como resultado se obtuvo que la proteína unicelular y el porcentaje de etanol aumentan progresivamente desde 0.13 hasta 1.80 g/L y desde 0.40 hasta 2.04% respectivamente, teniendo una proporción directa a medida que aumenta la concentración de Azúcares Reductores Totales de la peladilla de espárragos. Se concluye que el bioetanol tiene mayor producción a medida que aumentan los Azúcares Reductores Totales, por otro lado, el rendimiento óptimo de la *Candida utilis* con un 91.66% se

obtiene a la concentración 1.75 g/L disminuyendo conforme se aumenta la concentración de Azúcares Reductores.

Escalante y Fuentes (2013) obtuvieron en Piura bietanol a partir de residuos agrícolas del plátano usan sus hojas, pseudotallos y raquis, para la producción se hizo el pretratamiento que consistió en el Steam Explosion (SE) y Liquid Hot Water (LHW), la deslignificación, la hidrólisis enzimática se realizó con enzimas celulolíticas Cellic Ctec alcanzando un rendimiento del 29%, el proceso de fermentación y destilación finalmente, de éstos últimos la fermentación se estabilizó al quinto día y al hacer el destilado se obtuvo un 92% de pureza en peso y un rendimiento etílico de 0.078g de etanol/g de biomasa. Se concluyó que en Piura es técnicamente factible la producción de etanol a partir de estos residuos.

## **2.2. Base teórica**

### **2.2.1. Energía renovable**

Las energías renovables son obtenidas de fuentes naturales, literalmente no se acaban porque la cantidad de energía que contienen es extensa y son capaces de renovarse por medios naturales, se puede indicar también que los combustibles fósiles como el petróleo y el gas se reducirá drásticamente en las próximas décadas Simioni (2006). Entre las energías que se pueden renovar se encuentran la energía eólica, geotérmica, hidroeléctrica, solar y la biomasa, como es mostrado en la Tabla 1. Los beneficios que se rescatan de estas energías, que no son contados dentro de las cuentas económicas, son: el desarrollo social y económico, restauración de la tierra, reducción de la contaminación atmosférica, reducción del calentamiento global, los cuales se dan a largo plazo (Johansson, Kelly y Williams, 1992).

Tabla 1

*Fuentes de energía renovable* (Silverman y Worthman, 1995)

	<b>Definición</b>	<b>Aplicaciones</b>
<b>Solar térmica</b>	Energía producida por el calentamiento solar	Barras parabólicas
<b>Hidroeléctrica</b>	Energía de la caída del agua	Instalaciones de almacenamiento y liberación (incluyendo almacenamiento por bombeo) Instalaciones de explotación del río
<b>Fotovoltaica</b>	Energía de la luz solar convertida directamente en electricidad	Energía solares
<b>Geotérmica</b>	Energía del calor almacenado debajo de la superficie de la tierra en reservorios hidrotermales, salmuera geopresionada, zonas, roca seca caliente o magma	Extracción hidrotérmica
<b>Biomasa</b>	Energía derivada de la combustión, fermentación, gasificación o digestión anaerobia de materia vegetal o animal	Proyectos de gas en rellenos sanitarios Biocombustibles e instalaciones energéticas a partir de residuos
<b>Eólica</b>	Energía del viento	Turbinas de viento

### **2.2.2. Protocolo de Kyoto**

Scarpinella (2002) indica que, debido a las evidencias del calentamiento global, la preocupación por el clima, se urge importancia a partir de la década de 1980, desde ese entonces han ocurrido innumerables reuniones de orden internacional, cuya pauta eran los cambios climáticos, en los que se discutieron las posibles soluciones para evitar o reducir la emisión de gases causantes del efecto invernadero. El encuentro de Kyoto tal vez fue la más importante de esas reuniones, porque fue escenario de la creación del Protocolo de Kyoto, que establece la necesidad de reducir la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), no controlados por el Protocolo de Montreal (Nishi et al., 2005), creándose bajo la conclusión de que el cambio climático representaría una amenaza para la humanidad la Convención de las Organización de las Naciones Unidas (ONU) sobre el Cambio Climático, cuyo objetivo era frenar las emisiones por consiguiente, las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel, lo que impediría, que la interferencia antrópica modificara el sistema climático. Otro objetivo era garantizar que la producción de alimentos no fuera amenazada, para permitir que el crecimiento económico continuase de manera sostenible. Como se acordó que los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) y de la antigua Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS) adoptarían políticas de mitigación capaces de hacer que los niveles de emisión antrópica de los referidos gases se reanudaran hasta el año 2000 (primer plazo) a los niveles de 1990. Así, en 1997 en Kyoto, Japón, se aprobó el documento que se llamó "Protocolo de Kyoto", cuantificando las metas de reducción de emisiones (Tosi y Mussi, 2010).

De acuerdo con el Protocolo de Kyoto, los países más industrializados se verían obligados a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en volúmenes del 5,2% inferiores a sus niveles de emisiones en 1990, siendo que esta reducción deberá realizarse entre 2008 y 2012, intervalo establecido como el primer período de cumplimiento del protocolo. Además, el planeta tendrá que reducir en un 25% las emisiones de gas carbónico provenientes de la combustión de la gasolina. Una de las alternativas a esta reducción es la utilización del bioetanol, ya que sustituye totalmente el uso de combustibles fósiles, es renovable y económicamente viable (Tosi y Mussi, 2010).

### **2.2.3. Crisis energética**

Hoy en día se acepta la escasez de las reservas mundiales de petróleo y gas natural, los especialistas como los geólogos y otros que están empapados con la materia coinciden en la creencia que cuando la mitad de la reservas recuperables de petróleo hayan sido extraídas, se llegará a un punto crítico, a partir del cual se generará un déficit creciente en la disponibilidad y oferta (López, 2005), debido al consumo del petróleo a nivel internacional, todo ello asociado a la reducción de sus reservas y conflictos internacionales en Medio Oriente, implica el aumento gradual del precio del barril en los próximos años; con eso países muy dependientes de estos combustibles fósiles tendrán que ajustar drásticamente sus balanzas comerciales, con implicaciones de empleo y renta (Ministerio da Agricultura, Pecuaria y Abastecimento- Brasilia, 2006).

Demirbas-Ayşe y Demirbas-İmren (2007) sostienen que las fuentes de energía están divididas en tres grupos: combustibles fósiles, fuentes renovables y fuentes nucleares, así mismo consumo mundial de energía aumentó un 22,6 %, buena parte de esa energía consumida provenía de fuentes fósiles como el petróleo, el carbón y el gas natural. En estos últimos años las reservas se estimaron en un billón de barriles, dando una perspectiva para su agotamiento de 70 años como máximo (Shreeve, 2006).

Principalmente a partir de la década de 1980, las cuestiones relativas al cambio climático, la calefacción global y efecto invernadero comenzaron a pasar un lugar destacado en el rol de amenazas, que más ponen en riesgo la integridad del planeta. Varios gases que existen naturalmente en la atmósfera, sin embargo, cuando se emiten en exceso intensifican el efecto invernadero: Metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), ozono (O<sub>3</sub>), hidrofluorocarbonos (HFC) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), siendo los que más contribuyen al incremento del problema, debido al aumento de la concentración de estos gases, el efecto invernadero se está agravando, trayendo consigo la elevación de la temperatura media global. El promedio de la temperatura de la superficie terrestre sufrió un aumento de 0,6 °C en el siglo XX, esperando crecientes de temperatura para los próximos años, así mismo se esperan consecuencias drásticas debido al calentamiento, como derretimiento de los casquetes polares, aumento del nivel medio de los océanos, propagación de enfermedades tropicales, migración y extinción de la biodiversidad, etc. (Nishi et al., 2005).

#### **2.2.4. Biocombustible bioetanol**

El bioetanol se ha identificado como el biocombustible más utilizado en el mundo, debido a que contribuye significativamente a la educación del consumo de crudo y la contaminación ambiental. Puede producirse a partir de diversos tipos de materias primas tales como sacarosa,

almidón, biomasa lignocelulósica y algas a través del proceso de fermentación por microorganismos (Mohd et al. 2017).

El bioetanol es el alcohol etílico ( $C_2H_5OH$ ) producido desde los tiempos antiguos por la fermentación de los azúcares encontrados en productos vegetales (cereales, remolacha y caña). En la actualidad, gran parte del etanol industrial se hace por medio de la fermentación, aunque también se hace sintéticamente de fuentes como el etileno derivado del petróleo. El nuevo concepto de etanol (o bioetanol) corresponde a su fabricación utilizando como materia prima la biomasa lignocelulósica. Estas materias primas provenientes de los restos de productos naturales (la paja del maíz, el bagazo, las pajas de la caña de azúcar, entre otros residuos agroindustriales) (Bastos, 2015).

El biocombustible que presenta expectativas más prometedoras para el futuro es el bioetanol, por presentar las siguientes ventajas: no depende de reservas; se obtiene de fuentes renovables; genera diez veces más energía que consume en su producción; presenta bajos niveles de emisiones de gases relacionados con el efecto invernadero como el monóxido de carbono, óxidos de azufre y compuestos orgánicos tóxicos como el benceno y el plomo. Es alarmante, porque cerca del 50 % de los gases en la tierra provienen de la utilización de los automóviles, ya que aproximadamente un tercio de la energía generada en el planeta se utiliza para el transporte. Por lo tanto, tenemos motores de combustión más ecológicos y con menos depósitos, ayuda en el desarrollo económico-rural; sustituye los compuestos peligrosos de la gasolina, como por ejemplo el benceno, ya que la gasolina contamina el suelo y el agua, al contrario, el bioetanol es biodegradable, haciéndolo más seguro al ambiente. Por lo tanto, disminuye la contaminación del

aire, la emisión de gas carbónico y consecuentemente el cambio climático (Demirbas\_Ayşe y Demirbas\_Imren, 2007; Shreeve, 2006).

Las ventajas de los bicomcombustibles son:

- El bioetanol ayuda a reducir el CO<sub>2</sub> emisión de hasta un 80% en comparación con el uso de gasolina, por lo tanto promueve un entorno más limpio para el futuro (Lashinsky y Schwartz, 2006).
- Tiene alto índice de octano de 108, el bioetanol se convierte en un motor de combustión interna de combustible favorable para evitar la detonación del motor y el encendido temprano, por lo tanto conduce a un alto valor antidetonante (Balat, 2007).
- Tiene 68% menor contenido de energía en comparación con la gasolina, el alto contenido de oxígeno (O<sub>2</sub>) de bioetanol hace que el limpiador de combustión y los resultados de menor emisión de sustancias tóxicas (Krylova A., 2008).
- Es una fuente de energía atractiva debido a su renovabilidad, así como a su capacidad para reducir las emisiones de partículas en los motores de encendido por compresión (Ying, Keat, Wan y Peng, 2011).
- Los límites de inflamabilidad más amplios, mayor velocidad de la llama y los calores de vaporización son características particulares de este líquido que le permite competir con los combustibles fósiles en un nivel de eficiencia (Balat H., Balat M. y Öz 2008).
- La relación de salida de balance de carbono a entrada de la materia prima para la materia prima de segunda generación también es muy alta, enfatizando aún más su capacidad para reducir el dióxido de carbono en la atmósfera (Tan, Teong y Rahman, 2008).

- Los beneficios ambientales también incluirán un saneamiento adecuado y la reducción de la contaminación por desechos (donde se utilizan residuos agrícolas). En general, la reducción de la dependencia de las importaciones, el aumento de los empleos locales y los desarrollos agrícolas tienen implicaciones positivas para el desarrollo económico de los productores de bioetanol (Walter et al., 2008).

Las desventajas de los biocombustibles pueden ser:

- Su alta corrosividad, baja luminosidad de la llama y presión de vapor y miscibilidad con el agua (Giri, Sandeep, Chakrabarti y Pandey, 2010).
- No se pueden todavía producir a gran escala, ya que los costos son relativamente elevados. El proceso para aislar la celulosa y hacer finalmente el bioetanol son hoy más altos en comparación a los precios de la gasolina a base de aceite mineral y etanol convencional (Salinas y Gasca, 2009).

### **2.2.5 Lignocelulósicos para la producción de bioetanol**

Diversos tipos de sustratos se utilizan actualmente para la producción de biocombustibles. Son principales materiales lignocelulósicos que se utilizan ampliamente como sustrato para la fermentación en el proceso de producción de biocombustible. Los materiales lignocelulósicos generalmente incluyen todo tipo de residuos de cultivos, productos de desecho agrícolas y los constituyentes de la biomasa. Una vez que se ha seleccionado un sustrato en particular, se tiene muy en cuenta qué tipo de método de pretratamiento puede adaptarse para una hidrólisis eficiente del sustrato y, además, dado que esta biomasa se considera una fuente de energía renovable eficiente, el proceso es llevado a cabo para que la biomasa pueda convertirse en biocombustible

por acción de microorganismos. Algunas de las biomásas que se usan ampliamente son residuos de cultivos tales como: residuos de cebada, maíz, avena, arroz, trigo, sorgo, bagazo de caña de azúcar, etc. Durante las últimas dos décadas, maderas, lactosa, lactosa, suero de leche también se utilizan ampliamente como materia prima para la fermentación para producir bioetanol. La madera, el mijo y otros residuos de cultivos requieren un tipo diferente de pretratamiento, como la hidrólisis ácida, la hidrólisis alcalina y también la hidrólisis basada en enzimas (Zhu et al., 2006). A continuación, se describe las biomásas lignocelulósicas:

Según Bharathiraja et al. (2014) el maíz es el principal cultivo alimentario de América del Norte, África (26%), Europa (12%) y América del Sur (9%). América del Norte es considerada como el área de mayor producción de maíz. El maíz se usa principalmente como alimento para animales con un 64%, en segundo lugar, es utilizado como alimento humano. Casi el 5 % del maíz se desperdicia como desperdicio logístico. Por lo tanto, si esta parte desperdiciada se está utilizando como sustrato para la producción de bioetanol, entonces ha sido calculado estadísticamente que 9 300 galones de bioetanol pueden ser producido. Algunos de los productos de desecho en la molienda de maíz están secos granos de destilería, desechos no comestibles, etc. La lignina es rica en rastrojo de maíz. Con base en todas estas estadísticas disponibles, el maíz se puede usar como el eficiente sustrato para la producción de biocombustibles.

La cebada también es un cultivo importante con una producción anual del 62 % en Europa y Asia (15 %). Además de alimentos para animales y humanos, el 4 % de la cebada se desperdicia. El 4 % de la cebada se puede convertir efectivamente en 1 500 galones de bioetanol que pueden reemplazar efectivamente 1 100 galones de gasolina. La cebada también produce Destiladores de Granos Secos y Solubles (DDGS) que se puede utilizar de manera efectiva como sustrato para la

producción de bioetanol, el grano de cebada desperdiciado pueden usarse efectivamente para la producción de biocombustibles (Bharathiraja et al., 2014).

La avena es también una variedad de cultivo importante destinada a alimentar a las poblaciones de animales y a los humanos. El mayor productor es Europa (64 %) seguido de América del Norte (21 %), Oceanía (5 %). La avena perdida es menos del 2 %. Si esta avena desperdiciada se convierte en biocombustible, puede reemplazar 161 millones de litros de gasolina y producir 225 millones de litros de bioetanol. La paja de este producto está disponible en todo el mundo y podría producir bioetanol, es un residuo con un porcentaje importante de celulosa y lignina con ciertos otros polisacáridos. Por lo tanto, la producción de bioetanol y combustible con avena está ganando importancia (Bharathiraja et al., 2014).

Según Bharathiraja et al. (2014) indican que el arroz es otro cultivo alimenticio importante, principalmente preocupado por las necesidades humanas que los animales. Asia es el mayor productor de arroz con más del 90%. El desperdicio en el arroz es de alrededor del 4.8%. Por lo tanto, los trabajos de investigación son se lleva a cabo en la mayoría de los países para convertir efectivamente este sustrato en biocombustible. Ya 12.3 galones de etanol han sido producido por los países occidentales y otras partes de Asia. Tribales es la parte oriental de la India y las regiones tibetanas producen alcohol para beber bajo el nombre de "sake". Incluso la paja de arroz al igual que otros subproductos agrícolas de desecho se puede utilizar como el medio eficaz para producir alcohol como combustible.

La paja de trigo y el trigo con granos que se desperdician puede potencialmente contado en los medios efectivos de biocombustible a través de la fermentación. Asia (43 %), Europa (32 %) son los principales productores de trigo. El segundo productor más grande es India mientras que

primero es China. El uso de sustrato como trigo es limitado, al mismo tiempo, la producción de etanol como biocombustible a partir del trigo también es menor. El grano de trigo desperdiciado, el triturado en seco de trigo constituyen el sustrato para la producción de biocombustible. La paja de trigo se utiliza potencialmente como sustrato para la producción de biocombustibles. Europa está produciendo bioetanol en gran medida (Bharathiraja et al., 2014).

Según Bharathiraja et al. (2014) mencionan que el sorgo es otro cultivo primario en África (33 %) y América del Norte (23 %). El sorgo se utiliza principalmente como residuo animal y casi por igual para humanos. El 6 % del sorgo producido se desperdicia anualmente. El desperdicio de sorgo, la molienda seca de sorgo y la paja del mismo, se usan colectivamente para producir biocombustible. El uso para la producción de bioetanol se lleva a cabo solo en América del Norte y no en África, debido al bajo rendimiento de la paja y el grano. Se están produciendo casi 4.9 gl de bioetanol.

El bagazo de caña de azúcar es la sustancia similar a la paja que queda como residuo después de extraer el jugo. Este bagazo de caña de azúcar se utiliza ampliamente como sustrato para la producción de etanol. Sin embargo, en los últimos tiempos, el bagazo se está utilizando directamente para la producción de biogás. La visión general de las industrias productoras de biocombustibles y bioetanol es que cualquier sustrato que tenga material de polisacáridos con lignina puede ser potencialmente utilizado y adaptado para la producción de bioetanol (Bharathiraja et al., 2014).

### **2.2.6 Residuos sólidos**

Rivera (2009) define que los residuos sólidos son desechos descartadas como inútiles o no deseadas, producidos en una sociedad, que generalmente no llevan ningún valor para el primer

usuario, estas incluyen ambas fracciones orgánicas e inorgánicas, ya que carecen de servicio práctico para la actividad que los produce. Los residuos provienen de actividades como: domésticas, comerciales, industriales, de una comunidad (Fundación Natura, 2009). Siendo estos residuos: sustancias, subproductos o productos en estado semisólido o sólido dispuestos y manejados a través de un sistema (Ministerio del Ambiente, 2014).

#### **a. Residuos orgánicos**

Se determina que los residuos orgánicos son aquellos que se dan a partir de la materia orgánica que está en todos los seres vivos entre un 95% - 99%, su composición se da por elementos como el Carbono, Hidrógeno y Oxígeno, y en algunos casos hay la presencia de Fósforo, Nitrógeno y Azufre (Navarro, Herrero, Gómez y Beneyto, 1995).

Asimismo del total de los residuos que se generan por el productor, la materia residual es la que predomina ocupando principalmente de 70 - 75% de los residuos sólidos municipales es orgánico (Ramachandra, Aithal y Durgappa 2012; Sharholly , Ahmad , Vaishya y Gupta, 2006). Por lo tanto, los desechos orgánicos son los principales elementos de los residuos sólidos suscitados por la demanda del hombre, como se observa en la Tabla 2.

Navarro et al., (1995) consideran como parte de los residuos de materiales orgánica aquellos procedentes de actividades como la agricultura, ganadería, mataderos, residuos forestales, urbanos, domésticos, lodos de depuradoras de aguas residuales, englobando también a los originados en las industrias agroalimentarias y afines que hagan producción de esta materia orgánica residual.

Tabla 2

*Composición de la generación de residuos sólidos en diferentes ciudades* (Qu et al., 2009<sup>a</sup>; Philippe y Culot, 2009<sup>b</sup>; Sujauddin, Huda y Hoque, 2008<sup>c</sup>; Ramachandra, Bharath, Kulkarni y Sun, 2018).

<b>País</b>	<b>Orgánico</b>	<b>Papel</b>	<b>Plástico</b>	<b>Metal</b>	<b>Vidrio</b>	<b>Téxtil</b>	<b>Madera</b>	<b>Otros</b>
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
<b>China<sup>a</sup></b>	69.3	10.3	9.8	0.8	0.6	1.3	2.7	-
<b>Republica de Haití<sup>b</sup></b>	65.5	9	9.2	2.6	5.8	-	-	7.9
<b>Bangladés<sup>c</sup></b>	62	3	2		5	1	3	-
<b>India<sup>d</sup></b>	84	12		1	1	-	-	2

### **b. Residuos lignocelulósicos**

Según Cardona y Sánchez (2007) manifiestan que muchos materiales lignocelulósicos son subproductos de actividades agrícolas, residuos industriales o residuos domésticos, además son enormes las posibilidades a partir de éstos para la producción y el consumo global como combustible renovable. Compuestas por la pared celular que a su vez está formada por lignocelulosa, el principal y más abundante componente de las biomásas producida por la fotosíntesis (Ragauskas et al., 2006). Los materiales residuales lignocelulósicos constan de tres componentes principales: celulosa, hemicelulosa y la lignina (Oliva, 2003). Típicamente la hemicelulosa fluctúa entre el 20 - 40%, siguiendo la celulosa con 40 – 60% y finalmente representando 10 - 20% la lignina (McKendry y Peter, 2002), pudiendo entonces ser utilizados como sustratos para procesos fermentativos, ya que el 70% de estos residuos están constituidos por los carbohidratos (Saha y Cotta, 2008). (Xu et al., 2012) sostienen que la composición de la pared celular y la arquitectura física pueden afectar la tasa de conversión a biocombustibles, sin embargo, el principal desafío para convertir los materiales lignocelulósicos de la biomasa vegetal en azúcares fermentables es la resistencia intrínseca de las paredes celulares a la hidrólisis. Por lo tanto, los

principales componentes de la pared celular de la planta son los factores clave que afectan la conversión de los residuos lignocelulósicos a combustibles rentables (Jin et al., 2017).

Los residuos agroindustriales constituidos principalmente de carbohidratos polimerizados, de los cuales la celulosa es el más abundante, siendo este cerca de dos tercios de toda la materia orgánica presente sobre el planeta (Zhao et al., 2007).

### **2.2.7 Arroz**

El arroz (*Oryza sativa*) a menudo se conoce como el "oro del Oriente" y es el alimento diario más consumido universalmente. Casi la mitad de la población mundial; más de 3.5 billones de personas en su mayoría de Asia, África, partes de América Latina y el Caribe. En el cual juega un papel fundamental en la seguridad alimentaria de los países en desarrollo del mundo y ocupa el segundo lugar después del maíz en la producción mundial de cereales para alimentos (Hoogenkamp, Kumagai y Wanasundara, 2017).

El otro es la amplia gama de tipos de arroz en el mercado. El arroz está clasificado por longitud de grano (largo, mediano, corto), por forma (japonica, indica, aromático, silvestre), por el tipo de procesamiento (blanco, marrón, precocido) y por cualquier combinación de los mismos (Hoogenkamp 2015).

#### **a. Producción del arroz en el Perú**

El arroz (*Oryza Sativa*) en el Perú es el primer producto agroindustrial en área diseminada y cosechada, este producto está muy por encima del maíz amarillo, el café y la papa; con un promedio de 380 000 hectáreas sembradas (Instituto Nacional de Innovación Agraria [INIA], 2004).

El Ministerio de Agricultura (MINAGRI), 2012 aporta que uno de los cultivos más importantes en el Perú, con la mayor contribución al PIB agrícola, generando aproximadamente 161,300 empleos anualmente y teniendo un fuerte impacto en el desarrollo social y económico en áreas agrícolas rurales. La producción de arroz ha venido creciendo a una tasa promedio de 2.4% en los últimos diez años, el mismo que se viene sustentando por una mayor área cosechada en el año 2009.

La producción en el 2012 se ha incrementado en un 12.5%, liderados por Lambayeque (46.0%), Piura (34.2%), Loreto (16.2%), Cajamarca (10.1%), San Martín (6.2%), La Libertad (4.1%) y estos departamentos concentran el mayor nivel de producción con un 74.7%. Estos incrementos tanto en la superficie cosechada como en la producción, se debe principalmente por el incremento en la superficie sembrada de un 5.6%, en la última campaña agrícola (MINAGRI, 2012).

La predilección de la producción de desarrollo de arroz es fundamentalmente en la cantidad de hectáreas sembradas anualmente. A nivel regional del Perú, el departamento de San Martín tiene la superficie más enorme de arroz sembrado, que cubre 86.053 hectáreas. La mayor cantidad de arroz se procesa en el sector de Huallaga Central de la región de San Martín, con 73,343 toneladas (Velázquez, 2014). En la cual pasa las 80.000 hectáreas cada año como se observa en la Figura 1.

Pero en setiembre del 2017, la producción de arroz registró 162 mil 688 toneladas, incrementándose en 16,7 % del año 2016, explicada por los adecuados niveles de siembra y condiciones climatológicas favorables con temperaturas normales (Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), 2017).

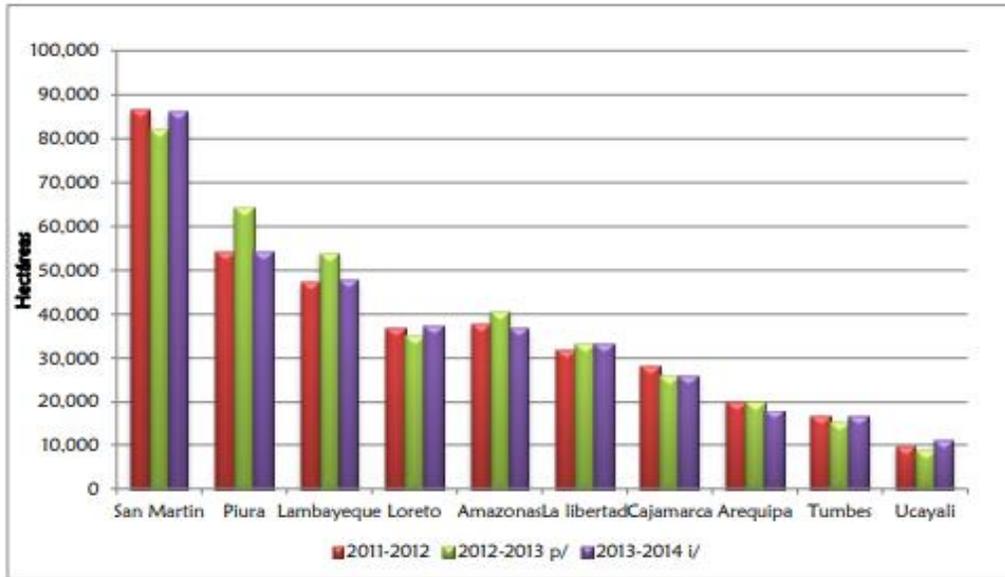


Figura 1. Comparativo de áreas sembradas de arroz en las diferentes regiones (Velázquez, 2014).

## b. Producción del arroz a nivel mundial

El arroz (*Oryza sativa*) es el segundo cereal más cultivado en el mundo, con aumento de la producción en los últimos años (Aparecida, Seferin, Gonçalves y Záchia, 2017). Además en Asia, donde el impacto de la revolución verde fue mayor, en donde la siembra de arroz de alto rendimiento aumentó del 12 al 67 por ciento (FAO, 2010).

En Brasil, como en muchos otros países, el arroz es uno de los alimentos más consumidos por la población, además de ser uno de los principales cultivos agrícolas (FAO, 2017). Así mismo es el principal alimento básico en Asia, donde alrededor del 90% del arroz del mundo se produce y consume. China es el mayor productor mundial, con un tercio del total de Asia en 29 millones de hectáreas como se indica en la tabla 3. La India produce casi una cuarta parte en 43 millones de hectáreas. Otros países principales productores de arroz en Asia se mencionan también en el tabla 3 (Pasquin y Witt, 2006)

Tabla 3

*Producción anual promedio de arroz. (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2006)*

<b>País o región</b>	<b>Producción (millones de toneladas)</b>	<b>País o región</b>	<b>Producción (millones de toneladas)</b>
China	188.5	Japón	10.9
India	142.5	Otros países asiáticos	35.8
Indonesia	58.3	Asia (Total)	594.5
Bangladesh	42.5	Brasil	12.1
Vietnam	36		
Thailandia	30.5		
Myanmar	32		
Filipinas	17.5		

Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado (SOSBAI, 2014) confirma que el arroz es una fuente nutricional importante de proteínas para muchas poblaciones, especialmente en los países asiáticos y latinoamericanos, y Brasil ocupa el 6 ° puesto como el mayor productor de arroz con cáscara del mundo. La región sur de Brasil es el mayor productor de arroz de América Latina con 9 millones de toneladas al año, lo que representa aproximadamente el 70% del total del país (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [IBGE], 2013).

En todo el mundo, alrededor de 79 millones de hectáreas de arroz se cultiva bajo condiciones de riego. Si bien esto es solo la mitad del área total de arroz, representa alrededor del 75% de la producción anual de arroz en el mundo. En Asia, casi el 60% de los 138 millones de hectáreas dedicadas a la producción de arroz anualmente se riegan, donde el arroz a menudo se cultiva en monocultivo con dos o tres cosechas al año, dependiendo de la disponibilidad de agua (Pasuquin y Witt, 2006) .

### **c. Usos del arroz**

Lu (2016) menciona que la mayor parte del arroz se consume directamente como granos enteros cocidos, pero aún existe un uso significativo del arroz en la elaboración de diversos alimentos procesados. Se utilizan arroces indicados con alto contenido de amilosa para en el consumo de fideos con base de arroz y productos de valor agregado como cereales para el desayuno, pasta de productos horneados, copos de arroz, galletas saladas. los fideos de arroz, y arroz japonica ceroso para muchos tipos de tortas de arroz (Hoogenkamp et al., 2017). Así mismo el arroz es una materia prima de primera generación que se utiliza para la producción de bioetanol, para sustituir la gasolina (Firouzi, Nikkhah y Aminpanah, 2018).

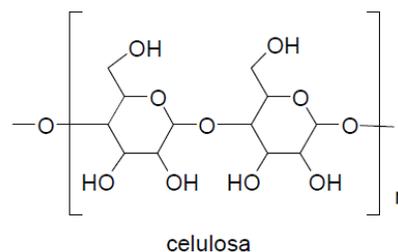
#### **2.2.8 Cáscara de arroz**

La cáscara de arroz es la capa exterior de semillas de arroz, eliminado como un subproducto durante el proceso de molienda, además por cada 4 toneladas de cosecha de arroz, alrededor de 01 toneladas de cascarilla de arroz o 20 % a 33 % del peso de grano (Shiun, Abdul, Rafidah y Hashim, 2012).

La cáscara de arroz es una de las materias primas más comunes disponibles como fuente de combustible para una variedad de procesos de conversión termoquímica (Pode, 2016). A pesar de su alto contenido de cenizas, la cáscara tiene bajo contenido de humedad con el potencial de energía satisfactoria y de bajo contenido de azufre. Sin embargo, los residuos agrícolas, incluyendo cáscara de arroz, tiene baja densidad aparente, generalmente por debajo de  $200 \text{ kg/m}^3$  (Shankar, Wright, Richard y Kenney, 2011). La composición de la cáscara de arroz son los siguientes:

#### **a. Celulosa**

Según Ebringerová, Hromádková y Heinze (2006) determinan que la celulosa es un componente lineal estructural de la pared celular de una planta que consiste en una larga cadena de monómeros de glucosa unidos b (1/4) - enlaces glucosídicos que pueden alcanzar varios miles de unidades de glucosa en longitud, sin embargo, los extensos enlaces de hidrógeno entre las moléculas conducen a una estructura matriz cristalina y fuerte. Deguchi, Mukai, Tsudome y Horikoshi (Como se citó en Limayem y Ricke, 2012) piensa que esta reticulación de numerosos grupos hidroxilo constituyen las microfibrillas que dan la molécula más fuerza y compacidad; aunque almidón los materiales requieren temperaturas de solo 60 a 70 °C para pasar de la textura cristalina a amorfa. La celulosa es la polímero orgánico más prevalente y es aproximadamente el 30% del composición de la planta (Zhu y Pan, 2010). Algodón, lino y pulpa química representan las fuentes más puras de celulosa (80 - 95% y 60 - 80%, respectivamente) mientras que las maderas duras y blandas contienen aproximadamente 45% de celulosa (Demírbas, 2005).



*Figura 2. Estructura química de la celulosa (Rodríguez, 2012).*

Betts, Dart, Ball y Pedlar (1991) especifican que la celulosa puede ser convertida eficientemente en azúcares monoméricos por procesos hidrolíticos, y así jugar un papel importante para satisfacer las necesidades futuras de energía. La producción de bioetanol de segunda generación utiliza completamente celulosa y sus desechos como materia prima por el hecho de que la celulosa es el material orgánico natural disponible más abundante en la tierra. A continuación, se muestra en la tabla 4 los contenidos de celulosa de diversas biomásas lignocelulósicas.

**Tabla 4**

*Contenido de celulosa de diversas materias primas de bioetanol* (Como se citó en Nagarajan, Skillen, Irvine, Lawton y Robertson, 2017).

<b>Materia prima</b>	<b>Contenido de Celulosa (%)</b>	<b>Materia prima</b>	<b>Contenido de Celulosa (%)</b>
Algas verdes	20-40	Tallos de maíz	39-47
Algodón, lino, etc.	80-95	Paja de trigo	37-41
Pastos	25-40	Periódicos	40-55
Maderas duras	45 ± 2	Pulpas químicas	60-80
Cortezas de madera dura	22-40	Paja de arroz	46.5 ± 1.5
Maderas blandas	18-38	Paja de trigo	35-37
La madera blanda ladra	42 ± 2	Cáscara de arroz	25-35
Bagazo	32-43		

Independientemente del propósito de la hidrólisis, una comprensión más fundamental del proceso de hidrólisis daría lugar a métodos mejorados para preparar la celulosa para convertirla en combustibles (Zhao et al., 2007).

## b. Hemicelulosa

Según Scheller y Ulvskov (2010) dan a conocer que las hemicelulosas son polisacáridos que contienen diversas subunidades de monosacáridos. Ellos pueden ser extraídos con diferentes concentraciones de álcali, ácido y otros productos químicos (Peng, Hocart, Redmond y Williamson, 2000). Aún no está claro si las hemicelulosas se entrecruzan con la celulosa y la lignina, y sus efectos sobre la cristalinidad de la celulosa y la degradación de la biomasa no son bien conocidos (Xu et al., 2012).

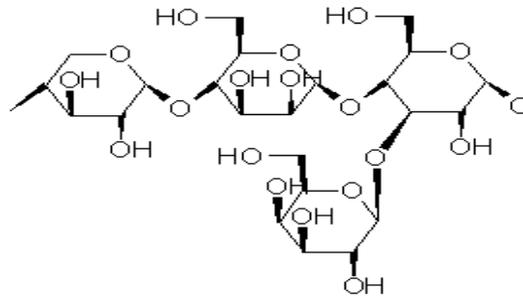


Figura 3. Estructura química de la hemicelulosa (Rodríguez, 2012).

## c. Lignina:

Afirman Gosselink, Jong, Guran y Abächerli (2004) que la lignina es la segunda materia prima natural más abundante de la tierra. También es el polímero más natural (fenólico) de la naturaleza (Lora y Glasser, 2002). Su función principal es cementar las fibras de celulosa de las plantas; en general, se obtiene de licor negro, un desecho descargado de fábricas de papel en grandes cantidades, y que puede plantear un problema importante de eliminación (Zhang y Chuang, 2001).

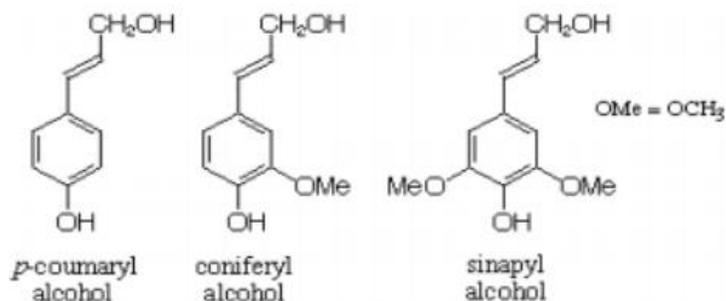


Figura 4. Estructura química de la lignina (Rodríguez, 2012).

Botaro, Dos Santos, Arantes y Da Costa (2001) enuncian que el aislamiento de lignina a partir de materiales lignocelulósicos es generalmente difícil debido a las reacciones de condensación y oxidación que se producen durante el proceso de aislamiento. Los métodos informados en la literatura se pueden dividir ampliamente en aquellos que se basan en la hidrólisis o solubilización de celulosa y hemicelulosas por reactivos químicos que dejan lignina como un material insoluble, y aquellos que se basan en la disolución o eliminación de lignina y producen soluciones de que el producto puede ser recuperado por el tratamiento posterior. Los procesos de aislamiento pueden lograrse utilizando energía química o mecánica, aunque se prefiere la primera ya que el daño a las fibras se minimiza en este caso. En los procesos de despulpado comercial y blanqueo usan ácidos, álcalis, solventes orgánicos o agentes biológicos que atacan a la lignina, causando su degradación y disolución, permitiendo así la separación de las fibras de celulosa de la lignina.

Las cortezas de madera blanda tienen el mayor nivel de lignina (30 – 60 %) seguido de las cortezas de madera dura (30 – 55 %) mientras que los pastos y los residuos agrícolas contienen el nivel más bajo de lignina (10- 30 % y 3 - 15%, respectivamente) (Demírbas, 2005).

La lignina pertenece a un grupo diverso de polímeros tridimensionales de alcohol aromático que asociado con la celulosa como lignocelulosa proporciona la rigidez estructural a las plantas vasculares (Higuchi, 1990 y Kirk, 1987).

Retener la lignina podría tener beneficios como han demostrado que los componentes de lignina, una vez recuperado del proceso de biocombustible puede ser una energía potencial autosostenida fuente para retener la solvencia financiera de las biorrefinerías Ladisch, Mosier, Kim, Ximenes y Hogsett (Como se citó en Limayem y Ricke, 2012).

Lee (1997) concluye que para la influencia de los parámetros en la producción del bioetanol, es recomendable hacer una previa deslignificación antes del proceso hidrolítico, ya que ayuda a que las reacciones posteriores sean simples, tengan mayor rendimiento del producto, haya menos reacciones secundarias y menos demanda de energía.

La composición de la celulosa, hemicelulosa y lignina según la localización geográfica son : Variables, pues depende de varios factores, empezando por la variedad de arroz e ir hasta las condiciones del suelo y el clima durante el cultivo de la planta , se muestra en la tabla 5 (Possamai et al., 2001).

Tabla 5

*Descripción de las propiedades bioquímicas de la cáscara de arroz en función de la ubicación geográfica*

Localización Geográfica	Análisis Bioquímico %		
	Lignina	Hemicelulosa	Celulosa
Malaysia <sup>a</sup>	26.1	21.25	42.45
Sierra Leona <sup>b</sup>	24.95-31.41	18.10-21.35	25.89-35.50
Taiwan <sup>c</sup>	26.91	22.18	34.56
Colombia <sup>d</sup>	35.84	24.5	39.65
Egipto <sup>e</sup>	20	21	35
Pakistan <sup>f</sup>	40.16	11.14	38.35
India <sup>g</sup>	20.3	26.7	34.8
Bulgaria <sup>h</sup>	24.6	31.6	48.3
Malasia <sup>i</sup>	7	26	33

Naqvi, Uemure, Osman y Yusup, 2015<sup>a</sup>; Mansaray y Ghaly, 1997<sup>b</sup>; Horng y Jung, 2009<sup>c</sup>; Marrugo, Valdés y Chejne, 2016<sup>d</sup>; Toniazzo, Fierro, Braghiroli, Amaral y Celzard, 2013<sup>e</sup>; Danish, Naqvi, Farooq y Naqvi, 2015<sup>f</sup>; Prakash y Sheeba, 2016<sup>g</sup>; Vassilev, Baxter y Vassileva, 2010<sup>h</sup>; Iqbal, Alimuddin, Mohamed, Rizman y Mat, 2015<sup>i</sup>).

En la tabla se observa en cada ciudad varía el porcentaje de lignina, hemicelulosa y celulosa, es debido al clima y posiciones geográficas (Mathew et al., 2010).

La disponibilidad de residuos celulósicos, representados por pajas, cáscaras, hojas, residuos de explotación maderera entre otros, despierta el interés para la producción de bioetanol a partir de éstos como materia prima. Los residuos agrícolas y la industrialización de vegetales se componen fundamentalmente de material celulósico, biológicamente siempre asociado a hemicelulosos. Sin embargo, para que estos residuos sean aprovechados para la obtención de bioetanol o en otros procesos biotecnológicos, inicialmente ellos deben ser hidrolizados, ya que en la forma macromolecular no son asimilables (Tamanini y Haully, 2004).

Las cantidades de celulosa, hemicelulosa y lignina varían sustancialmente con el tipo de materiales de biomasa. Por ejemplo, los materiales leñosos contienen más lignina, pero menos celulosa y hemicelulosa en comparación con los residuos agrícolas o cultivos herbáceos. Además, la estructura y longitud del polímero, y los enlaces cruzados de celulosa, hemicelulosa y lignina son muy diferentes (Mohan, Pittman y Steele, 2006).

### **2.2.9 Producción del arroz**

En el 2014, la producción mundial de arroz con cáscara llegó a 741,3 millones de toneladas (Pode, 2016). En latinoamérica Brasil produce 12,17 millones de toneladas de arroz con cáscara (FAO, 2016); 2,42 millones de toneladas de cascarilla de arroz (Pode, 2016).

La FAO prevé una modesta recuperación del 1,1% en la producción mundial de arroz en 2015. La producción mundial de arroz con cáscara esperada en 2015 fue de 749,8 millones de toneladas, con el potencial de generar alrededor de 150 millones de toneladas de cáscara de arroz (Pode, 2016). Sin embargo, la producción alcanzó 824 millones de toneladas (FAO, 2016), superando las expectativas.

En el proceso de beneficiamiento del arroz se tiene como residuo la cáscara, que corresponde en promedio al 23% del peso total del grano, con una generación anual de 123,69 millones de toneladas en todo el planeta. Este residuo presenta alta dureza, fibrosidad y naturaleza abrasiva, llevando la obtención de productos de baja propiedad nutritiva, buena resistencia al desgaste y muchas cenizas (Possamai, Kuhn y Hotza, 2001).

Normalmente, es incinerada para generar energía en la propia industria resultando en cenizas que son descartadas en los cultivos como fertilizantes. Sin embargo, las cenizas cargan el

carbono residual de la combustión, provocando contaminación en el medio ambiente y problemas de salud al hombre, ya que son tóxicos. La ceniza sólo tiene valor económico si presenta alta calidad. Otro destino común de la cáscara es el descarte en los cultivos y fondos de ríos, liberando gas metano, lo que contribuye al calentamiento global (Possamai et al., 2001; Foletto, Hoffmann, Hoffmann, Portugal y Jahn, 2005).

#### **2.2.10 Usos de la cáscara de arroz**

- Por lo general, se quema o se transporta a vertederos, con impactos ambientales relevantes. La recuperación de este material de desecho mejoraría la sostenibilidad de esta actividad agrícola y ayudaría a reducir el impacto ambiental de otros medios de eliminación de residuos (Yarbrough, Wilkes, Olivier, Graves y Vohra, 2005; Rocco, Savastano y Fiorelli, 2015)
- Aunque algunos estudios han descrito la incorporación de la cáscara de arroz en los materiales, particularmente en el aislamiento térmico (Rocco et al., 2015).
- Cáscaras de arroz y plásticos se usa para materiales de construcción, en el cual se desarrolla un nuevo método de reciclaje efectivo para las cáscaras de arroz y el poliestireno expandido de desecho mediante el uso de una combinación de ambos desechos (Woon, Mori y Ohama, 2006).
- Existen paneles de pared hechos de cáscara de arroz, ese estudio sugirió que la proporciona un mejor desempeño ambiental para casi todas las categorías de impacto que los materiales de aislamiento convencionales (Rocco et al., 2015).
- Uso de cáscara de arroz crudo como agregado natural en un aislante ligero concreto (Chabannes, Bénézet, Clerc y Garcia, 2014).

- Una creciente aplicación de la cáscara de arroz se utiliza como combustible en la planta de energía, debido a su alto poder calorífico (aproximadamente 13-16 MJ / kg) (Kapur, 1985).

## **2.2.11 Procesos para la obtención del bioetanol**

### **a. Pretratamiento químico**

Anwar, Gulfraz y Irshad (2014) indican que el pretratamiento es un paso importante para la recuperación del contenido celulósico de la biomasa a base de lignina en comparación con los materiales con almidón. Si bien se trata de biomasa lignocelulósicas, también se requiere pretratamiento para romper la barrera de lignina y así recuperar la celulosa, la cual se somete adicionalmente al hidrólisis enzimática para convertir en azúcares fermentables. Durante las últimas décadas, varios pretratamientos y enfoques se han desarrollado para la generación rentable de azúcar fermentable de la celulosa y hemicelulosa agrícola que contiene materiales lignocelulósicos.

### **b. Eliminación de la lignina**

La mayor dificultad para el aprovechamiento de los residuos celulósicos está relacionada con la barrera física formada por la lignina, impidiendo la utilización de la celulosa (Martín, Hahn, Jönsson, Whalbmom y Galbe, 2002) . Ya que está fuertemente ligada a la celulosa que, a la hemicelulosa, impidiendo la utilización de la celulosa. Por esta razón, los métodos de producción de celulosa a partir de residuos vegetales se centran particularmente en la deslignificación (Owolabi, Arniza, Wan y Alkharkhi, 2016) . Se pueden aplicar varios tipos de pretratamientos con el objetivo de aminorar el contenido de lignina y facilitar la posterior hidrólisis (Martín et al., 2002).

Esta técnica se basa en procesos mecánicos, físicos, químicos, biológicos o la combinación de éstos. La elección del proceso dependerá del grado de separación requerido y el fin al que se destina. Los pretratamientos que combinan métodos físicos y químicos se han señalado en la literatura como los más eficientes y, entre estos métodos, el con hidróxido de sodio se destaca por ser uno de los más antiguos y utilizados en las industrias de celulosa y papel para la deslignificación de materias primas vegetales, principalmente maderas, pajas de cereales y plantas fibrosas. Los procesos alcalinos utilizan condiciones moderadas de operación (presión y temperatura), en comparación con los sistemas ácidos. El principal efecto consiste en la remoción de la lignina de la biomasa, promoviendo mayor reactividad de la fibra (Pitarelo, 2014).

La solubilización y fraccionamiento de la lignina, es potencialmente perjudicial para las etapas subsiguientes de hidrólisis y fermentación, debido a la deposición de lignina sobre la superficie de la materia celulósica, así como de la generación de compuestos inhibidores de la fermentación tales como derivados fenólicos y ácidos orgánicos. Los procesos de pretratamiento deben ser en condiciones moderadas, con el fin de promover una elevada reactividad de las fibras celulósicas, con menor pérdida de glucosa en el hidrolizado, además de la mínima generación de compuestos inhibidores de las etapas subsiguientes de hidrólisis y fermentación (Pitarelo, 2014).

### **c. Hidrólisis ácida**

Demirbas A. y Demirbas I. (2007) confirman que los materiales lignocelulósicos presentan una estructura muy compleja, ya que el 70% de celulosa está en forma cristalina y la lignina junto con la hemicelulosa forma un complejo difícil de aislar de la celulosa. Para que esta sea utilizada por los microorganismos en los procesos fermentativos, inicialmente es necesario convertir estos carbohidratos indirectamente a directamente fermentables. Esta conversión se llama sacarificación y se puede realizar a través de la hidrólisis química o enzimática. La conducción técnica de cualquiera de estos procesos involucra reacciones que pueden llevar a derivados oxidados de la celulosa, a oligosacáridos, a la celobiosis por último a la propia glucosa monomérica.

El proceso hidrolítico empleando ácidos concentrados como el sulfúrico es un proceso relativamente antiguo, se emplea temperaturas moderadas y tiempos de reacción cortos. Las temperaturas y presiones utilizadas permiten el uso de materiales lignocelulósicos (Demirbas A. y Demirbas I., 2007).

### **d. Procesos de fermentación**

Aden (2007) menciona que la fermentación es el núcleo de todo el proceso. En la producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica, que consiste en la conversión de azúcares monoméricos obtenido en la hidrólisis enzimática en bioetanol por la acción de microorganismos tales como levadura, bacterias, y hongos. Los agentes de fermentación biológicos usados habitualmente para la producción de bioetanol son levaduras, particularmente *Saccharomyces cerevisiae*, que es capaz de la fermentación de azúcares de hexosa, especialmente glucosa, especialmente glucosa, en etanol bajo condiciones controladas (Aditiya, Mahlia, Chong, Nur y Sebayang, 2016).

Para Hamelinck, Hooijdonk y Faaij (2005) la fermentación es un proceso, donde el etanol se produce directamente a partir de la actividad metabólica del agente de fermentación. El hidrolizado, en este proceso, se introduce a un agente de fermentación específico (levadura, bacteria u hongos) de acuerdo con la idoneidad para digerir los respectivos compuestos de azúcar. Un tipo de bacteria que fermenta la glucosa, por ejemplo, *Zymomonas mobilis* prefiere hidrolizado rico en glucosa como su alimento y dejando el compuesto de bioetanol como el producto. Teóricamente, cada kg de glucosa y xilosa pueden producir 0,49 kg de dióxido de carbono con 0,51 kg de etanol.

En particular se requiere las condiciones de soporte para que los microbios puedan sostenerse, es decir, temperatura y rango de pH (Demirbaş, 2004). Como organismos mesófilos, la mayoría de los agentes de fermentación son cómodo dentro de la temperatura de 303 a 311 K (Hettenhaus, 1998). Para el tipo de bacteria de microbios de fermentación, pH de 6.5-7.5 son típicamente esenciales para mantener el crecimiento de las bacterias (Aminifarshidmehr, 1996).

Balat H., Balat M. y Öz (2008) muestran que los hongos son capaces para resistir un ambiente más ácido de pH 3.5-5. Además, factores adicionales que juegan un papel importante en la fermentación proceso son la tasa de crecimiento de los microbios y la estabilidad genética; tolerancia de inhibidores, ósmosis y alcohol; productividad y el rendimiento de etanol (Demirbaş, 2004).

El proceso bioquímico de fermentación del bioetanol se muestra en la Figura 5.

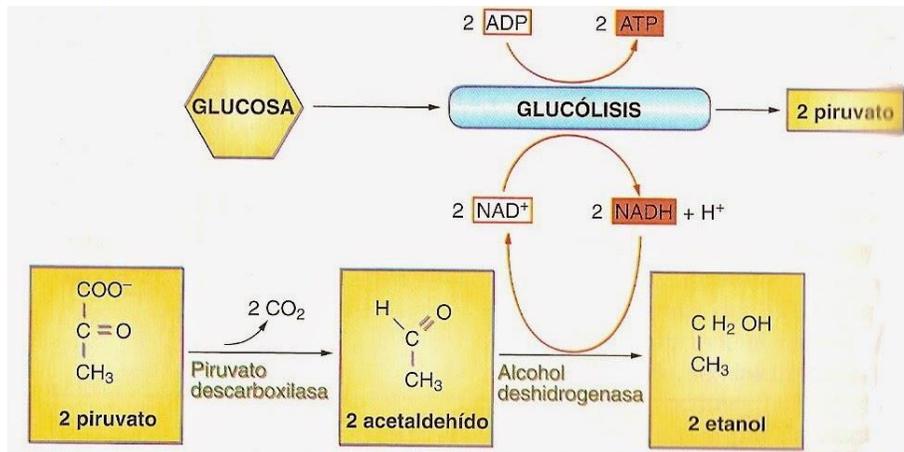


Figura 5. Proceso bioquímico de fermentación alcohólica (Villadsen, Nielsen y Lidén 2011).

Como se observa en la figura 5 el producto final es bioetanol y CO<sub>2</sub>, este último se desprende en forma gaseosa, la secuencia química se describe a continuación (Villadsen, Nielsen y Lidén, 2011):

- Glucólisis: La glucosa es transformada en 2 moléculas de ácido pirúvico (CH<sub>3</sub>-CO-COO<sup>-</sup>) y se produce 2 moléculas de ATP, a partir de 2 ADP
- Posteriormente los 2 piruvatos entran en la fase fermentativa y con la actuación de la enzima piruvato descarboxilasa, la cual desprende 2 moléculas de CO<sub>2</sub>, son transformados a 2 moléculas de acetaldehído (CH<sub>3</sub>-CHO).
- Finalmente, por la actuación del alcohol deshidrogenasa, hace que las 2 moléculas de NADH + una molécula de H<sup>+</sup>, se desprendan las 2 moléculas de NAD<sup>+</sup> y se obtiene 2 moléculas de etanol (CH<sub>3</sub>-CH<sub>2</sub>O<sup>-</sup>).

### **e. Procesos de destilación**

El bioetanol obtenido de una conversión de fermentación requiere mayor separación y purificación de etanol del agua a través de un proceso de destilación. La destilación es un proceso implementado para separar el etanol del agua en función de sus diferentes volatilidades. Este proceso consiste simplemente en hervir la mezcla de etanol. Porque el punto de ebullición del agua (100 °C) es más alto que el punto de ebullición del etanol (78.3 °C), el etanol se convertirá en vapor antes del agua. Por lo tanto, el agua puede separarse mediante un procedimiento de condensación y destilado de etanol recapturado a una concentración del 95% (Limayem y Ricke, 2012).

Wootton y Mello (2004) informan un método basado en la evaporación laminar para la purificación continua de líquidos volátiles utilizando el sistema microfluídico consta de tres secciones, a saber: de calentamiento, de condensación y de separación. Como en un proceso de destilación estándar, la disposición propuesta permitió que una mezcla de volátiles se separara de acuerdo con sus presiones de vapor. El rendimiento del dispositivo, utilizando una mezcla 50:50 de acetonitrilo y dimetilformamida (DMF). Se demostró que el dispositivo logró un aumento de nueve veces en la concentración de acetonitrilo en un único proceso de destilación.

Wang, Liu, Yang, Ju y Fu (2016) proponen que un chip de destilación microfluídico integrado para separar una solución mixta de etanol-metanol-agua en sus componentes constituyentes. El chip comprendía un canal de serpentina, una zona de ebullición, una zona de calentamiento y una cámara de recogida enfriada llena de agua desionizada. Al realizar el proceso de destilación, la solución de etanol-metanol-agua fue conducida a través del canal de serpentina y en la cámara de recogida por medio de un gas portador de nitrógeno. Los resultados mostraron que el sistema propuesto logró un promedio de metanol eficiencia de destilación del 97%. Además, los

resultados obtenidos para el metanol demostraron que las concentraciones de dos vinos comerciales de fruta estaban en buen acuerdo con los obtenidos usando una técnica de macroescala.

Adiche y Sundmacher (2010) formulan un novedoso micro separador que combina el principio de destilación de la membrana de gas de barrido y los canales microfluídicos para la separación de mezclas binarias de metanol-agua. Notablemente, la membrana en el dispositivo propuesto no estaba destinada a ofrecer selectividad para ninguna especie en particular con respecto a otra, sino simplemente para servir como una separación física entre el líquido y la fase gaseosa. El rendimiento del dispositivo se evaluó 10 experimentalmente utilizando diferentes contactares de membrana de líquido / vapor / gas, concentraciones de metanol (5 ~ 70 % en peso), temperaturas de alimentación (40-65 °C), tasas de flujo de alimentación (hasta 30 mL/min) y tasas de flujo de gas portador (hasta 600 mL/min). Los resultados mostraron que el efecto de polarización de temperatura se localizó tanto en el canal de alimentación como en el canal de permeado y se relacionó fuertemente con la velocidad de flujo de alimentación y el caudal de gas inerte, respectivamente. Los autores concluyeron que el dispositivo propuesto tenía una gran ventaja sobre los procesos de destilación de membranas existentes ya que permitía la separación de mezclas acuosas con diversas concentraciones de metanol que variaba de baja a alta.

### **2.2.12 Biorreactor**

Los biorreactores son elementos esenciales en todo proceso biológico; aún más son considerados el núcleo de los bioprocesos. También proporciona las condiciones óptimas para satisfacer los requisitos del sistema biológico (enzima, microorganismo o célula) y garantizar un alto rendimiento del bioproceso (Zhong, 2011).

En las últimas décadas, se han desarrollado diferentes configuraciones de biorreactores para realizar la etapa de hidrólisis enzimática. Los siguientes párrafos presentan una descripción de los biorreactores más comunes, incluidas sus ventajas y desventajas, así como los principales aspectos a tener en cuenta en cada uno de los tipos de biorreactores:

**a. Tanque agitado**

Son los más comunes utilizados para llevar a cabo procesos enzimáticos. Este tipo de biorreactores consta de un recipiente cilíndrico con uno o más impulsores (agitadores) ensamblados con un motor externo. En modo discontinuo, STBR supone que la mezcla es intensa y uniforme, de modo que las condiciones operativas relacionadas con las reacciones bioquímicas y la concentración biocatalítica son homogéneas dentro del reactor. El diseño de estos biorreactores puede incluir deflectores que evitan la generación de vórtice y mejoran las condiciones de mezcla entre el sustrato y la enzima (García, Santos y Gómez, 2011).

## **b. Biorreactores de membrana (MBR)**

Son reactores que se combinan una reacción biológica con un método de separación. Se emplean membranas especializadas que actúan como barreras físicas, oponen a la movilización de toda la masa, y que permite el paso de uno o más especies. Esta configuración de biorreactor se considera una alternativa prometedora para desarrollar hidrólisis enzimática. En la sacarificación de celulosa, membranas específicas permiten el inmovilización de las enzimas, que permanecen atrapados físicamente en la membrana debido a su naturaleza impermeable (Zhong, 2011; Yang, Ding y Chen, 2006).

### **2.2.13 Metodología de superficie de respuesta**

Algunas veces hay experimentos con los que no se obtienen las respuestas buscadas o el nivel de mejoras logrado no es suficiente por lo que es necesario experimentar de manera secuencial hasta encontrar el nivel de mejoras deseado. En este caso, después de una primera etapa experimental quizá sea necesario desplazar la región experimental (moverse de lugar) en una dirección adecuada, o bien, explorar en forma más detallada la región experimental inicial. La forma de realizar ambas cosas son parte de la llamada metodología de superficie de respuesta (MSR).

La MSR es la estrategia experimental y de análisis que permite resolver el problema de encontrar las condiciones de operación óptimas de un proceso, es decir, aquellas que dan por resultado “valores óptimos” de una o varias características de calidad del producto.

Los diseños de superficie de respuesta se clasifican con base en el grado del modelo que se pretende utilizar, existiendo los diseños de primer orden y los de segundo orden.

Según Teófilo y Ferreira (2006) afirman que la metodología de superficie de respuesta (MSR) se compone de un grupo de técnicas matemáticas y estadísticas que se basan en el ajuste de los modelos empíricos a los datos experimentales obtenidos en relación con el diseño experimental; esto se puede hacer tomando polinomios lineales o cuadrados funciones para describir el sistema estudiado y en consecuencia para explorar las condiciones experimentales hasta la optimización. Antes de aplicar el MSR, es necesario elegir el diseño experimental que da información sobre el número de experimentos que se llevarán a cabo en el experimento región en estudio, así mismo el diseño experimental para modelos de primer orden como el diseño factorial se puede usar cuando el conjunto de datos no muestra curvatura, pero si la función de respuesta no puede ser descrito por funciones lineales, los otros diseños para superficies de respuesta cuadrática se deben utilizar como factorial de tres niveles, Box-Behnken, compuesto central y diseños Doehlert, etc. (Bezerra, Santelli, Oliveira, Villar y Escaleira 2008).

Según Rodrigues y Lema (2012) revelan que los diseños experimentos de superficie de respuesta tiene como finalidad de: i) optimizar parámetros y procesos de ingeniería, ii) mejorar la calidad final de producto, iii) minimizar los costos y tiempo y iv) maximizar el rendimiento.

#### 2.2.14 Diseño de Box-Behnken

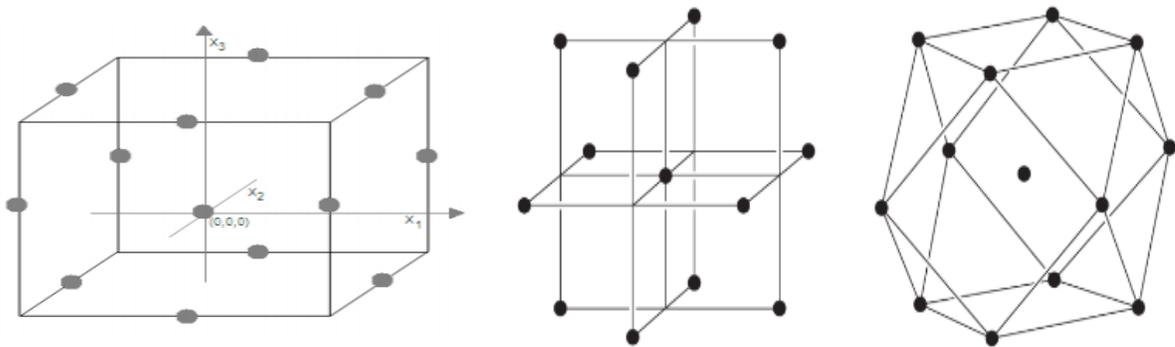


Figura 6. Representación gráfica de Box-Behnken

Este diseño se aplica cuando se tienen tres o más factores, y suelen ser eficientes en cuanto al número de corridas. Es un diseño rotatable o casi rotatable que se distingue porque no incluye como tratamientos a los vértices de la región experimental los puntos de este diseño se ubican en medio de las aristas del cubo centrado en el origen.

El diseño de Box-Behnken es una buena alternativa porque tiene un número competitivo de tratamientos, además de que por su construcción los puntos de prueba no son extremosos, en el sentido de que cualquiera de ellos siempre tiene, uno de los factores en su nivel intermedio. Además, en ocasiones es deseable o incluso necesario que los factores se ensayen sólo a tres niveles. Los diseños de Box-Behnken son diseños factoriales incompletos a tres niveles en los que los puntos experimentales están escogidos especialmente para permitir una estimación eficiente de los coeficientes de un modelo de segundo orden (Box., Hunter y Hunter, 2008). La Tabla 6 contiene los diseños de tres factores y 3 representaciones del diseño para tres factores, Figura 2.

Tabla 6

*Niveles de diseño de Box-Behnken*

<b>Diseño de 3 factores</b>		
<b>±1</b>	±1	0
<b>±1</b>	0	±1
<b>0</b>	±1	±1
<b>0</b>	0	0

## **2.3 Aspecto de responsabilidad**

### **2.3.1 Social**

Los impactos salariales demuestran cuánto aumentarían los salarios en los sectores industriales debido a la implementación de la política de bioenergía. Los impactos globales de la producción de bioetanol dependen de la materia prima para la producción de biocombustible. Los impactos salariales producidos por el bioetanol son los más altos en la etapa de la agricultura, aproximadamente el 30 al 45% de los impactos totales. Los menores impactos son la compensación directa de los empleados en las fábricas de etanol. Al comparar el salario pagado a empleados, toda la cadena de suministro de bioetanol tiene salarios más altos que la gasolina convencional. Este aspecto se debe según la tasa salarial en el sector agrícola de cada país. Además para los trabajadores agrícolas no es necesario contar con un nivel académico (Oficina Nacional de Estadística [NSO], 2013).

### **2.3.2 Ambiental**

Kumar et al. (2007) consideran que el etanol representa un ciclo cerrado de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) porque después de quemar etanol, el  $\text{CO}_2$  liberado se recicla en material vegetal debido a que las plantas usan  $\text{CO}_2$  para sintetizar celulosa durante el ciclo de fotosíntesis. El proceso de producción de etanol solo utiliza energía de fuentes de energía renovables; no se agrega  $\text{CO}_2$  neto a la atmósfera, lo que hace que el etanol sea una fuente de energía ambientalmente beneficiosa, además la toxicidad de las emisiones de etanol es menor que las fuentes de petróleo (Wyman y Hinman, 1990). El etanol derivado de la biomasa es el único combustible líquido para el transporte que no contribuye al efecto del gas de efecto invernadero

(GEI) Foody (1981; como se citó en Kumar et al., 2007).

Según Kumar et al. (2007) consideran que a medida que aumenta la demanda de energía, el suministro global de combustibles fósiles causa daños a la salud humana y contribuye a la emisión de GEI, también alarmaron a la sociedad al ver la seguridad del suministro de petróleo y el impacto negativo de los combustibles fósiles en el medio ambiente, particularmente en las emisiones de GEI. Demirbas (2007) manifiesta que la reducción de la contaminación por GEI es la principal ventaja de utilizar la conversión de biomasa en etano. El etanol contiene 35% de oxígeno que ayuda a completar la combustión del combustible, por lo tanto, reduce las emisiones de partículas que representan un peligro para la salud de los seres vivos (Osman , 2015).

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Lugar de ejecución

El trabajo de investigación se desarrolló en el Laboratorio Centro de Investigación en Tecnologías de Alimentos (CITAL), Centro de Investigación en Ciencia de Alimentos (CICAL) y Laboratorio de química, con coordenadas: este 299441.48m., norte 8673652.57 m., zona 18L. en la Universidad Peruana Unión, ubicada en la ciudad de Lima, Perú.

La cascarilla de arroz se adquirió en la comunidad Santa Rita del departamento de Madre de Dios, Perú, en la provincia de Tambopata tal como se observa en la Figura 3.

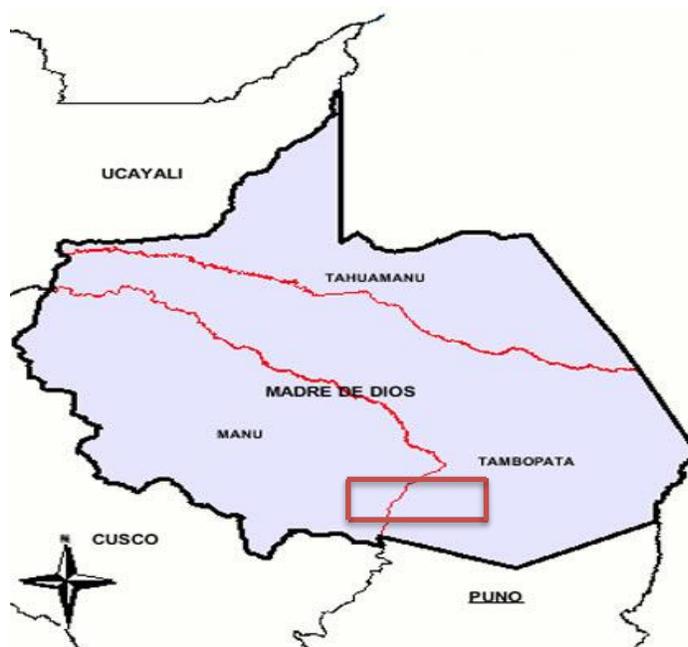


Figura 7. Mapa del distrito de Tambopata

### **3.2. Materiales y equipos**

#### **a. Materiales en el proceso del pre-tratamiento**

- Materia prima: Cáscara de arroz
- Vasos precipitados
- Cucharilla espátula
- Pastilla magneto
- Papel aluminio
- Cerámica
- Baldes
- Tina
- papel parafilm
- Escurreidor

#### **b. Equipos en el proceso del pre-tratamiento**

- Un molino manual
- Un molino mecánico tipo willye
- Una balanza clásica
- pH-métro
- Balanza analítica
- Agitador magnético

- Estufa
- Cocinilla
- Autoclave

**c. Reactivos Equipos en el proceso del pre-tratamiento**

- Solución de hidróxido de sodio (NaOH), hipoclorito de sodio al 5%
- Agua destilada fría y caliente

**d. Materiales en el proceso de hidrólisis Ácida**

- Muestra deslignificada (cascarilla pre-tratada)
- Cerámica
- Papel aluminio
- Recipiente cilíndrica de 18 lt
- Cucharillas
- Escurridor
- Papel parafilm

**e. Equipos en el proceso de hidrólisis Ácida**

- Estufa
- Vasos precipitados
- pH-métro

**f. Reactivos en el proceso de hidrólisis Ácida**

- Ácido sulfúrico al 1, 5.5 y 10 %

- Agua destilada

**g. Materiales en el proceso de hidrólisis ácida**

- Celulosa (Cascarilla de arroz hidrolizada)
- papel parafilm
- Caja poliestireno expandido
- Sacarosa blanca
- Fosfato de amonio
- Cucharillas
- Placas petri
- Foco LED
- Termómetro

**h. Equipos en el proceso de hidrólisis ácida**

- 5 biorreactores laboratorial
- Cocinilla
- Refractómetro
- Ph-métro
- Conductímetro
- Refrigeradora
- Balanza analítica
- Agua Destilada

**i. Materiales en el proceso destilación**

- Refrigerante
- Pinzas
- Nuez
- Soporte
- Balones de destilación
- Pinzas
- Mangeras
- Pastillas magnetos
- Vaselina
- Goteros color ámbar
- Embudo
- Papel parafilm
- Pipetas
- Placas petry
- Balanza digital

**j. Procesamiento de datos**

- STATISTICA v 13.13
- Excel
- Calculadora
- Laptop

### 3.3. Diseño experimental para la obtención de bioetanol

Se realizó un flujograma para el rendimiento de biocombustible etanol a partir de residuos lignocelulósicos de la cáscara de arroz (*Oryza sativa*), se aprecia en la Figura 8.

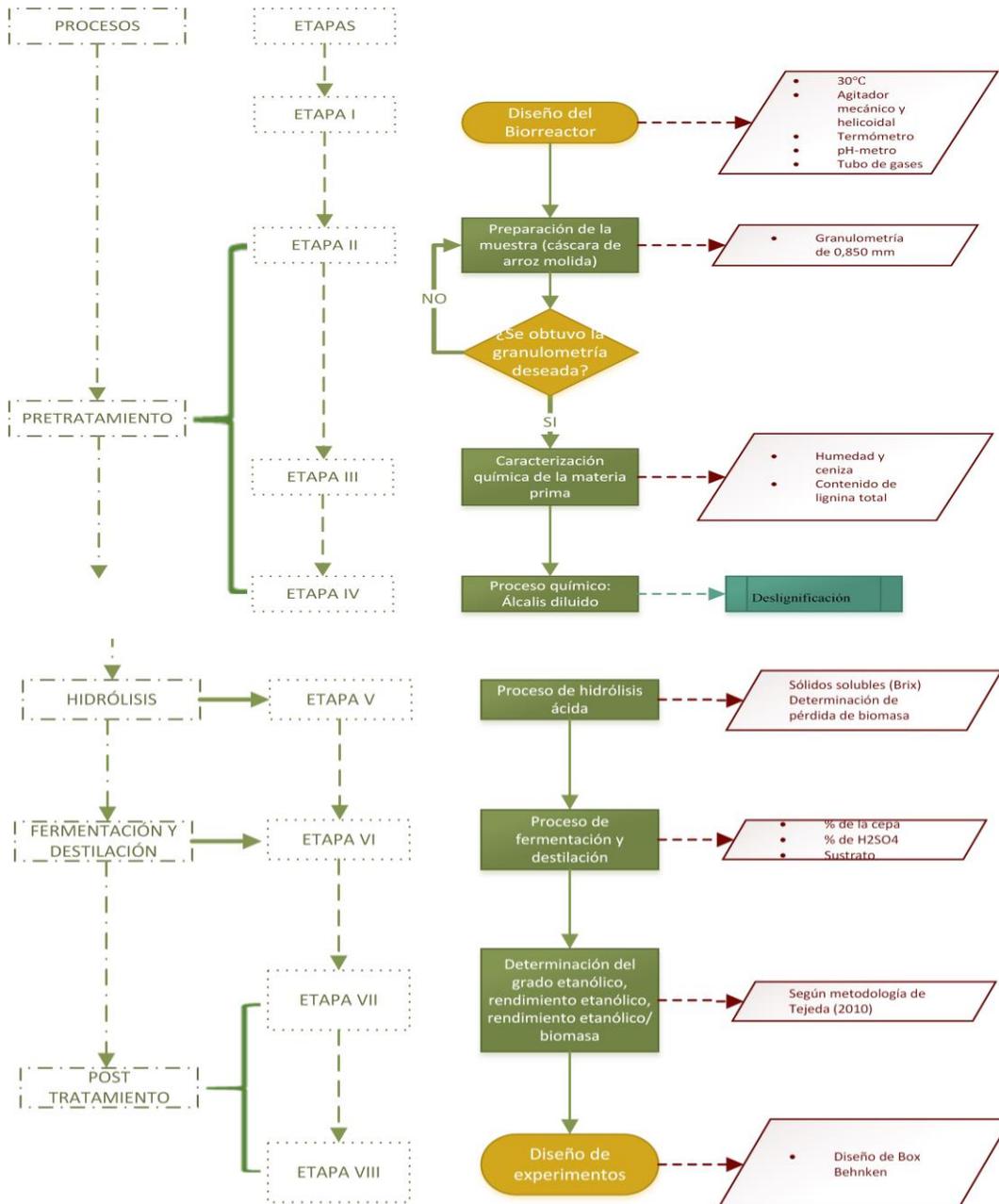


Figura 8. Flujograma para el rendimiento de biocombustible etanol a partir de residuos lignocelulósicos de la cáscara de arroz (*Oryza sativa*)

A continuación, se describe el flujograma:

### **3.3.1. Diseño del biorreactor**

Se diseñaron los biorreactores de material pyrex, sumado se construyó una caja térmica de poliestireno expandido (tecnopor), con la finalidad de uniformizar la temperatura entre 35 a 40 °C en el proceso de fermentación, ya que las *Saccharomices cereviciae* tienen un óptimo desarrollo en las temperaturas mencionadas.

Se construyó 5 biorreactores con capacidad de 1200 mL en anaerobiosis para temperatura de resistencia hasta 40°C, las medidas del biorreactor fueron las siguientes: su diámetro de 10.95 cm, tiene 4 orificios: un orificio es para la llave de paso, que se encuentra a 3 cm de la base, con diámetro de 2.5 cm, sirve para sacar las muestras; el segundo y el tercer agujero se encuentran a 10 cm de la base, los dos orificios con 1 cm de diámetro, uno de ellos es para la manguera de recolección, el otro para la termómetro y el cuarto orificio se ubica en la tapa en donde es para el conducto de dióxido de carbono, este conducto cuenta con 10 cm de altura de igual forma de vidrio pyrex, tal como se observa en la Figura 9.

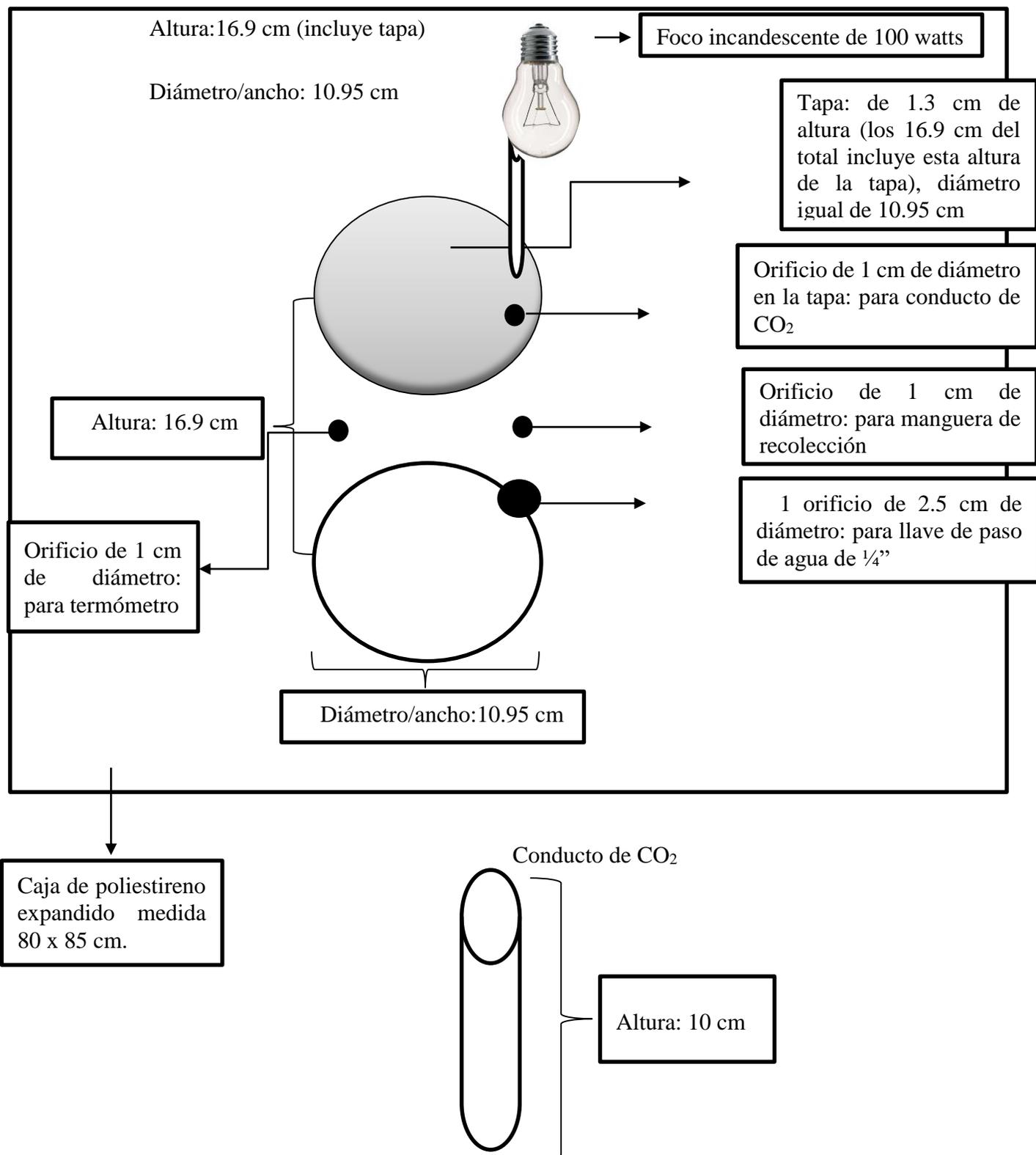


Figura 9. Diseño del biorreactor

### 3.3.2. Pretratamiento mecánica

#### a. Trituración mecánica

Se realizó la trituración mecánica de la materia prima de 2.5 kg. se molió en un molino manual, para posibilitar la reducción de la cristalinidad de la celulosa, luego en un molino mecánico tipo willye se adquirió una granulometría de 0,80 mm. (Sun, Tomkinson, Ma, & Liang, 2000). Finalmente se pesó la materia prima molida obteniendo 2.326 kg.

#### b. Caracterización fisicoquímica de la materia prima

**Cenizas:** Se realizó la determinación de cenizas por método de Calcinación, en donde se tomó las muestras de 2gr. se analizó vertidas en recipientes de crisol, a continuación, se pesó la capsula vacía registrándose su peso, se rotuló cada crisol. El crisol con la muestra se llevó a la mufla para calcinación a 550 C° durante 2 dos horas, después de este tiempo se retiró la capsula y se dejó enfriar en un desecador durante 20 minutos, a continuación, se agregó gotas de agua hasta humedecer la muestra y luego se llevó nuevamente a la mufla para calcinación a 550 C° durante una hora, nuevamente se retiró las muestras y se dejó enfriar en los desecadores durante 20 minutos, a continuación se pesó el crisol con la muestra seca y se registró el peso, por último se realizó cálculos matemáticos para hallar el porcentaje de ceniza (AOAC, 2000).

**Humedad:** Se determinó la humedad llevándose a cabo en placas petri previamente tarada, se pesó en la balanza analítica 2 gr de la muestra, a continuación, se colocó la placa petri con la muestra en la estufa a 105 C° durante 3 horas, pasado ese tiempo se sacó de la estufa la placa petri y se llevó de inmediato al desecador por 30 minutos, luego se procedió a pesar en la balanza analítica.

Registrando los datos y posteriormente hacer los cálculos para el porcentaje de humedad (AOAC, 2000).

**c. Químico: Alcalis diluidos**

Para tener una mejor eliminación de la lignina se realizó el pretratamiento químico-álcalis diluido, se utilizó la metodología de Hoyos y Pérez (2005), como se citó en Monsalve, Medina y Ruiz, 2006).

- Primeramente, se pesó 200 g. de cascarilla de arroz molido con el equipo tipo willye.
- Se introdujo agua destilada en un vaso de precipitación de un (1) l., al mismo vaso se agregó hidróxido de sodio al 15 %.
- Por consiguiente, se añadió la muestra al vaso y se agitó manualmente con una cucharilla por 20 minutos.
- Finalmente se dejó en reposo por 4 días.
- Pasado los 4 días se colocó en una cocinilla para que ebulle durante 7 horas.
- Luego se lavó con agua destilada hasta tener un pH neutro (7), para ello se utilizó un envase y penieras de tela.
- Después se dejó secar en la estufa por 24 horas a 80 °C.
- Al cabo se pesó toda la muestra deslignificada, adquiriendo un total de 1.179 kg. después se guardó en bolsas herméticas hasta el siguiente proceso.

### **3.3.3. Hidrólisis ácida**

Para la hidrólisis ácida se utilizó la metodología de Sun y Cheng (2002), una vez tenido el total de la muestra deslignificada, se dividió en tres partes equitativas es decir en cada división había 393 gr que se trabajó a diferentes concentraciones de ácido: 1, 5.5 y 10 % (v/v), guardando una misma relación de  $\frac{1}{5}$  (p/v). A continuación, se describe de a cada uno de las concentraciones:

#### **a. Concentración al 5.5 %**

Se trabajó en 2 vasos de precipitación de 2.5 l. c/u, en los cuales se introdujo 196 gr de sustrato deslignificado con 980 ml de agua destilada y 53.9 ml de ácido sulfúrico puro.

#### **b. Concentración al 1.0 %**

Se trabajó en 4 vasos de precipitación de 1.5 l. c/u, en los cuales se introdujo 98 gr de sustrato deslignificado con 492 ml de agua destilada y 4.92 ml de ácido sulfúrico puro.

#### **c. Concentración al 10 %**

Se trabajó en 2 vasos de precipitación de 2.5 l. c/u, en los cuales se introdujo 196 g de sustrato deslignificado con 980 mL de agua destilada y 98 mL de ácido sulfúrico puro.

El procedimiento de hidrólisis ácida se describe a continuación:

- Primero se colocó el agua destilada, luego el ácido sulfúrico por consiguiente se agita con una cucharilla para tener una mezcla homogénea, a continuación, se puso el sustrato deslignificado nuevamente se agita manualmente por 10 minutos, seguidamente se dejó en reposo por 48 horas cada muestra, mediante este proceso se consiguió la celulosa
- Se lava la celulosa independientemente de cada concentración hasta tener un pH neutro, al igual que en el pretratamiento alcalis.

- Luego la celulosa se esparció en diferentes cerámicas poniendo como base papel aluminio, a continuación, se puso en la estufa por 24 horas a 80 °C.
- Por último, se pesó toda la celulosa, adquiriendo un total por cada concentración de 377 g, después se guardó en bolsas herméticas a temperatura 2 °C hasta empezar a trabajar el proceso de fermentación.

### 3.3.4. Pérdida de biomasa

Para la pérdida de biomasa se realizó bajo la metodología de Abril (2010):

$$Pérdida\ de\ biomasa = P_i - P_f$$

Donde:

P<sub>i</sub>: Peso (Kg) inicial antes de la trituración

P<sub>f</sub>: Peso (Kg) final de la cascarilla deslignificada que se usa en hidrólisis ácida

### 3.3.5. Proceso de fermentación

Para el proceso de fermentación se utilizó la metodología de Cuadrado y Vélez (2006), citado por Tejeda et al., (2010).

- Se trabajó con 5 biorreactores anaerobios de vidrio pyrex con una capacidad 1200 ml.
- Además, se construyó una caja de tecnopor con las siguientes medidas: ancho: 80 cm., largo: 80 cm, con altura de 64cm y con espesor de 5 cm.
- Se realizó 18 muestras, a cada biorreactor se agregó 1 L de agua destilada, luego se adicionó levadura *Saccharomyces cerevisiae* comercial (cepa), como nutrientes se agregó a cada muestra 0.25 % de fosfato de amonio (NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, se agitó hasta que todo esté diluido, por último, se

agregó la celulosa y se agitó uniformemente con una cucharilla, luego se rotuló y se dejó bien tapado por 74 horas

Durante el proceso de fermentación se realizó 10 análisis de 4 parámetros tales como: pH, conductividad eléctrica, temperatura y sólidos solubles; el horario del análisis son las siguientes: el primer análisis se realizó después de 3 horas, luego de 6, 9, 23, 26, 29, 54, 57, 60 y 74 horas. Sin embargo, cada el análisis de cada parámetro fue hecho por triplicata. Después de 74 horas se realizó el proceso de destilación.

### 3.3.6. Proceso de destilación

Para el proceso de fermentación se utilizó la metodología de Cuadrado y Vélez (2006, citado por Tejeda et al., 2010), que se trabajó a diferentes concentraciones del sustrato (p/v) y concentración de cultivo, y como nutrientes se utilizó 0.25 % de fosfato  $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ . El proceso de destilación se realizó a 90 °C en un destilador, para llegar a dicha temperatura se usó una cocinilla, finalmente se determinó el rendimiento y el grado alcohólico.

### 3.3.7. Determinación del grado etanólico

Para determinar el grado alcohólico, utilizando las siguientes fórmulas:

$$\rho_{\text{solución}} = \frac{m}{V} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 1)}$$

$$GA = \frac{\rho_{\text{solución}} - \rho_{\text{agua}}}{\rho_{\text{etanol}} - \rho_{\text{agua}}} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 2)}$$

Tabla 7

*Densidad del agua*

T (°C)	Densidad de agua (g/mL)	T (°C)	Densidad de agua (g/mL)	T (°C)	Densidad de agua (g/mL)
16	0.998976	20	0.998235	24	0.997326
17	0.998808	21	0.998023	25	0.997073
18	0.998628	22	0.9978	26	0.996811
19	0.998437	23	0.997568	27	0.996549

### 3.3.8. Determinación del rendimiento etanólico

Una vez destilado se pesó la cantidad del bioetanol obtenido en la etapa de destilación, y se determinó los gramos de etanol producido por cada litro de solución fermentada (Tejeda, 2010):

$$Rend. \text{ etanólico} = \text{Grado etanólico} * \text{Densidad real del etanol} \dots \text{(Ecuación 3)}$$

### 3.3.9. Determinación del rendimiento etanólico/biomasa

Una vez obtenido el rendimiento etanólico, se determinó los miligramos de etanol por cada gramo de cáscara (Tejeda, 2010):

$$Rend. \frac{\text{etanólico}}{\text{biomasa}} = \text{Rend. Etanólico (mg)} / (\text{Fibra celulósica} * 1000) \dots \text{(Ecuación 4)}$$

Dónde: 1000 es un factor de corrección

## 3.4. Diseño de experimentos de superficie de respuesta

### 3.4.1. Diseño estadístico

Se determinó el grado etanólico, rendimiento etanólico y rendimiento etanólico/biomasa del biocombustible etanol, para deducir las condiciones óptimas y modelar la superficie de

respuesta de segundo orden. Se empleó el diseño de experimentos (DOE) Box-Behnken de 3 factores, 1 bloque, 15 ejecuciones, + 3 puntos centrales por bloque, dando un total de 18 puntos experimentales. Los rangos y niveles de las variables independientes utilizados en la forma codificada y no codificada se muestran en la Tabla 8.

Los experimentos se ejecutaron en orden aleatorio y el tratamiento de datos por análisis de varianza, para comparar el efecto de los tratamientos en la obtención del bioetanol con relación a las variables dependientes. Las variables dependientes (Y) fueron generadas en modelos de función lineal, cuadrático e interacción y los datos experimentales ajustados al modelo polinomial de segundo orden como se muestra en la siguiente ecuación (Rodrigues y Lemma, 2012).

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^2 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^2 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i \neq j=1}^2 \beta_{ij} X_i X_j \dots \dots \dots (\text{Ecuacion 5})$$

Donde Y es la variable dependiente predicha (grado etanolico, rendimiento)

$\beta_0$ : Coeficiente intercepto,

$\beta_i$ ,  $\beta_{ii}$  y  $\beta_{ij}$ : Coeficientes del modelo lineal, cuadrático e interacción, respectivamente,

$X_i$  y  $X_j$ : Valores codificados de las variables independientes.

Tabla 8

*Diseño de experimentos Box-Behnken de 3 factores, 1 bloque, 15 ejecuciones, +3 puntos centrales por bloque*

Trat.	Variables independientes					
	Codificados			No codificados		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> (g/100mL)	Ácido Sulfúrico (%)	Fibra celulósica (g/100mL)
1	-1	-1	0	0.1	1.0	3.5
2	1	-1	0	0.3	1.0	3.5
3	-1	1	0	0.1	10.0	3.5
4	1	1	0	0.3	10.0	3.5
5	-1	0	-1	0.1	5.5	2.0
6	1	0	-1	0.3	5.5	2.0
7	-1	0	1	0.1	5.5	5.0
8	1	0	1	0.3	5.5	5.0
9	0	-1	-1	0.2	1.0	2.0
10	0	1	-1	0.2	10	2.0
11	0	-1	1	0.2	1.0	5.0
12	0	1	1	0.2	10	5.0
13	0	0	0	0.2	5.5	3.5
14	0	0	0	0.2	5.5	3.5
15	0	0	0	0.2	5.5	3.5
16	0	0	0	0.2	5.5	3.5
17	0	0	0	0.2	5.5	3.5
18	0	0	0	0.2	5.5	3.5

### 3.4.2. Análisis estadístico

Se analizó por ANOVA a 95 % de intervalo de confianza, diagrama de Pareto, y superficie de respuesta. Para el tratamiento de datos se empleó el programa estadístico Statistica 13.3.

### 3.5. Diseño del trabajo de investigación

El proceso se desarrolló de acuerdo al diagrama mostrado en la Figura 10.

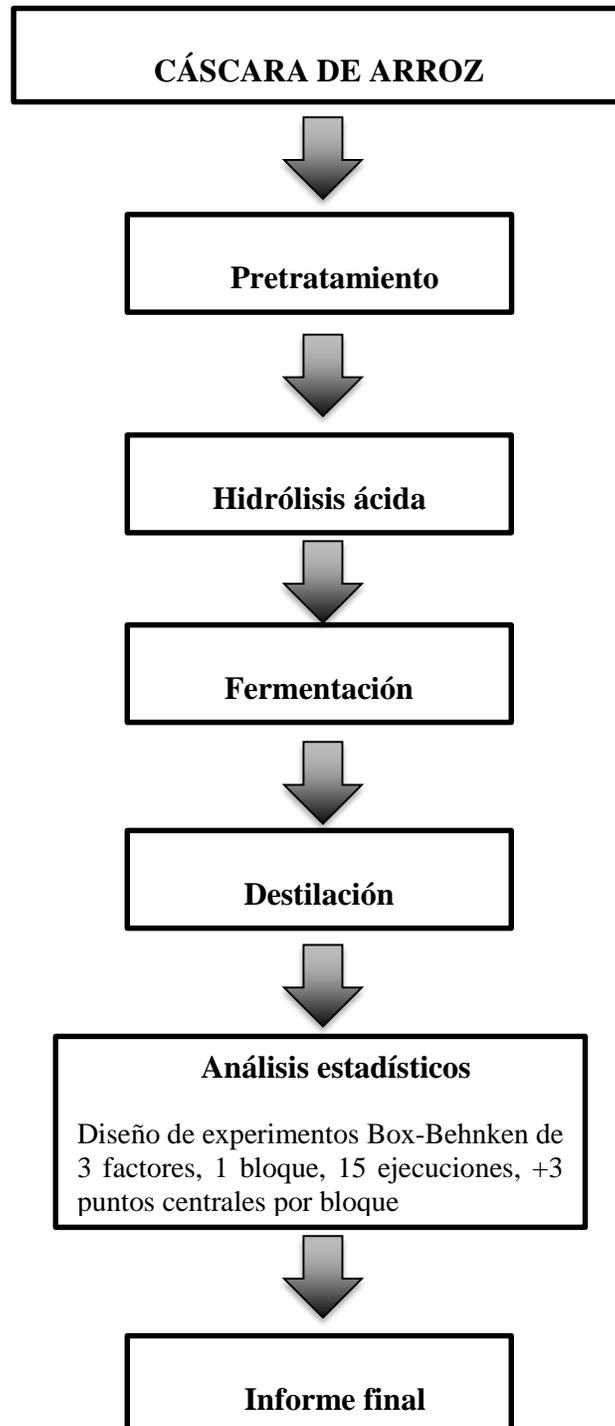


Figura 10. Esquema del diseño del trabajo de investigación

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 4.1. Resultados de las propiedades físicoquímicas de fibras celulósicas

Las cascarillas de arroz tuvieron un promedio de 1.0 cm de largo, 0.2 cm de ancho y 0.1 cm de espesor, la cascarilla molidas tuvieron un promedio de 0.8 mm, esto corrobora con lo que mencionó Arcelus (2015), donde el tamaño de las partículas después de la molienda es de 0.2 -2 mm.

Sin embargo, una reducción de partícula del tamaño de malla inferior a 40 aproximadamente de 0.42 mm de biomasa, tiene un efecto mínimo en los rendimientos del hidrólisis (Sánchez, Gutiérrez, Muñoz y Rivera, 2010), debido a ello se realiza dos pretratamientos, para tener un mejor rendimiento en los procesos próximos ya que es un paso esencial que hace hincapié en la eliminación de red de lignina. Así mismo se realizaron de los granos gastados por los cerveceros, de la fábrica de cerveza en Reino Unido a partir de un proceso de elaboración de la cerveza de alta gravedad usando 100% de cebada malteada, a continuación, se secó durante la noche a 105 °C y se muele hasta un tamaño de partícula de menos de 212  $\mu\text{m}$ . para asegurar la homogeneidad (Stuart, Smart y Cook 2015).

#### 4.1.1. Cenizas de la cáscara

Tabla 9

*Análisis de cenizas de la cascara de arroz*

Muestra	Sin moler (%)	Molida (%)
1	13.07	12.90
2	14.08	13.53
3	12.96	12.49
Promedio	13.37	12.97
SD	0.61	0.52

La cascarilla de arroz fue encestado a un análisis químico de cenizas. Los resultados se muestran en la Tabla 9, donde se apreció que el contenido de cenizas es de 12.49 a 13.53 %, se encuentra inferior a los valores reportados por (Shiun, Abdul, Rafidah y Hashim, 2012) de 20.26 % y dentro de los valores caracterizados citados por (Ríos, Luzardo, Santos y Gutiérrez, 2019) de 12.81 a 17.51 %. La diferencia es debido a la composición química de una materia prima de biomasa, también puede influir en su eficiencia de combustión. El alto contenido de álcali (Na y K) y la presencia de fósforo en la cáscara de arroz y la paja de arroz pueden disminuir la temperatura de fusión de la ceniza (Ríos, Luzardo, Santos y Gutiérrez, 2019). Así mismo los resultados de la Tabla 9 no solo corresponde a la cáscara de arroz sino también a la paja de arroz que es 10-17 % (Shiun, Abdul, Rafidah y Hashim, 2012).

#### 4.1.2. Humedad de la cáscara

**Tabla 10**

*Resultados de humedad de la cascara de arroz*

Muestra	Sin moler (%)	Molida (%)
1	8.26	5.71
2	7.87	9.30
3	8.92	7.07
Promedio	8.35	7.36
SD	0.53	1.81

La cascarilla de arroz absorbe poca humedad del medio, por ello se aminora los intercambios hídricos hasta quedar en equilibrio con la humedad relativa del aire. El análisis presentado en la Tabla 10. estos datos son similares con los análisis que realizó Prada y Cortés (2010) en Colombia, teniendo de 6.95 a 8.51 %, así mismo tiene similitud con los resultados obtenidos por la Universidad de California de 7.87 a 8.92 %.

## 4.2. Resultado pérdida en la biomasa

Tabla 11

Resultado de la pérdida en la biomasa

<b>Etapas de la biomasa</b>	<b>Biomasa en las etapas(Kg)</b>	<b>Biomasa en las etapas (%)</b>	<b>Porcentaje de pérdida en las etapas (%)</b>
<b>Biomasa inicial</b>	2.500	100.00	-
<b>Biomasa molida</b>	2.326	93.04	6.96
<b>Biomasa con químico-álcalis diluido</b>	1.179	47.16	45.88
<b>Pérdida Total</b>	1.321		52.84

Al apreciar la tabla 11 se observa una pérdida parcial del 6.96 % hasta la trituración mecánica de la biomasa, sin embargo, posterior al pretratamiento químico-álcalis diluido se suma a la pérdida de biomasa un 45.88 %, dato adecuado mencionado por Danish, et al (2015); Marrugo, Valdés y Chejne (2016).

### 4.3. Resultado de la variable grado etanólico

Tabla 12

Resultados en la variable dependiente Grado etanólico del diseño de experimentos Box-Behnken

Trat.	Variables independientes			Variables dependientes
	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> (g/100mL)	Ácido Sulfúrico (%)	Fibra celulósica (g/100mL)	Grado Etanólico (cc)
1	0.1	1.0	3.5	23.9
2	0.3	1.0	3.5	24.7
3	0.1	10	3.5	15.0
4	0.3	10	3.5	16.5
5	0.1	5.5	2.0	30.8
6	0.3	5.5	2.0	31.8
7	0.1	5.5	5.0	26.9
8	0.3	5.5	5.0	34.1
9	0.2	1.0	2.0	23.7
10	0.2	10	2.0	16.4
11	0.2	1.0	5.0	25.0
12	0.2	10	5.0	18.3
13	0.2	5.5	3.5	41.2
14	0.2	5.5	3.5	40.2
15	0.2	5.5	3.5	40.4
16	0.2	5.5	3.5	37.9
17	0.2	5.5	3.5	40.4
18	0.2	5.5	3.5	40.7

Para la materia prima; típicamente plantas tales como trigo, remolacha azucarera, maíz, paja, y madera, para el procesos de fermentación se utiliza microorganismos de azúcares como la más común la glucosa para una mejor producción de etanol, con una gama amplia de pH: 3.5-5, en dónde se obtuvo una cantidad significativa de grado etanólico (41 % p/v), sin embargo en el

presente trabajo se usó levadura *Saccharomyces cerevisiae* para la fermentación con un rango de pH 3.357 – 3.07 en donde se obtuvo el grado etanólico como máximo de 41.2 %, se obtiene mayor grado etanólico porque se adicionó un nutriente más aparte de la sacarosa que es el sulfato de sodio de 0.25 % a cada biorreactor. En la Universidad Federal de Alagoas (UFAL) afirmaron que en Maceió de Brasil, utilizaron las cáscaras de coco verde, el pretratamiento alcalino que dio una solubilización eficaz de la lignina en un 80 % convirtiendo así las fibras de coco en una materia prima factible para la producción de bioetanol, además el proceso de hidrólisis fue enzimático, dando lugar a una eficiencia de etanol del 59.6 %, en el cual con la cascara de arroz se ha tenido de 41.2 %. Finalmente, estos resultados muestran que las cáscaras de coco verde son una excelente alternativa para la producción de energía renovable (Santos, Souza, Farias y Garcia 2016).

Además-Prasad, Singh y Joshi (2007) afirmaron que la temperatura es fundamental ya que los organismos mesófilos y la mayoría de los agentes de fermentación son cómodos dentro de la temperatura de 29.85 – 37.85 °C para obtener más del 40% de grado etanólico.

Tabla 13

*Análisis de Variancia (ANOVA) para Grado etanólico*

<b>Factor</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de Libertad</b>	<b>Media cuadrática</b>	<b>Fisher</b>	<b>p-valor</b>
(1)Saccharomyces cerevisiae (g/100mL)(L)	14.023	1	14.0228	10.7542	0.02197
Saccharomyces cerevisiae (g/100mL)(Q)	110.012	1	110.0121	84.3694	0.000257
(2)Ácido sulfúrico (%) (L)	119.973	1	119.9726	92.0081	0.000209
Ácido sulfúrico (%) (Q)	990.609	1	990.6094	759.7077	0.000001
(3)Fibras de celulosa (g/100mL)(L)	0.306	1	0.3059	0.2346	0.64863
Fibras de celulosa (g/100mL)(Q)	77.503	1	77.5032	59.4379	0.000586
Interacción 1L con 2L	0.109	1	0.1092	0.0837	0.783915
Interacción 1L con 3L	9.279	1	9.2789	7.1161	0.044476
Interacción 2L con 3L	0.099	1	0.0986	0.0756	0.794285
Falta de Ajuste	8.324	3	2.7748	2.128	0.21527
Error Puro	6.52	5	1.3039		
Suma de cuadrados total	1501.073	17			
R: 99.01 %					
R adj: 97.89 %					

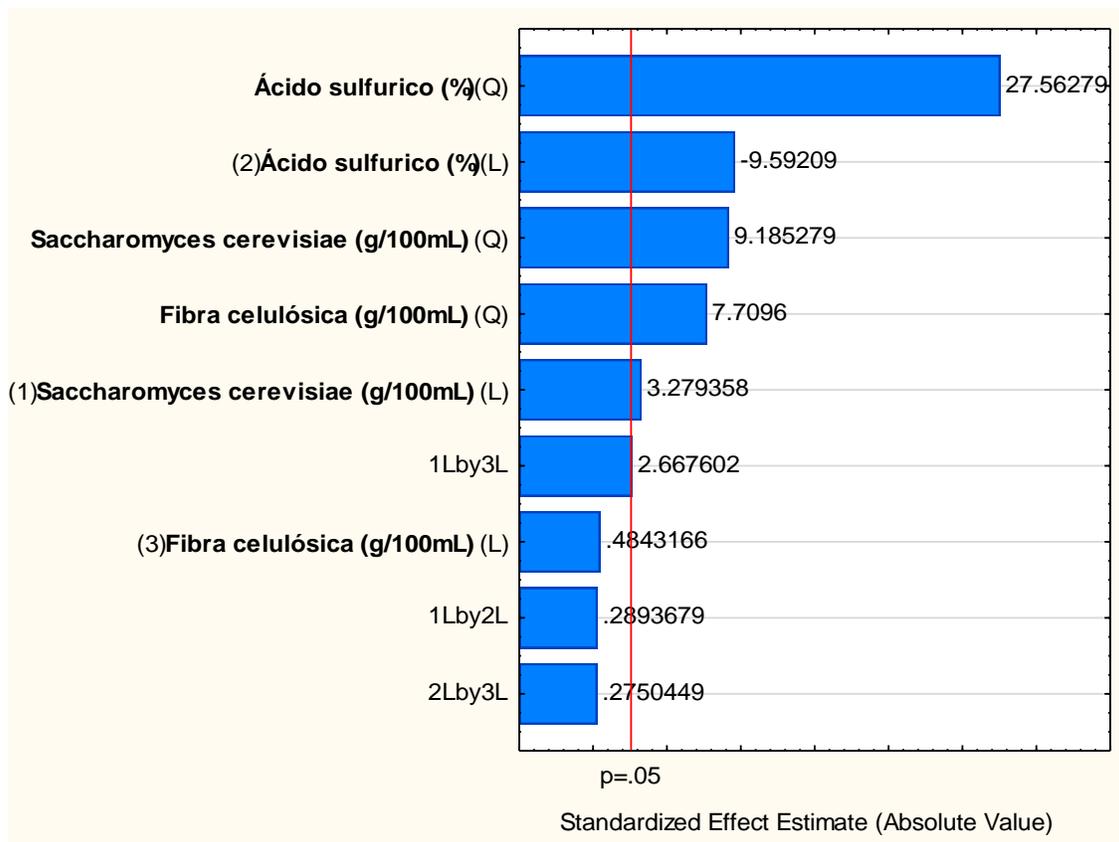


Figura 11. Diagrama de Pareto para grado etanólico

La Tabla 13 particiona la variabilidad de grado etanólico en valores separados para cada uno de los efectos, prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su media cuadrática contra un estimado del error experimental. El ANOVA muestra para R (coeficiente de determinación) fue de 99.01 %, y la falta de ajuste indica no significativa, quiere decir que el ajuste del modelo matemático estadísticamente tiene un efecto significativo para el grado etanólico.

En este caso, 6 efectos tienen un p-valor menor que 0.05 indicando que estos efectos sí afectan significativamente a la variable dependiente del grado etanólico con un nivel de confianza del 95 %.

El efecto con mayor significancia para el grado etanólico, fue de parámetros (Variable independientes) del ácido sulfúrico, con 27.57% como se observa en la Figura 11.

Tabla 14

Tabla de coeficiente de regresión de la variable grado etanólico

Factor	Coeficiente Regresión	error estándar error puro	t(5)	p	-0.95% Coeficiente Límite	+0.95% Coeficiente Límite
Mean/Interc.	-15.829	4.86591	-3.2531	0.022618	-28.337	-3.321
(1) Saccharomyces cerevisiae (g/100mL)(L)	176.525	26.84372	6.576	0.00122	107.521	245.529
Saccharomyces cerevisiae (g/100mL)(Q)	-502.107	54.66429	-9.1853	0.000257	-642.626	-361.588
(2) Ácido sulfúrico (%)(L)	7.169	0.49826	14.3884	0.000029	5.888	8.45
Ácido sulfúrico (%)(Q)	-0.744	0.02699	-27.5628	0.000001	-0.813	-0.675
(3) Fibra celulósica (g/100mL)(L)	11.083	1.93924	5.7152	0.002292	6.098	16.068
Fibras celulósica (g/100mL)(Q)	-1.873	0.24295	-7.7096	0.000586	-2.498	-1.249
1L by 2L	0.367	1.26878	0.2894	0.783915	-2.894	3.629
1L by 3L	10.154	3.80633	2.6676	0.044476	0.369	19.938
2L by 3L	0.023	0.08459	0.275	0.794285	-0.194	0.241
<b>R: 99.01</b>						
<b>R adj: 97.89</b>						

Los modelos matemáticos reducidos de segundo grado generados por el coeficiente de regresiones significativos para el grado etanólico se muestran en las siguientes ecuaciones:

Para la interacción de *Saccharomyces cerevisiae* (g/100 mL) y Ácido sulfúrico (%):

$$G_e = -15.83 + 176.52S - 502.11 S^2 + 7.17 A - 0.74A^2 \dots\dots\dots \text{(Ecuación 6)}$$

Para la interacción de *Saccharomyces cerevisiae* (g/100 mL) y Fibra celulósica (g/100mL):

$$G_e = -15.83 + 176.52 S - 502.11 S^2 + 11.08 F - 1.87 F^2 + 10.15 SF \dots\dots \text{(Ecuación 7)}$$

Para la interacción de Ácido sulfúrico (%) y Fibra celulósica (g/100mL):

$$G_e = -15.83 + 7.17 A - 0.74A^2 + 11.08 F - 1.87 F^2 \dots\dots\dots \text{(Ecuación 8)}$$

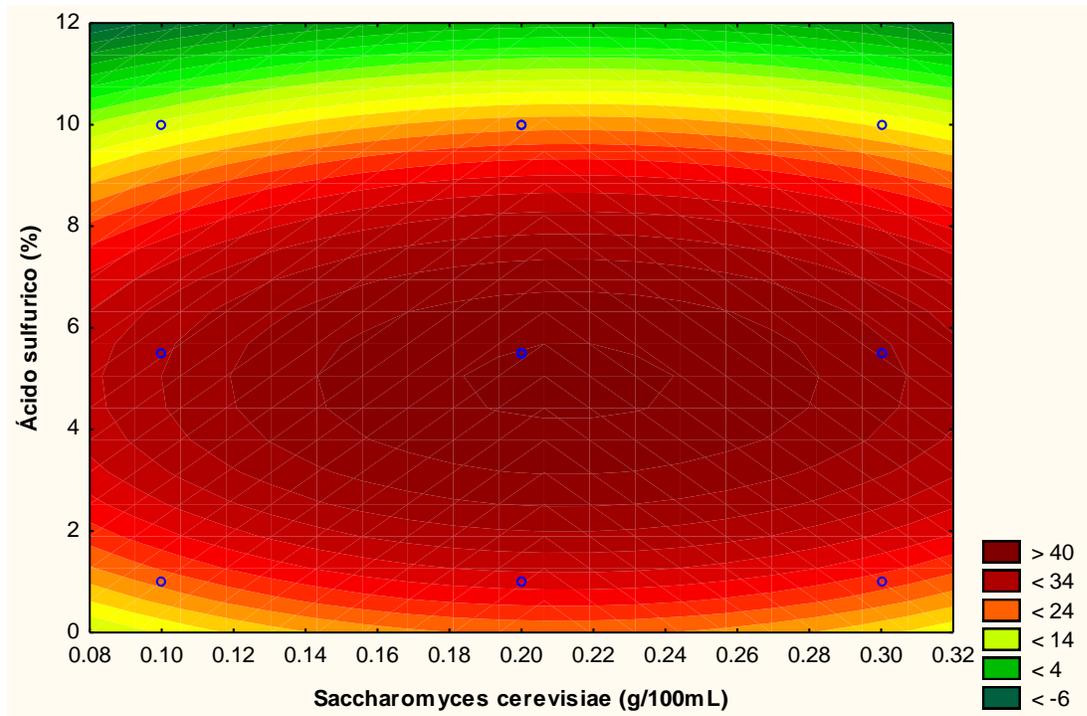
Donde:

G<sub>e</sub>: Grado etanólico

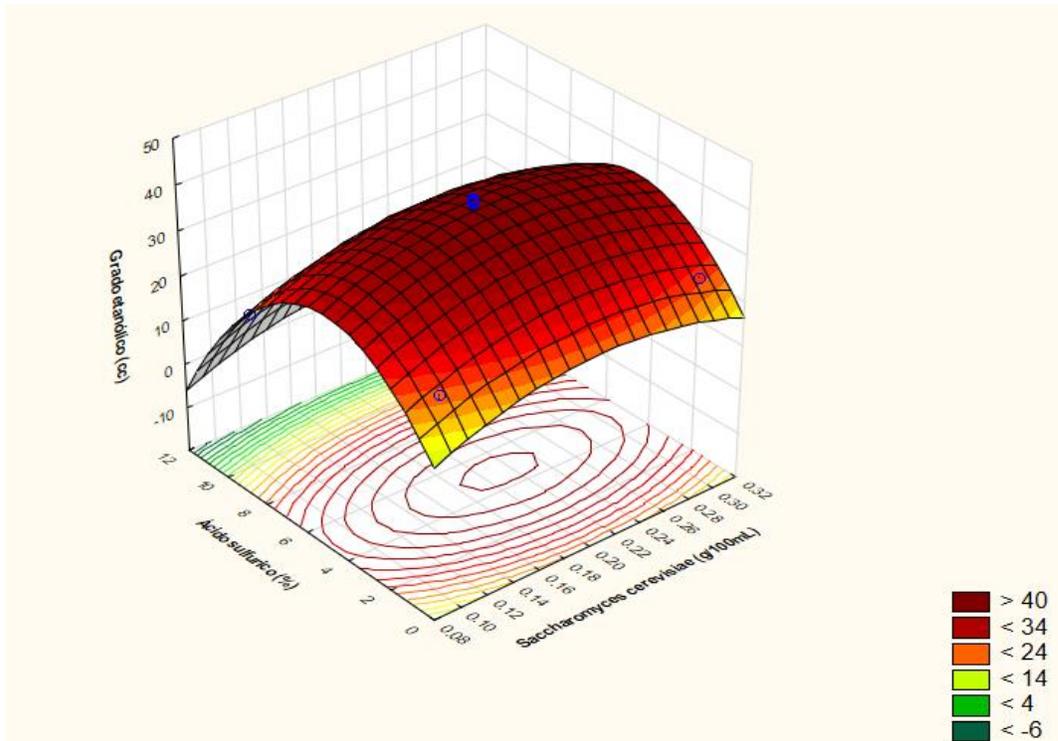
S: *Saccharomyces cerevisiae* (g/100ml)

A: Ácido sulfúrico (%)

F: Fibra celulósica (g/100mL)



**Figura 12.** Superficie de respuesta, variable Grado etanólico, variables independientes Ácido sulfúrico (%) vs Saccharomyces cerevisiae (g/100ml)



**Figura 13.** Superficie de respuesta, variable Grado etanólico, variables independientes Ácido sulfúrico (%) vs Saccharomyces cerevisiae (g/100ml)

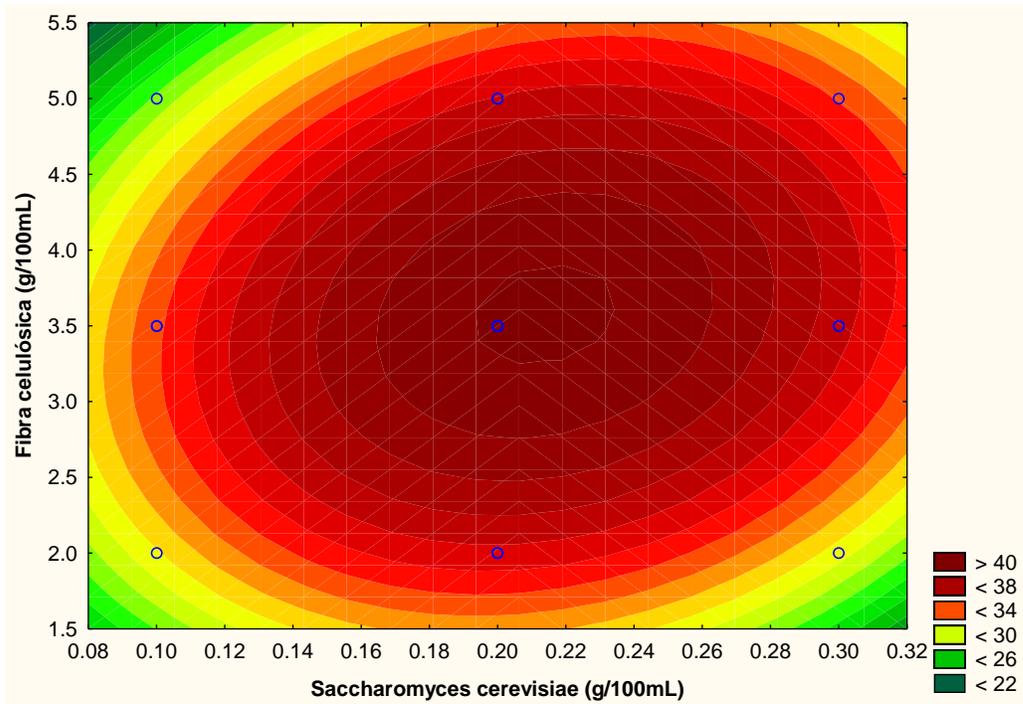


Figura 14. Superficie de respuesta, variable Grado etanólico, variables independientes Fibra celulósica (g/100mL) vs *Saccharomyces cerevisiae* (g/100ml)

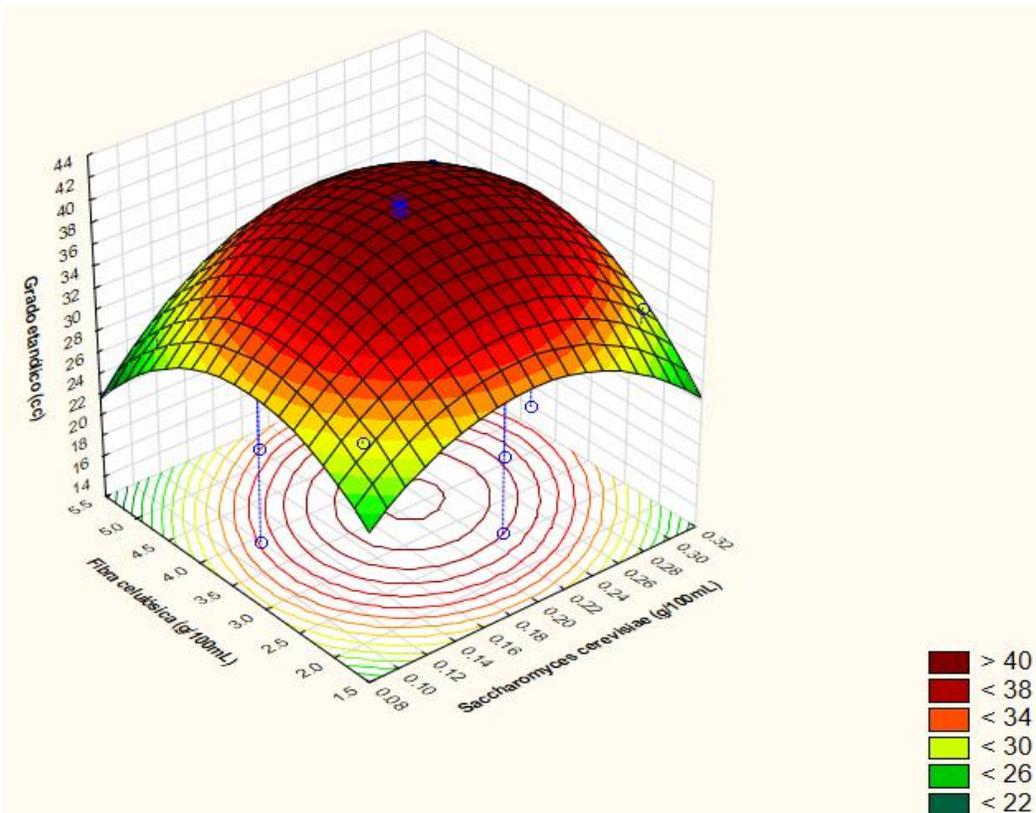


Figura 15. Superficie de respuesta, variable Grado etanólico, variables independientes Fibra celulósica (g/100mL) vs *Saccharomyces cerevisiae* (g/100ml)

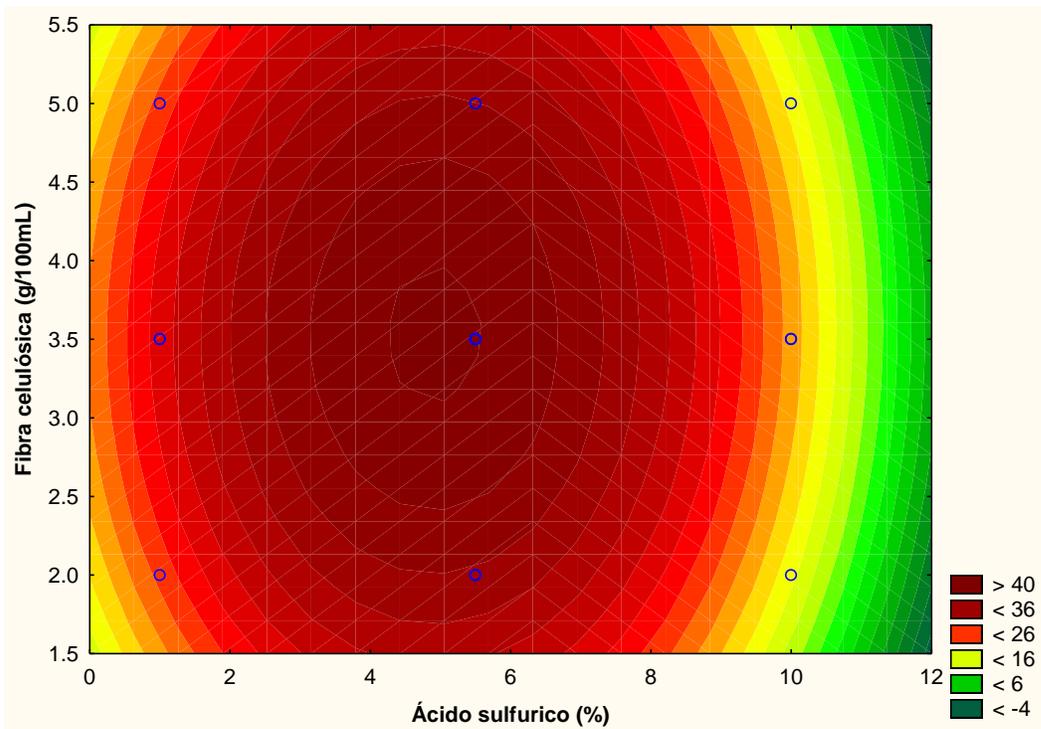


Figura 16. Superficie de respuesta, variable Grado etanólico, variables independientes Fibra celulósica (g/100mL) vs Ácido sulfúrico (%)

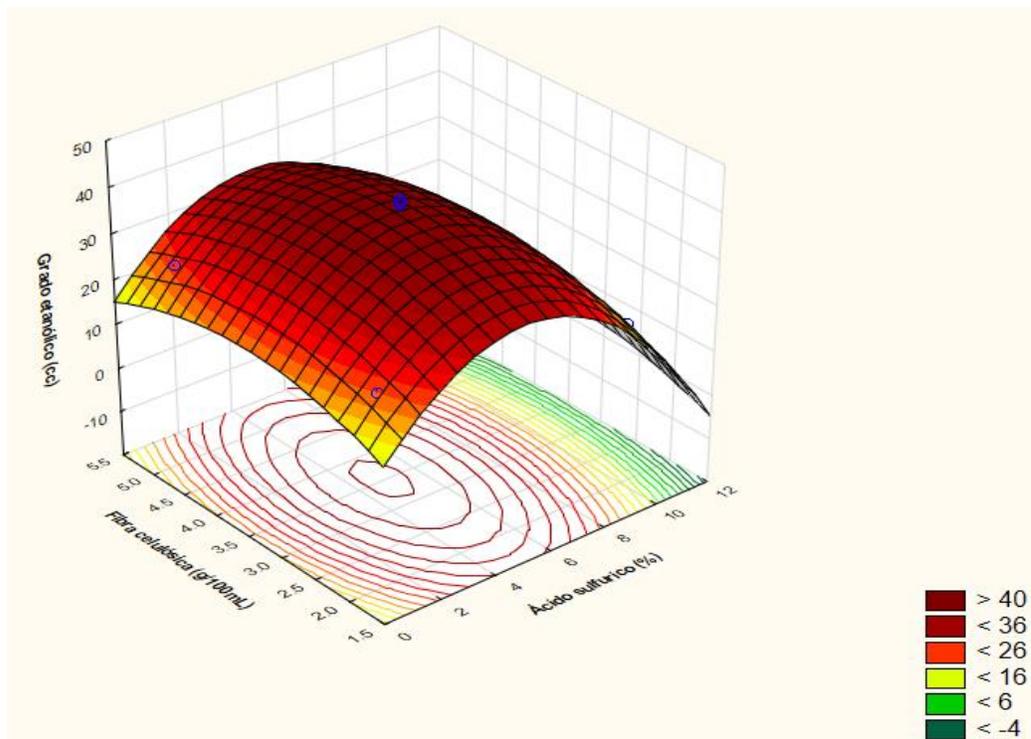


Figura 17. Superficie de respuesta, variable Grado etanólico, variables independientes Fibra celulósica (g/100mL) vs Ácido sulfúrico (%)

En las Figura 12 y 13 se observan que a una concentración de 3.5 g/100mL de fibra celulósica y concentraciones de intervalos de 0.15 – 0.28 g/100mL de *Sachharomyces cerevisiae* y 3.5 – 6.3 % (v/v) de Ácido Sulfúrico se obtiene un Grado Etanólico (cc) mayor a 40 %.

En las Figura 14 y 15 indica con 0.165 – 0.26 g/100mL de *Sachharomyces cerevisiae* y 2.8 – 4.25 g/100mL de Fibras de celulosa se obtuvo un Grado Etanólico (cc) mayor a 40%.

En la figura 16 y 17 se aprecia con 3.2 – 6.8 % (v/v) de Ácido Sulfúrico y 2.4 – 4.5 g/100ml de Fibra celulósica se obtuvo un Grado Etanólico (cc) mayor a 40%.

#### 4.4. Resultado de la variable rendimiento etanólico

Tabla 15

*Resultados en la variable dependiente de rendimiento etanólico del diseño de experimentos* *Box- Behnken*

Trat.	Variables independientes			Variable dependiente
	Fibras de Celulosa (g/100ml)	Ácido Sulfúrico (%)	Fibra celulósica (g/100mL)	Rendimiento etanólico (g/L)
1	0.1	1	3.5	18.7
2	0.3	1	3.5	19.3
3	0.1	10	3.5	12.2
4	0.3	10	3.5	12.9
5	0.1	5.5	2	20.5
6	0.3	5.5	2	20.9
7	0.1	5.5	5	18.9
8	0.3	5.5	5	21.6
9	0.2	1	2	17.2
10	0.2	10	2	12.6
11	0.2	1	5	17.9
12	0.2	10	5	13.9
13	0.2	5.5	3.5	22.7
14	0.2	5.5	3.5	22.7
15	0.2	5.5	3.5	22.7
16	0.2	5.5	3.5	22.4
17	0.2	5.5	3.5	22.7
18	0.2	5.5	3.5	22.7

En la Tabla 15 se aprecia que los mayores resultados se valoraron en los puntos centrales, con 22.7 g/L para los ensayos 13, 14, 15, 17 y 18, y 22.4 g/L para el punto central del ensayo 16,

estos valores se respaldan con estudios hechos por (Zhu et al., 2006) quienes trabajaron con paja de trigo pretratada con álcali asistida por microondas, la concentración de etanol alcanzó 34.3 g/L en 72 h. Sin embargo, para la paja de trigo pretratada con álcali convencional, la concentración de etanol fue de solo 31,1 g/L después de 96 h. Esto indica que la SSF para la paja de trigo pretratada con álcali asistida por microondas tuvo mayor productividad y rendimiento de etanol.

En otra investigación realizada por (Tejada, Marimón, & Medina, 2014). Las concentraciones máximas de concentración de etanol alcanzadas fueron 9,32, 15,96 y 13,90 mg/L para las cáscaras de limón, naranja y mandarina respectivamente.

Por otro lado en la investigación de (Tejada et al., 2010) quienes trabajaron con cáscara de naranja y piña, Se observa una mayor producción de etanol para las cáscaras de naranja con respecto a las cáscaras de piña con un rendimiento de etanol de 13.981 g/L y 1.225 g/L, comparando con los resultados del rendimiento etanólico de los 18 ensayos, son valores coherentes con las investigaciones.

Tabla 16

ANOVA de la variable Rendimiento etanólico

Factor	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
(1) Saccharomyces cerevisiae (g/100mL)(L)	2.4091	1	2.4091	204.90	0.000030
Saccharomyces cerevisiae (g/100mL)(Q)	3.6538	1	3.6538	310.76	0.000011
(2) Ácido sulfúrico (%) (L)	57.5708	1	57.5708	4896.43	0.000000
Ácido sulfúrico (%) (Q)	156.5935	1	156.5935	13318.3	0.000000
				7	
(3) Fibras de celulosa (g/100mL)(L)	0.1240	1	0.1240	10.55	0.022743
Fibras de celulosa (g/100mL)(Q)	6.9616	1	6.9616	592.08	0.000002
Interacción 1L con 2L	0.0067	1	0.0067	0.57	0.483286
Interacción 1L con 3L	1.4105	1	1.4105	119.97	0.000110
Interacción 2L con 3L	0.0852	1	0.0852	7.25	0.043201
Falta de Ajuste	3.9072	3	1.3024	110.77	0.000054
Error Puro	0.0588	5	0.0118		
Suma de cuadrados total	248.5034	17			
<b>R: 98.4</b>					
<b>R adj: 96.6</b>					

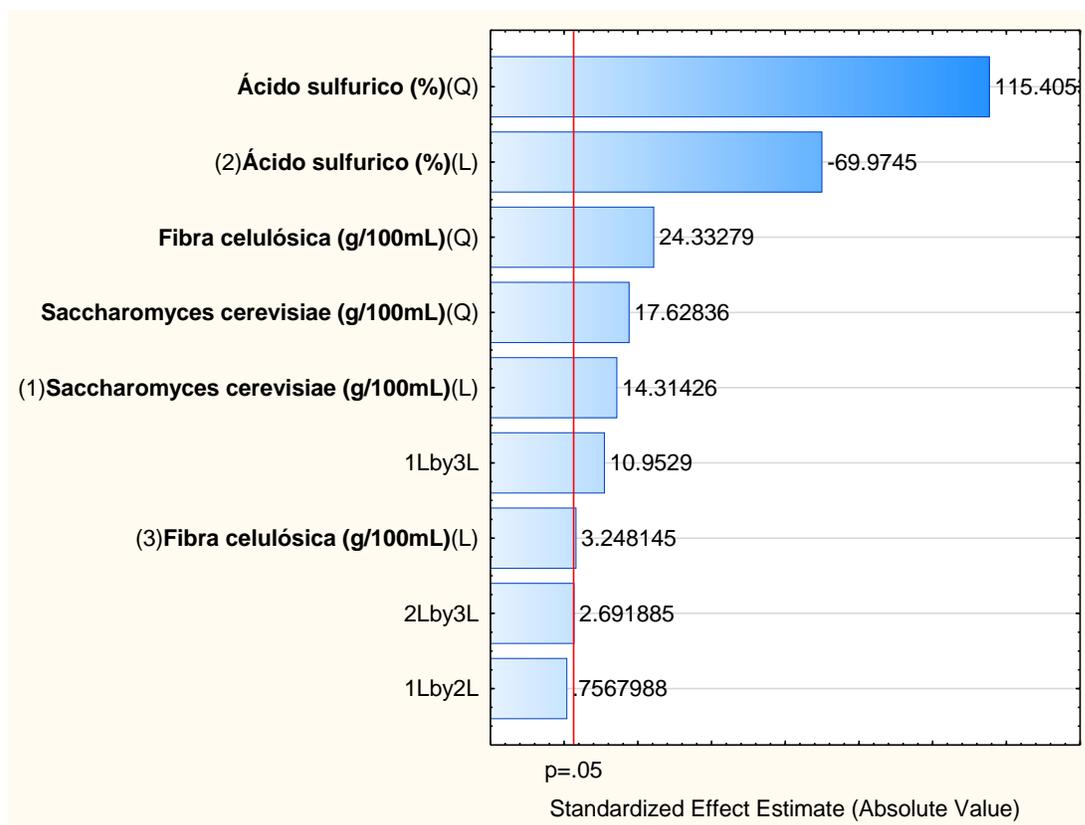


Figura 18. Diagrama de Pareto para variable Rendimiento etanólico

La Tabla 16 particiona la variabilidad del rendimiento en valores separados para cada uno de los efectos, prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su media cuadrática contra un estimado del error experimental. El ANOVA muestra para R (coeficiente de determinación) fue de 98.4 %, y la falta de ajuste indica significativa, quiere decir el ajuste del modelo matemático estadísticamente no tiene un efecto significativo para el grado etanólico

En este caso, 9 efectos tienen un p-valor menor que 0.05 indicando que estos efectos sí afectan significativamente al grado etanólico con un nivel de confianza del 95%.

El efecto con mayor significancia para el rendimiento, fue del parámetro (variable independiente) del ácido sulfúrico, con 115.40 %, así como se aprecia en la Figura 18.

Tabla 17

*Tabla de coeficiente de regresión de la variable rendimiento etanólico*

<b>Factor</b>	<b>Regresión</b>	<b>Error estándar error puro</b>	<b>t(5)</b>	<b>P</b>	<b>-0.95% Coeficiente Límite</b>	<b>+0.95% Coeficiente Límite</b>
Mean/Interc.	8.3583	0.462059	18.089	0.000009	7.171	9.5461
(1)Saccharomyces cerevisiae (g/100mL)(L)	27.7325	2.549036	10.880	0.000114	21.180	34.2850
Saccharomyces cerevisiae (g/100mL)(Q)	-91.5059	5.190832	-17.628	0.000011	-104.849	-78.1624
(2)Ácido sulfúrico (%) (L)	2.5641	0.047314	54.193	0.000000	2.442	2.6857
Ácido sulfúrico (%) (Q)	-0.2958	0.002563	-	0.000000	-0.302	-0.2892
(3)Fibras de celulosa (g/100mL)(L)	3.1019	0.184147	16.845	0.000013	2.629	3.5753
Fibras de celulosa (g/100mL)(Q)	-0.5614	0.023070	-24.333	0.000002	-0.621	-0.5021
Interacción 1L con 2L	0.0912	0.120481	0.757	0.483286	-0.219	0.4009
Interacción 1L con 3L	3.9588	0.361443	10.953	0.000110	3.030	4.8880
Interacción 2L con 3L	0.0216	0.008032	2.692	0.043201	0.001	0.0423
<b>R: 98.4 %</b>						
<b>R adj: 96.6 %</b>						

Los modelos matemáticos reducidos de segundo grado generado por el coeficiente de regresiones significativos para el rendimiento etanólico se muestran en las siguientes ecuaciones:

Para la interacción de *Saccharomyces cerevisiae* (g/100 mL) y Ácido sulfúrico (%):

$$R_e = 8.36 + 27.73 S - 91.51 S^2 + 2.56 A - 0.30 A^2 \dots\dots\dots \text{(Ecuación 9)}$$

Para la interacción de *Saccharomyces cerevisiae* (g/100 mL) y Fibra celulósica (g/100mL):

$$R_e = 8.36 + 27.73 S - 91.51 S^2 + 3.10 F - 0.56 F^2 + 3.96 SF \dots\dots\dots \text{(Ecuación 10)}$$

Para la interacción de Ácido sulfúrico (%) y Fibra celulósica (g/100mL):

$$R_e = 8.36 + 2.56 A - 0.30 A^2 + 3.10 F - 0.56 F^2 + 0.02 AF \dots\dots\dots \text{(Ecuación 11)}$$

**Donde:**

Re: Rendimiento etanólico

S: *Saccharomyces cerevisiae* (g/100ml)

A: Ácido sulfúrico (%)

F: Fibra celulósica (g/100mL)

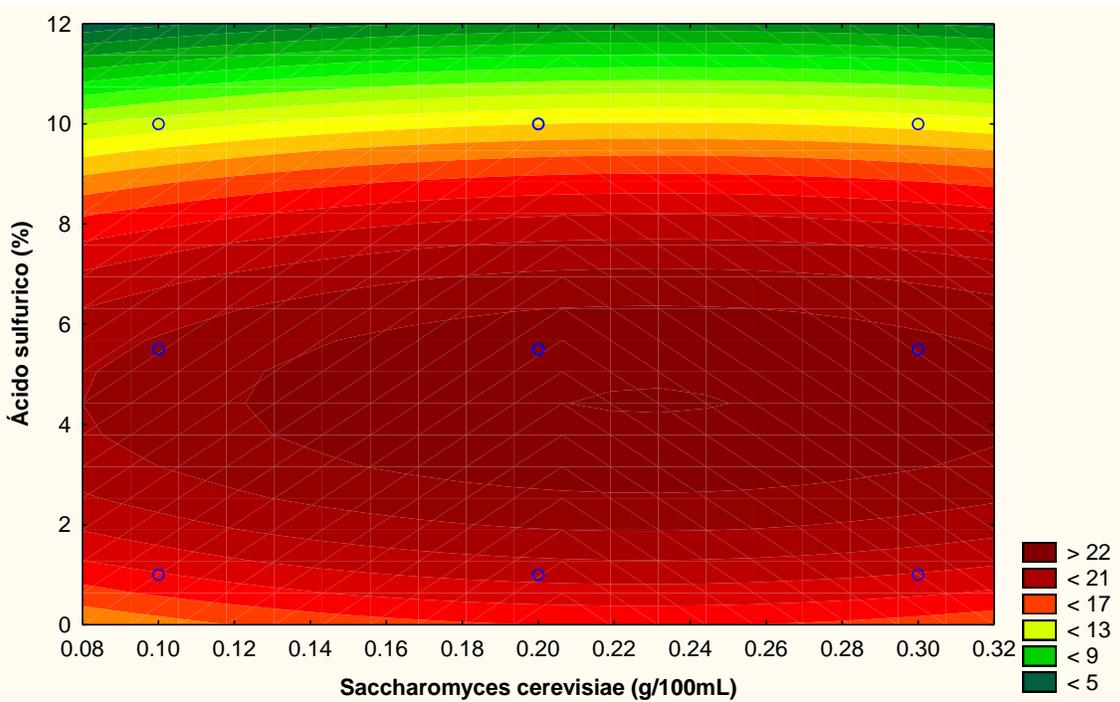


Figura 19. Superficie de respuesta, variable Rendimiento etanólico, variables independientes Ácido sulfúrico (%) vs Saccharomyces cerevisiae (g/100ml)

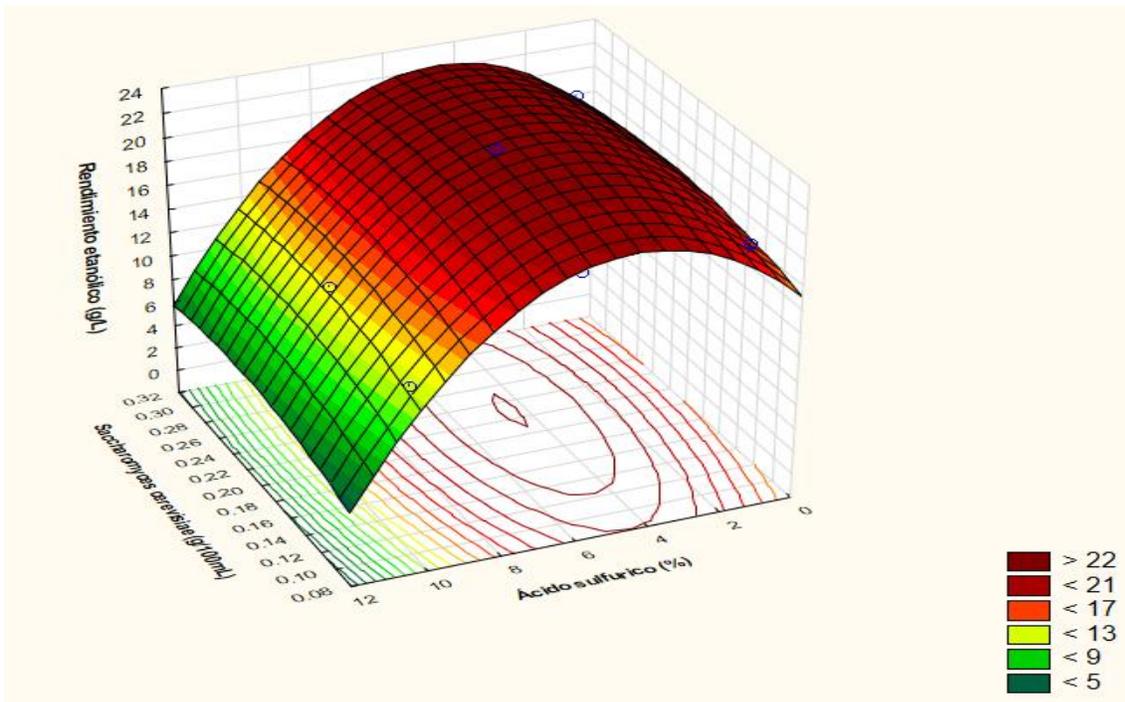


Figura 20. Superficie de respuesta, variable Rendimiento etanólico, variables independientes Ácido sulfúrico (%) vs Saccharomyces cerevisiae (g/100ml)

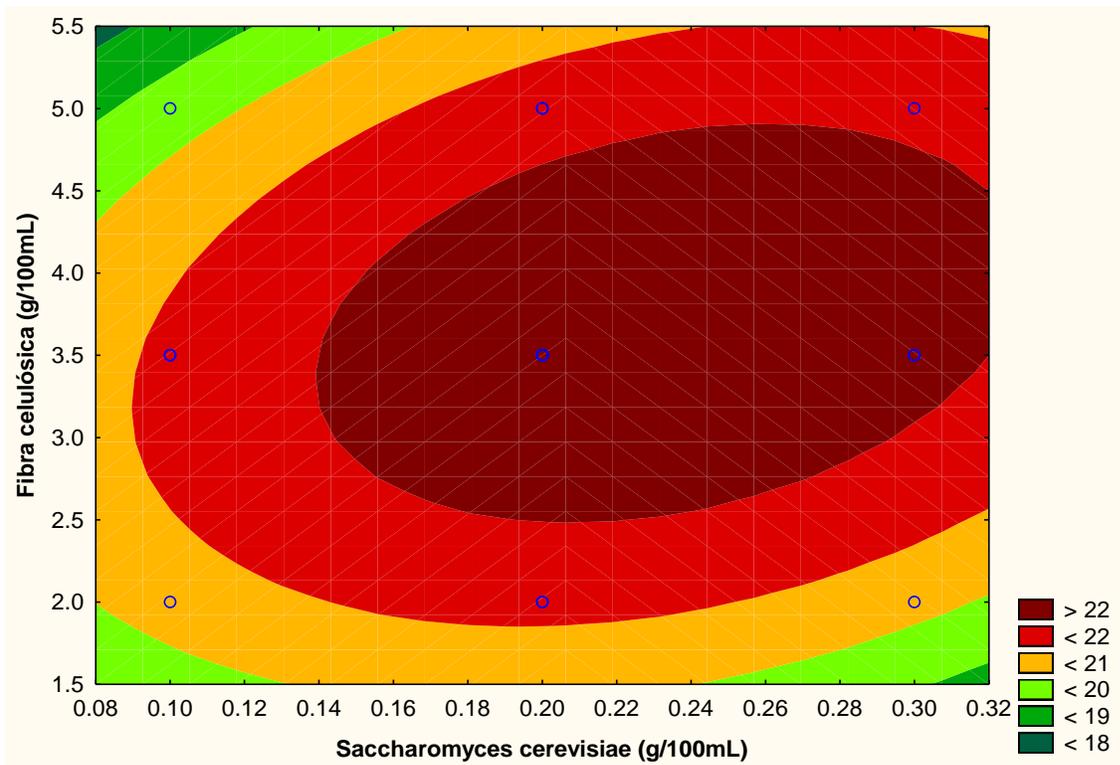


Figura 21. Superficie de respuesta, variable Rendimiento etanólico, variables independientes Fibra celulósica (g/100mL) vs Saccharomyces cerevisiae (g/100ml)

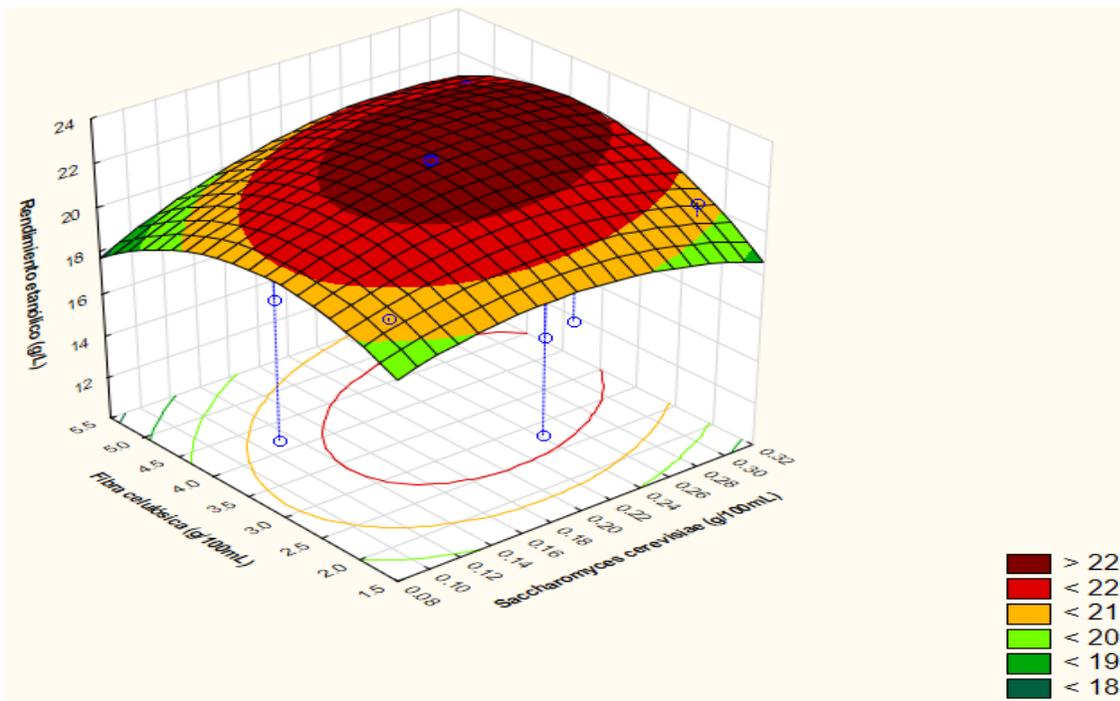


Figura 22. Superficie de respuesta, variable Rendimiento etanólico, variables independientes Fibra celulósica (g/100mL) vs Saccharomyces cerevisiae (g/100ml)

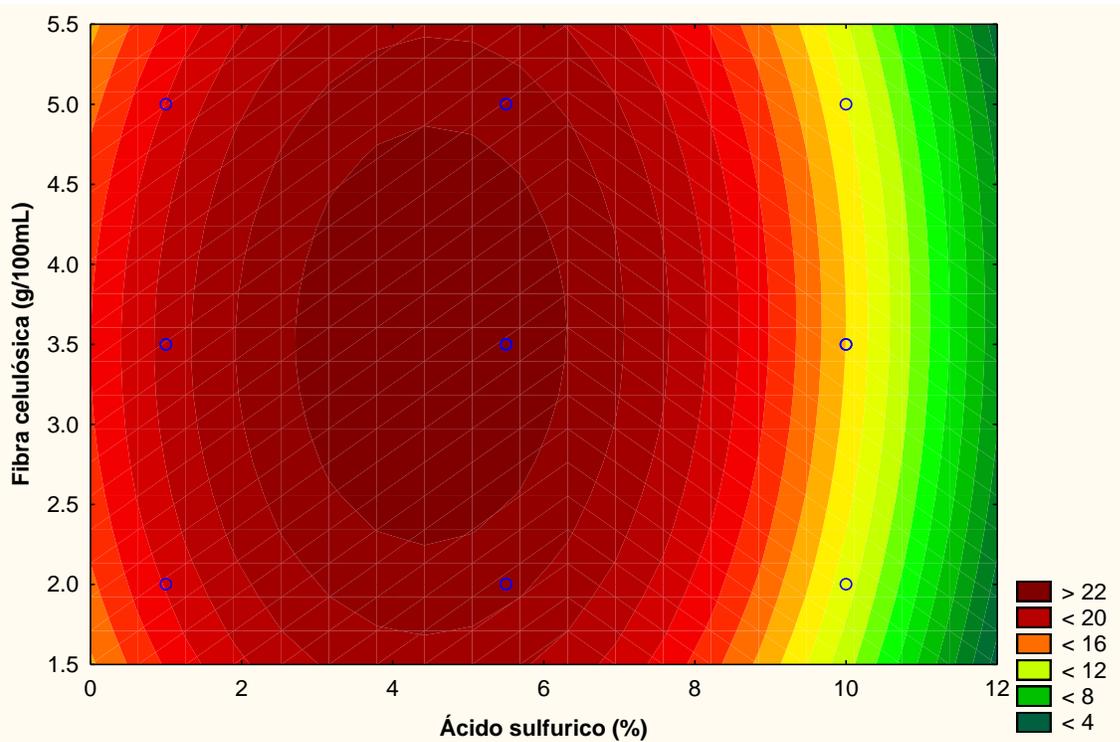


Figura 23. Superficie de respuesta, variable Rendimiento etanólico, variables independientes Fibra celulósica (g/100mL) vs Ácido sulfúrico (%)

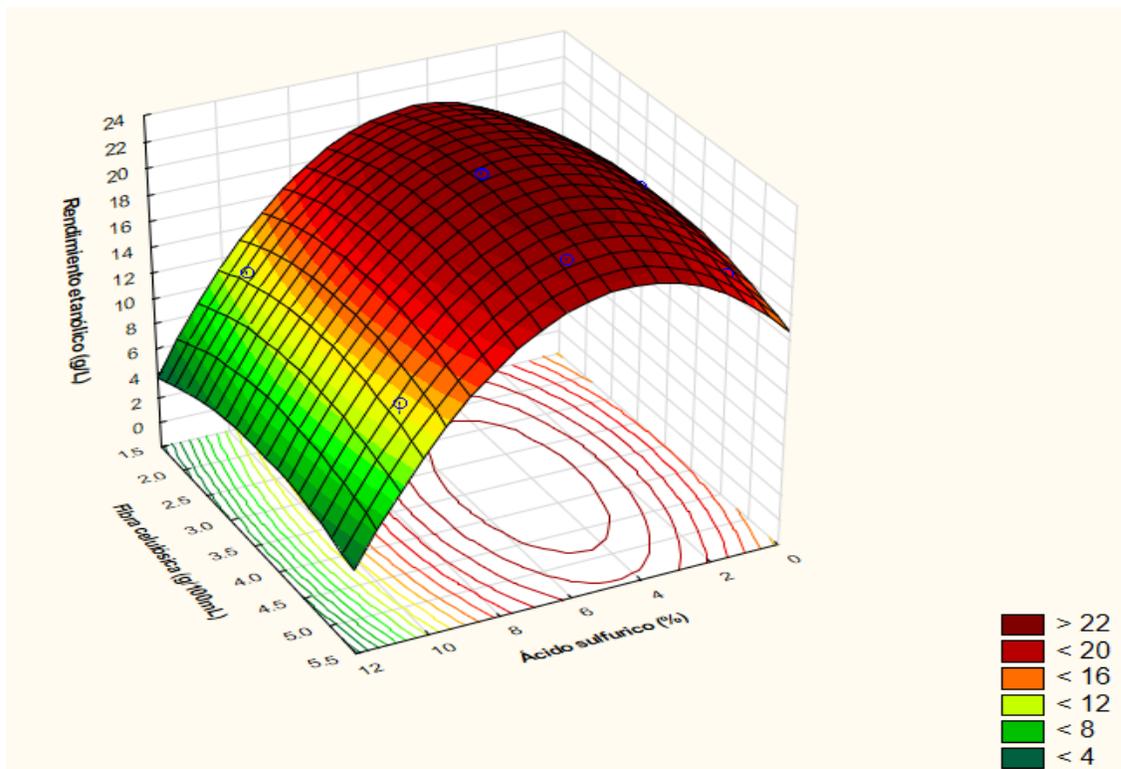


Figura 24. Superficie de respuesta, variable Rendimiento etanólico, variables independientes Fibra celulósica (g/100mL) vs Ácido sulfúrico (%)

En la figura 19 y 20 se observa que 0.13 – 0.32 g/100ml de *Sachharomyces cerevisiae* y 3.0 – 6.0 % (v/v) de Ácido Sulfúrico se obtuvo un rendimiento etanólico mayor a 22 g/L

En la figura 21 y 22 indica con 0.14 – 0.32 g/100ml de *Saccharomyces cerevisiae* y 2.8 – 2.5 – 4.7 g/100ml de Fibra celulósica se obtuvo un rendimiento etanólico mayor a 22 g/L

En la figura 23 y 24 se aprecia con 2.3 – 7.2 (%) (v/v) de Ácido Sulfúrico y 1.75 – 5.4 g/100ml de Fibra celulósica se obtuvo un rendimiento etanólico mayor a 22 g/L

#### 4.5. Rendimiento de la variable etanólico/ biomasa

Tabla 18

*Resultado de la variable dependiente rendimiento etanólico/ biomasa del diseño de experimentos Box- Behnken de 3 factores, 1 bloque, 15 ejecuciones, +3 puntos centrales por bloque*

Ensayos	Variable independientes			Variable dependiente
	Saccharom yces cerevisiae (g/100mL)	Ácido Sulfúrico (%)	Fibra celulósica (g/100mL)	Rendimiento etanólico/ biomasa (mg/g)
<b>1</b>	0.1	1	3.5	5.3
<b>2</b>	0.3	1	3.5	5.5
<b>3</b>	0.1	10	3.5	3.5
<b>4</b>	0.3	10	3.5	3.7
<b>5</b>	0.1	5.5	2	10.3
<b>6</b>	0.3	5.5	2	10.5
<b>7</b>	0.1	5.5	5	3.8
<b>8</b>	0.3	5.5	5	4.3
<b>9</b>	0.2	1	2	8.6
<b>10</b>	0.2	10	2	6.3
<b>11</b>	0.2	1	5	3.6
<b>12</b>	0.2	10	5	2.8
<b>13</b>	0.2	5.5	3.5	6.5
<b>14</b>	0.2	5.5	3.5	6.5
<b>15</b>	0.2	5.5	3.5	6.5
<b>16</b>	0.2	5.5	3.5	6.4
<b>17</b>	0.2	5.5	3.5	6.5
<b>18</b>	0.2	5.5	3.5	6.5

En la Tabla 18 se aprecia que los mayores resultados se valoraron en los ensayos 5 y 6 con 10.3 y 10.5 mg/g, respectivamente, los puntos centrales tuvieron un rendimiento etanólico/biomasa, mediano con 6.5 y 6.4 mg/g en esta investigación. (Tejada et al., 2010) al realizar el balance de masa, estableció que la producción de etanol a partir de cáscaras de frutas es de poco rendimiento debido a que se requieren grandes pesos de estos residuos, en su indagación, a partir de las cáscaras de naranja se obtuvo 8.4 mg de etanol por cada gramo de cáscaras y a partir de las de piña, 1.0 mg de etanol por cada gramo de cáscaras, años más tarde, (Tejada et al., 2014) realizando el balance de masa con las biomásas trabajadas, obtuvo que las cáscaras de mandarina mostraron el mejor rendimiento con 24,6 mg de etanol por gramo de cáscara seca, seguido del limón y la naranja con 14,8 y 14,0 mg/g respectivamente. Estos valores de mg/g en el balance de masa presentados en cada investigación son afines con este estudio. Sin embargo en Escalante y Fuentes (2013) en Piura obtuvieron etanol a partir de residuos agrícolas de la cáscara de plátano, para la producción se hizo el pretratamiento por Explosión de Vapor (SE) y Agua Caliente Líquida (LHW) para la deslignificación e hidrólisis enzimática se realizó con enzimas celulolíticas alcanzando un rendimiento etílico de 78 mg de etanol/g de biomasa, se concluyó que en Piura es técnicamente factible la producción de etanol a partir de estos residuos, con un resultado más alto que la cáscara de arroz tal como se observa en la tabla 16.

Guevara C, Arenas H y Peláez C (2015), produjeron etanol a partir del plátano verde de rechazo donde emplearon como tratamiento previo a la fermentación la hidrólisis endo-enzimática, con la finalidad de tener una mayor concentración de sólidos solubles en la pulpa y así tener mayor rendimiento etanólico por peso de materia prima usa, se concluyó que efectivamente la hidrólisis endoenzimática es una alternativa viable, para para la obtención de azúcares fermentables a partir

del banano verde de rechazo y su posterior fermentación alcohólica, sin embargo embargo, es de anotar que los rendimientos de producción de etanol por kilogramo de banano verde.

Por otro lado, Medina D, Álvarez M y Silva M (2010), manejaron independientemente los residuos secos del cultivo de banano, entiéndase por: las hojas del banano, el pseudotallo y el raquis, para generar bioetanol, en resumen, de los resultados obtenidos se indican a continuación, el mejor rendimiento de alcohol por biomasa de residuos fue la relación de 26,71 ml de etanol por 100 g de residuo de raquis. El raquis tiene la mayor proporción de celulosa en su composición (49,52%) y mayor cantidad de fibra bruta (53,90%) con respecto a los a hojas y pseudotallo. El pseudotallo le sigue con respecto al rendimiento de alcohol producido con 20,89 ml etanol por 100 g de residuo y por último las hojas con 19,04 ml.

Tabla 19

ANOVA de la variable rendimiento etanólico/ biomasa

Factor	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
(1)Saccharomyces cerevisiae (g/100mL)(L)	0.15150	1	0.15150	157.85	0.000057
Saccharomyces cerevisiae (g/100mL)(Q)	0.00815	1	0.00815	8.49	0.033276
(2)Ácido sulfúrico (%) (L)	5.72777	1	5.72777	5967.59	0.000000
Ácido sulfúrico (%) (Q)	16.25090	1	16.25090	16931.32	0.000000
(3)Fibras de celulosa (g/100mL)(L)	56.13303	1	56.13303	58483.32	0.000000
Fibras de celulosa (g/100mL)(Q)	2.61659	1	2.61659	2726.15	0.000000
Interacción 1L con 2L	0.00055	1	0.00055	0.57	0.483286
Interacción 1L con 3L	0.03203	1	0.03203	33.37	0.002187
Interacción 2L con 3L	0.55324	1	0.55324	576.41	0.000002
Falta de Ajuste	2.13990	3	0.71330	743.17	0.000000
Error Puro	0.00480	5	0.00096		
Suma de cuadrados total	82.68405	17			
<b>R: 97.4</b>					
<b>Radj: 94.4</b>					

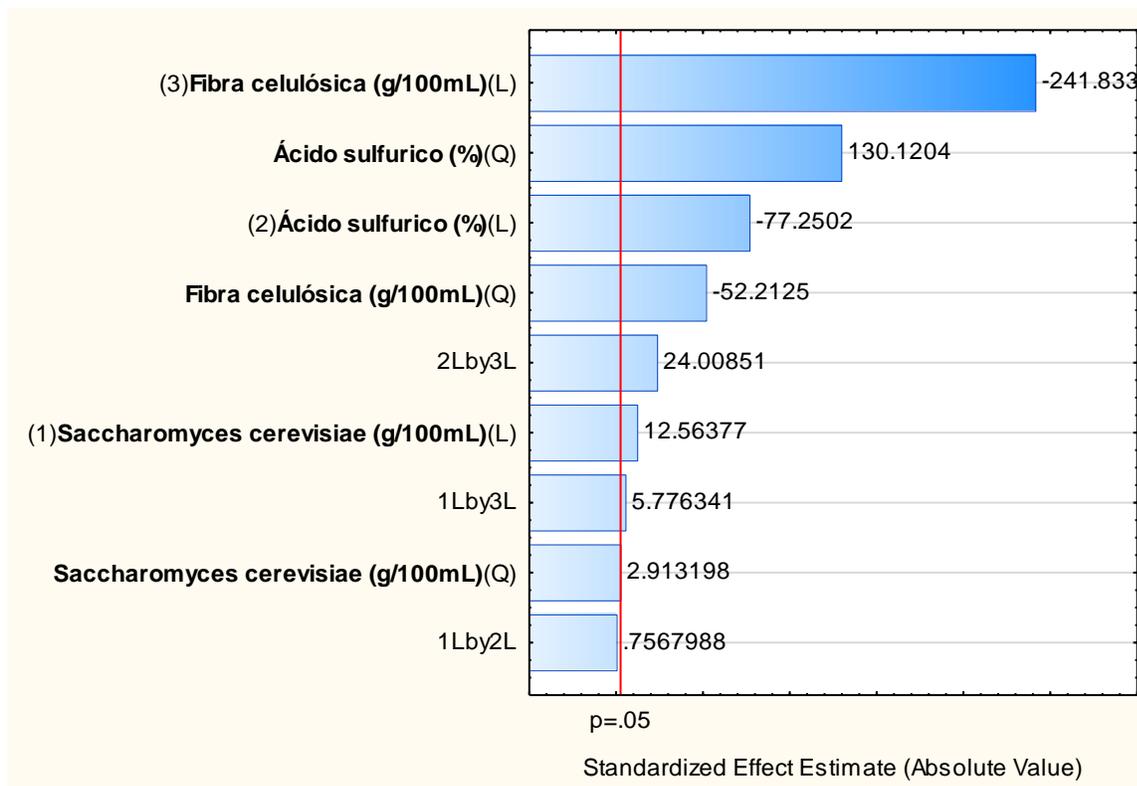


Figura 25. Diagrama de Pareto para variable rendimiento etanólico/ biomasa

La Tabla 19 particiona la variabilidad del rendimiento etanólico/biomasa en valores separados para cada uno de los efectos, prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su media cuadrática contra un estimado del error experimental. El ANOVA muestra para R (coeficiente de determinación) fue de 97.40 %, y la falta de ajuste indica significativa, quiere decir que el ajuste del modelo matemático estadísticamente no tiene un efecto significativo para el rendimiento etanólico/biomasa.

En este caso, 9 efectos tienen un p-valor menor que 0.05 indicando que estos efectos si afectan significativamente al rendimiento etanólico/biomasa con un nivel de confianza del 95%.

El efecto con mayor significancia para el rendimiento etanólico/biomasa, fue del parámetro (Variable independiente) fibra celulósica, con -241.833 %, esto indica que a menos fibra celulósica

es conveniente para tener un mayor rendimiento etanólico/biomasa, como se observa en la Figura 25.

Tabla 20

*Tabla de coeficiente de regresión de la variable rendimiento etanólico/ biomasa*

<b>Factor</b>	<b>Regresión n</b>	<b>error estándar error puro</b>	<b>t(5)</b>	<b>p</b>	<b>-0.95% Coeficiente e Límite</b>	<b>+0.95% Coeficiente e Límite</b>
Mean/Interc.	16.08278	0.132017	121.824	0.00000	15.74342	16.42214
(1)Saccharomyces cerevisiae (g/100mL)(L)	0.87328	0.728296	1.199	0.28422	-0.99887	2.74542
Saccharomyces cerevisiae (g/100mL)(Q)	-4.32055	1.483095	-2.913	0.03327	-8.13297	-0.50813
(2)Ácido sulfúrico (%)(L)	0.66221	0.013518	48.987	0.00000	0.62746	0.69696
Ácido sulfúrico (%)(Q)	-0.09530	0.000732	-130.120	0.00000	-0.09718	-0.09342
(3)Fibras de celulosa (g/100mL)(L)	-4.59739	0.052614	-87.380	0.00000	-4.73263	-4.46214
Fibras de celulosa (g/100mL)(Q)	0.34416	0.006592	52.213	0.00000	0.32722	0.36110
Interacción 1L con 2L	0.02605	0.034423	0.757	0.48328	-0.06244	0.11454
Interacción 1L con 3L	0.59652	0.103269	5.776	0.00218	0.33106	0.86198
Interacción 2L con 3L	0.05510	0.002295	24.009	0.00000	0.04920	0.06100
<b>R: 97.4</b>						
<b>R adj: 94.4</b>						

Los modelos matemáticos reducidos de segundo grado generados por el coeficiente de regresiones significativos para el rendimiento etanólico/biomasa se muestran en las siguientes ecuaciones:

Para la interacción de *Saccharomyces cerevisiae* (g/100 mL) y Ácido sulfúrico (%):

$$R_e = 16.08 + 0.87 S - 4.32 S^2 + 0.66 A - 0.10 A^2 \dots\dots\dots \text{(Ecuación 12)}$$

Para la interacción de *Saccharomyces cerevisiae* (g/100 mL) y Fibra celulósica (g/100mL):

$$R_e = 16.08 + 0.87 S - 4.32 S^2 - 4.60 F + 0.34 F^2 + 0.60 SF \dots \text{(Ecuación 13)}$$

Para la interacción de Ácido sulfúrico (%) y Fibra celulósica (g/100mL):

$$R_e = 16.08 + 0.66 A - 0.10 A^2 - 4.60 F + 0.34 F^2 + 0.06 AF \dots\dots \text{(Ecuación 14)}$$

**Donde:**

- Re: Rendimiento etanólico/biomasa
- S: *Saccharomyces cerevisiae* (g/100ml)
- A: Ácido sulfúrico (%)
- F: Fibra celulósica (g/100mL)

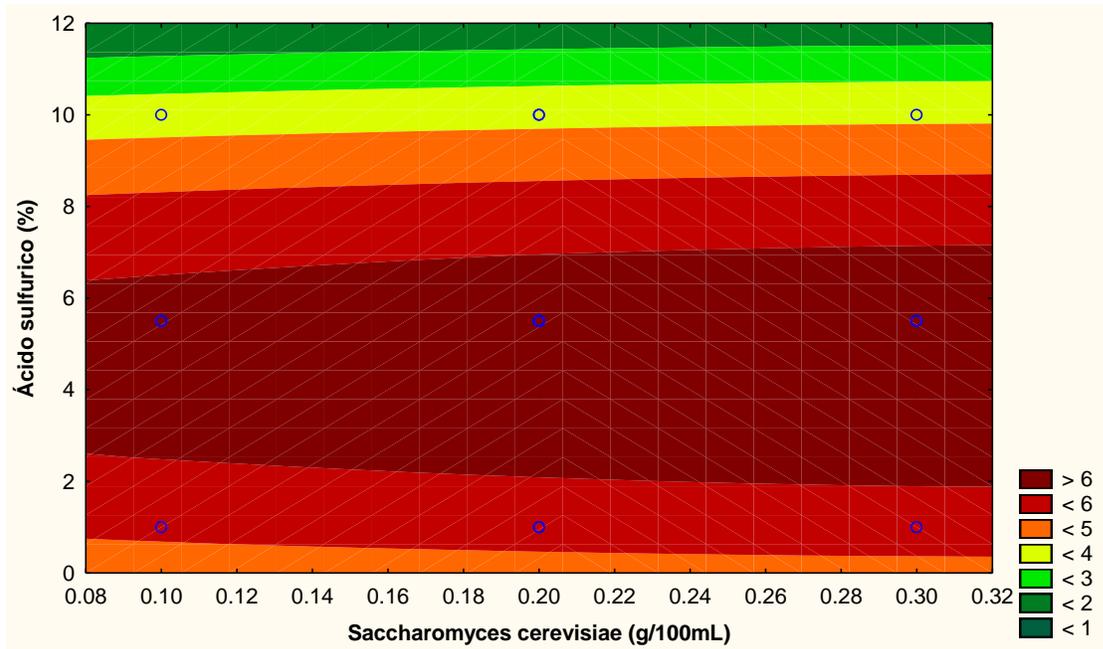


Figura 26. Superficie de respuesta, variable Rendimiento etanólico/biomasa, variables independientes Ácido sulfúrico (%) vs Saccharomyces cerevisiae (g/100ml)

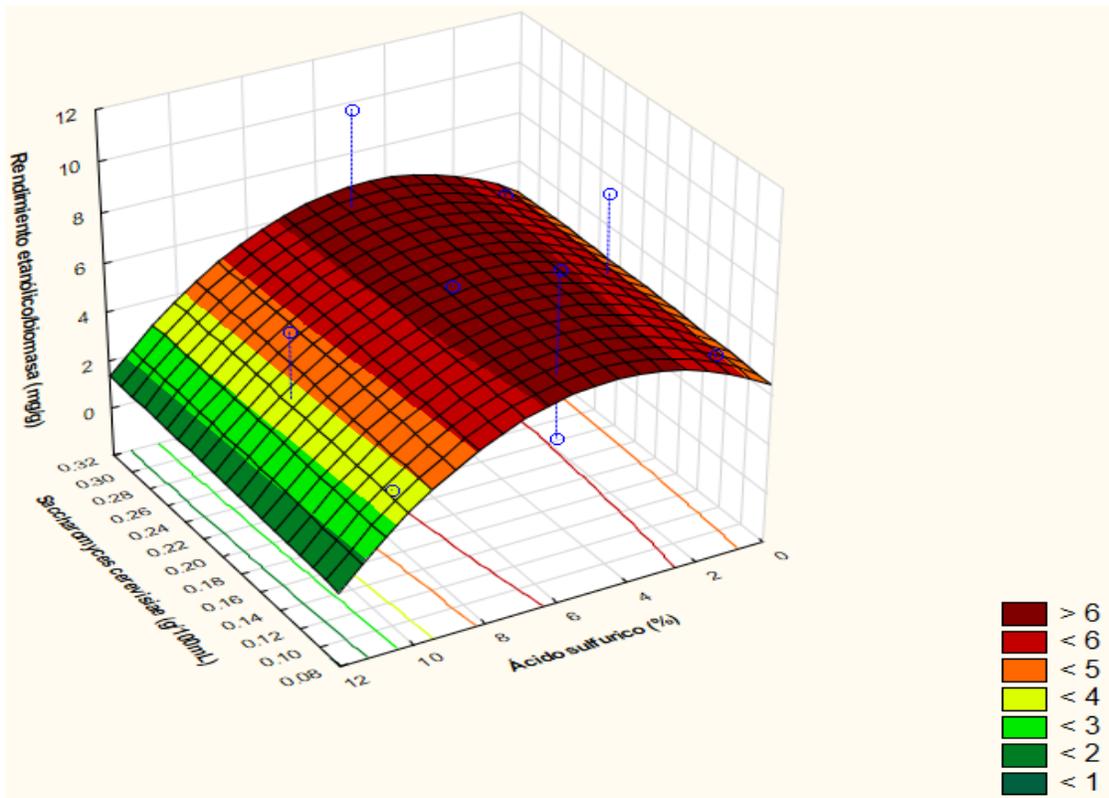


Figura 27. Superficie de respuesta, variable Rendimiento etanólico/biomasa, variables independientes Ácido sulfúrico (%) vs Saccharomyces cerevisiae (g/100ml)

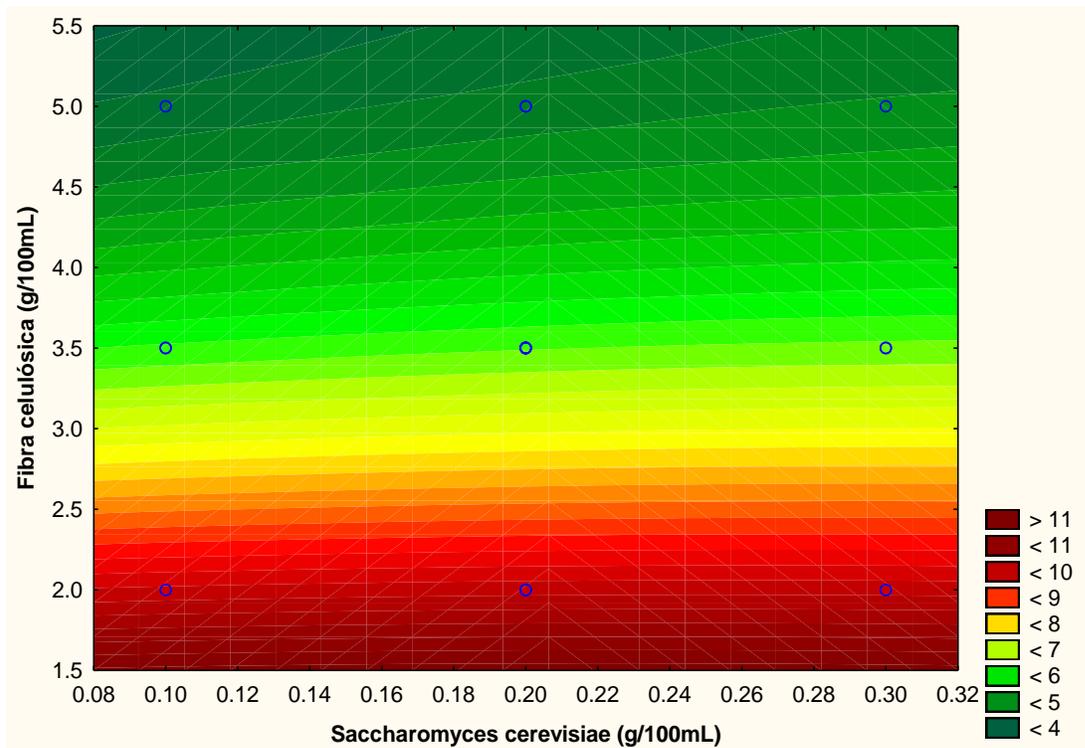


Figura 28. Superficie de respuesta, variable Rendimiento etanólico/biomasa, variables independientes Fibra celulósica (g/100mL) vs Saccharomyces cerevisiae (g/100mL)

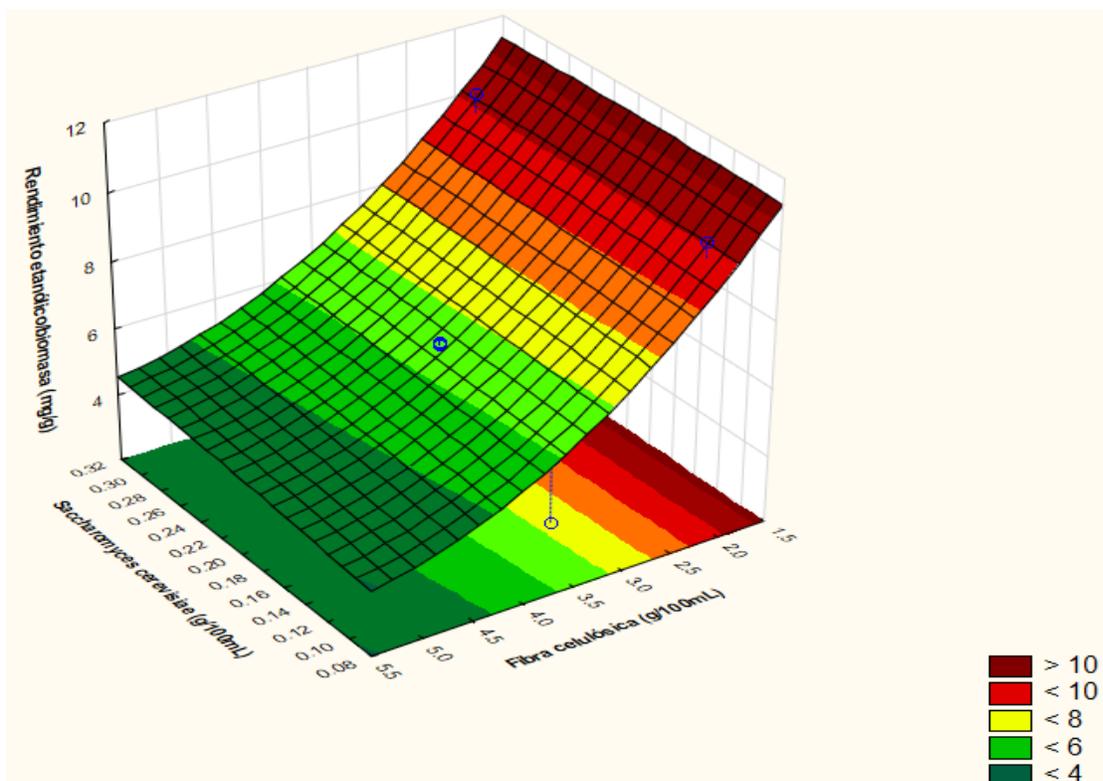


Figura 29. Superficie de respuesta, variable Rendimiento etanólico/biomasa, variables independientes Fibra celulósica (g/100mL) vs Saccharomyces cerevisiae (g/100mL)

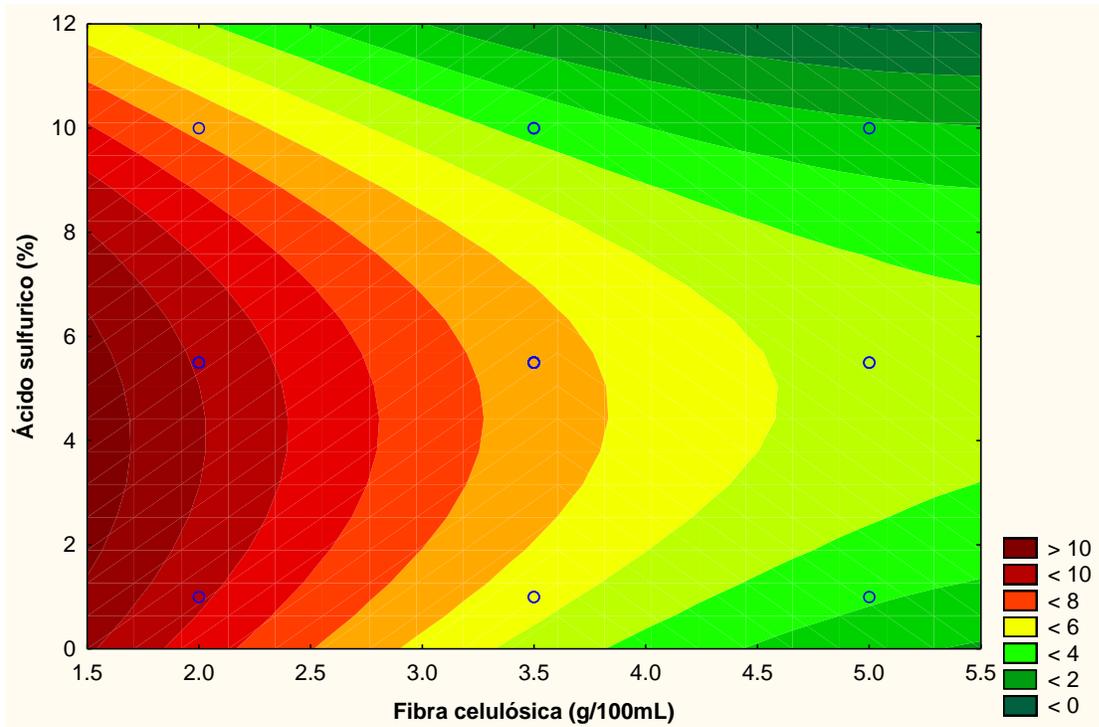


Figura 30. Superficie de respuesta, variable Rendimiento etanólico/biomasa, variables independientes Ácido sulfúrico (%) vs Fibra celulósica (g/100mL)

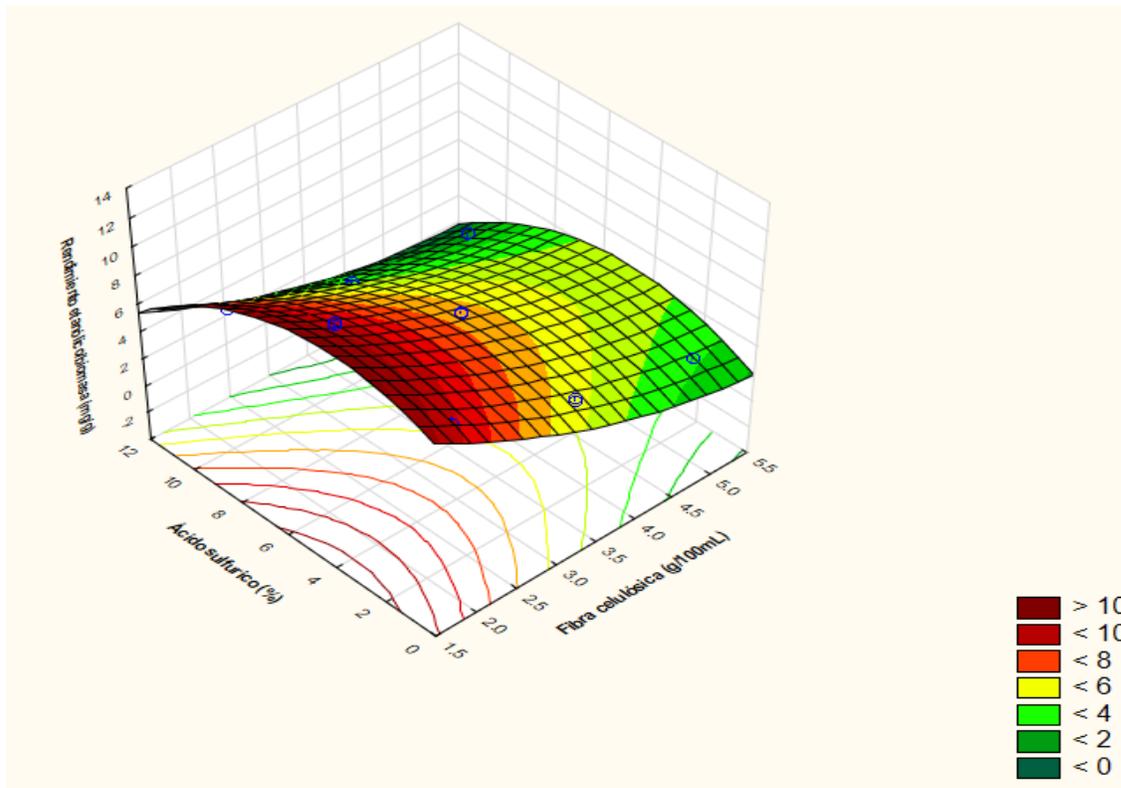


Figura 31. Superficie de respuesta, variable Rendimiento etanólico/biomasa, variables independientes Ácido sulfúrico (%) vs Fibra celulósica (g/100mL)

En las Figuras 26 y 27 se observa que 0.32 g/100mL de *Sachharomyces cerevisiae* y 7 % (v/v) de Ácido Sulfúrico, en donde se obtuvo un Rendimiento etanólico/biomasa mayor a 6%.

En las Figuras 28 y 29 se aprecia con 6.3 (%) (v/v) de Ácido Sulfúrico y 2.2 g/100ml de Fibra celulósica se obtuvo un Rendimiento etanólico/biomasa mayor a 10 y 11 respectivamente%.

En las Figuras 30 y 31 indica con 0.32 g/100mL de *Sachharomyces cerevisiae* y 2.4 g/100mL de Fibras de celulosa se obtuvo un Rendimiento etanólico/biomasa mayor a 10%.

#### **4.6. Cinética del pH, conductividad eléctrica, temperatura y sólidos solubles**

##### **4.6.1. Cinética del pH en función del tiempo**

Tabla 21 *Cinética del pH en función del tiempo en los distintos tratamientos*

<b>Tiempo (h)</b>	<b>Trat.1</b>	<b>Trat 2</b>	<b>Trat 3</b>	<b>Trat 4</b>	<b>Trat 5</b>	<b>Trat 6</b>	<b>Trat 7</b>	<b>Trat 8</b>	<b>Trat 9</b>	<b>Trat 10</b>	<b>Trat 11</b>	<b>Trat 12</b>	<b>Trat 13</b>
<b>3</b>	4.977 ± 0.021	4.940 ± 0.010	3.377 ± 0.012	3.197 ± 0.006	3.507 ± 0.006	3.463 ± 0.015	3.357 ± 0.006	3.553 ± 0.006	4.977 ± 0.021	3.440 ± 0.010	4.883 ± 0.025	3.250 ± 0.010	3.600 ± 0.010
<b>6</b>	4.927 ± 0.012	4.897 ± 0.015	3.367 ± 0.015	3.193 ± 0.006	3.457 ± 0.006	3.477 ± 0.006	3.303 ± 0.006	3.530 ± 0.010	4.927 ± 0.012	3.393 ± 0.006	4.827 ± 0.025	3.233 ± 0.006	3.587 ± 0.006
<b>9</b>	4.883 ± 0.015	4.847 ± 0.015	3.400 ± 0.010	3.163 ± 0.006	3.480 ± 0.000	3.450 ± 0.010	3.320 ± 0.000	3.517 ± 0.006	4.883 ± 0.015	3.317 ± 0.006	4.793 ± 0.031	3.233 ± 0.006	3.567 ± 0.006
<b>23</b>	4.817 ± 0.015	4.807 ± 0.012	3.397 ± 0.015	3.147 ± 0.006	3.460 ± 0.010	3.410 ± 0.010	3.283 ± 0.006	3.497 ± 0.006	4.817 ± 0.015	3.273 ± 0.006	4.740 ± 0.017	3.217 ± 0.006	3.540 ± 0.010
<b>26</b>	4.783 ± 0.006	4.753 ± 0.006	3.370 ± 0.010	3.120 ± 0.000	3.443 ± 0.006	3.400 ± 0.010	3.213 ± 0.049	3.490 ± 0.010	4.783 ± 0.006	3.263 ± 0.006	4.683 ± 0.040	3.150 ± 0.050	3.513 ± 0.006
<b>29</b>	4.730 ± 0.010	4.710 ± 0.017	3.297 ± 0.050	3.093 ± 0.015	3.430 ± 0.010	3.380 ± 0.010	3.167 ± 0.006	3.480 ± 0.010	4.730 ± 0.010	3.193 ± 0.015	4.610 ± 0.026	3.193 ± 0.015	3.490 ± 0.010
<b>54</b>	4.680 ± 0.010	4.627 ± 0.015	3.190 ± 0.020	2.953 ± 0.021	3.420 ± 0.010	3.333 ± 0.015	3.147 ± 0.006	3.463 ± 0.006	4.680 ± 0.010	3.017 ± 0.029	4.553 ± 0.031	3.133 ± 0.015	3.493 ± 0.006
<b>57</b>	4.630 ± 0.010	4.547 ± 0.025	3.057 ± 0.084	2.893 ± 0.015	3.400 ± 0.010	3.290 ± 0.010	3.140 ± 0.010	3.447 ± 0.006	4.630 ± 0.010	2.977 ± 0.006	4.500 ± 0.017	3.097 ± 0.012	3.470 ± 0.010
<b>60</b>	4.573 ± 0.012	4.487 ± 0.015	2.763 ± 0.042	2.823 ± 0.025	3.373 ± 0.006	3.263 ± 0.012	3.107 ± 0.015	3.400 ± 0.010	4.573 ± 0.012	2.940 ± 0.010	4.437 ± 0.035	3.047 ± 0.025	3.467 ± 0.021
<b>74</b>	4.513 ± 0.006	4.413 ± 0.006	2.623 ± 0.032	2.770 ± 0.020	3.353 ± 0.006	3.237 ± 0.012	3.070 ± 0.020	3.390 ± 0.010	4.513 ± 0.006	2.860 ± 0.010	4.373 ± 0.015	2.967 ± 0.006	3.440 ± 0.010

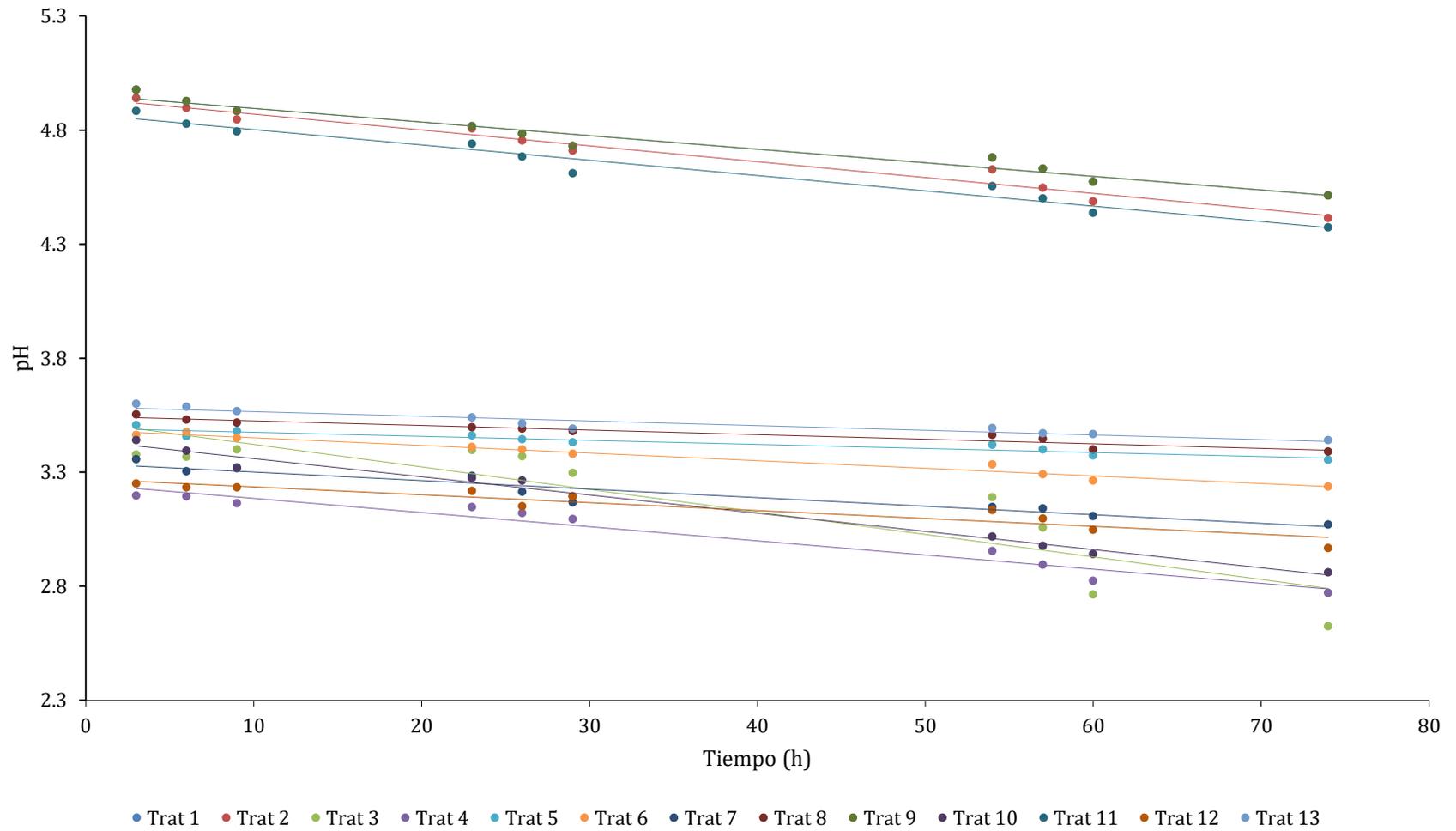


Figura 32. Cinética del pH de todos los tratamientos en función del tiempo

En la tabla 21, se percibe que el pH inició en 4.977, en el primer muestreo, con una desviación estándar de  $\pm 0.021$ , pero la acidez aumentó y a las 74 horas tuvo un pH de 4.513 con una desviación estándar de 0.006, este parámetro tiene un comportamiento similar decreciente de acuerdo con la investigación realizada por Agüero, Ortega, Hoyos (2010) donde el pH fue mudando al transcurrir el tiempo de fermentación, comenzando con un valor de 6.25 en la hora 0 y finalizando en 4.05 a las 48 horas.

El pH del tratamiento 3 estuvo con un valor inicial de  $3.377 \pm 0.012$ , disminuyendo progresivamente, según (Aguilar et al., 2015) el pH óptimo es de 3.5 a 5 para la fermentación con *Saccharomyces cerevisiae*, y Rios 2005, acota que en el proceso de fermentación, el pH tiende a disminuir debido a la producción de ácidos, formados al tomar los nitrógenos de los aminoácidos perdiendo su carácter anfótero. Este concepto explica que las levaduras consumieron la fuente nitrogenada (fosfato de amonio) liberando ácidos y acidificando el medio.

En este tratamiento 8 en la primera muestra se tiene 3.553 pH y al finalizar el muestreo es de 3.390 pH, TEJEDA realizando similar el procedimiento, pero con sustrato de cascara de naranja y piña, utilizando el mismo nutriente en la cual su rendimiento de etanol obtuvo: 13981mg/L de piña y 1225 mg/L de naranja.

En el tratamiento 10 el rango del pH esta entre 2.860 - 3.440. Hettenhaus indica, si el pH está por debajo de 4.0 que usen levadura en equipos menos asépticos para minimizar la pérdida debido a contaminantes bacterianos. El biorreactor que se usa para este proceso es muy precioso ya que es un equipo tal como lo indica Hettenhaus.

Según Aminifarshidmehr, indica que un organismo debe mantener un estado bastante constante equilibrio del pH para sobrevivir. La mayoría de las bacterias crecen mejor en un estrecho rango de pH de 6,5 a 7,5, sin embargo, con la levadura *saccharomyces cerevisiae* el pH tiene que ser menor como se muestra en la tabla 20 de 4.373 - 4.883, en donde no todos los agentes que se usa para la fermentación se debe mantener con el mismo pH sino de acuerdo el tipo de microorganismo, hongo, levadura, etc. que se usa en dicho proceso.

### Análisis de varianza del pH por tratamiento

#### Tratamiento 1: 0.1S/1.0A/3.5F

Tabla 22

*Análisis de varianza de la variable pH, tratamiento 1*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: pH				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.204893	1	0.204893	206.6139	0.000001
<b>Residual</b>	0.007933	8	0.000992		
<b>Total</b>	0.212827				

#### Tratamiento 2: 0.3S/1.0A/3.5F

Tabla 23

*Análisis de varianza de la variable pH, tratamiento 2*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: pH				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.280366	1	0.280366	271.8022	0.000000
<b>Residual</b>	0.008252	8	0.001032		
<b>Total</b>	0.288618				

**Tratamiento 3: 0.1S/10.0A/3.5F**

Tabla 24

*Análisis de varianza de la variable pH, tratamiento 3*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: pH				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.562634	1	0.562634	29.11724	0.000649
<b>Residual</b>	0.154584	8	0.019323		
<b>Total</b>	0.717218				

**Tratamiento 4: 0.3S/10.0A/3.5F**

Tabla 25

*Análisis de varianza de la variable pH, tratamiento 4*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: pH				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.222152	1	0.222152	171.1196	0.000001
<b>Residual</b>	0.010386	8	0.001298		
<b>Total</b>	0.232538				

**Tratamiento 5: 0.1S/5.5A/2.0F**

Tabla 26

*Análisis de varianza de la variable pH, tratamiento 5*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: pH				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.018134	1	0.018134	70.19421	0.000031
<b>Residual</b>	0.002067	8	0.000258		
<b>Total</b>	0.020201				

**Tratamiento 6: 0.3S/5.5A/2.0F**

Tabla 27

*Análisis de varianza de la variable pH, tratamiento 6*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: pH				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.064326	1	0.064326	309.5900	0.000000
<b>Residual</b>	0.001662	8	0.000208		
<b>Total</b>	0.065988				

**Tratamiento 7: 0.1S/5.5A/5.0F**

Tabla 28

*Análisis de varianza de la variable pH, tratamiento 7*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: pH				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.081330	1	0.081330	87.41046	0.000014
<b>Residual</b>	0.007443	8	0.000930		
<b>Total</b>	0.088773				

**Tratamiento 8: 0.3S/5.5A/5.0F**

Tabla 29

*Análisis de varianza de la variable pH, tratamiento 8*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: pH (Spreadsheet1)				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.023381	1	0.023381	93.67627	0.000011
<b>Residual</b>	0.001997	8	0.000250		
<b>Total</b>	0.025378				

**Tratamiento 9: 0.2S/1.0A/2.0F**

Tabla 30

*Análisis de varianza de la variable pH, tratamiento 9*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: pH				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.204893	1	0.204893	206.6139	0.000001
<b>Residual</b>	0.007933	8	0.000992		
<b>Total</b>	0.212827				

**Tratamiento 10: 0.2S/10.0A/2.0F**

Tabla 31

*Análisis de varianza de la variable pH, tratamiento 10*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: pH (Spreadsheet1)				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.368659	1	0.368659	548.0636	0.000000
<b>Residual</b>	0.005381	8	0.000673		
<b>Total</b>	0.374040				

**Tratamiento 11: 0.2S/1.0A/5.0F**

Tabla 32

*Análisis de varianza de la variable pH, tratamiento 11*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: pH				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.260326	1	0.260326	217.2652	0.000000
<b>Residual</b>	0.009586	8	0.001198		
<b>Total</b>	0.269911				

**Tratamiento 12: 0.2S/10.0A/5.0F**

Tabla 33

*Análisis de varianza de la variable pH, tratamiento 12*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: pH				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.069482	1	0.069482	68.62659	0.000034
<b>Residual</b>	0.008100	8	0.001012		
<b>Total</b>	0.077582				

**Tratamiento 13: 0.2S/5.5A/3.5F**

Tabla 34

*Análisis de varianza de la variable pH, tratamiento 13*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: pH				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.024056	1	0.024056	72.48099	0.000028
<b>Residual</b>	0.002655	8	0.000332		
<b>Total</b>	0.026711				

Las Tablas 22 al 34 prueban la significancia estadística de la regresión para el pH, con coeficientes de regresión (R) entre 0.85 a 90.0 %, comparando su media cuadrática contra un estimado del error experimental. En este caso, la variable independiente del pH tiene un p-valor menor que 0.05 afirmando que esta variable si afecta significativamente a la variable dependiente del grado etanólico con un nivel de confianza del 95 %.

#### **4.6.2. Cinética de la conductividad eléctrica en función del tiempo**

Tabla 35

*Cinética de la conductividad eléctrica en función del tiempo en los distintos tratamientos*

T. (h)	Trat.1	Trat 2	Trat 3	Trat 4	Trat 5	Trat 6	Trat 7	Trat 8	Trat 9	Trat 10	Trat 11	Trat 12	Trat 13
<b>3</b>	3136.667	3573.333 ±	4620.000	4980.000	3573.333 ±	4220.000 ±	4306.667 ±	4133.333 ±	3363.333 ±	4920.000 ±	3433.333	4976.667 ±	4420.000 ±
	±	25.166	±	±	37.859	45.826	5.774	15.275	20.817	20.000	± 5.774	15.275	10.000
	15.275		10.000	26.458									
<b>6</b>	3110.000	3496.667 ±	4716.667 ±	5223.333	4580.000 ±	4176.667 ±	4256.667 ±	4140.000 ±	3313.333 ±	5073.333 ±	3383.333	4960.000 ±	4386.667 ±
	± 10	15.275	5.774	± 15.275	30.000	20.817	41.633	10.000	35.119	15.275	±	10.000	5.774
<b>9</b>	3070.000	3433.333 ±	4653.333	5193.333	4036.667 ±	4120.000 ±	4183.333 ±	4100.000 ±	3250.000 ±	5046.667 ±	3313.333	4943.333 ±	4383.333 ±
	± 20	5.774	± 35.119	± 5.774	37.859	20.000	15.275	10.000	20.000	5.774	±	15.275	15.275
											35.119		
<b>23</b>	3003.333	3383.333 ±	5223.333	5133.333	3936.667 ±	4100.000 ±	4140.000 ±	4053.333 ±	3196.667 ±	4943.333 ±	3303.333	4943.333±	4346.667 ±
	± 20.817	25.166	± 1122.957	± 28.868	15.275	10.000	20.000	47.258	30.551	20.817	±	20.817	15.275
											50.332		
<b>26</b>	2943.333	3313.333 ±	3313.333 ±	5086.667	3900.000 ±	4063.333 ±	4100.000 ±	4046.667 ±	3080.000 ±	4936.667 ±	3266.667	4936.667 ±	4326.667 ±
	± 11.547	35.119	15.275	± 75.719	10.000	15.275	10.000	15.275	60.828	20.817	±	15.275	15.275
											15.275		
<b>29</b>	2916.667	3250.000 ±	6423.333 ±	4970.000	3883.333 ±	4016.667 ±	4080.000 ±	4013.333 ±	3040.000 ±	4876.667 ±	3173.333	4880.000 ±	4266.667 ±
	± 15.275	20.000	15.275	± 20.000	15.275	15.275	20.000	11.547	30.000	20.817	±	26.458	15.275
											55.076		
<b>54</b>	2900.000	3186.667 ±	6376.667 ±	4566.667	3840.000 ±	3980.000 ±	4023.333 ±	3966.667 ±	3006.667 ±	4843.333 ±	3066.667	4856.667 ±	4236.667 ±
	± 10	20.817	25.166	±	20.000	10.000	15.275	37.859	5.774	35.119	±	30.551	11.547
				306.159							58.595		
<b>57</b>	2836.667	3080.000 ±	6353.333 ±	4343.333	3813.333 ±	3933.333 ±	3990.000 ±	3910.000 ±	3080.000 ±	4763.333 ±	3056.667	4783.333 ±	4210.000 ±
	± 15.275	70.000	35.119	± 20.817	15.275	25.166	10.000	10.000	70.000	11.547	±	15.275	10.000
											15.275		
<b>60</b>	2806.667	3040.000 ±	6223.333 ±	4313.333	3783.333 ±	3900.000 ±	3953.333 ±	3843.333 ±	3040.000 ±	4723.333 ±	3073.333	4726.667 ±	4180.000 ±
	± 15.275	30.000	50.332	± 15.275	11.547	20.000	20.817	64.291	30.000	15.275	±	11.547	10.000
											66.583		
<b>74</b>	2750.000	2996.667 ±	6153.333 ±	4310.000	3733.333 ±	3886.667 ±	3926.667 ±	3733.333 ±	3033.333 ±	4686.667 ±	3063.333	4690.000 ±	4120.000 ±
	± 20	15.275	40.415	± 10.000	20.817	25.166	15.275	20.817	32.146	20.817	± 58.595	20.000	30.000

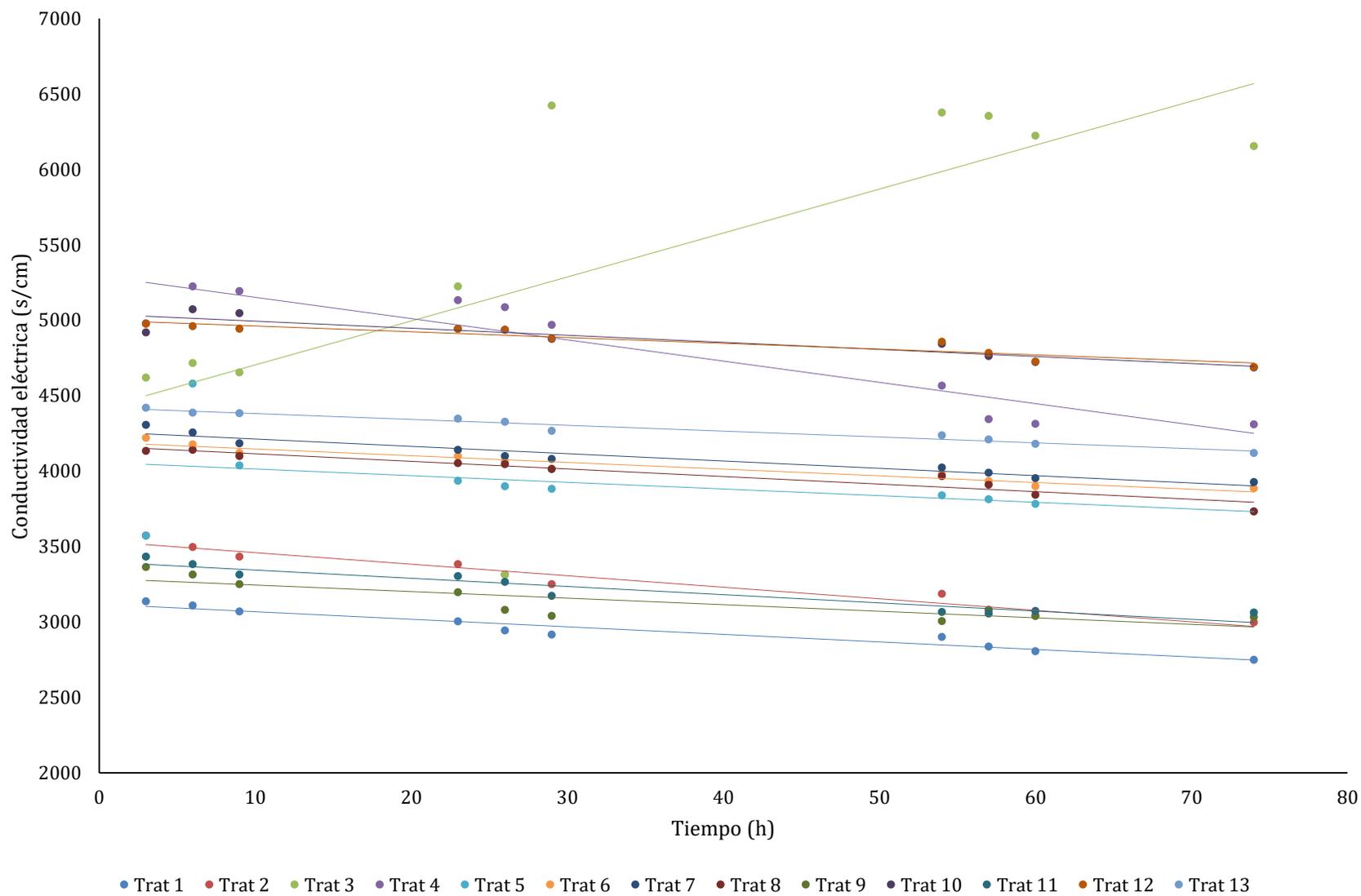


Figura 33. Cinética de la conductividad eléctrica de todos los tratamientos en función del tiempo

La cinética en la conductividad eléctrica en función al tiempo, tuvo 11 tratamiento del total, con datos decrecientes, mientras que de los tratamientos 3 y 5 se dieron al aumento, Espinoza (2015) comenta que al ver un acrecentamiento en función al tiempo de 11 en la conductividad eléctrica del medio, deber ser relacionado con el desarrollo de sólidos totales disueltos, el cual se toma como un indicador de mayor producción etanólico, por ende de mayor transformación de azúcares, se reportaron comportamientos de aumentos leves en este parámetro en el proceso fermentativo, el cual no afecta a la productividad etanólica. Por lo tanto, los 11 tratamientos con cinética decreciente están relacionados con el último concepto de Espinoza (2015) y los 2 tratamientos con C.E. creciente con el primer concepto.

Por otro lado, (Gracida y Pérez (2014) explican que mientras su conductividad eléctrica es mayor su poder corrosivo en el sistema de distribución del combustible aumenta, lo cual es perjudicial para el sistema.

## Análisis de varianza de conductividad eléctrica por tratamiento

### Tratamiento 1: 0.1S/1.0A/3.5F

Tabla 36

*Análisis de varianza de la variable conductividad eléctrica, tratamiento 1*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: Conduc. Elec.				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	145017.8	1	145017.8	120.2911	0.000004
<b>Residual</b>	9644.5	8	1205.6		
<b>Total</b>	154662.2				

### Tratamiento 2: 0.3S/1.0A/3.5F

Tabla 37

*Análisis de varianza de la variable conductividad eléctrica, tratamiento 2*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: pH				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	338967.9	1	338967.9	163.4360	0.000001
<b>Residual</b>	16592.1	8	2074.0		
<b>Total</b>	355560.0				

### Tratamiento 3: 0.1S/10.0A/3.5F

Tabla 38

*Análisis de varianza de la variable conductividad eléctrica, tratamiento 3*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: C.E.				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	4907663	1	4907663	7.456213	0.025822
<b>Residual</b>	5265582	8	658198		
<b>Total</b>	10173246				

**Tratamiento 4: 0.3S/10.0A/3.5F**

Tabla 39

*Análisis de varianza de la variable conductividad eléctrica, tratamiento 4*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: C.E.				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	1148543	1	1148543	51.48642	0.000095
<b>Residual</b>	178461	8	22308		
<b>Total</b>	1327004				

**Tratamiento 5: 0.1S/5.5A/2.0F**

Tabla 40

*Análisis de varianza de la variable conductividad eléctrica, tratamiento 5*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: C.E.				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	112857.7	1	112857.7	1.708628	0.227481
<b>Residual</b>	528413.4	8	66051.7		
<b>Total</b>	641271.1				

**Tratamiento 6: 0.3S/5.5A/2.0F**

Tabla 41

*Análisis de varianza de la variable conductividad eléctrica, tratamiento 6*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: C.E.				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	112960.8	1	112960.8	123.9006	0.000004
<b>Residual</b>	7293.6	8	911.7		
<b>Total</b>	120254.4				

**Tratamiento 7: 0.1S/5.5A/5.0F**

Tabla 42

*Análisis de varianza de la variable conductividad eléctrica, tratamiento 7*

Efecto	Análisis de varianza; DV: C.E.				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	135744.8	1	135744.8	110.4899	0.000006
<b>Residual</b>	9828.6	8	1228.6		
<b>Total</b>	145573.3				

**Tratamiento 8: 0.3S/5.5A/5.0F**

Tabla 43

*Análisis de varianza de la variable conductividad eléctrica, tratamiento 8*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: C.E.				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	145886.9	1	145886.9	104.2280	0.000007
<b>Residual</b>	11197.5	8	1399.7		
<b>Total</b>	157084.4				

**Tratamiento 9: 0.2S/1.0A/2.0F**

Tabla 44

*Análisis de varianza de la variable conductividad eléctrica, tratamiento 9*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: C.E.				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	108764.3	1	108764.3	20.31860	0.001982
<b>Residual</b>	42823.5	8	5352.9		
<b>Total</b>	151587.8				

**Tratamiento 10: 0.2S/10.0A/2.0F**

Tabla 45

*Análisis de varianza de la variable conductividad eléctrica, tratamiento 10*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: C.E.				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	127684.8	1	127684.8	44.09745	0.000162
<b>Residual</b>	23164.1	8	2895.5		
<b>Total</b>	150848.9				

**Tratamiento 11: 0.2S/1.0A/5.0F**

Tabla 46

*Análisis de varianza de la variable conductividad eléctrica, tratamiento 11*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: C.E. (Spreadsheet1)				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	171233.9	1	171233.9	81.70457	0.000018
<b>Residual</b>	16766.1	8	2095.8		
<b>Total</b>	188000.0				

**Tratamiento 12: 0.2S/10.0A/5.0F**

Tabla 47

*Análisis de varianza de la variable conductividad eléctrica, tratamiento 12*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: C.E.				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	85473.30	1	85473.30	68.81427	0.000034
<b>Residual</b>	9936.70	8	1242.09		
<b>Total</b>	95410.00				

### Tratamiento 13: 0.2S/5.5A/3.5F

Tabla 48

*Análisis de varianza de la variable conductividad eléctrica, tratamiento 13*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: C.E.				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	87002.25	1	87002.25	214.6014	0.000000
<b>Residual</b>	3243.31	8	405.41		
<b>Total</b>	90245.56				

Las tablas del al 36 al 48 prueban la significancia estadística de la conductividad eléctrica comparando su media cuadrática contra un estimado del error experimental. En este caso, la variable independiente de la conductividad eléctrica tiene un p-valor menor que 0.05 afirmando que esta variable si afecta significativamente a las variables dependientes con un nivel de confianza del 95%.

### 4.6.3. Cinética de la temperatura en función del tiempo

Tabla 49

*Cinética de la temperatura en función del tiempo en los distintos tratamientos*

T. (h)	Trat.1	Trat 2	Trat 3	Trat 4	Trat 5	Trat 6	Trat 7	Trat 8	Trat 9	Trat 10	Trat 11	Trat 12	Trat 13
<b>3</b>	37.700 ± 0.100	37.500 ± 0.100	36.667 ± 0.058	36.533 ± 0.153	37.500 ± 0.100	37.600 ± 0.100	37.700 ± 0.100	37.267 ± 0.493	4.133 ± 0.058	36.467 ± 0.058	37.467 ± 0.058	36.733 ± 0.058	36.867 ± 0.058
<b>6</b>	37.567 ± 0.058	35.667 ± 0.058	34.800 ± 0.100	34.367 ± 0.058	35.367 ± 0.058	35.533 ± 0.058	35.433 ± 0.058	35.433 ± 0.058	4.200 ± 0.100	34.367 ± 0.058	35.667 ± 0.058	34.367 ± 0.058	34.533 ± 0.058
<b>9</b>	37.600 ± 0.100	32.567 ± 0.058	32.033 ± 0.058	31.733 ± 0.058	32.033 ± 0.058	32.267 ± 0.058	32.200 ± 0.100	32.200 ± 0.100	4.033 ± 0.058	31.733 ± 0.058	32.567 ± 0.058	31.933 ± 0.058	31.967 ± 0.058
<b>23</b>	37.733 ± 0.058	37.2667 ± 0.058	37.167 ± 0.058	37.300 ± 0.100	37.733 ± 0.058	37.733 ± 0.058	37.733 ± 0.058	37.167 ± 0.058	4.000 ± 0.100	37.667 ± 0.153	37.167 ± 0.058	37.167 ± 0.153	37.167 ± 0.153
<b>26</b>	37.800 ± 0.100	35.033 ± 0.058	35.033 ± 0.058	34.933 ± 0.058	35.133 ± 0.058	35.267 ± 0.058	35.233 ± 0.058	35.167 ± 0.058	4.067 ± 0.153	34.933 ± 0.058	35.033 ± 0.058	34.867 ± 0.058	34.533 ± 0.058
<b>29</b>	37.700 ± 0.000	31.500 ± 0.100	31.333 ± 0.058	31.366 ± 0.058	32.033 ± 0.058	32.100 ± 0.000	32.033 ± 0.058	32.167 ± 0.058	4.033 ± 0.058	31.300 ± 0.100	31.500 ± 0.100	31.300 ± 0.000	31.267 ± 0.058
<b>54</b>	37.700 ± 0.1tr00	37.667 ± 0.153	36.633 ± 0.153	37.300 ± 0.200	37.700 ± 0.100	37.700 ± 0.100	37.700 ± 0.100	36.633 ± 0.153	3.900 ± 0.100	37.267 ± 0.058	36.633 ± 0.153	37.300 ± 0.100	37.300 ± 0.100
<b>57</b>	37.467 ± 0.058	35.167 ± 0.153	35.133 ± 0.058	35.133 ± 0.058	34.833 ± 0.058	34.867 ± 0.058	34.733 ± 0.058	34.767 ± 0.058	3.767 ± 0.058	35.167 ± 0.058	35.167 ± 0.153	35.100 ± 0.000	35.033 ± 0.058
<b>60</b>	37.467 ± 0.058	30.867 ± 0.058	31.667 ± 0.058	31.667 ± 0.058	31.833 ± 0.058	31.633 ± 0.058	31.666 ± 0.058	31.733 ± 0.058	3.633 ± 0.058	31.700 ± 0.000	30.867 ± 0.058	31.633 ± 0.058	32.033 ± 0.058
<b>74</b>	37.400 ± 0.100	36.867 ± 0.058	37.100 ± 0.173	37.100 ± 0.100	37.400 ± 0.100	37.400 ± 0.100	37.400 ± 0.100	37.100 ± 0.173	3.833 ± 0.058	37.133 ± 0.208	37.100 ± 0.173	37.500 ± 0.100	37.500 ± 0.100

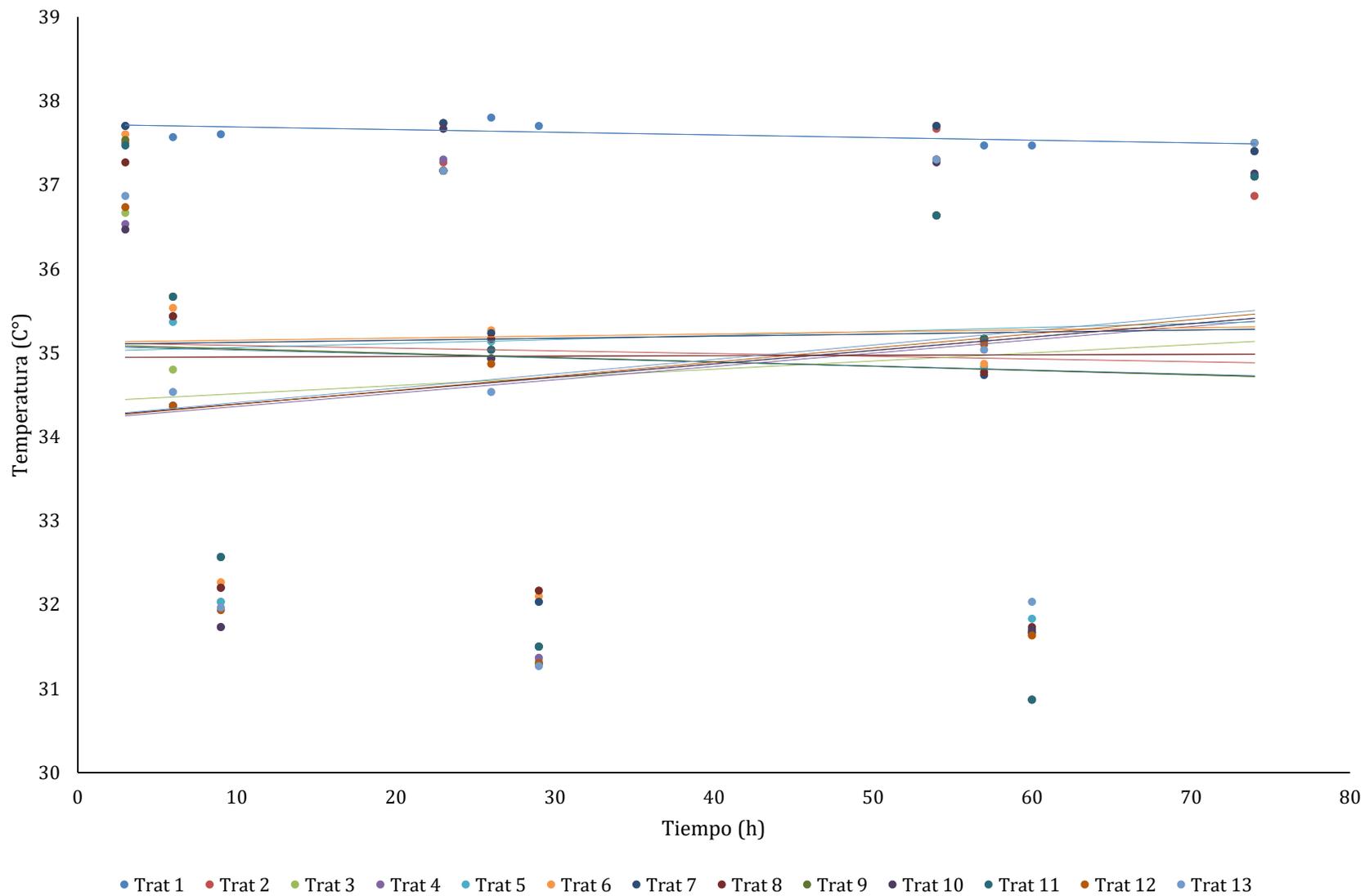


Figura 34. Cinética de la temperatura de todos los tratamientos en función del tiempo

La temperatura del tratamiento 1, en el primer muestreo fue de 37.700 °C, con una desviación estándar de  $\pm 0.100$  °C, a las 74 horas la temperatura fue de 37.400, con una desviación estándar de  $\pm 37.400$  °C, no hubo un comportamiento significativo en este parámetro, es preciso mencionar que el rango de temperatura fue bueno, debido a que se tenía la *S. cerevisiae*, según (Josefina , Mabel y Quintana 2012), la temperatura óptima para la *S.cerevisiae* es de 36 °C, pudiendo soportar un máximo variante de 38 – 43°C.

Todas las cepas recombinantes son organismos mesófilos y funcionan mejor entre 30 ° y 38 ° C., este tratamiento se encuentra dentro del rango como se observa en la tabla. Además, no se trabaja a temperatura ambiente, porque a mayor temperatura de fermentación aumenta la tasa de crecimiento y la productividad exponencialmente cuando el etanólogo puede prosperar (Hettenhaus, 1998).

En este tratamiento la temperatura máxima se tiene de 37.6 °C, si la temperatura hubiese sido mayor a 40 °C se hubiese usado la levadura *Kluyveromyces marxianus* porque son capaces de crecer y fermentar a temperaturas superiores a 40 °C (Almenares, Ngoma y Serrat, 2011). Además porque el proceso de hidrólisis se realizó con ácido por ello también varía la temperatura empezando desde 31.267 hasta 37.6 °C, en cambio si hubiese sido hidrolisis enzimática es un requisito que la temperatura esté de 30- 32 °C (Pavle, Meyer, Jensen y Johansen, 2010).

## Análisis de varianza de la temperatura por tratamiento

### Tratamiento 1: 0.1S/1.0A/3.5F

Tabla 50

*Análisis de varianza de la variable temperatura, tratamiento 1*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: Temperatura				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.057764	1	0.057764	4.405138	0.069062
<b>Residual</b>	0.104903	8	0.013113		
<b>Total</b>	0.162667				

### Tratamiento 2: 0.3S/1.0A/3.5F

Tabla 51

*Análisis de varianza de la variable temperatura, tratamiento 2*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: pH				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.06030	1	0.060298	0.008367	0.929366
<b>Residual</b>	57.65092	8	7.206366		
<b>Total</b>	57.71122				

### Tratamiento 3: 0.1S/10.0A/3.5F

Tabla 52

*Análisis de varianza de la variable temperatura, tratamiento 3*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: Temperatura				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.53522	1	0.535218	0.091416	0.770097
<b>Residual</b>	46.83823	8	5.854778		
<b>Total</b>	47.37344				

**Tratamiento 4: 0.3S/10.0A/3.5F**

Tabla 53

*Análisis de varianza de la variable temperatura, tratamiento 4*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: Temperatura				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	1.46068	1	1.460682	0.230809	0.643787
<b>Residual</b>	50.62832	8	6.328540		
<b>Total</b>	52.08900				

**Tratamiento 5: 0.1S/5.5A/2.0F**

Tabla 54

*Análisis de varianza de la variable temperatura, tratamiento 5*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: Temperatura				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.19721	1	0.197214	0.029142	0.868690
<b>Residual</b>	54.13845	8	6.767307		
<b>Total</b>	54.33567				

**Tratamiento 6: 0.3S/5.5A/2.0F**

Tabla 55

*Análisis de varianza de la variable temperatura, tratamiento 6*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: Temperatura				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.03530	1	0.035300	0.005192	0.944328
<b>Residual</b>	54.39370	8	6.799213		
<b>Total</b>	54.42900				

**Tratamiento 7: 0.1S/5.5A/5.0F**

Tabla 56

*Análisis de varianza de la variable temperatura, tratamiento 7*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: Temperatura				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.03429	1	0.034286	0.004942	0.945683
<b>Residual</b>	55.50627	8	6.938284		
<b>Total</b>	55.54056				

**Tratamiento 8: 0.3S/5.5A/5.0F**

Tabla 57

*Análisis de varianza de la variable temperatura, tratamiento 8*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: Temperatura				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.00156	1	0.001559	0.000285	0.986935
<b>Residual</b>	43.70389	8	5.462986		
<b>Total</b>	43.70544				

**Tratamiento 9: 0.2S/1.0A/2.0F**

Tabla 58

*Análisis de varianza de la variable temperatura, tratamiento 9*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: Temperatura				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.15409	1	0.154094	0.022954	0.883328
<b>Residual</b>	53.70602	8	6.713252		
<b>Total</b>	53.86011				

**Tratamiento 10: 0.2S/10.0A/2.0F**

Tabla 59

*Análisis de varianza de la variable temperatura, tratamiento 10*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: Temperatura				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	1.48099	1	1.480986	0.225070	0.647883
<b>Residual</b>	52.64079	8	6.580099		
<b>Total</b>	54.12178				

**Tratamiento 11: 0.2S/1.0A/5.0F**

Tabla 60

*Análisis de varianza de la variable temperatura, tratamiento 11*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: Temperatura				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.13344	1	0.133436	0.019997	0.891042
<b>Residual</b>	53.38268	8	6.672834		
<b>Total</b>	53.51611				

**Tratamiento 12: 0.2S/10.0A/5.0F**

Tabla 61

*Análisis de varianza de la variable temperatura, tratamiento 12*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: Temperatura				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	1.63913	1	1.639132	0.252094	0.629130
<b>Residual</b>	52.01653	8	6.502067		
<b>Total</b>	53.65567				

**Tratamiento 13: 0.2S/5.5A/3.5F**

Tabla 62

*Análisis de varianza de la variable temperatura, tratamiento 13*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: Temperatura				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	1.70842	1	1.708415	0.273002	0.615482
<b>Residual</b>	50.06314	8	6.257893		
<b>Total</b>	51.77156				

Las tablas de 50 a la 62 prueban la inexistencia significativa estadística en los valores de temperatura comparando su media cuadrática contra un estimado del error experimental. En este caso, la variable independiente de temperatura tiene un p-valor mayor que 0.05 demostrando que esta variable no afecta significativamente a la variable dependiente en la producción del bioetanol.

#### 4.6.4. Cinética de los sólidos solubles en función del tiempo

Tabla 63

*Cinética de los sólidos solubles en función del tiempo en los distintos tratamientos*

Tiempo (h)	Trat.1	Trat 2	Trat 3	Trat 4	Trat 5	Trat 6	Trat 7	Trat 8	Trat 9	Trat 10	Trat 11	Trat 12	Trat 13
<b>3</b>	4.267 ±	4.033 ±	4.467 ±	4.567 ±	4.033 ±	4.167 ±	4.133 ±	4.267 ±	4.133 ±	4.433 ±	4.667 ±	5.233 ±	4.367 ±
	0.058	0.058	0.058	0.058	0.000	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058
<b>6</b>	4.133 ±	3.833 ±	4.533 ±	4.567 ±	4.033 ±	4.067 ±	4.033 ±	4.133 ±	4.200 ±	4.333 ±	4.600 ±	5.300 ±	4.300 ±
	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.100	0.058	0.100	0.000	0.100
<b>9</b>	4.200 ±	3.700 ±	4.700 ±	4.467 ±	4.033 ±	4.000 ±	4.033 ±	4.067 ±	4.033 ±	4.233 ±	4.633 ±	5.400 ±	4.267 ±
	0.100	0.100	0.100	0.058	0.058	0.000	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.000	0.058
<b>23</b>	4.033 ±	3.633 ±	4.767 ±	4.233 ±	4.000 ±	3.800 ±	3.933 ±	3.800 ±	4.000 ±	4.200 ±	4.600 ±	5.000 ±	4.133 ±
	0.058	0.058	0.153	0.058	0.100	0.100	0.058	0.100	0.100	0.100	0.100	0.000	0.058
<b>26</b>	4.000 ±	3.433 ±	3.433 ±	4.200 ±	4.067 ±	3.867 ±	4.067 ±	3.867 ±	4.067 ±	4.167 ±	4.867 ±	5.000 ±	4.033 ±
	0.100	0.115	0.100	0.000	0.153	0.058	0.153	0.058	0.153	0.058	0.231	0.000	0.058
<b>29</b>	4.067 ±	3.300 ±	4.500 ±	4.200 ±	3.933 ±	3.733 ±	3.933 ±	3.733 ±	4.033 ±	4.167 ±	4.800 ±	4.800 ±	4.033 ±
	0.153	0.100	0.100	0.100	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.100	0.100	0.058
<b>54</b>	4.100 ±	3.333 ±	4.267 ±	4.267 ±	3.900 ±	3.800 ±	3.900 ±	3.800 ±	3.900 ±	4.167 ±	4.533 ±	4.533 ±	3.933 ±
	0.100	0.058	0.058	0.058	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.058	0.058	0.058	0.058
<b>57</b>	4.100 ±	3.267 ±	4.500 ±	4.133 ±	3.767 ±	3.733 ±	3.767 ±	3.767 ±	3.767 ±	4.133 ±	4.833 ±	4.833 ±	4.067 ±
	0.100	0.058	0.100	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.153
<b>60</b>	3.933 ±	3.167 ±	4.500 ±	4.167 ±	3.633 ±	3.633 ±	3.633 ±	3.633 ±	3.633 ±	4.167 ±	4.600 ±	4.600 ±	3.933 ±
	0.058	0.058	0.100	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.100	0.100	0.058
<b>74</b>	3.867 ±	3.067 ±	4.300 ±	4.167 ±	3.533 ±	3.533 ±	3.533 ±	3.567 ±	3.833 ±	4.133 ±	4.633 ±	4.633 ±	3.900 ±
	0.058	0.058	0.100	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.100

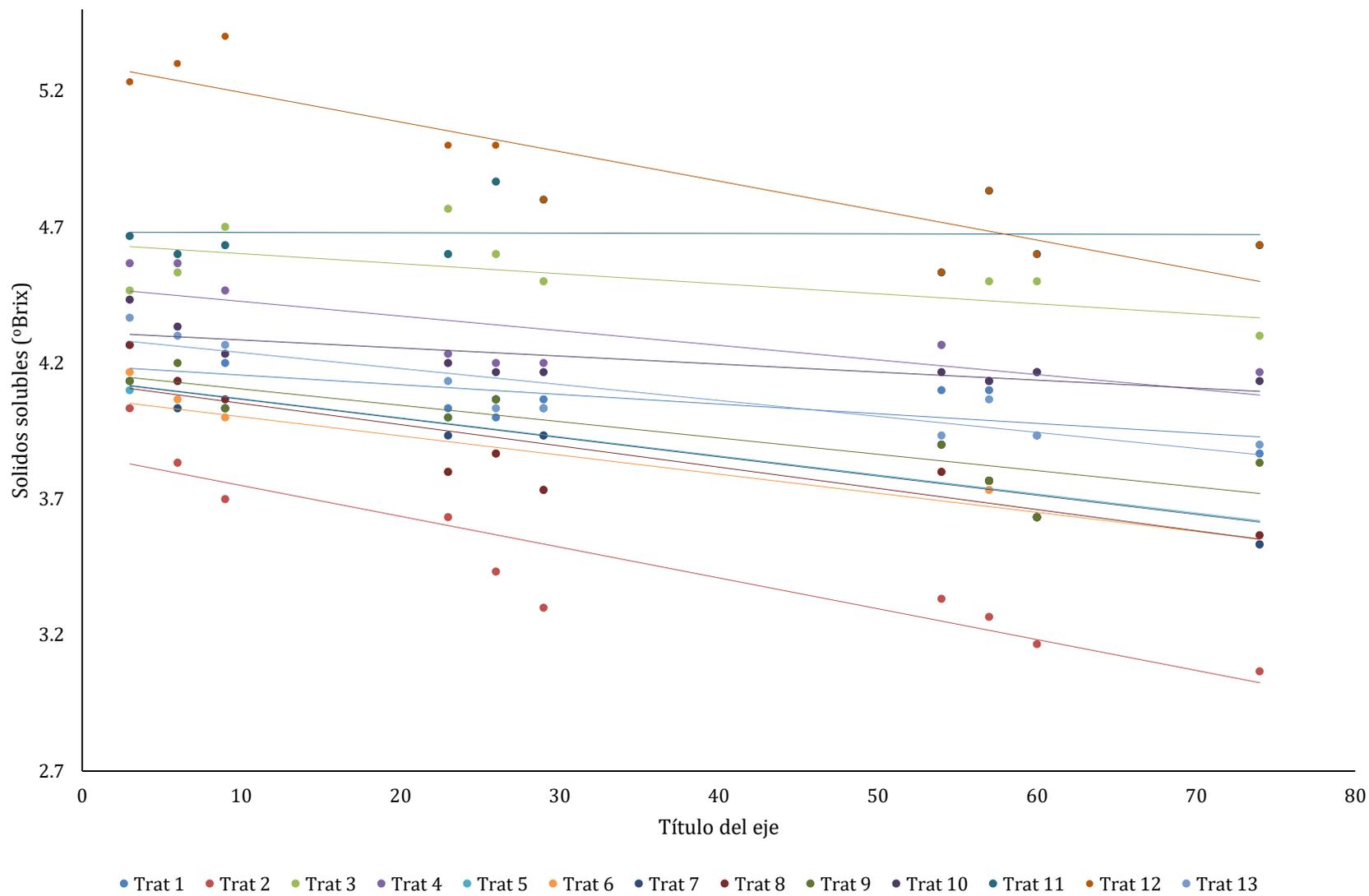


Figura 35. Cinética de la temperatura de todos los tratamientos en función del tiempo

Los sólidos solubles descienden según la cantidad de horas, porque al inicio del muestreo fue de 4.133 y después de 74 horas se obtuvo de 37.400 , respecto a ello Espinoza (2015) menciona es porque la levadura ha comenzado a consumir este sustrato, demostrando tener una mayor eficiencia en el rendimiento.

Guevara C, Arenas H y Peláez C (2015), refuerzan la idea de Espinoza (2015), argumentando, si en el proceso de fermentación se nota un descenso de los sólidos solubles, es un indicativo de la degradación de los azúcares provocada por la fermentación, sabiendo que el microorganismo de *Saccharomyces cerevisiae* consume los sólidos solubles que son el sustrato para estos.

Medina D, Álvarez M y Silva M (2010), trabajaron con los residuos secos del cultivo de banano (hojas del banano, pseudotallo y raquis). Es preciso mencionar que los sólidos solubles iniciales de la muestra a fermentar eran de 6° Brix para cada residuo mencionado. A los sólidos solubles se agregó levadura y nutrientes para someterlos al proceso de fermentación por 9 días, una vez culminado el proceso se monitorearon los sólidos solubles finales de las muestras y dieron como resultado 2, 2.2 y 2.2 de °Brix para las hojas del banano, el psedotallo y el raquis, respectivamente, lo que confirma la tendencia de entropía que tienen los sólidos solubles en el proceso de fermentación.

### **Análisis de varianza de sólidos solubles por tratamiento**

**Tratamiento 1: 0.1S/1.0A/3.5F**

Tabla 64

*Análisis de varianza de la variable sólidos solubles, tratamiento 1*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: SS.SS.				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.072906	1	0.072906	10.65090	0.011466
<b>Residual</b>	0.054761	8	0.006845		
<b>Total</b>	0.127667				

**Tratamiento 2: 0.3S/1.0A/3.5F**

Tabla 65

*Análisis de varianza de la variable sólidos solubles, tratamiento 2*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: SS				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.741101	1	0.741101	44.79856	0.000154
<b>Residual</b>	0.132344	8	0.016543		
<b>Total</b>	0.873444				

**Tratamiento 3: 0.1S/10.0A/3.5F**

Tabla 66

*Análisis de varianza de la variable sólidos solubles, tratamiento 3*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: SS.SS.				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.024329	1	0.024329	0.160261	0.699394
<b>Residual</b>	1.214449	8	0.151806		
<b>Total</b>	1.238778				

**Tratamiento 4: 0.3S/10.0A/3.5F**

Tabla 67

*Análisis de varianza de la variable sólidos solubles, tratamiento 4*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: SS.SS.				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.167877	1	0.167877	14.77460	0.004921
<b>Residual</b>	0.090900	8	0.011363		
<b>Total</b>	0.258778				

**Tratamiento 5: 0.1S/5.5A/2.0F**

Tabla 68

*Análisis de varianza de la variable sólidos solubles, tratamiento 5*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: SS.SS.				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.255695	1	0.255695	34.42789	0.000375
<b>Residual</b>	0.059416	8	0.007427		
<b>Total</b>	0.315111				

**Tratamiento 6: 0.3S/5.5A/2.0F**

Tabla 69

*Análisis de varianza de la variable sólidos solubles, tratamiento 6*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: SS.SS.				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.284942	1	0.284942	36.93059	0.000297
<b>Residual</b>	0.061725	8	0.007716		
<b>Total</b>	0.346667				

**Tratamiento 7: 0.1S/5.5A/5.0F**

Tabla 70

*Análisis de varianza de la variable sólidos solubles, tratamiento 7*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: SS.SS.				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.288179	1	0.288179	41.88438	0.000194
<b>Residual</b>	0.055043	8	0.006880		
<b>Total</b>	0.343222				

**Tratamiento 8: 0.3S/5.5A/5.0F**

Tabla 71

*Análisis de varianza de la variable sólidos solubles, tratamiento 8*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: SS.SS.				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.352595	1	0.352595	28.34475	0.000708
<b>Residual</b>	0.099516	8	0.012440		
<b>Total</b>	0.452111				

**Tratamiento 9: 0.2S/1.0A/2.0F**

Tabla 72

*Análisis de varianza de la variable sólidos solubles, tratamiento 9*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: SS.SS.				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.209265	1	0.209265	25.42464	0.000999
<b>Residual</b>	0.065846	8	0.008231		
<b>Total</b>	0.275111				

**Tratamiento 10: 0.2S/10.0A/2.0F**

Tabla 73

*Análisis de varianza de la variable sólidos solubles, tratamiento 10*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: SS.SS.				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.050626	1	0.050626	11.82059	0.008848
<b>Residual</b>	0.034263	8	0.004283		
<b>Total</b>	0.084889				

**Tratamiento 11: 0.2S/1.0A/5.0F**

Tabla 74

*Análisis de varianza de la variable sólidos solubles, tratamiento 11*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: SS.SS.				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.000096	1	0.000096	0.006487	0.937785
<b>Residual</b>	0.117793	8	0.014724		
<b>Total</b>	0.117889				

**Tratamiento 12: 0.2S/10.0A/5.0F**

Tabla 75

*Análisis de varianza de la variable sólidos solubles, tratamiento 12*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: SS.SS.				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.681747	1	0.681747	34.46373	0.000374
<b>Residual</b>	0.158253	8	0.019782		
<b>Total</b>	0.840000				

### Tratamiento 13: 0.2S/5.5A/3.5F

Tabla 76

*Análisis de varianza de la variable sólidos solubles, tratamiento 13*

Efecto	Análisis de Varianza; DV: SS.SS. (Spreadsheet1)				
	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	Fisher	p-valor
<b>Regresión</b>	0.199400	1	0.199400	34.64462	0.000368
<b>Residual</b>	0.046045	8	0.005756		
<b>Total</b>	0.245444				

Las tablas desde la 64 hasta la 76 prueban la significancia estadística de sólidos solubles comparando su media cuadrática contra un estimado del error experimental. En este caso, la variable independiente de sólidos solubles tiene un p-valor menor que 0.05 afirmando que esta variable si afecta significativamente a la variable dependiente del grado etanólico con un nivel de confianza del 95%.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

- Los factores y niveles destacables en la obtención del bioetanol a partir de los residuos lignocelulósicos de la cáscara de arroz son las variables centrales del diseño de experimentos de superficie de respuesta, siendo las óptimas variables de 0.2 g/100mL de *Saccharomyces cerevisiae*, al 5.5 % para la variable ácido sulfúrico y 3.5g/100mL de fibra celulósica.
- El diseño y construcción del biorreactor anaerobio fue adecuado para el proceso fermentativo tolerando una temperatura recomendable para la *Saccharomyces cerevisiae* de 36°C.
- El contenido de cenizas en la cáscara de arroz sin moler y molida es 13.37 y 12.97 %, respectivamente, la humedad de la cáscara de arroz sin moler y molida es 8.35 y 7.36 %, equitativamente.
- La pérdida de biomasa lignocelulósica de la cáscara de arroz (*Oryza sativa*) comprendido desde el pretratamiento mecánico hasta la hidrólisis fue de 52.84 %.
- Los parámetros significativos, evaluados cinéticamente, en el proceso de fermentación fueron: el pH, conductividad eléctrica y sólidos solubles; la temperatura estadísticamente no tuvo significancia, demostrando así una continuidad en el proceso de este parámetro.
- El grado etanólico según superficie de respuesta fue a concentraciones: 0.2 g/100mL de *Saccharomyces cerevisiae*, al 5.5% para la variable ácido sulfúrico y 3.5g/100mL de fibra celulósica. El rendimiento etanólico según superficie de respuesta fue a concentraciones: 0.2 g/100mL de *Saccharomyces cerevisiae*, al 5.5% para la variable ácido sulfúrico y 3.5g/100ml de fibra celulósica. El rendimiento etanólico en la biomasa según superficie de respuesta fue a concentraciones: 0.2 g/100mL de *Saccharomyces cerevisiae*, al 5.5% para la variable ácido sulfúrico y 3.5g/100ml de fibra celulósica.

## 5.2 Recomendaciones

- Efectuar el análisis químico de azúcares reductores después de la deslignificación de la biomasa.
- Diseñar un mecanismo que estandarice la temperatura en todo el proceso de fermentación.
- Realizar el proceso de hidratación para tener un etanol con mayor grado alcohólico.
- Optimizar parámetros para la obtención del bioetanol empleando otras fuentes de la biomasa lignocelulósica.
- Realizar el proceso de destilación a temperaturas menores para adquirir mayor concentración de bioetanol.
- Trabajar meticulosamente evitar la pérdida de la biomasa, principalmente en la deslignificación y en la obtención de la celulosa.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abril A. (2010). *Etanol a partir de biomasa lignocelulósica*. Retrieved from [http://karin.fq.uh.cu/acc/2016/CIENCIAS\\_TECNICAS/032/New/Documentación/Parte V/Bibliografía/Capt II/II-15.pdf](http://karin.fq.uh.cu/acc/2016/CIENCIAS_TECNICAS/032/New/Documentación/Parte V/Bibliografía/Capt II/II-15.pdf)
- Aden A. (2007). Water usage for current and future ethanol production. *National Renewable Energy Laboratory*, 22–23. Retrieved from [http://www.swhydro.arizona.edu/archive/V6\\_N5/feature4.pdf](http://www.swhydro.arizona.edu/archive/V6_N5/feature4.pdf)
- Adewale P., D. M. y N. M. (2015). Recent trends of biodiesel production from animal fat wastes and associated production techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 574–588. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.039>
- Adiche Ch. y Sundmacher K. (2010). Experimental investigation on a membrane distillation based micro-separator. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49(4), 425–434. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2010.02.009>
- Aditiya H., Mahlia T., Chong W., N. H., & y Sebayang A. (2016). Second generation bioethanol production: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 631–653. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.015>
- Aguilar, J., Espinoza, M., Cabanillas, J., Ávilab, I., Garcíab, A., Julcab, J., ... Linaresa, G. (2015). Evaluación de la cinética de crecimiento de *saccharomyces cerevisiae* utilizando un medio de cultivo a base de melaza de caña y suero lácteo. *Revista Científica de La Universidad Nacional de Trujillo*, 5, 1–47.
- Almenares j., N. F. y S. (2011). *Aspectos tecnológicos generales para la conversión a etanol de la biomasa lignocelulosica ii technological aspects general for conversion to ethanol from biomass lignocellulosic II*. Retrieved from <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v31n3/rtq12311.pdf>
- Ambiente, M. del. (2014). *SÓLIDOS DE LA GESTIÓN DEL ÁMBITO MUNICIPAL Y NO MUNICIPAL 2013*.
- Aminifarshidmehr N. (1996). The management of chronic suppurative otitis media with acid media solution. *The American Journal of Otology*, 17(1), 24–25. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8694129>

- Anwar, Z., Gulfraz, M., & Irshad, M. (2014). Agro-industrial lignocellulosic biomass a key to unlock the future bio-energy: A brief review. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 7(2), 163–173. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2014.02.003>
- AOAC. (2000). Official Methods of Analysis. Association of official analytical chemist. Retrieved September 9, 2019, from <https://www.aoac.org/official-methods-of-analysis-21st-edition-2019/>
- Aparecida F., Seferin M., Gonçalves V., y Z. M. (2017). Life cycle assessment comparison between brown parboiled rice produced under organic and minimal tillage cultivation systems. *Journal of Cleaner Production*, 161, 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.098>
- Arcelus I. (2015). *Obtención de bioetanol a partir de desechos de arroz*. Retrieved from <http://digibug.ugr.es/handle/10481/39208>
- Balat M. (2007). Global Bio-fuel Processing and Production Trends. In *Energy Exploration y Exploitation* (Vol. 25). Retrieved from <http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1260/014459807782009204>
- Balat M. (2011). Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 858–875. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.08.013>
- Balat M., B. H. y Ö. C. (2008). Progress in bioethanol processing. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(5), 551–573. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2007.11.001>
- Balat M. y Balat H. (2009). Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel. *Applied Energy*, 86(11), 2273–2282. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.03.015>
- Banco Mundial. (2013). Poner fin a la pobreza extrema promover la prosperidad compartida. Retrieved May 15, 2018, from Informe Anual website: <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/16091/9780821399446SP.pdf>
- Bardales C., León C., M. J., Arellano J., Nomberto C., S. M., & Pretel O., M. E. y B. M. (2011). Producción de bioetanol del desecho lignocelulósico "peladilla" de *Asparagus officinalis* L. "esparrágo" por *Candida utilis* var. major. *UCV - SCIENTIA*, 3(2),

- 205–213. Retrieved from  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo;jsessionid=10B26C755DB0D92D17E3232350379E96.dialnet02?codigo=4366526>
- Bastos Delgado, V. (2015). Etanol, alcoholquímica e biorrefinarias. *PhD Proposal*, 1, 1–299.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Betts, W. B., Dart, R. K., Ball, A. S., & Pedlar, S. L. (1991). *Biosynthesis and Structure of Lignocellulose*. [https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3470-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3470-1_7)
- Bezerra M., Santelli R., Oliveira E., V. L. y E. L. (2008). Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, 76(5), 965–977.  
<https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.05.019>
- Bharathiraja B., Jayamuthunagai J., Praveenkumar R., V. J., & Vinoshmuthukumar P. y Saravananaraj A. (2014). Bioethanol Production from Lignocellulosic Materials-An Overview 1 2 3 3 1. *THE SCITECH JOURNAL*, 1(07), 24–25. Retrieved from  
<http://thescitech.com/admin/includes/abstractpdf/2014-10-0753bea428e0d9c.pdf>
- Botaro V., Dos Santos C., A. G. y D. C. A. (2001). Chemical modification of lignocellulosic materials by irradiation with Nd-YAG pulsed laser. *Applied Surface Science*, 183(1–2), 120–125. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(01\)00571-2](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(01)00571-2)
- Box G., H. J. y H. W. (2008). *Estadística para investigadores* (2nd ed.). Retrieved from  
<https://books.google.com.pe/books?id=XR8SR1Iuj5wC&pg=PA475&dq=Box-Behnken&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjBuPKmuYvkAhUOxVkkHcJJC08Q6AEIKzAA#v=onepage&q=Box-Behnken&f=false>
- Brooks N. y Adger W. (2003). Country level risk measures of climate-related natural disasters and implications for adaptation to climate change. *Tyndall Centre for Climate Change Research*. Retrieved from  
[http://lib.riskreductionafrica.org/bitstream/handle/123456789/459/3740.Country\\_level\\_risk\\_measures\\_of\\_climate-related\\_natural\\_disasters\\_and\\_implications\\_for\\_adaptation\\_to\\_climate\\_change.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://lib.riskreductionafrica.org/bitstream/handle/123456789/459/3740.Country_level_risk_measures_of_climate-related_natural_disasters_and_implications_for_adaptation_to_climate_change.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Cardona, C. A., & Sánchez, Ó. J. (2007). Fuel ethanol production: Process design trends and integration opportunities. *Bioresource Technology*, 98(12), 2415–2457. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.002>
- Chabannes M., Bénézet J, C. L. y, & Garcia E. (2014). Use of raw rice husk as natural aggregate in a lightweight insulating concrete: An innovative application. *Construction and Building Materials*, 70, 428–438. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.025>
- Danish Ac, M., Naqvi, M., Farooq, U., & Naqvi, S. (2015). Characterization of South Asian agricultural residues for potential utilization in future "energy mix". *Energy Procedia*, 75, 2974–2980. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.604>
- De Barros. *Diagnóstico e avaliação da gestão de lixiviados produzidos em aterros sanitários de resíduos urbanos.* , (2008).
- De Gante Cabrera, V. H. (2013). *La lombricultura : alternativa a la disposición final de residuos domiciliarios.* 89, 43–46.
- Della Possamai, D., Kuhn, I., & Hotza, D. (2001). *Caracterização de cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica.* 24(6), 778–782.
- Demirbas A. (2007). Producing and using bioethanol as an automotive fuel. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 2(4), 391–401. <https://doi.org/10.1080/15567240600705466>
- Demirbaş A. (2004). Ethanol from cellulosic biomass resources. *International Journal of Green Energy*, 1(1), 79–87. <https://doi.org/10.1081/GE-120027885>
- Demirbas A. (2005). Bioethanol from Cellulosic Materials: A Renewable Motor Fuel from Biomass. *Energy Sources*, 27(4), 327–337. <https://doi.org/10.1080/00908310390266643>
- Demirbas, A. H., & Demirbas, I. (2007). Importance of rural bioenergy for developing countries. *Energy Conversion and Management*, 48(8), 2386–2398. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.03.005>
- Ebringerová A., H. Z. . H. T. (2006). *Advances in Polymer Science.* [https://doi.org/10.1007/12\\_099](https://doi.org/10.1007/12_099)
- Escalante J. y Fuentes H. (2013). *Estudio experimental de obtención de bioetanol a partir de*

- residuos agrícolas de banano orgánico en Piura* (Universidad de Piura). Retrieved from [https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1744/ING\\_531.pdf?sequence=1](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1744/ING_531.pdf?sequence=1)
- Espinoza V. (2015). *Utilización del jugo de caña de azúcar (saccharum officinarum l.) como medio de cultivo para la producción de saccharomyces boulardii L.* Retrieved from <http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/3185/2/CD0000-28-TRABAJO COMPLETO-pdf>
- FAO. (2010). Towards a New Green Revolution. Retrieved September 16, 2018, from Food for all - World food summit - Agricultural machinery worldwide website: <http://www.fao.org/docrep/x0262e/x0262e06.htm>
- FAO. (2016). Information System on Water and Agriculture. Retrieved April 23, 2018, from Food and Agriculture Organization of the United Nations website: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm>
- FAO. (2017). *Rice Market Monitor*. Retrieved from [www.fao.org/economic/RMM](http://www.fao.org/economic/RMM)
- Firouzi S., N. A. y A. H. (2018). Resource use efficiency of rice production upon single cropping and ratooning agro-systems in terms of bioethanol feedstock production. *Energy*, 150, 694–701. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.02.155>
- Foletto, E. L., Hoffmann, R., Hoffmann, R. S., Portugal Jr, U. L., & Jahn, S. L. (2005). Applicability of Rice Husk Ash. *Química Nova*, 28(6), 1055–1060. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000600021>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2012). *Development Co-operation Report 2012*. <https://doi.org/10.1787/dcr-2012-en>
- Fundación, N. (2009). *Ambiental, Gestión integral de residuos sólidos: elemento básico de la sostenibilidad*.
- García F., S. V. y G. E. (2011). Stirred tank bioreactors. *Comprehensive Biotechnology*, 2, 179–198. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00108-2>
- Giri B., Sandeep D., Chakrabarti T., y P. R. (2010). Commercializing lignocellulosic bioethanol: technology bottlenecks and possible remedies. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 4(1), 77–93. <https://doi.org/10.1002/bbb.188>

- Goldemberg J. (2007). *Environmental and ecological dimensions of biofuels*. Retrieved from [https://www.esa.org/biofuels/presentations/Goldemberg\\_BiofuelsPresentation.pdf](https://www.esa.org/biofuels/presentations/Goldemberg_BiofuelsPresentation.pdf)
- Gosselink R., Jong E., G. B. y A. A. (2004). Co-ordination network for lignin—standardisation, production and applications adapted to market requirements (EUROLIGNIN). *Industrial Crops and Products*, 20(2), 121–129. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2004.04.015>
- Gracida J. Y Pérez B. (2014). Factores previos involucrados en la producción de bioetanol, aspectos a considerar. In *Rev. Int. Contam. Ambie* (Vol. 30). Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v30n2/v30n2a8.pdf>
- Hamelinck C., H. G. y F. A. (2005). Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term. *Biomass and Bioenergy*, 28(4), 384–410. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.09.002>
- Hettenhaus J. (1998). Ethanol fermentation strains: present and future requirements for biomass to ethanol commercialization. *United States Department of Energy*. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.593.3810&rep=rep1&type=pdf>
- Higuchi T. (1990). Lignin biochemistry: Biosynthesis and biodegradation. *Wood Science and Technology*, 24(1), 23–63. <https://doi.org/10.1007/BF00225306>
- Hoogenkamp H. (2015). *Plant Protein Vision: Rice Bran Protein, Pea Protein, Soy Protein: Henk Hoogenkamp, Bram Roseboom: 9781511910293: Amazon.com: Books*. Retrieved from <https://www.amazon.com/Plant-Protein-Vision-Rice-Bran/dp/1511910291>
- Hoogenkamp H., K. H. y W. J. (2017). Rice Protein and Rice Protein Products. In *Sustainable Protein Sources* (pp. 47–65). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802778-3.00003-2>
- Instituto brasileiro de geografia e estatística (IBGE). (2013). Produção agrícola municipal. Retrieved May 2, 2018, from Instituto brasileiro de geografia e estatística -IBGE website: [https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/66/pam\\_2013\\_v40\\_br.pdf](https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/66/pam_2013_v40_br.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2017). Producción de arroz cáscara creció 16,7% en setiembre de 2017. Retrieved May 2, 2018, from <https://www.inei.gov.pe/prensa/noticias/produccion-de-arroz-cascara-crecio-167-en-setiembre-de-2017-10203/>

- Instituto Nacional de Innovacion Agraria (INIA). (2004). Instituto Nacional de Innovacion Agraria (INIA) - PNIA en arroz. Retrieved May 2, 2018, from <http://www.inia.gob.pe/mobile/prod-servicios/publicaciones/publicacion/tripticos/item/279-01-2004-hibrido-simple-inia-605-peru>
- Instituto Unibanco. (2003). Institutounibanco.org.br: Home - Instituto Unibanco. Retrieved June 12, 2018, from <https://www.easycounter.com/report/institutounibanco.org.br>
- Internacional Energy Agency (IEA). (2008). *Key world energy statistics*. Retrieved from <http://iklim.cob.gov.tr/iklim/Files/eKutuphane/Key world Energy Statistics.pdf>
- Iqbal M., Alimuddin Z., M. S., & Mohamed M., Rizman I., Mat M., A. A. M. . M. H. (2015). Performance and carbon efficiency analysis of biomass via stratified gasifier. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 10(20). Retrieved from [www.arnpjournals.com](http://www.arnpjournals.com)
- Jin, X., Chen, X., Shi, C., Li, M., Guan, Y., Yu, C. Y., ... Peng, J. (2017). Determination of hemicellulose, cellulose and lignin content using visible and near infrared spectroscopy in *Miscanthus sinensis*. *Bioresource Technology*, 241, 603–609. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.047>
- Johansson, T. B., Kelly, H., & Williams, R. H. (1992). *Renewable Fuels and Electricity for a Growing World Economy : Defining and Achieving the Potential* (Vol. 4).
- K. G. Mansaray; A. E. Ghaly. (1997). Physical and thermochemical properties of rice husk. *Energy Resources*, 19(November 2012), 989–1004. <https://doi.org/10.1080/00908319708908904>
- Kang, Q., Appels, L., Tan, T., & Dewil, R. (2014). *Bioethanol from Lignocellulosic Biomass : Current Findings Determine Research Priorities*. 2014(Ci).
- Kapur P. (1985). Production of reactive bio-silica from the combustion of rice husk in a tube-in-basket (TiB) burner. *Powder Technology*, 44(1), 63–67. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(85\)85022-1](https://doi.org/10.1016/0032-5910(85)85022-1)
- Kirk T. (1987). Biochemistry of lignin degradation by phanerochaete chrysosporium. *Biochemistry of Lignin Degradation*, 43(43), 315–332. Retrieved from <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1988/kirk88a.pdf>
- Krylova A., K. E. y L. A. (2008). Ethanol and diesel fuel from plant raw materials: A review. *Solid*

*Fuel Chemistry*, 42(6), 358–364. <https://doi.org/10.3103/S0361521908060062>

Kumar A., Chan E., R. R., & Lakshmi M., R. y R. P. (2007). Economics and environmental impact of bioethanol production technologies: an appraisal Environmental impact of bioethanol production technologies and their Life-cycle assessment (LCA). *Biotechnology and Molecular Biology Review*, 2(1), 14-032. Retrieved from <http://www.academicjournals.org/BMBR>

Lashinsky A. y Schwartz N. (2006). How to Beat the High Cost of Gasoline. Forever! - February 06, 2006. Retrieved July 25, 2018, from CNN website: [https://money.cnn.com/magazines/fortune/fortune\\_archive/2006/02/06/8367959/index.htm](https://money.cnn.com/magazines/fortune/fortune_archive/2006/02/06/8367959/index.htm)

Lashinsky B. y Schwartz N. (2006). How to Beat the High Cost of Gasoline. Forever! - February 06, 2006. Retrieved May 9, 2018, from [http://archive.fortune.com/magazines/fortune/fortune\\_archive/2006/02/06/8367959/index.htm](http://archive.fortune.com/magazines/fortune/fortune_archive/2006/02/06/8367959/index.htm)

Lee J. (1997). Biological conversion of lignocellulosic biomass to ethanol. *Journal of Biotechnology*, 56(1), 1–24. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(97\)00073-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(97)00073-4)

Limayem A. y Ricke S. (2012). Lignocellulosic biomass for bioethanol production: Current perspectives, potential issues and future prospects. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38(4), 449–467. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2012.03.002>

López, J. H. (2005). *La Crisis Energética Mundial: Una Oportunidad Para Colombia*.

Lora J. y Glasser W. (2002). Recent Industrial Applications of Lignin: A Sustainable Alternative to Nonrenewable Materials. *Journal of Polymers and the Environment*, 10, 39–47. <https://doi.org/10.1023/A:1021070006895>

Lu S. (2016). Rice: Chinese food uses. *Encyclopedia of Food Grains (Second Edition)*, 3, 110–115. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394437-5.00127-3>

Margeot A., Hahn-Hagerdal B., Edlund M., S. R. y M. F. (2009). New improvements for lignocellulosic ethanol. *Current Opinion in Biotechnology*, 20(3), 372–380. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2009.05.009>

Marrugo G; Valdés C. y Chejne F. (2016). WebCharacterization of Colombian agroindustrial

- biomass residues as energy resourceset Importer. *Energy and Fuels*, 30(10), 8386–8398. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b01596>
- Martín, C., Hahn hägerdal, B., Jönsson, L. J., Whalbm, F., & Galbe, M. (2002). *Ethanol production from enzymatic hydrolysates of sugarcane bagasse using recombinant xylose-utilising Saccharomyces cerevisiae*. 31, 274–282.
- Mastny L. et al. (2007). *Biofuels for Transport: Global Potential and Implications for Sustainable Energy and Agriculture* (V. EARTHSCAN Long. Sterling, Ed.). Retrieved from <http://base.dnsgb.com.ua/files/book/Agriculture/Biotechnology-Renewable-Energy/Biofuels-for-Transport-Global-Potential.pdf>
- Mathew B., Lopes A., F. S., & Thomas S., P. L. y K. M. (2010). Isolation of nanocellulose from pineapple leaf fibres by steam explosion. *Carbohydrate Polymers*, 81(3), 720–725. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.03.046>
- McKendry, P., & Peter. (2002). Energy production from biomass: overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83(1), 37–46. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3)
- Ministerio da Agricultura, P. y A.-B. (2006). *Plano Nacional de Agroenergia (2006-2011)* (2nd ed.; Lilian A., Ed.). Retrieved from [www.agricultura.gov.br](http://www.agricultura.gov.br)
- Ministerio de Agricultura (MINAGRI). (2012). El Arroz : cadena agroproductiva. Retrieved May 2, 2018, from Dirección general de competitividad agraria website: <http://agroaldia.minagri.gob.pe/biblioteca/download/pdf/agroeconomia/agroeconomiaarroz3.pdf>
- Ministerio del Ambiente. (2014). *Sexto informe nacional de residuos sólidos de la gestión del ámbito municipal y no municipal 2013*. Retrieved from <http://www.minam.gob.pe/calidadambiental/residuos>
- Mohan, D., Pittman, C. U., & Steele, P. H. (2006). *Pyrolysis of Wood / Biomass for Bio-oil : A Critical Review*. (4), 848–889.
- Mohd S., Abdulla R., Azmah S., Marbawi H., Azlan J., M. A., & Rodrigues K. (2017). Yeasts in sustainable bioethanol production: A review. *Biochemistry and Biophysics Reports*, 10, 52–61. <https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2017.03.003>

- Molion, L. C. B. (2008). Aquecimento global: uma visão crítica. *Revista Brasileira de Climatologia*, 3(0). Retrieved from <http://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/25404/17024>
- Monsalve J., M. V. y R. A. (2006). Producción de etanol a partir de la cáscara de banano y de almidón de yuca. *DYNA*, 73(150), 21–27. Retrieved from [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0012-73532006000300002](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532006000300002)
- Muñoz Velázquez, K. T., & Bedoya Osorio, A. (n.d.). *El papel de los residuos sólidos, en la solución de problemas ambientales*.
- Myers R., M. D. y C. A. (2016). *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. (4th ed.). Retrieved from <https://www.wiley.com/en-us/Response+Surface+Methodology%3A+Process+and+Product+Optimization+Using+Designed+Experiments%2C+4th+Edition-p-9781118916018>
- Nagarajan S., Skillen N., I. J., & Lawton L. y Robertson P. (2017). Cellulose II as bioethanol feedstock and its advantages over native cellulose. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 182–192. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.118>
- Naqvi, S. R., Uemura, Y., Osman, N., & Yusup, S. (2015). Production and Evaluation of Physicochemical Characteristics of Paddy Husk Bio-char for its C Sequestration Applications. *Bioenergy Research*, 8(4), 1800–1809. <https://doi.org/10.1007/s12155-015-9634-x>
- Navarro, P., Herrero, M., Gómez, L., & Beneyto, M. (1995). *Residuos orgánicos y agricultura*.
- Nigam P. y Singh A. (2011). Production of liquid biofuels from renewable resources. *Progress in Energy and Combustion Science*, 37(1), 52–68. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2010.01.003>
- Nishi, M. H., Gonçalves Jacovine, L., Silva, M. L. Da, Valverde, S. R., Nogueira, H. D. P., & Alvarenga, A. D. P. (2005). Influência dos créditos de carbono na viabilidade financeira de três projetos florestais. *Revista Árvore*, 29(2), 263–270. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622005000200009>
- Oficina Nacional de Estadística (NSO). (2013). *Thailand-2013 Agricultural Census-Explanatory Notes*. Retrieved from <http://web.nso.go.th/>

- Oliva J. (2003). *Efecto de los productos de degradación originados en la explosión por vapor de biomasa de chopo sobre Kluyveromyces marxianus* (Universidad Complutense de Madrid). Retrieved from <http://eprints.ucm.es/4804/1/T26833.pdf>
- Osman O. (2015). *Analytical analysis of a renewable fuel operated Recuperated gas turbine* (Budapest University of Technology and Economics). Retrieved from <http://tdk.bme.hu/GPK/DownloadPaper/Analytical-analysis-of-a-micro-gas-turbine>
- Owolabi, A. W. T., Arniza, G., Wan Daud, W., & Alkharkhi, A. F. M. (2016). Effect of alkaline peroxide pre-treatment on microfibrillated cellulose from oil Palm Fronds Rachis Amenable for Pulp and Paper and Bio-composite production. *BioResources*, *11*(2), 3013–3026. <https://doi.org/10.15376/biores.11.2.3013-3026>
- Pasuquin J. y Witt C. (2006). Rice in Asia and the global food supply. Retrieved May 2, 2018, from International Potash Institute (IPI) website: <https://www.ipipotash.org/en/eifc/2006/10/2/english>
- Pavle A., Meyer A., J. P. y, & Johansen K. (2010). Reactor design for minimizing product inhibition during enzymatic lignocellulose hydrolysis: I. Significance and mechanism of cellobiose and glucose inhibition on cellulolytic enzymes. *Biotechnology Advances*, *28*(3), 308–324. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2010.01.003>
- Peng L., Hocart C., Redmond J., & Williamson R. (2000). Fractionation of carbohydrates in Arabidopsis root cell walls shows that three radial swelling loci are specifically involved in cellulose production. *Planta*, *211*(3), 406–414. <https://doi.org/10.1007/s004250000301>
- Philippe, F., & Culot, M. (2009). Household solid waste generation and characteristics in Cape Haitian city, Republic of Haiti. *Resources, Conservation and Recycling*, *54*(2), 73–78. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.06.009>
- Pitarelo, A. P. (2014). *Avaliação da susceptibilidade do bagaço e da palha de cana-de-açúcar à bioconversão via pré-tratamento a vapor e ...*
- Pode, R. (2016). Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *53*, 1468–1485. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.051>

- Prada A. y Cortés C. (2010). La descomposición térmica de la cascarilla de arroz: una alternativa de aprovechamiento integral. *Orinoquia*, 14(1), 155–170. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/rori/v14s1/v14s1a13.pdf>
- Prakash, P., & Sheeba, K. N. (2016). Prediction of pyrolysis and gasification characteristics of different biomass from their physico-chemical properties. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(11), 1530–1536. <https://doi.org/10.1080/15567036.2014.953713>
- Prasad S., S. A. y J. H. (2007). Ethanol as an alternative fuel from agricultural, industrial and urban residues. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1), 1–39. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.05.007>
- Qu, X., Li, Z., Xie, X., Sui, Y., Yang, L., & Chen, Y. (2009). Survey of composition and generation rate of household wastes in Beijing , China. *Waste Management*, 29(10), 2618–2624. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.05.014>
- Ragauskas, A. J., Williams, C. K., Davison, B. H., Britovsek, G., Cairney, J., Eckert, C. A., ... Tschaplinski, T. (2006). The Path Forward for Biofuels and Biomaterials. *Science*, 311(5760), 484–489. <https://doi.org/10.1126/science.1114736>
- Ramachandra T., Bharath H., K. G. y S. H. (2018). Municipal solid waste: generation, composition and GHG emissions in Bangalore, India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1122–1136. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.085>
- Ramachandra T., A. B. y D. D. (2012). Insights to urban dynamics through landscape spatial pattern analysis. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 18, 329–343. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.03.005>
- Ríos I., Luzardo I., G. J., & Santos J. y Gutiérrez C. (2020). Production and characterization of fuel pellets from rice husk and wheat straw. *Renewable Energy*, 145, 500–507. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.048>
- Rivera Lopez, N. (2009). Propuesta De Un Programa Para El Manejo De Los Residuos Solidos En La Plaza De Mercado De Cerete – Cordoba. In *Pontificia universidad Javeriana*.

- Rocco F., S. H. Y. F. J. (2015). *Non-conventional Building Materials based on Agro-industrial Wastes Study of the mechanical, physical and chemical properties of wood under natural and artificial weathering treatment. View project Timber Housing in Brazil View project* (1st ed.; Copyright© Tiliform, Ed.). Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/276900038>
- Rodríguez C. (2012). *Efecto del uso de mezclas de lignocelulosas sobre la producción de etanol de segunda generación*. Retrieved from <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/111989>
- Saha, B. C., & Cotta, M. A. (2008). Lime pretreatment, enzymatic saccharification and fermentation of rice hulls to ethanol. *Biomass and Bioenergy*, 32(10), 971–977. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.01.014>
- Salinas E. y Gasca V. (2009). Los biocombustibles. *Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco México*, 82. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=32512739009>
- Sánchez A., Gutiérrez A., M. J. . R. C. (2010). Producción de bioetanol a partir de subproductos agroindustriales lignocelulósicos - PDF. *Revista Tumbaga*, 5, 61–91. Retrieved from <https://docplayer.es/36403027-Produccion-de-bioetanol-a-partir-de-subproductos-agroindustriales-lignocelulosicos.html>
- Scarpinella, G. D. (2002). *Reflorestamento no Brasil e o Protocolo de Kyoto*. 182.
- Scheller H. y Ulvskov P. (2010). Hemicelluloses. *Annual Review of Plant Biology*, 61(1), 263–289. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112315>
- Sedesol. (1996). *Problemática del Tiradero “A cielo abierto.”* 33–41.
- Seo Y. y Seong M. (2013). Estimation of greenhouse gas emissions from road traffic: A case study in Korea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 777–787. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.016>
- Shankar J., Wright Ch., R. J. y, & Kenney K. (2011). A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5(6), 683–707. <https://doi.org/10.1002/bbb.324>
- Sharholly M, Ahmad K, V. R. y G. R. (2006). *Municipal solid waste characteristics and*

- management in Allahabad, India*. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.03.001>
- Shiun L., Abdul Z., R. S. y, & Hashim H. (2012). A review on utilisation of biomass from rice industry as a source of renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3084–3094. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.051>
- Shreeve J. (2006). Redesigning life to make ethanol. Retrieved September 16, 2018, from MIT Technology Review website: <https://www.technologyreview.com/s/406006/redesigning-life-to-make-ethanol/>
- Silitonga A., Masjuki H., Mahlia T., Ong H., C. W. y B. M. (2013). Overview properties of biodiesel diesel blends from edible and non-edible feedstock. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 346–360. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.055>
- Silva R. y Paula B. (2009). Causa do aquecimento global: antropogênica versus natural. *TERRAE DIDÁTICA*, 5(1), 42–49. Retrieved from [https://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/v5/pdf-v5/TD\\_V-a4.pdf](https://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/v5/pdf-v5/TD_V-a4.pdf)
- Silverman, M., & Worthman, S. (1995). The future of renewable energy industries. *The Electricity Journal*, 8(2), 12–31. [https://doi.org/10.1016/1040-6190\(95\)90149-3](https://doi.org/10.1016/1040-6190(95)90149-3)
- SOSBAI. (2014). Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. *XXX Reunião Técnica Da Cultura Do Arroz Irrigado*. Retrieved from [http://www.irga.rs.gov.br/upload/20141205095320recomendacoes\\_tecnicas\\_sosbai\\_2014.pdf](http://www.irga.rs.gov.br/upload/20141205095320recomendacoes_tecnicas_sosbai_2014.pdf)
- Sujauddin, M., Huda, S. M. S., & Hoque, A. T. M. R. (2008). Household solid waste characteristics and management in Chittagong, Bangladesh. *Waste Management*, 28(9), 1688–1695. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.06.013>
- Sun, R. C., Tomkinson, J., Ma, P. L., & Liang, S. F. (2000). *Comparative study of hemicelluloses from rice straw by alkali and hydrogen peroxide treatments*. 42, 111–122.
- Sun Y. y Cheng J. (2002). Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresource Technology*, 83(1), 1–11. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00212-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00212-7)
- Tamanini C. y Hauly M. (2004). Resíduos agroindustriais para produção biotecnológica de xilitol. *Semina: Ciências Agrárias*, 25(4), 315. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2004v25n4p315>

- Tan K., Lee, T. K. y R. A. (2008). Role of energy policy in renewable energy accomplishment: The case of second-generation bioethanol. *Energy Policy*, 36(9), 3360–3365. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.05.016>
- Tejada, L., Marimón, W., & Medina, M. (2014). Evaluación del potencial de las cáscaras de frutas en la obtención de bioetanol. *Hechos Microbiológicos*, 5, 4–9.
- Tejada, L. P., Tejada, C., Villabona, Á., Alvear, M. R., Castillo, C. R., Henao, D. L., & Marimón, W. (2010). Producción de bioetanol a partir de la fermentación alcohólica de jarabes glucosados derivados de cáscaras de naranja y piña. *Revista Educación En Ingeniería*. Retrieved from [http://www.acofi.edu.co/revista/Revista10/2009\\_I\\_51.pdf](http://www.acofi.edu.co/revista/Revista10/2009_I_51.pdf)
- Teófilo R. y Ferreira M. (2006). Quimiometria II: Planilhas eletrônicas para cálculos de planejamentos experimentais, um tutorial. *Quim. Nova*, 29(2), 338–350. Retrieved from <http://www.scielo.br/pdf/%0D/qn/v29n2/28454.pdf>
- Toniazzo, L., Fierro, V., Braghiroli, F., Amaral, G., & Celzard, A. (2013). Biosorption of model pollutants in liquid phase on raw and modified rice husks. *Journal of Physics Conference Series J. Phys.: Conf. Ser.*, 416(1), 6–11. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/416/1/012026>
- Tosi F. y Mussi A. (2010). Impactos Econômicos para o Brasil de um Choque Tecnológico na Produção de Etanol. *Revista Economia*. Retrieved from [http://www.anpec.org.br/revista/vol11/vol11n3p691\\_710.pdf](http://www.anpec.org.br/revista/vol11/vol11n3p691_710.pdf)
- Tzong Horng Liou; Shao Jung Wu. (2009). Characteristics of microporous/mesoporous carbons prepared from rice husk under base- and acid-treated conditions. *Journal of Hazardous Materials*, 171(1–3), 693–703. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.06.056>
- United States Census Bureau. (2016). Population Clock. Retrieved May 15, 2018, from [https://www.census.gov/popclock/?intcmp=home\\_pop](https://www.census.gov/popclock/?intcmp=home_pop)
- United States Census Bureau. (2017). Population Clock. Retrieved June 12, 2018, from [https://www.census.gov/popclock/?intcmp=home\\_pop](https://www.census.gov/popclock/?intcmp=home_pop)
- Vargas, P. (2009). *El Cambio Climático y Sus Efectos en el Perú*. 59. Retrieved from <http://www.ipacc.pe/doc/Documento-de-Trabajo-14-2009.pdf>
- Vassilev S., Baxter D., A. L. y, & Vassileva C. (2010). An overview of the chemical composition

- of biomass. *Fuel*, 89(5), 913–933. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>
- Velázquez J. (2014). Evaluación del potencial de generación energética con cáscara de arroz en la zona del Huallaga Central del departamento de San Martín. *Gobierno Regional San Martín*. Retrieved from [https://www.dremsm.gob.pe/archivos/electricidad/Potencial\\_energetico.pdf](https://www.dremsm.gob.pe/archivos/electricidad/Potencial_energetico.pdf)
- Villadsen J., N. J. y L. G. (2011). *Bioreaction Engineering Principles*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9688-6>
- Walter A., Dolzan P., Q. O., & Garcia J., De Silva C., P. F. y S. A. (2008). *A sustainability analysis of the Brazilian ethanol*. Retrieved from [http://www.globalbioenergy.org/uploads/media/0811\\_Unicamp\\_-\\_A\\_sustainability\\_analysis\\_of\\_the\\_Brazilian\\_ethanol.pdf](http://www.globalbioenergy.org/uploads/media/0811_Unicamp_-_A_sustainability_analysis_of_the_Brazilian_ethanol.pdf)
- Wang Y., Liu C., Yang R., J. W. y, & Fu L. (2016). Microfluidic distillation chip for methanol concentration detection. *Analytica Chimica Acta*, 912, 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2016.01.047>
- Woon N., M. I. y O. Y. (2006). Development of rice husks–plastics composites for building materials. *Waste Management*, 26(2), 189–194. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.05.008>
- Wootton R. y Mello A. (2004). Continuous laminar evaporation: micron-scale distillation. Electronic supplementary information (ESI) available: Figure S1. See <http://www.rsc.org/suppdata/cc/b3/b311697b/>. *Chemical Communications*, (3), 266. <https://doi.org/10.1039/b311697b>
- Wyman C. y Hinman N. (1990). Ethanol. Fundamentals of production from renewable feedstocks and use as transportation fuel. In *Applied biochemistry and biotechnology (USA)*. Retrieved from <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US9318821>
- Xu, N., Zhang, W., Ren, S., Liu, F., Zhao, C., Liao, H., ... Peng, L. (2012). Hemicelluloses negatively affect lignocellulose crystallinity for high biomass digestibility under NaOH and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pretreatments in Miscanthus. *Biotechnology for Biofuels*, 1–12. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-5-58>
- Yang S., D. W. y C. H. (2006). Enzymatic hydrolysis of rice straw in a tubular reactor coupled

- with UF membrane. *Process Biochemistry*, 41(3), 721–725.  
<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.08.002>
- Yarbrough D., Wilkes K., O. P., & Graves R. y Vohra A. (2005). *Apparent Thermal Conductivity Data and Related Information for Rice Hulls and Crushed Pecan Shells Authors*. 222–230. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.543.3927&rep=rep1&type=pdf>
- Ying T., Keat L., Wan A., P. C. (2011). Second-generation bioethanol as a sustainable energy source in Malaysia transportation sector: Status, potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4521–4536.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.099>
- Zhang Q. y Chuang K. (2001). Adsorption of organic pollutants from effluents of a Kraft pulp mill on activated carbon and polymer resin. *Advances in Environmental Research*, 5(3), 251–258.  
[https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(00\)00059-9](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(00)00059-9)
- Zhao, H., Kwak, J. H., Conrad Zhang, Z., Brown, H. M., Arey, B. W., & Holladay, J. E. (2007). Studying cellulose fiber structure by SEM, XRD, NMR and acid hydrolysis. *Carbohydrate Polymers*, 68(2), 235–241. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.12.013>
- Zhong, J. (2011). Bioreactor engineering. In *Comprehensive Biotechnology* (2nd ed., pp. 165–177). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00097-0>
- Zhu J. y Pan X. (2010). Woody biomass pretreatment for cellulosic ethanol production: Technology and energy consumption evaluation☆. *Bioresource Technology*, 101(13), 4992–5002.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.007>
- Zhu S., Wu Y., Yu Z., Zhang X., Wang C., Y. F. y J. S. (2006). Production of ethanol from microwave-assisted alkali pretreated wheat straw. *Process Biochemistry*, 41(4), 869–873.  
<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.10.024>
- Zhu, S., Wu, Y., Yu, Z., Zhang, X., Wang, C., Yu, F., & Jin, S. (2006). Production of ethanol from microwave-assisted alkali pretreated wheat straw. *Process Biochemistry*, 41(4), 869–873.  
<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.10.024>

## ANEXO

### Anexo 1. ANNOVA de cada parámetro por tratamientos

#### TRATAMIENTO 1

#### pH en función del tiempo

Tabla 77

Resumen estadístico del pH, tratamiento 1

Estadística	Resumen
	estadístico: Ph
	Valor
R Múltiple	0.98118487
R <sup>2</sup> Múltiple	0.96272376
R <sup>2</sup> Ajustado	0.95806423
F(1,8)	206.61391
P	5.36E-07
Error Estándar de Estimación	0.03149083

Tabla 78

Resumen de regresión del pH para la variable dependiente, tratamiento 1

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err.Estd. de b*	B	Err.Estd. de b	t(8)	p-valor
Interceptar			4.954275	0.017277	286.7524	0.000000
Tiempo (h)	-0.98119	0.068261	-0.005951	0.000414	-14.3741	0.000001

Tabla 79

Resumen estadístico de la C.E, tratamiento 1

**Conductividad eléctrica en función del tiempo**

Estadística	Resumen estadístico: C.E.
	Valor
R Múltiple	0.96831908
R <sup>2</sup> Múltiple	0.93764183
R <sup>2</sup> Ajustado	0.92984706
F(1,8)	120.291137
p	4.2419E-06
Error Estándar de Estimación	34.7211256

Tabla 80

Resumen de regresión de la C.E para la variable dependiente, tratamiento 1

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err.Estd. de b*	b	Err.Estd. de b	t(8)	p-valor
Interceptar			3118.066	19.04946	163.6827	0.000000
Tiempo (h)	-0.968319	0.088288	-5.007	0.45651	-10.9677	0.000004

## Temperatura en función del tiempo

Tabla 81

Resumen estadístico de la Temperatura, tratamiento 1

Estadística	Resumen estadístico: Temperatura
	Valor
R Múltiple	0.59590768
R <sup>2</sup> Múltiple	0.35510596
R <sup>2</sup> Ajustado	0.2744942
F(1,8)	4.40513865
p	0.06906179
Error Estándar de Estimación	0.11451133

Tabla 82

Resumen de regresión de la Temperatura para la variable dependiente, tratamiento 1

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err.Estd. de b*	b	Err.Estd. de b	t(8)	p-valor
Interceptar			37.72109	0.062826	600.4085	0.000000
Tiempo (h)	-0.595908	0.283922	-0.00316	0.001506	-2.0988	0.069062

## Sólidos solubles en función del tiempo

Tabla 83

Resumen estadístico de SS.SS, tratamiento 1

Estadística	Resumen estadístico: SS.SS
	Valor
R Múltiple	0.75568929
R <sup>2</sup> Múltiple	0.5710663
R <sup>2</sup> Ajustado	0.51744959
F(1,8)	10.6509011
p	0.01146587
Error Estándar de Estimación	0.08273492

Tabla 84

Resumen de regresión de SS.SS para la variable dependiente, tratamiento 1

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err.Estd. de b*	b	Err.Estd. de b	t(8)	p-valor
Interceptar			4.191057	0.045392	92.33063	0.000000
Tiempo (h)	-0.755689	0.231553	-0.003550	0.001088	-3.26357	0.011466

## TRATAMIENTO 2

### pH en función del tiempo

Tabla 85

Resumen estadístico del pH, tratamiento 2

Estadística	Resumen
	estadístico: Ph
	Valor
R Múltiple	0.98560051
R <sup>2</sup> Múltiple	0.97140837
R <sup>2</sup> Ajustado	0.96783441
F(1,8)	271.802151
P	1.8486E-07
Error Estándar de Estimación	0.03211708

Tabla 86

Resumen de regresión del pH para la variable dependiente, tratamiento 2

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err.Estd. de b*	B	Err.Estd. de b	t(8)	p-valor
Interceptar			4.940060	0.017621	280.3544	0.000000
Tiempo (h)	-0.985601	0.059783	-0.006962	0.000422	-16.4864	0.000000

## Conductividad eléctrica en función del tiempo

Tabla 87

Resumen estadístico de la C.E., tratamiento 2

Estadística	Resumen estadístico: C.E.
	Valor
R Múltiple	0.97638894
R <sup>2</sup> Múltiple	0.95333536
R <sup>2</sup> Ajustado	0.94750228
F(1,8)	163.436017
P	1.3215E-06
Error Estándar de Estimación	45.5412991

Tabla 88

Resumen de regresión de la C.E. para la variable dependiente, tratamiento 2

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err.Estd. de b*	b	Err.Estd. de b	t(8)	p-valor
Interceptar			3536.361	24.98586	141.5345	0.000000
Tiempo (h)	-0.976389	0.076375	-7.655	0.59877	-12.7842	0.000001

## Temperatura en función del tiempo

Tabla 89

Resumen estadístico de la Temperatura, tratamiento 2

Estadística	Resumen estadístico: Temperatura
	Valor
R Múltiple	0.03232372
R <sup>2</sup> Múltiple	0.00104482
R <sup>2</sup> Ajustado	-0.12382457
F(1,8)	0.00836732
P	0.92936569
Error Estándar de Estimación	2.68446746

Tabla 90

Resumen de regresión de la Temperatura para la variable dependiente, tratamiento 2

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err.Estd. de b*	b	Err.Estd. de b	t(8)	p-valor
Interceptar			35.12009	1.472811	23.84562	0.000000
Tiempo (h)	-0.032324	0.353369	-0.00323	0.035295	-0.09147	0.929366

## Sólidos solubles en función del tiempo

Tabla 91

Resumen estadístico de SS.SS, tratamiento 2

Estadística	Resumen estadístico: SS.SS
	Valor
R Múltiple	0.92113013
R <sup>2</sup> Múltiple	0.84848073
R <sup>2</sup> Ajustado	0.82954082
F(1,8)	44.7985632
P	0.00015379
Error	0.12861943
Estándar de Estimación	

Tabla 92

Resumen de regresión de SS.SS para la variable dependiente, tratamiento 2

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err.Estd. de b*	B	Err.Estd. de b	t(8)	p-valor
Interceptar			3.862629	0.070566	54.73783	0.000000
Tiempo (h)	-0.921130	0.137622	-0.011319	0.001691	-6.69317	0.000154

## TRATAMIENTO 3

### pH en función del tiempo

Tabla 93

Resumen estadístico del pH, tratamiento 3

Estadística	Resumen
	estadístico: Ph
	Valor
R Múltiple	0.88570128
R <sup>2</sup> Múltiple	0.78446676
R <sup>2</sup> Ajustado	0.7575251
F(1,8)	29.1172445
P	0.00064908
Error Estándar de Estimación	0.13900732

Tabla 94

Resumen de regresión del Ph para la variable dependiente, tratamiento 3

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err.Estd. de b*	B	Err.Estd. de b	t(8)	p-valor
Interceptar			3.520294	0.076265	46.15858	0.000000
Tiempo (h)	-0.885701	0.164139	-0.009862	0.001828	-5.39604	0.000649

## Conductividad eléctrica en función del tiempo

Tabla 95

Resumen estadístico de la C.E., tratamiento 3

Estadística	Resumen estadístico: C.E.
	Valor
R Múltiple	0.69455654
R <sup>2</sup> Múltiple	0.48240879
R <sup>2</sup> Ajustado	0.41770989
F(1,8)	7.45621313
p	0.02582156
Error Estándar de Estimación	811.293908

Tabla 96

Resumen de regresión de la C.E. para la variable dependiente, tratamiento 3

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err.Estd. de b*	b	Err.Estd. de b	t(8)	p-valor
Interceptar			4412.450	445.1097	9.913174	0.000009
Tiempo (h)	0.694557	0.254360	29.127	10.6667	2.730607	0.025822

## Temperatura en función del tiempo

Tabla 97

Resumen estadístico de la Temperatura, tratamiento 3

Estadística	Resumen estadístico: Temperatura
	Valor
R Múltiple	0.1062913
R <sup>2</sup> Múltiple	0.01129784
R <sup>2</sup> Ajustado	-0.11228993
F(1,8)	0.09141553
P	0.7700969
Error Estándar de Estimación	2.41966493

Tabla 98

Resumen de regresión de la Temperatura para la variable dependiente, tratamiento 3

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err.Estd. de b*	b	Err.Estd. de b	t(8)	p-valor
Interceptar			34.42867	1.327529	25.93440	0.000000
Tiempo (h)	0.106291	0.351551	0.00962	0.031813	0.30235	0.770097

## Solidos solubles en función del tiempo

Tabla 99

Resumen estadístico de SS.SS, tratamiento 3

Estadística	Resumen estadístico: SS.SS
	Valor
R Múltiple	0.14014
R <sup>2</sup> Múltiple	0.01963922
R <sup>2</sup> Ajustado	-
	0.10290588
F(1,8)	0.16026115
p	0.69939369
Error Estándar de Estimación	0.38962308

Tabla 100

Resumen de regresión de SS.SS para la variable dependiente, tratamiento 3

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err.Estd. de b*	b	Err.Estd. de b	t(8)	p-valor
Interceptar			4.466597	0.213763	20.89504	0.000000
Tiempo (h)	-0.140140	0.350064	-0.002051	0.005123	-0.40033	0.699394

## TRATAMIENTO 4

### pH en función del tiempo

Tabla 101

Resumen estadístico del pH, tratamiento 4

Estadística	Resumen estadístico: Ph
	Valor
R Múltiple	0.97741347
R <sup>2</sup> Múltiple	0.95533709
R <sup>2</sup> Ajustado	0.94975423
F(1,8)	171.119559
P	1.108E-06
Error	0.03603091
Estándar de Estimación	

Tabla 102

Resumen de regresión del pH para la variable dependiente, tratamiento 4

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err.Estd. de b*	b	Err.Estd. de b	t(8)	p-valor
Interceptar			3.246649	0.019768	164.2371	0.000000
Tiempo (h)	-0.977413	0.074719	-0.006197	0.000474	-13.0813	0.000001

## Conductividad eléctrica en función del tiempo

Tabla 103

Resumen estadístico del C.E., tratamiento 4

Estadística	Resumen estadístico: C.E.
	Valor
R Múltiple	0.93033087
R <sup>2</sup> Múltiple	0.86551553
R <sup>2</sup> Ajustado	0.84870497
F(1,8)	51.4864227
P	9.4702E-05
Error Estándar de Estimación	149.357578

Tabla 104

Resumen de regresión de la C.E. para la variable dependiente, tratamiento 4

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err.Estd. de b*	B	Err.Estd. de b	t(8)	p-valor
Interceptar			5292.485	81.94381	64.58676	0.000000
Tiempo (h)	-0.930331	0.129656	-14.090	1.96372	-7.17540	0.000095

## Temperatura en función del tiempo

Tabla 105

Resumen estadístico de la Temperatura, tratamiento 4

Estadística	Resumen estadístico: Temperatura
	Valor
R Múltiple	0.16745759
R <sup>2</sup> Múltiple	0.02804204
R <sup>2</sup> Ajustado	-0.0934527
F(1,8)	0.23080869
P	0.64378703
Error	2.51565891
Estándar de Estimación	

Tabla 106

Resumen de regresión de la Temperatura para la variable dependiente, tratamiento 4

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err.Estd. de b*	b	Err.Estd. de b	t(8)	p-valor
Interceptar			34.20148	1.380196	24.78017	0.000000
Tiempo (h)	0.167458	0.348561	0.01589	0.033075	0.48043	0.643787

## Sólidos solubles en función del tiempo

Tabla 107

Resumen estadístico de SS.SS, tratamiento 4

Estadística	Resumen estadístico: SS.SS
	Valor
R Múltiple	0.80543869
R <sup>2</sup> Múltiple	0.64873148
R <sup>2</sup> Ajustado	0.60482292
F(1,8)	14.7746001
P	0.00492077
Error Estándar de Estimación	0.10659531

Tabla 108

Resumen de regresión de SS.SS para la variable dependiente, tratamiento 4

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err.Estd. de b*	B	Err.Estd. de b	t(8)	p-valor
Interceptar			4.480364	0.058483	76.61015	0.000000
Tiempo (h)	-0.805439	0.209544	-0.005387	0.001401	-3.84377	0.004921

## TRATAMIENTO 5

### pH en función del tiempo

Tabla 109

Resumen estadístico del pH, tratamiento 5

Estadística	Resumen estadístico: Ph
	Valor
R Múltiple	0.94746538
R <sup>2</sup> Múltiple	0.89769064
R <sup>2</sup> Ajustado	0.88490197
F(1,8)	70.1942159
p	3.1269E-05
Error Estándar de Estimación	0.01607312

Tabla 110

Resumen de regresión del pH para la variable dependiente, tratamiento 5

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err.Estd. de b*	b	Err.Estd. de b	t(8)	p-valor
Interceptar			3.492708	0.008818	396.0711	0.000000
Tiempo (h)	-0.947465	0.113087	-0.001771	0.000211	-8.3782	0.000031

## Conductividad eléctrica en función del tiempo

Tabla 111

Resumen estadístico de la C.E., tratamiento 5

Estadística	Resumen estadístico: C.E.
	Valor
R Múltiple	0.4195124
R <sup>2</sup> Múltiple	0.17599065
R <sup>2</sup> Ajustado	0.07298949
F(1,8)	1.70862774
p	0.22748104
Error Estándar de Estimación	257.005202

Tabla 112

Resumen de regresión de la C.E. para la variable dependiente, tratamiento 5

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err.Estd. de b*	b	Err.Estd. de b	t(8)	p-valor
Interceptar			4058.616	141.0038	28.78374	0.000000
Tiempo (h)	-0.419512	0.320938	-4.417	3.3790	-1.30714	0.227481

## Temperatura en función del tiempo

Tabla 113

Resumen estadístico de la Temperatura, tratamiento 5

Estadística	Resumen estadístico: Temperatura
	Valor
R Múltiple	0.06024574
R <sup>2</sup> Múltiple	0.00362955
R <sup>2</sup> Ajustado	-0.12091676
F(1,8)	0.02914217
P	0.86868972
Error Estándar de Estimación	2.60140473

Tabla 114

Resumen de regresión de la Temperatura para la variable dependiente, tratamiento 5

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err.Estd. de b*	b	Err.Estd. de b	t(8)	p-valor
Interceptar			34.95756	1.427239	24.49313	0.000000
Tiempo (h)	0.060246	0.352911	0.00584	0.034203	0.17071	0.868690

## Sólidos solubles en función del tiempo

Tabla 115

Resumen estadístico de SS.SS, tratamiento 5

Estadística	Resumen estadístico: SS.SS
	Valor
R Múltiple	0.90080231
R <sup>2</sup> Múltiple	0.81144481
R <sup>2</sup> Ajustado	0.78787541
F(1,8)	34.427896
P	0.00037525
Error	0.08617992
Estándar de Estimación	

Tabla 116

Resumen de regresión de SS.SS para la variable dependiente, tratamiento 5

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err.Estd. de b*	B	Err.Estd. de b	t(8)	p-valor
Interceptar			4.120042	0.047282	87.13781	0.000000
Tiempo (h)	-0.900802	0.153523	-0.006648	0.001133	-5.86753	0.000375

## Tratamiento 6

pH en función del tiempo

Tabla 117

Resumen estadístico del pH, tratamiento 6

Estadística	Resumen estadístico: Ph
	Valor
R Múltiple	0.98732482
R <sup>2</sup> Múltiple	0.97481029
R <sup>2</sup> Ajustado	0.97166158
F(1,8)	309.590011
P	1.1122E-07
Error	0.01441446
Estándar de Estimación	

Tabla 118

Resumen de regresión del pH para la variable dependiente, tratamiento 6

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err.Estd. de b*	B	Err.Estd. de b	t(8)	p-valor
Interceptar			3.484043	0.007908	440.5511	0.000000
Tiempo (h)	-0.987325	0.056113	-0.003335	0.000190	-17.5952	0.000000

## Conductividad eléctrica en función del tiempo

Tabla 119

Resumen estadístico de la C.E., tratamiento 6

Estadística	Resumen estadístico: C.E.
	Valor
R Múltiple	0.96919982
R <sup>2</sup> Múltiple	0.93934829
R <sup>2</sup> Ajustado	0.93176682
F(1,8)	123.900644
P	3.7936E-06
Error Estándar de Estimación	30.1944491

Tabla 120

Resumen de regresión de la C.E. para la variable dependiente, tratamiento 6

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err.Estd. de b*	b	Err.Estd. de b	t(8)	p-valor
Interceptar			4190.352	16.56594	252.9499	0.000000
Tiempo (h)	-0.969200	0.087072	-4.419	0.39699	-11.1311	0.000004

## Temperatura en función tiempo

Tabla 121

Resumen estadístico de la Temperatura., tratamiento 6

Estadística	Resumen estadístico: Temperatura
	Valor
R Múltiple	0.02546649
R <sup>2</sup> Múltiple	0.00064854
R <sup>2</sup> Ajustado	-0.12427039
F(1,8)	0.0051917
P	0.94432819
Error Estándar de Estimación	2.60752997

Tabla 122

Resumen de regresión de la Temperatura. para la variable dependiente, tratamiento 6

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err.Estd. de b*	B	Err.Estd. de b	t(8)	p-valor
Interceptar			35.12577	1.430600	24.55317	0.000000
Tiempo (h)	0.025466	0.353439	0.00247	0.034283	0.07205	0.944328

## Sólidos solubles en función del tiempo

Tabla 123

Resumen estadístico de SS.SS., tratamiento 6

Estadística	Resumen estadístico: SS.SS
	Valor
R Múltiple	0.90661325
R <sup>2</sup> Múltiple	0.82194759
R <sup>2</sup> Ajustado	0.79969104
F(1,8)	36.930591
P	0.00029689
Error Estándar de Estimación	0.08783851

Tabla 124

Resumen de regresión de SS. SS para la variable dependiente, tratamiento 6

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err.Estd. de b*	B	Err.Estd. de b	t(8)	p-valor
Interceptar			4.072656	0.048192	84.50919	0.000000
Tiempo (h)	-0.906613	0.149186	-0.007018	0.001155	-6.07705	0.000297

## TRATAMIENTO 7

### pH en función del tiempo

Tabla 125

Resumen estadístico de pH, tratamiento 7

Estadística	Resumen estadístico: Ph
	Valor
R Múltiple	0.957158165
R <sup>2</sup> Múltiple	0.916151754
R <sup>2</sup> Ajustado	0.905670723
F(1,8)	87.41046302
P	1.39941E-05
Error Estándar de Estimación	0.03050305

Tabla 126

Resumen de regresión del pH para la variable dependiente, tratamiento 7

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err. Estd de b*	b	Err. Estd de b	t(8)	p-valor
Interceptar			3.338526	0.016735	199.4907	0.000000
Tiempo (h)	-0.957158	0.102377	-0.003750	0.000401	-9.3494	0.000014

## Conductividad eléctrica en función del tiempo

Tabla 127

Resumen estadístico de la C.E., tratamiento 7

Estadística	Resumen estadístico: C.E.
	Value
R Múltiple	0.96565194
R <sup>2</sup> Múltiple	0.93248368
R <sup>2</sup> Ajustado	0.92404414
F(1,8)	110.489868
p	5.8421E-06
Error	35.0509913
Estándar de Estimación	

Tabla 128

Resumen de regresión de la C.E. para la variable dependiente, tratamiento 7

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err. Estd de b*	b	Err. Estd de b	t(8)	p-valor
Interceptar			4261.184	19.23044	221.5854	0.000000
Tiempo (h)	-0.965652	0.091867	-4.844	0.46084	-10.5114	0.000006

## Temperatura en función del tiempo

Tabla 129

Resumen estadístico de la Temperatura., tratamiento 7

Estadística	Resumen estadístico: Temperatura
	Value
R Múltiple	0.02484577
R <sup>2</sup> Múltiple	0.00061731
R <sup>2</sup> Ajustado	-0.12430552
F(1,8)	0.00494155
p	0.94568342
Error	2.63406221
Estándar de Estimación	

Tabla 130

Resumen de regresión de la Temperatura para la variable dependiente, tratamiento 7

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err. Estd de b*	b	Err. Estd de b	t(8)	p-valor
Interceptar			35.10032	1.445157	24.28825	0.000000
Tiempo (h)	0.024846	0.353444	0.00243	0.034632	0.07030	0.945683

## Sólidos solubles en función del tiempo

Tabla 131

Resumen estadístico de SS.SS, tratamiento 7

Estadística	Resumen estadístico: SS.SS
	Value
R Múltiple	0.9163128
R <sup>2</sup> Múltiple	0.83962914
R <sup>2</sup> Ajustado	0.81958279
F(1,8)	41.8843756
p	0.00019378
Error	0.08294791
Estándar de Estimación	

Tabla 132

Resumen de regresión de SS.SS para la variable dependiente, tratamiento 7

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err. Estd de b*	b	Err. Estd de b	t(8)	p-valor
Interceptar			4.137346	0.045509	90.91331	0.000000
Tiempo (h)	-0.916313	0.141585	-0.007058	0.001091	-6.47181	0.000194

## TRATAMIENTO 8

### pH en función del tiempo

Tabla 133

Resumen estadístico del pH, tratamiento 8

Estadística	Resumen estadístico: Ph
	Value
R Múltiple	0.959853586
R <sup>2</sup> Múltiple	0.921318906
R <sup>2</sup> Ajustado	0.91148377
F(1,8)	93.67626833
P	1.08265E-05
Error	0.015798542
Estándar de Estimación	

Tabla 134

Resumen de regresión del pH para la variable dependiente, tratamiento 8

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err. Estd de b*	b	Err. Estd de b	t(8)	p-valor
Interceptar			3.545222	0.008668	409.0134	0.000000
Tiempo (h)	-0.959854	0.099172	-0.002010	0.000208	-9.6787	0.000011

## Conductividad eléctrica en función del tiempo

Tabla 135

Resumen estadístico de la C.E., tratamiento 8

Estadística	Resumen estadístico: C.E.
	Value
R Múltiple	0.963699392
R <sup>2</sup> Múltiple	0.928716518
R <sup>2</sup> Ajustado	0.919806083
F(1,8)	104.2279637
P	7.27091E-06
Error Estándar de Estimación	37.41244132

Tabla 136

Resumen de regresión de la C.E para la variable dependiente, tratamiento 8

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err. Estd de b*	b	Err. Estd de b	t(8)	p-valor
Interceptar			4165.244	20.52603	202.9250	0.000000
Tiempo (h)	-0.963699	0.094395	-5.022	0.49189	-10.2092	0.000007

## Temperatura en función del tiempo

Tabla 137

Resumen estadístico de la Temperatura, tratamiento 8

Estadística	Resumen estadístico: Temperatura
	Value
R Múltiple	0.005972936
R <sup>2</sup> Múltiple	3.5676E-05
R <sup>2</sup> Ajustado	-
F(1,8)	0.124959865
P	0.000285418
Error	0.986934662
Estándar de Estimación	2.337303072

Tabla 138

Resumen de regresión de la Temperatura para la variable dependiente, tratamiento 8

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err. Estd de b*	b	Err. Estd de b	t(8)	p-valor
Interceptar			34.94563	1.282342	27.25141	0.000000
Tiempo (h)	0.005973	0.353547	0.00052	0.030730	0.01689	0.986935

## Sólidos solubles en función del tiempo

Tabla 139

Resumen estadístico de SS.SS, tratamiento 8

Estadística	Resumen estadístico: SS.SS
	Value
R Múltiple	0.88311136
R <sup>2</sup> Múltiple	0.77988567
R <sup>2</sup> Ajustado	0.75237138
F(1,8)	28.3447484
p	0.00070764
Error	0.11153258
Estándar de Estimación	

Tabla 140

Resumen de regresión de SS.SS para la variable dependiente, tratamiento 8

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err. Estd de b*	b	Err. Estd de b	t(8)	p-valor
Interceptar			4.129556	0.061191	67.48585	0.000000
Tiempo (h)	-0.883111	0.165874	-0.007807	0.001466	-5.32398	0.000708

## TRATAMIENTO 9

### pH en función del tiempo

Tabla 141

Resumen estadístico del pH, tratamiento 9

Estadística	Resumen estadístico: Ph
	Valor
R Múltiple	0.98118487
R <sup>2</sup> Múltiple	0.96272376
R <sup>2</sup> Ajustado	0.95806423
F(1,8)	206.61391
p	5.36E-07
Error	0.03149083
Estándar de Estimación	

Tabla 142

Resumen de regresión del pH para la variable dependiente, tratamiento 9

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err. Estd de b*	b	Err. Estd de b	t(8)	p-valor
Interceptar			4.954275	0.017277	286.7524	0.000000
Tiempo (h)	-0.981185	0.068261	-0.005951	0.000414	-14.3741	0.000001

## Conductividad eléctrica en función del tiempo

Tabla 143

Resumen estadístico de la C.E., tratamiento 9

Estadística	Resumen
	estadístico: C.E.
	Value
R Múltiple	0.84705381
R <sup>2</sup> Múltiple	0.71750016
R <sup>2</sup> Ajustado	0.68218767
F(1,8)	20.3185996
p	0.00198204
Error Estándar de Estimación	73.163792

Tabla 144

Resumen de regresión de la C.E. para la variable dependiente, tratamiento 9

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err. Estd de b*	b	Err. Estd de b	t(8)	p-valor
<b>Interceptar</b>			3288.193	40.14071	81.91666	0.000000
<b>Tiempo (h)</b>	-0.847054	0.187916	-4.336	0.96194	-4.50762	0.001982

## Temperatura en función del tiempo

Tabla 145

Resumen estadístico de la Temperatura., tratamiento 9

Estadística	Resumen estadístico: Temperatura
	Value
R Múltiple	0.05348842
R <sup>2</sup> Múltiple	0.002861011
R <sup>2</sup>	-
Ajustado	0.121781363
F(1,8)	0.02295376
P	0.883328259
Error	2.590994421
Estándar de Estimación	

Tabla 146

Resumen de regresión de la Temperatura para la variable dependiente, tratamiento 9

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err. Estd de b*	b	Err. Estd de b	t(8)	p-valor
Interceptar			35.09933	1.421528	24.69127	0.000000
Tiempo (h)	-0.053488	0.353047	-0.00516	0.034066	-0.15150	0.883328

## Sólidos solubles en función del tiempo

Tabla 147

Resumen estadístico de SS.SS, tratamiento 9

Estadística	Resumen estadístico: SS.SS
	Value
R Múltiple	0.87215574
R <sup>2</sup> Múltiple	0.76065564
R <sup>2</sup> Ajustado	0.73073759
F(1,8)	25.4246436
p	0.00099878
Error	0.09072368
Estándar de Estimación	

Tabla 148

Resumen de regresión de SS.SS para la variable dependiente, tratamiento 9

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err. Estd de b*	b	Err. Estd de b	t(8)	p-valor
Interceptar			4.165095	0.049775	83.67878	0.000000
Tiempo (h)	-0.872156	0.172968	-0.006015	0.001193	-5.04229	0.000999

## TRATAMIENTO 10

### pH en función del tiempo

Tabla 149

Resumen estadístico del pH, tratamiento 10

Estadística	Resumen estadístico: Ph
	Value
R Múltiple	0.992780518
R <sup>2</sup> Múltiple	0.985613156
R <sup>2</sup> Ajustado	0.983814801
F(1,8)	548.0635917
P	1.17824E-08
Error	0.02593563
Estándar de Estimación	

Tabla 150

Resumen de regresión del pH para la variable dependiente, tratamiento 10

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err. Estd de b*	b	Err. Estd de b	t(8)	p-valor
Interceptar			3.439553	0.014229	241.7221	0.000000
Tiempo (h)	-0.992781	0.042407	-0.007983	0.000341	-23.4108	0.000000

## Conductividad eléctrica en función del tiempo

Tabla 151

Resumen estadístico de la C.E., tratamiento 10

Estadística	Resumen estadístico: C.E.
	Value
R Múltiple	0.92002263
R <sup>2</sup> Múltiple	0.84644163
R <sup>2</sup> Ajustado	0.82724684
F(1,8)	44.0974547
p	0.00016238
Error	53.8099768
Estándar de Estimación	

Tabla 152

Resumen de regresión de la C.E. para la variable dependiente, tratamiento 10

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err. Estd de b*	b	Err. Estd de b	t(8)	p-valor
Interceptar			5041.538	29.52240	170.7699	0.000000
Tiempo (h)	-0.920023	0.138545	-4.698	0.70748	-6.6406	0.000162

## Temperatura en función del tiempo

Tabla 153

Resumen estadístico de la Temperatura, tratamiento 10

Estadística	Resumen estadístico: Temperatura
	Value
R Múltiple	0.16542052
R <sup>2</sup> Múltiple	0.02736395
R <sup>2</sup> Ajustado	-0.09421556
F(1,8)	0.22507041
p	0.64788294
Error Estándar de Estimación	2.56517037

Tabla 154

Resumen de regresión de la Temperatura para la variable dependiente, tratamiento 10

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err. Estd de b*	b	Err. Estd de b	t(8)	p-valor
Interceptar			34.22772	1.407360	24.32052	0.000000
Tiempo (h)	0.165421	0.348683	0.01600	0.033726	0.47442	0.647883

## Sólidos solubles en función del tiempo

Tabla 155

Resumen estadístico de SS.SS, tratamiento 10

Estadística	Resumen estadístico: SS.SS
	Value
R Múltiple	0.77225594
R <sup>2</sup> Múltiple	0.59637924
R <sup>2</sup> Ajustado	0.54592664
F(1,8)	11.8205858
p	0.00884844
Error	0.0654436
Estándar de Estimación	

Tabla 156

Resumen de regresión de SS.SS para la variable dependiente, tratamiento 10

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err. Estd de b*	b	Err. Estd de b	t(8)	p-valor
Interceptar			4.314211	0.035905	120.1560	0.000000
Tiempo (h)	-0.772256	0.224617	-0.002958	0.000860	-3.4381	0.008848

## TRATAMIENTO 11

### ph en función del tiempo

Tabla 157

Resumen estadístico del pH, tratamiento 11

Estadística	Resumen estadístico: Ph
	Valor
R Múltiple	0.98208263
R <sup>2</sup> Múltiple	0.9644863
R <sup>2</sup> Ajustado	0.96004708
F(1,8)	217.265156
p	4.4127E-07
Error Estándar de Estimación	0.03461492

Tabla 158

Resumen de regresión del pH para la variable dependiente, tratamiento 11

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err. Estd de b*	b	Err. Estd de b	t(8)	p-valor
Interceptar			4.868752	0.018991	256.3689	0.000000
Tiempo (h)	-0.982083	0.066627	-0.006708	0.000455	-14.7399	0.000000

## Conductividad eléctrica en función del tiempo

Tabla 159

Resumen estadístico de la C.E., tratamiento 11

Estadística	Resumen estadístico: C.E.
	Value
R Múltiple	0.95436804
R <sup>2</sup> Múltiple	0.91081836
R <sup>2</sup> Ajustado	0.89967066
F(1,8)	81.7045648
p	1.795E-05
Error Estándar de Estimación	45.7795641

Tabla 160

Resumen de regresión de la C.E. para la variable dependiente, tratamiento 11

	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err. Estd de b*	b	Err. Estd de b	t(8)	p-valor
N=10						
Interceptar			3398.858	25.11658	135.3233	0.000000
Tiempo (h)	-0.954368	0.105583	-5.441	0.60190	-9.0391	0.000018

## Temperatura en función del tiempo

Tabla 161

Resumen estadístico de la Temperatura., tratamiento 11

Estadística	Resumen estadístico: Temperatura
	Value
R Múltiple	0.04993375
R <sup>2</sup> Múltiple	0.00249338
R <sup>2</sup> Ajustado	-0.12219495
F(1,8)	0.01999689
p	0.89104187
Error Estándar de Estimación	2.583183

Tabla 162

Resumen de regresión de la Temperatura para la variable dependiente, tratamiento 11

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err. Estd de b*	b	Err. Estd de b	t(8)	p-valor
Interceptar			35.08044	1.417242	24.75261	0.000000
Tiempo (h)	-0.049934	0.353112	-0.00480	0.033963	-0.14141	0.891042

## Sólidos solubles en función del tiempo

Tabla 163

Resumen estadístico de SS.SS, tratamiento 11

Estadística	Resumen estadístico: SS.SS
	Value
R Múltiple	0.02846422
R <sup>2</sup> Múltiple	0.00081021
R <sup>2</sup> Ajustado	-0.12408851
F(1,8)	0.00648695
p	0.93778497
Error Estándar de Estimación	0.1213432

Tabla 164

Resumen de regresión de SS. SS, para la variable dependiente, tratamiento 11

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err. Estd de b*	b	Err. Estd de b	t(8)	p-valor
Interceptar			4.681048	0.066574	70.31352	0.000000
Tiempo (h)	-0.028464	0.353410	-0.000128	0.001595	-0.08054	0.937785

## Tratamiento 12

### pH en función del tiempo

Tabla 165

Resumen estadístico del pH, tratamiento 12

Estadística	Resumen estadístico: Ph Value
R Múltiple	0.946360183
R <sup>2</sup> Múltiple	0.895597596
R <sup>2</sup> Ajustado	0.882547296
F(1,8)	68.62658833
p	3.39386E-05
Error Estándar de Estimación	0.031819354

Tabla 166

Resumen de regresión del pH para la variable dependiente, tratamiento 12

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err. Estd de b*	b	Err. Estd de b	t(8)	p-valor
Interceptar			3.270180	0.017457	187.3231	0.000000
Tiempo (h)	-0.946360	0.114238	-0.003466	0.000418	-8.2841	0.000034

## Conductividad eléctrica en función del tiempo

Tabla 167

Resumen estadístico de la C.E., tratamiento 12

Estadística	Resumen estadístico: C.E.
	Value
R Múltiple	0.946494947
R <sup>2</sup> Múltiple	0.895852685
R <sup>2</sup> Ajustado	0.88283427
F(1,8)	68.8142701
p	3.36044E-05
Error Estándar de Estimación	35.24325351

Tabla 168

Resumen de regresión de la C.E. para la variable dependiente, tratamiento 12

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err. Estd de b*	b	Err. Estd de b	t(8)	p-valor
Interceptar			5000.742	19.33592	258.6245	0.000000
Tiempo (h)	-0.946495	0.114098	-3.844	0.46337	-8.2954	0.000034

## Temperatura en función del tiempo

Tabla 169

Resumen estadístico de la Temperatura, tratamiento 12

Estadística	Resumen estadístico: Temperatura
	Value
R Múltiple	0.174782996
R <sup>2</sup> Múltiple	0.030549096
R <sup>2</sup> Ajustado	-0.09063227
F(1,8)	0.252094008
p	0.629129767
Error	2.549915062
Estándar de Estimación	

Tabla 170

Resumen de regresión de la Temperatura para la variable dependiente, tratamiento 12

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err. Estd de b*	b	Err. Estd de b	t(8)	p-valor
Interceptar			34.21600	1.398990	24.45764	0.000000
Tiempo (h)	0.174783	0.348111	0.01683	0.033526	0.50209	0.629130

## Sólidos solubles en función del tiempo

Tabla 171

Resumen estadístico de SS. SS, tratamiento 12

Estadística	Resumen estadístico: SS.SS
	Value
R Múltiple	0.900890636
R <sup>2</sup> Múltiple	0.811603938
R <sup>2</sup> Ajustado	0.78805443
F(1,8)	34.46373253
P	0.000373961
Error Estándar de Estimación	0.140647028

Tabla 172

Resumen de regresión de SS.SS para la variable dependiente, tratamiento 12

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err. Estd de b*	b	Err. Estd de b	t(8)	p-valor
Interceptar			5.303518	0.077165	68.72972	0.000000
Tiempo (h)	-0.900891	0.153458	-0.010856	0.001849	-5.87058	0.000374

## TRATAMIENTO 13

### pH en función del tiempo

Tabla 173

Resumen estadístico del pH, tratamiento 13

Estadística	Resumen estadístico: Ph Value
R Múltiple	0.94899823
R <sup>2</sup> Múltiple	0.90059764
R <sup>2</sup> Ajustado	0.88817235
F(1,8)	72.4809889
p	2.7828E-05
Error Estándar de Estimación	0.01821794

Tabla 174

Resumen de regresión del pH para la variable dependiente, tratamiento 13

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err. Estd de b*	b	Err. Estd de b	t(8)	p-valor
Interceptar			3.586204	0.009995	358.7953	0.000000
Tiempo (h)	-0.948998	0.111469	-0.002039	0.000240	-8.5136	0.000028

## Conductividad eléctrica en función del tiempo

Tabla 175

Resumen estadístico de la C.E., tratamiento 13

Estadística	Resumen estadístico: C.E.
	Value
R Múltiple	0.98186624
R <sup>2</sup> Múltiple	0.96406132
R <sup>2</sup> Ajustado	0.95956898
F(1,8)	214.60138
p	4.6286E-07
Error Estándar de Estimación	20.1348772

Tabla 176

Resumen de regresión de la C.E. para la variable dependiente, tratamiento 13

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err. Estd de b*	b	Err. Estd de b	t(8)	p-valor
Interceptar			4419.909	11.04683	400.1064	0.000000
Tiempo (h)	-0.981866	0.067025	-3.878	0.26473	-14.6493	0.000000

## Temperatura en función del tiempo

Tabla 177

Resumen estadístico de la Temperatura, tratamiento 13

Estadística	Resumen estadístico: Temperatura
	Value
R Múltiple	0.18165657
R <sup>2</sup> Múltiple	0.03299911
R <sup>2</sup> Ajustado	-0.087876
F(1,8)	0.27300168
p	0.61548167
Error Estándar de Estimación	2.50157801

Tabla 178

Resumen de regresión de la Temperatura para la variable dependiente, tratamiento 13

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err. Estd de b*	b	Err. Estd de b	t(8)	p-valor
Interceptar			34.23399	1.372470	24.94334	0.000000
Tiempo (h)	0.181657	0.347671	0.01718	0.032890	0.52250	0.615482

## Sólidos solubles en función del tiempo

Tabla 179

Resumen estadístico de SS.SS, tratamiento 13

Estadística	Resumen estadístico: SS.SS
	Value
R Múltiple	0.90133405
R <sup>2</sup> Múltiple	0.81240306
R <sup>2</sup> Ajustado	0.78895345
F(1,8)	34.6446197
p	0.00036752
Error Estándar de Estimación	0.07586553

Tabla 180

Resumen de regresión de SS.SS para la variable dependiente, tratamiento 13

N=10	Resumen de regresión para la variable dependiente					
	b*	Err. Estd de b*	b	Err. Estd de b	t(8)	p-valor
Interceptar			4.296869	0.041623	103.2330	0.000000
Tiempo (h)	-0.901334	0.153133	-0.005871	0.000997	-5.8860	0.000368

**Anexo 2. Resumen de las variables independientes y dependientes de la metodología de superficie de respuesta en el biocombustible etanol**

Tabla 181

*Resumen de resultado de las variables dependientes del diseño de experimentos Box-Behnken de 3 factores, 1 bloque, 15 ejecuciones, +3 puntos centrales por bloque*

Trat.	Variables independientes			Variables dependientes		
	S.cerv. (g/100mL)	Ác.Sulf. (%)	Fibra cels. (g/100mL)	Grado Etanólico (cc)	Rendimiento etanólico (g/L)	Rendimiento etanólico/ biomasa (mg/g)
<b>1</b>	0.1	1	3.5	23.9	18.7	5.3
<b>2</b>	0.3	1	3.5	24.7	19.3	5.5
<b>3</b>	0.1	10	3.5	15	12.2	3.5
<b>4</b>	0.3	10	3.5	16.5	12.9	3.7
<b>5</b>	0.1	5.5	2	30.8	20.5	10.3
<b>6</b>	0.3	5.5	2	31.8	20.9	10.5
<b>7</b>	0.1	5.5	5	26.9	18.9	3.8
<b>8</b>	0.3	5.5	5	34.1	21.6	4.3
<b>9</b>	0.2	1	2	23.7	17.2	8.6
<b>10</b>	0.2	10	2	16.4	12.6	6.3
<b>11</b>	0.2	1	5	25	17.9	3.6
<b>12</b>	0.2	10	5	18.3	13.9	2.8
<b>13</b>	0.2	5.5	3.5	41.2	22.7	6.5
<b>14</b>	0.2	5.5	3.5	40.2	22.7	6.5
<b>15</b>	0.2	5.5	3.5	40.4	22.7	6.5
<b>16</b>	0.2	5.5	3.5	37.9	22.4	6.4
<b>17</b>	0.2	5.5	3.5	40.4	22.7	6.5
<b>18</b>	0.2	5.5	3.5	40.7	22.7	6.5

### Anexo 3. Gráficos de cinéticas de parámetros durante el proceso fermentativo

pH

Tratamiento 1: 0.1S/1.0A/3.5F

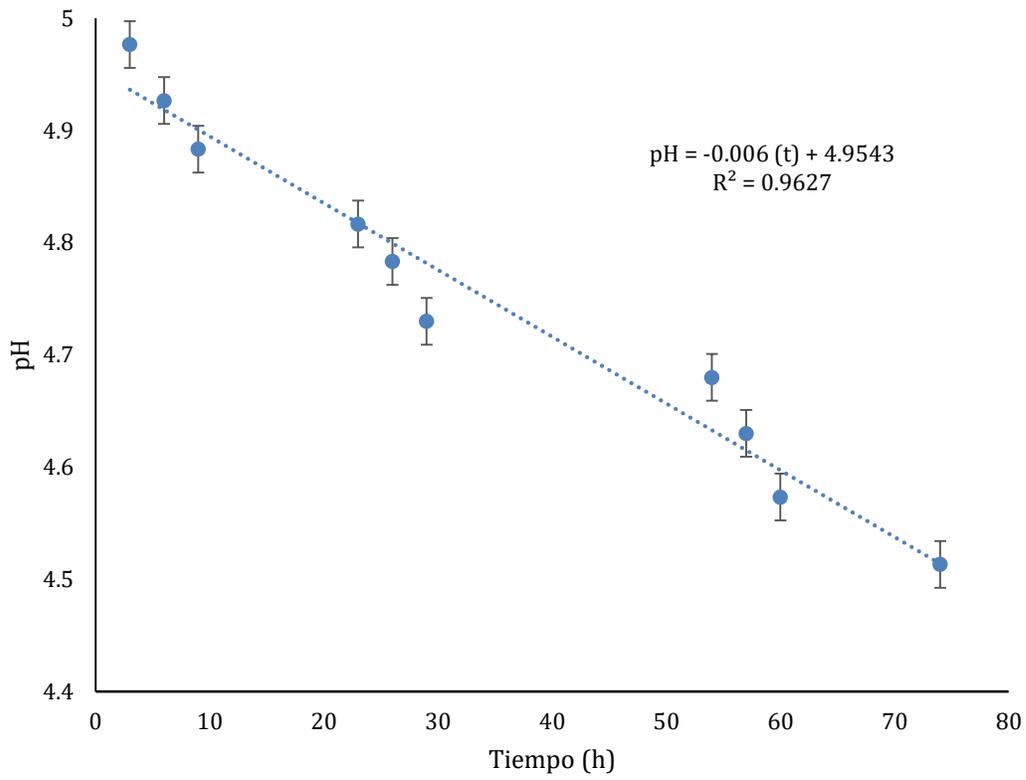


Figura 36. Cinética del pH en función del tiempo, tratamiento 1

**Tratamiento 2: 0.3S/1.0A/3.5F**

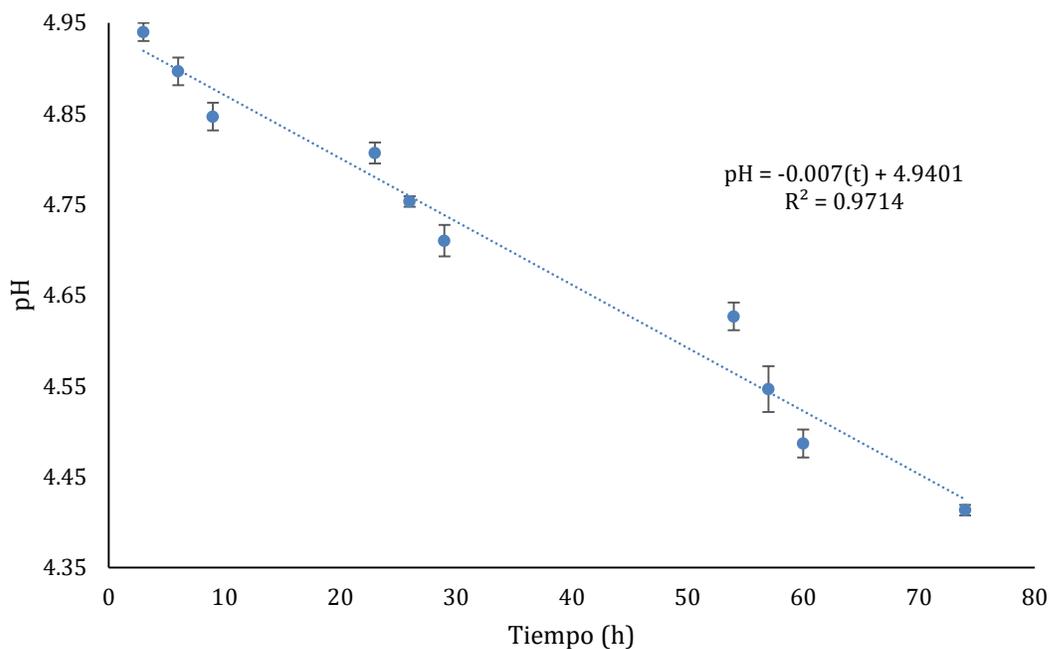


Figura 37. Cinética del pH en función del tiempo, tratamiento 2

**Tratamiento 3: 0.1S/10.0A/3.5F**

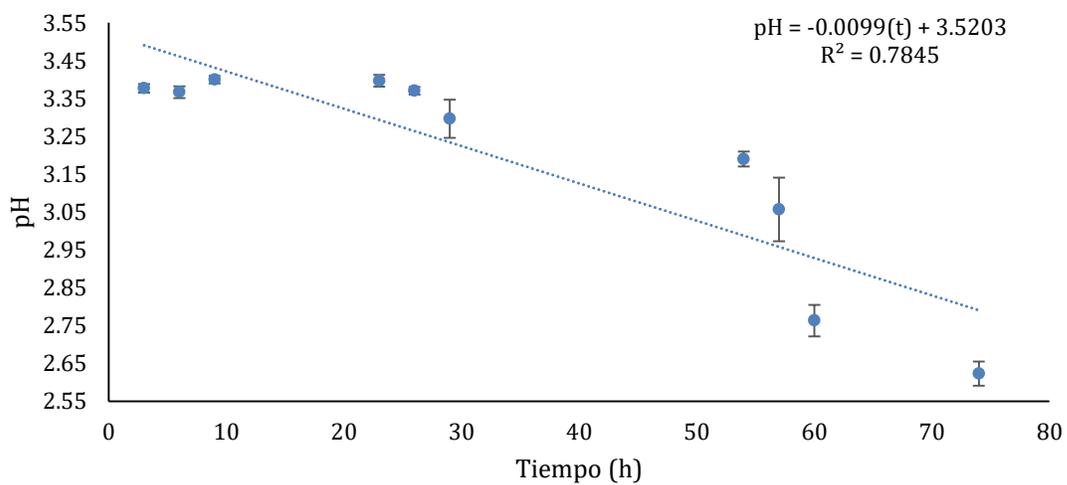


Figura 38. Cinética del pH en función del tiempo, tratamiento 3

**Tratamiento 4: 0.3S/10.0A/3.5F**

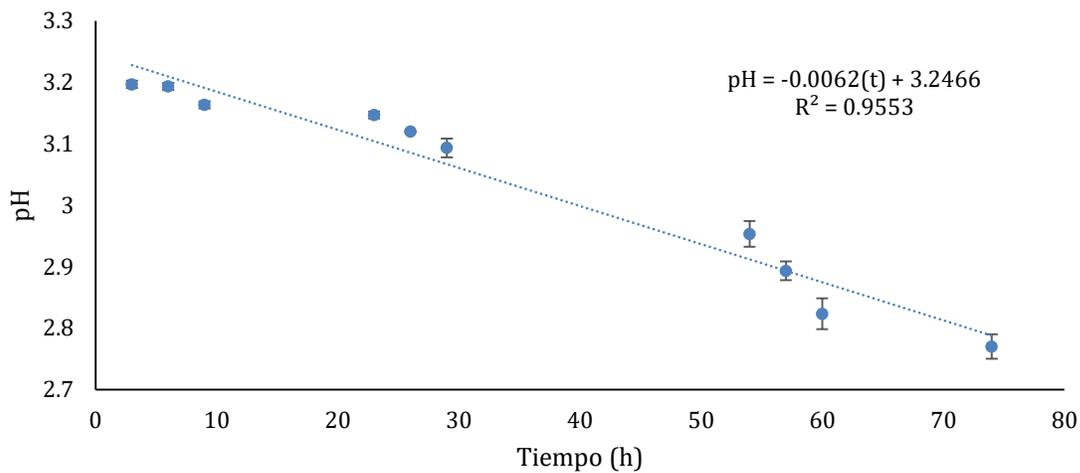


Figura 39. Cinética del pH en función del tiempo, tratamiento 4

**Tratamiento 5: 0.1S/5.5A/2.0F**

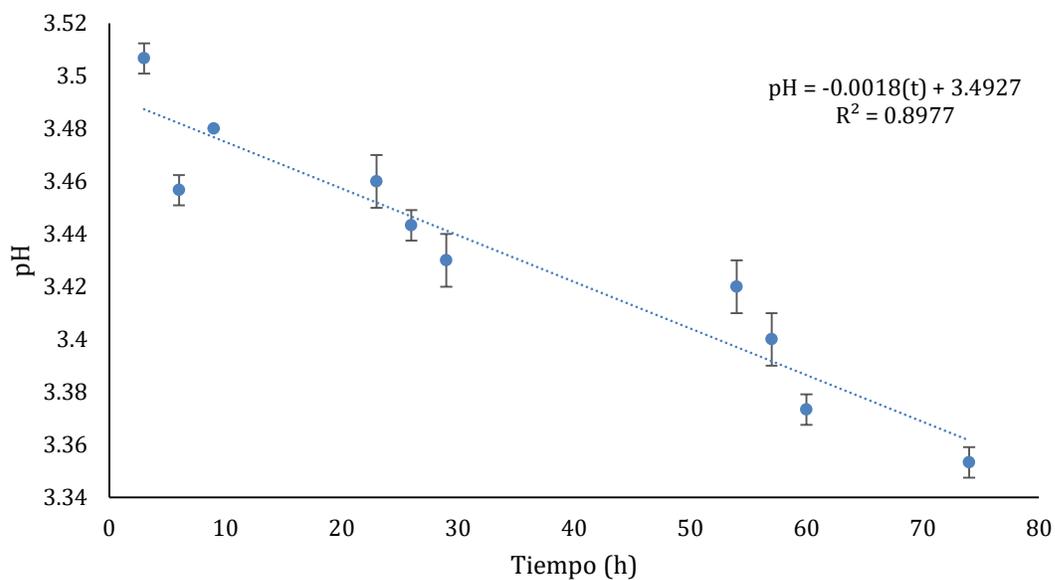


Figura 40. Cinética del pH en función del tiempo, tratamiento 5

**Tratamiento 6: 0.3S/5.5A/2.0F**

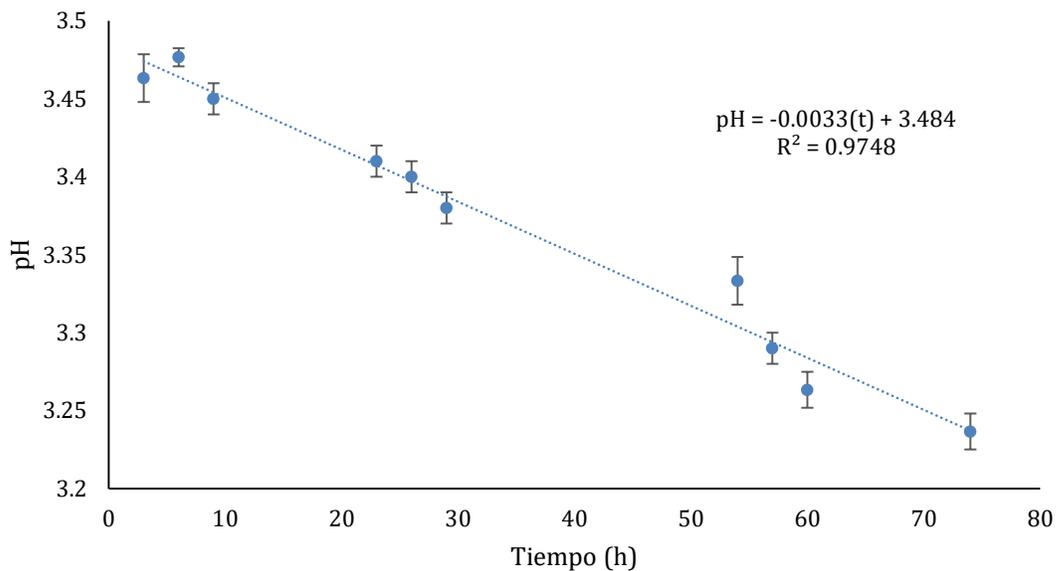


Figura 41. Cinética del pH en función del tiempo, tratamiento 6

**Tratamiento 7: 0.1S/5.5A/5.0F**

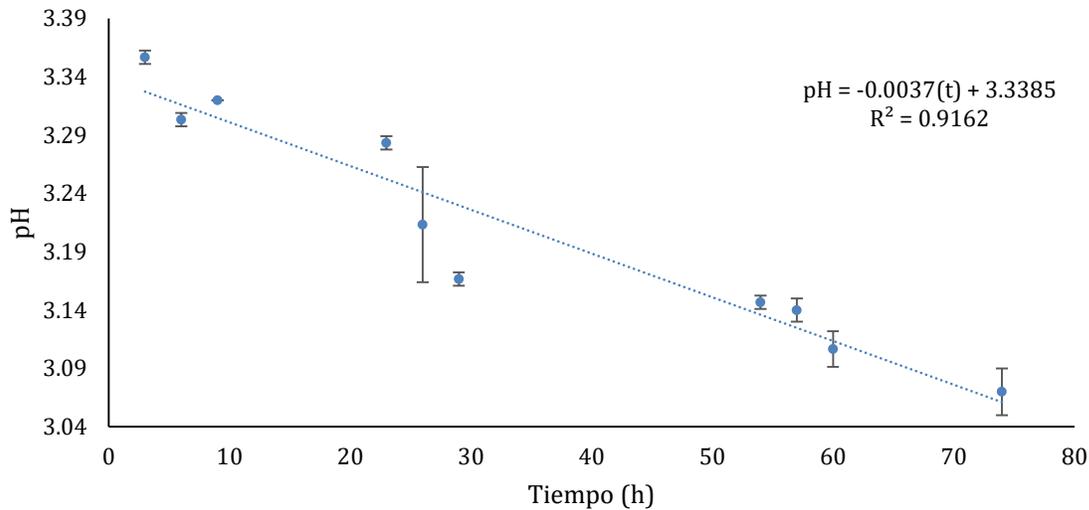


Figura 42. Cinética del pH en función del tiempo, tratamiento 7

**Tratamiento 8: 0.3S/5.5A/5.0F**

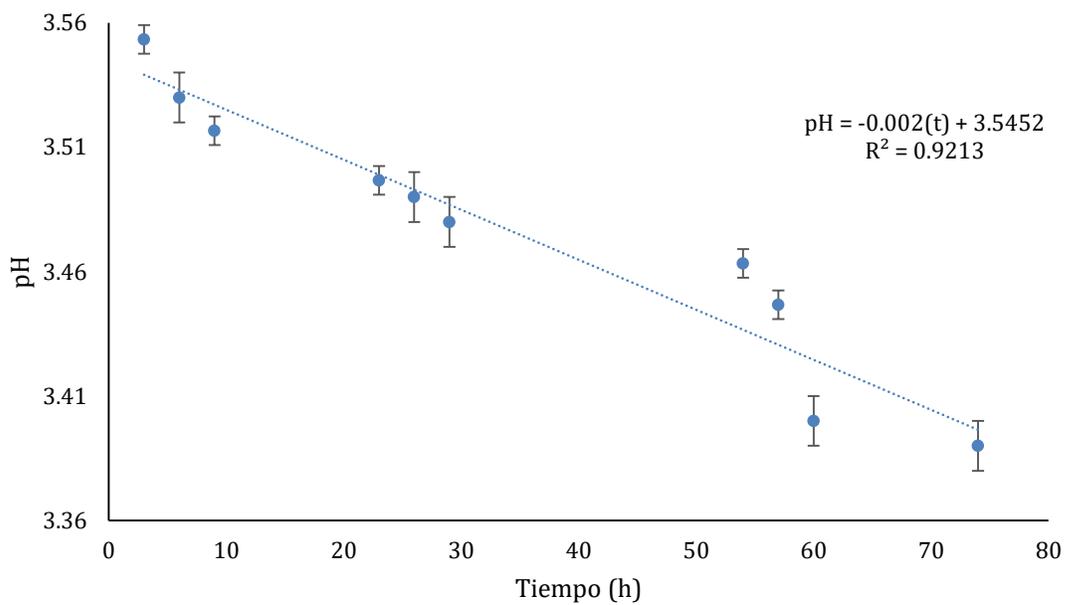


Figura 43. Cinética del pH en función del tiempo, tratamiento 8

**Tratamiento 9: 0.2S/1.0A/2.0F**

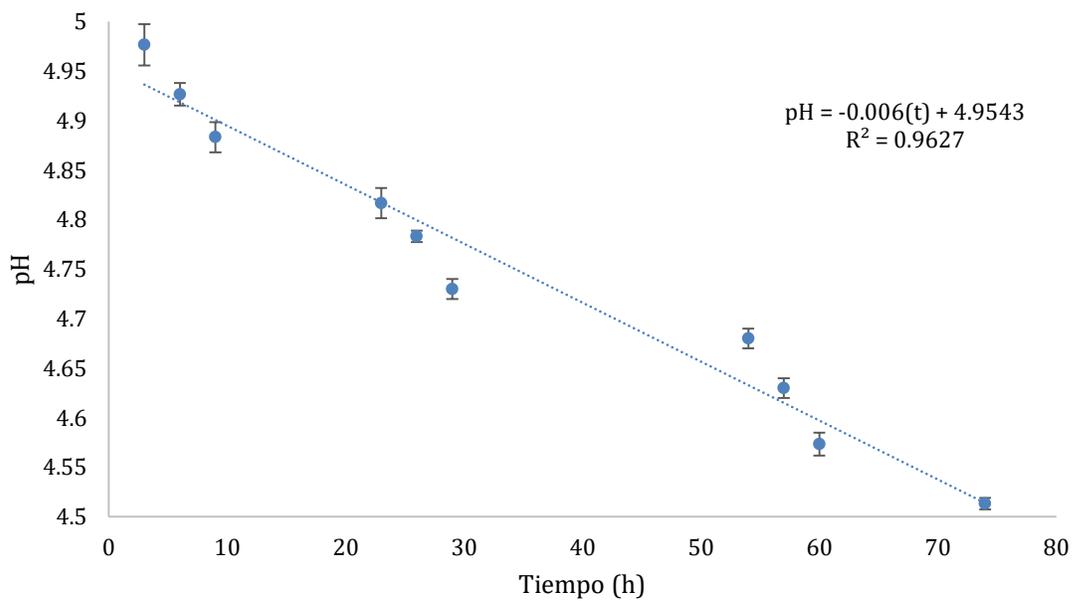


Figura 44. Cinética del pH en función del tiempo, tratamiento 9

**Tratamiento 10: 0.2S/10.0A/2.0F**

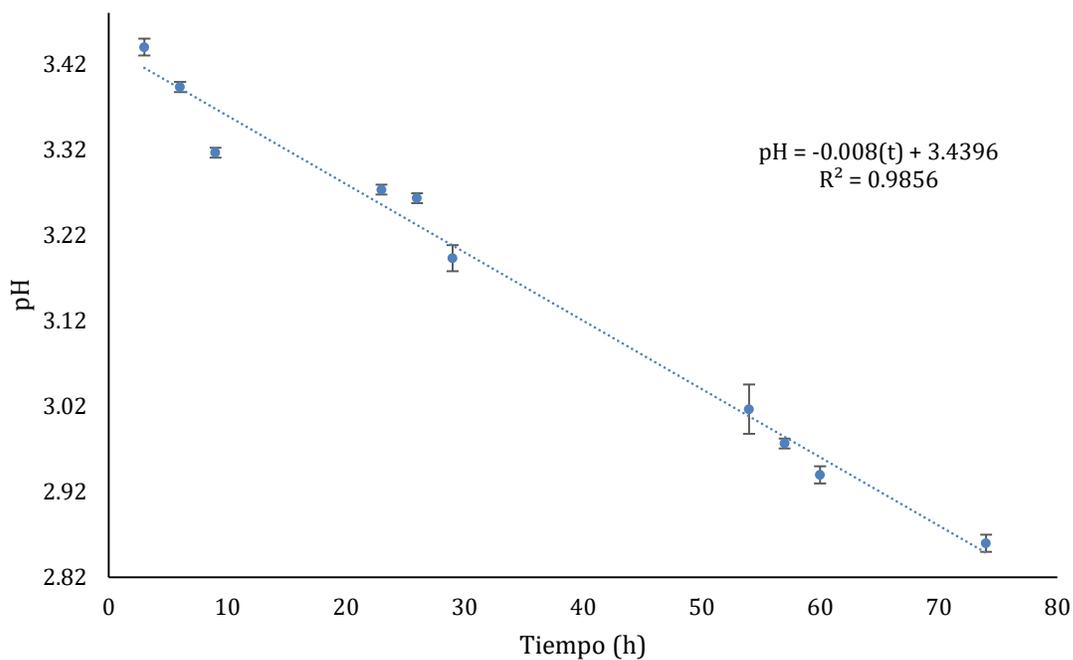


Figura 45. Cinética del pH en función del tiempo, tratamiento 10

**Tratamiento 11: 0.2S/1.0A/5.0F**

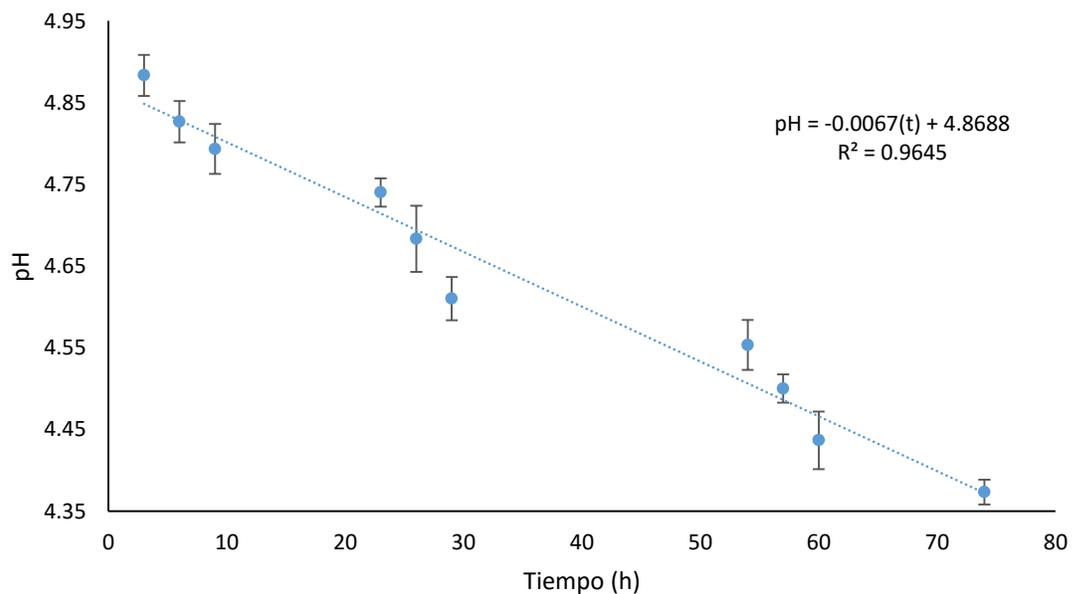


Figura 46. Cinética del pH en función del tiempo, tratamiento 11

### Tratamiento 12: 0.2S/10.0A/5.0F

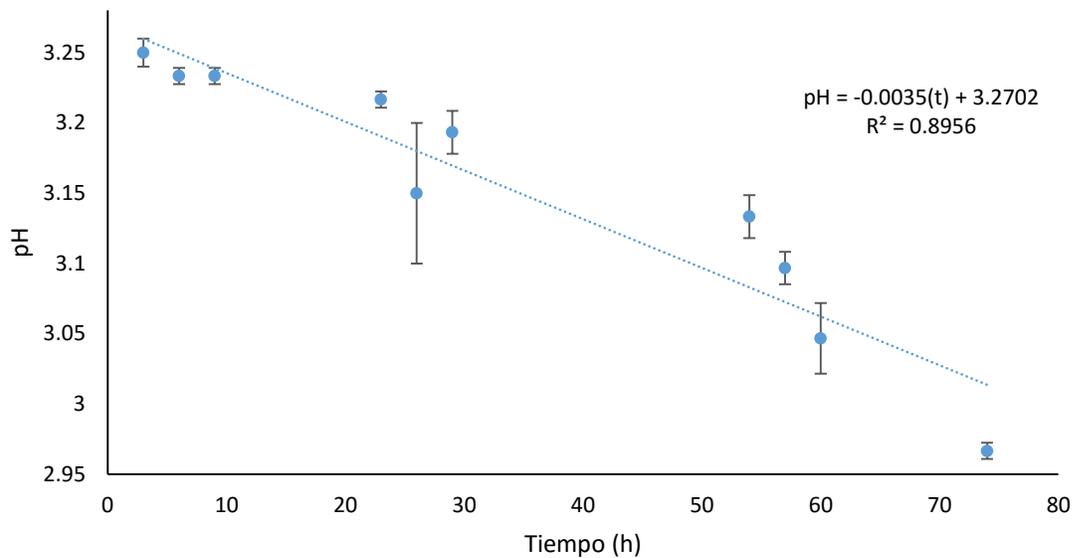


Figura 47. Cinética del pH en función del tiempo, tratamiento 12

### Tratamiento 13: 0.2S/5.5A/3.5F

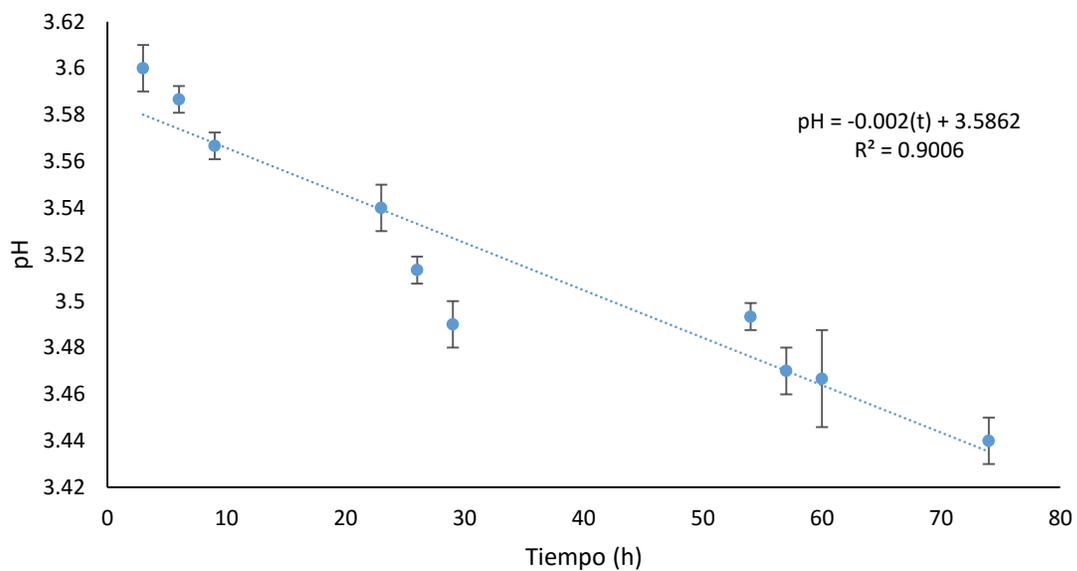


Figura 48. Cinética del pH en función del tiempo, tratamiento 13

## Conductividad eléctrica

### Tratamiento 1: 0.1S/1.0A/3.5F

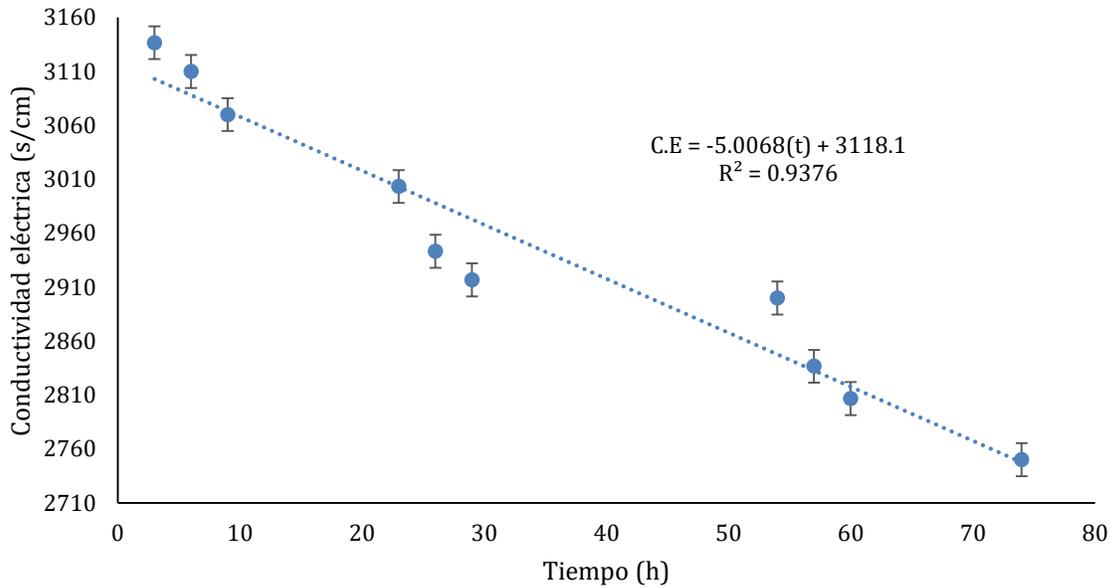


Figura 49. Cinética de la conductividad eléctrica en función del tiempo, tratamiento 1

### Tratamiento 2: 0.3S/1.0A/3.5F

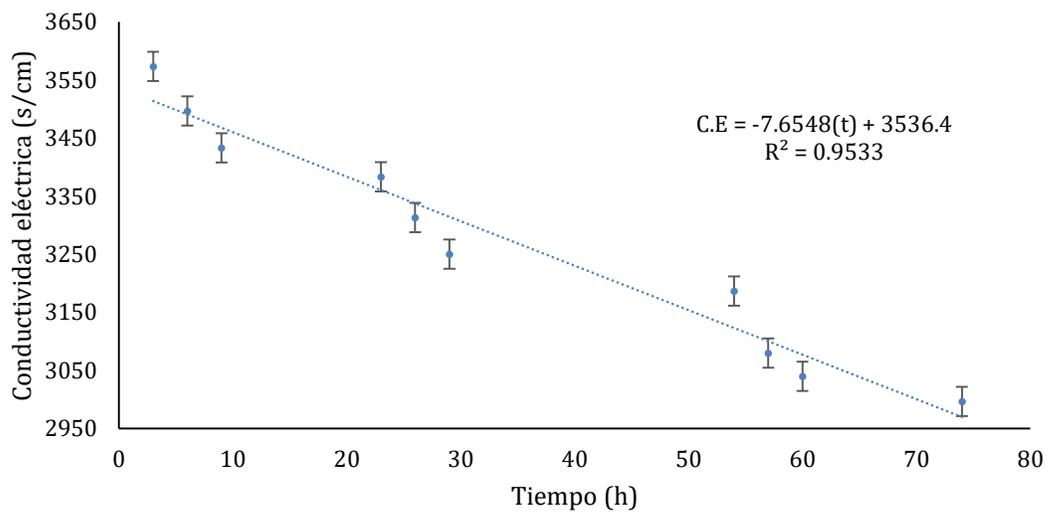


Figura 50. Cinética de la conductividad eléctrica en función del tiempo, tratamiento 2



**Tratamiento 5: 0.1S/5.5A/2.0F**

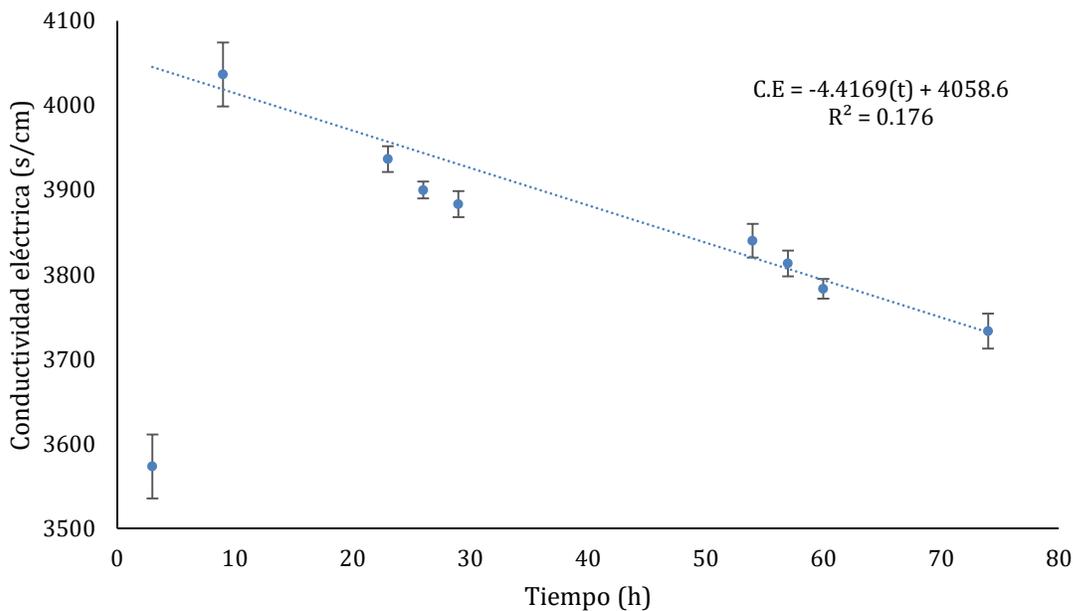


Figura 53. Cinética de la conductividad eléctrica en función del tiempo, tratamiento 5

**Tratamiento 6: 0.3S/5.5A/2.0F**

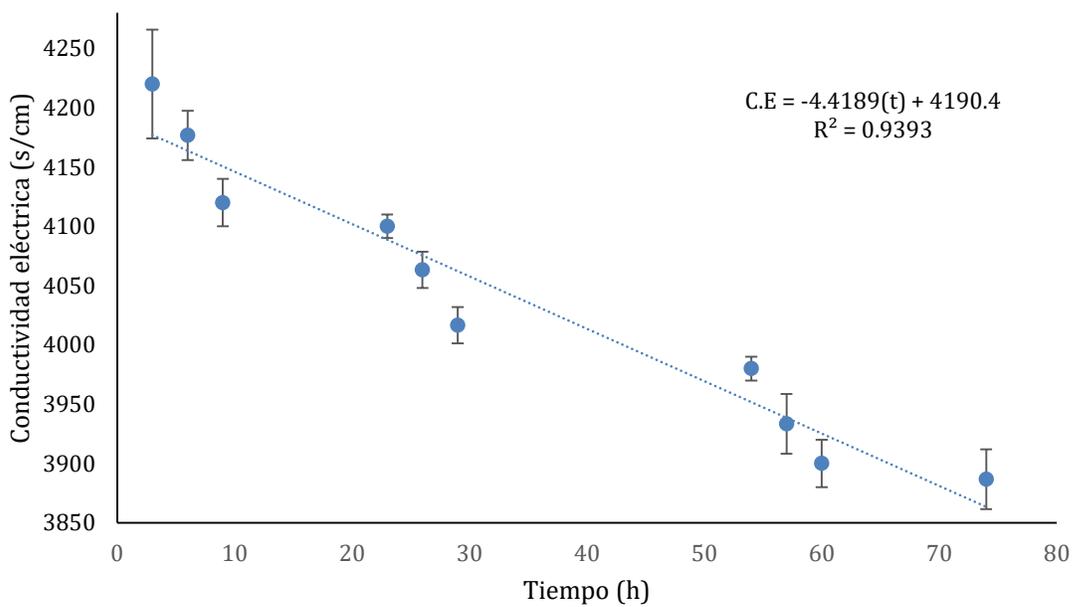


Figura 54. Cinética de la conductividad eléctrica en función del tiempo, tratamiento 6

### Tratamiento 7: 0.1S/5.5A/5.0F

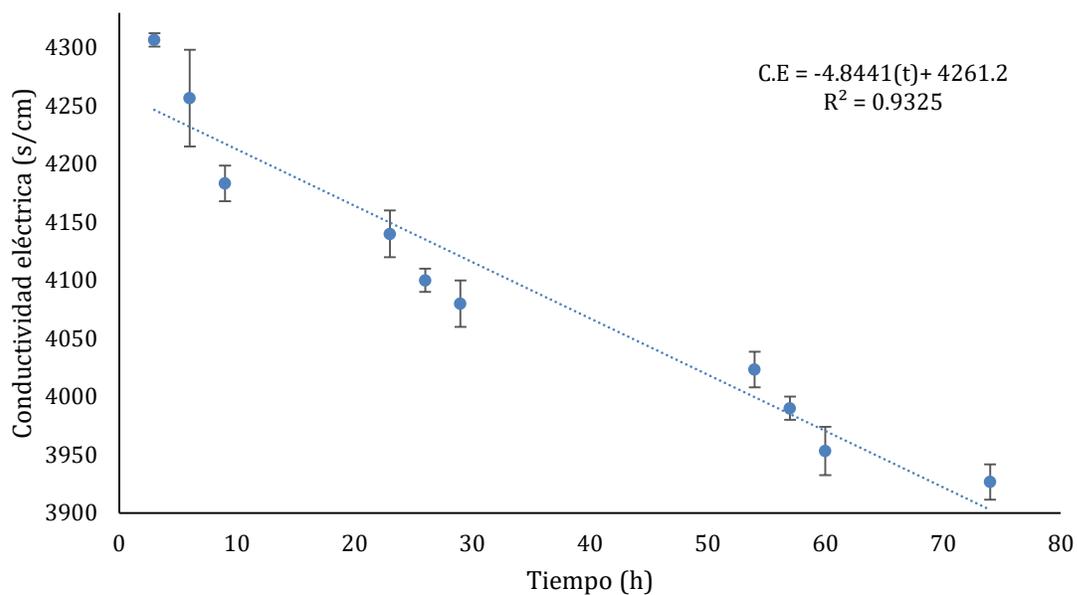


Figura 55. Cinética de la conductividad eléctrica en función del tiempo, tratamiento 7

### Tratamiento 8: 0.3S/5.5A/5.0F

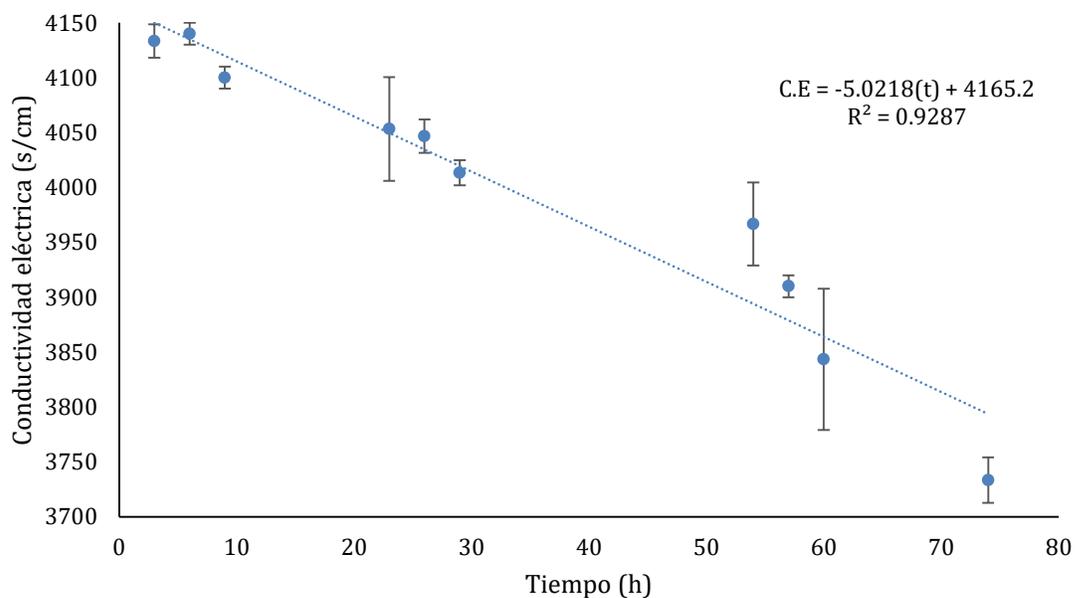


Figura 56. Cinética de la conductividad eléctrica en función del tiempo, tratamiento 8

**Tratamiento 9: 0.2S/1.0A/2.0F**

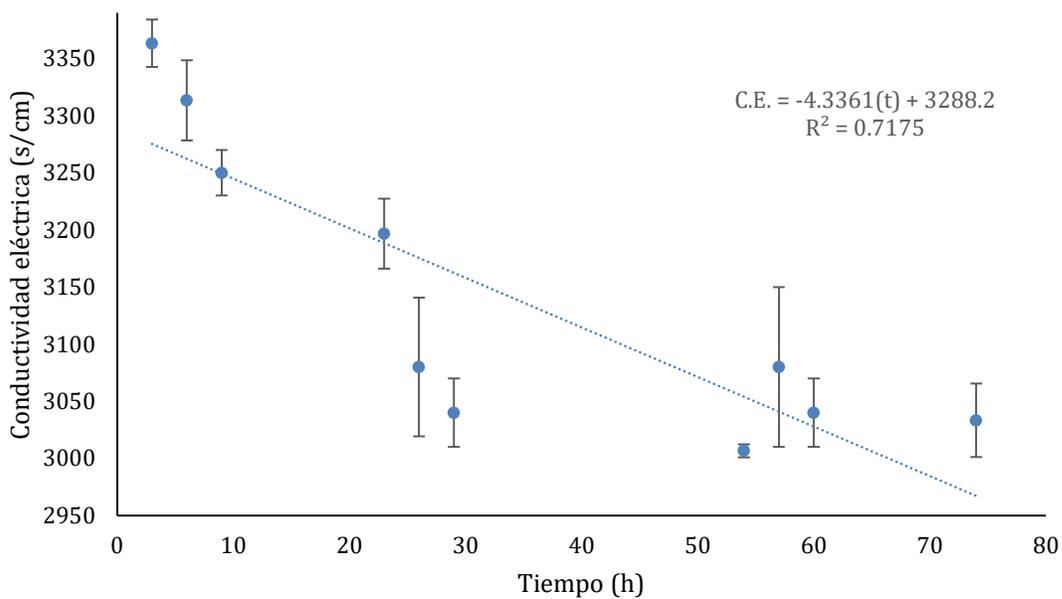


Figura 57. Cinética de la conductividad eléctrica en función del tiempo, tratamiento 9

**Tratamiento 10: 0.2S/10.0A/2.0F**

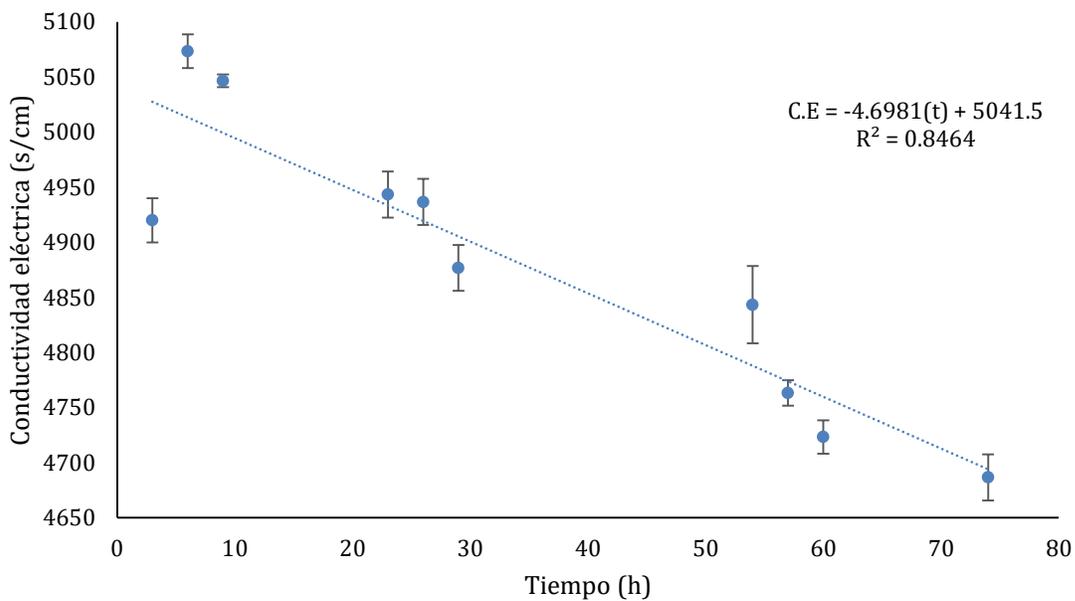


Figura 58. Cinética de la conductividad eléctrica en función del tiempo, tratamiento 10

**Tratamiento 11: 0.2S/1.0A/5.0F**

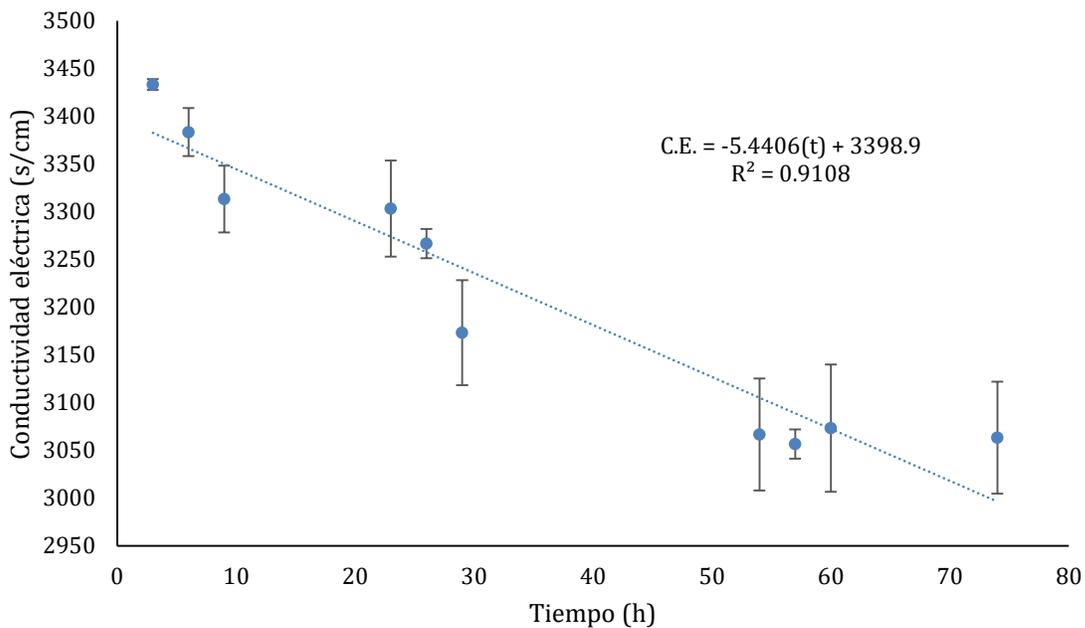


Figura 59. Cinética de la conductividad eléctrica en función del tiempo, tratamiento 11

**Tratamiento 12: 0.2S/10.0A/5.0F**

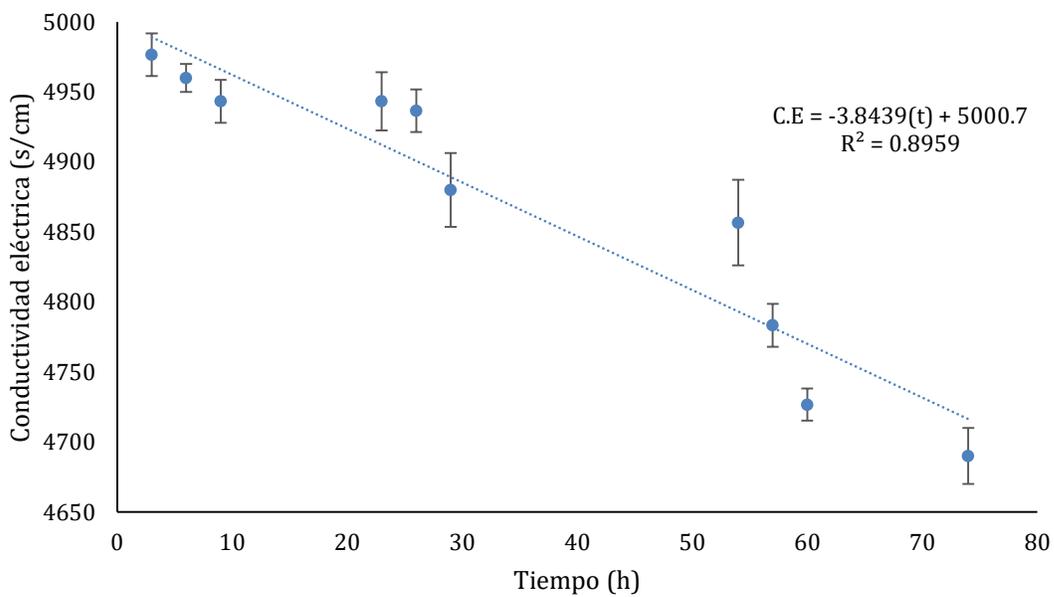
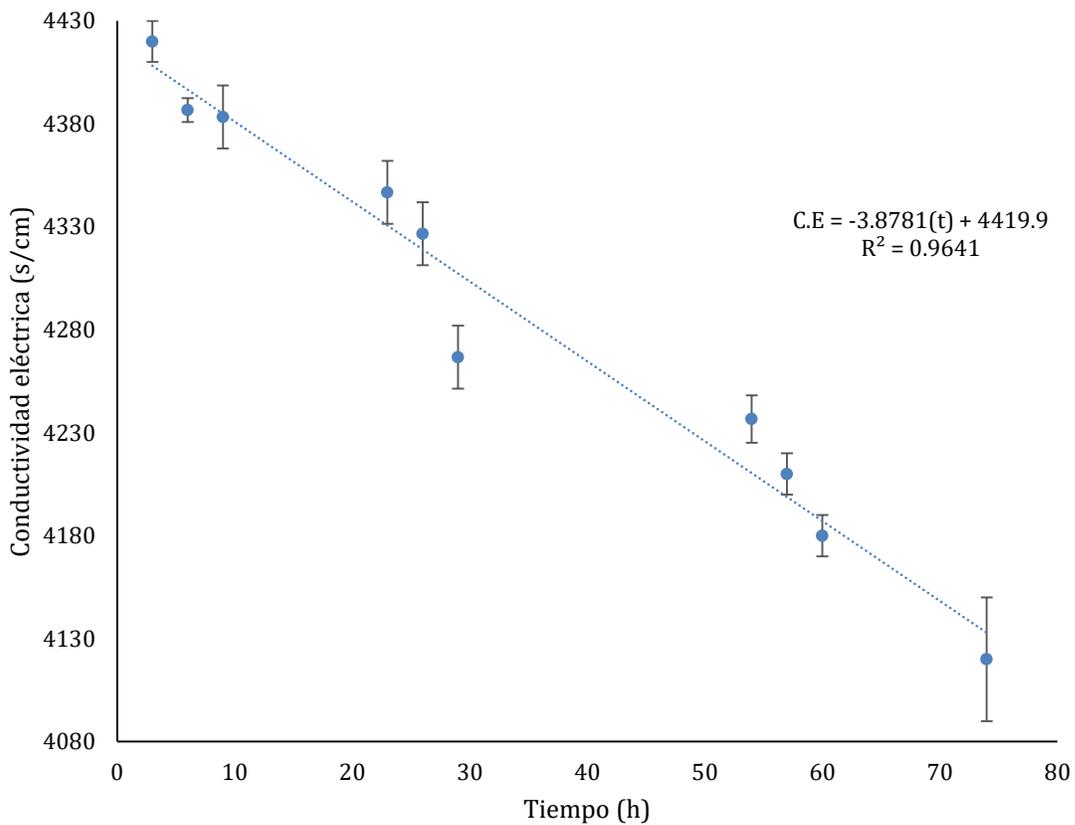


Figura 60. Cinética de la conductividad eléctrica en función del tiempo, tratamiento 12

**Tratamiento 13: 0.2S/5.5A/3.5F**



*Figura 61.* Cinética de la conductividad eléctrica en función del tiempo, tratamiento 13

## Temperatura

### Tratamiento 1: 0.1S/1.0A/3.5F

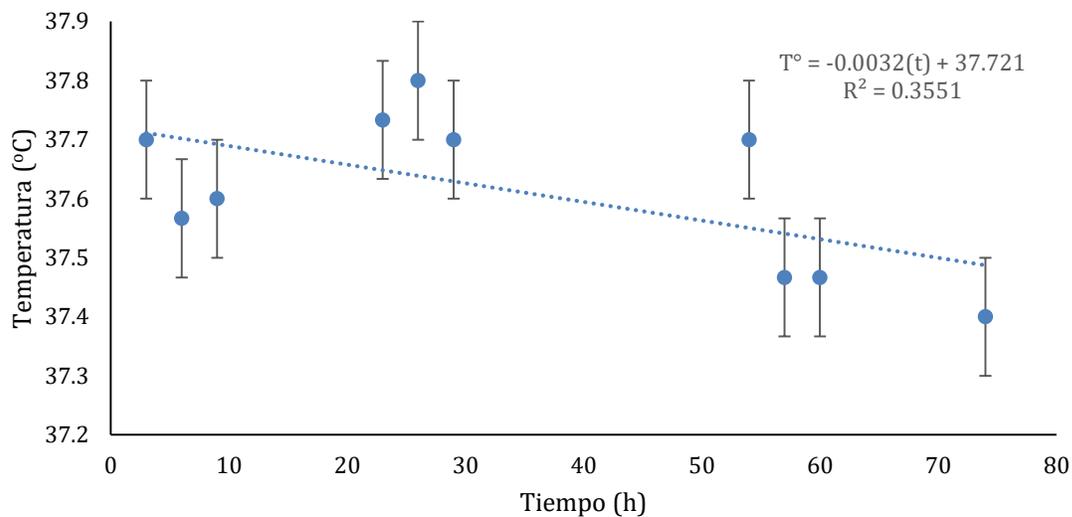


Figura 62. Cinética de la temperatura en función del tiempo, tratamiento 1

### Tratamiento 2: 0.3S/1.0A/3.5F

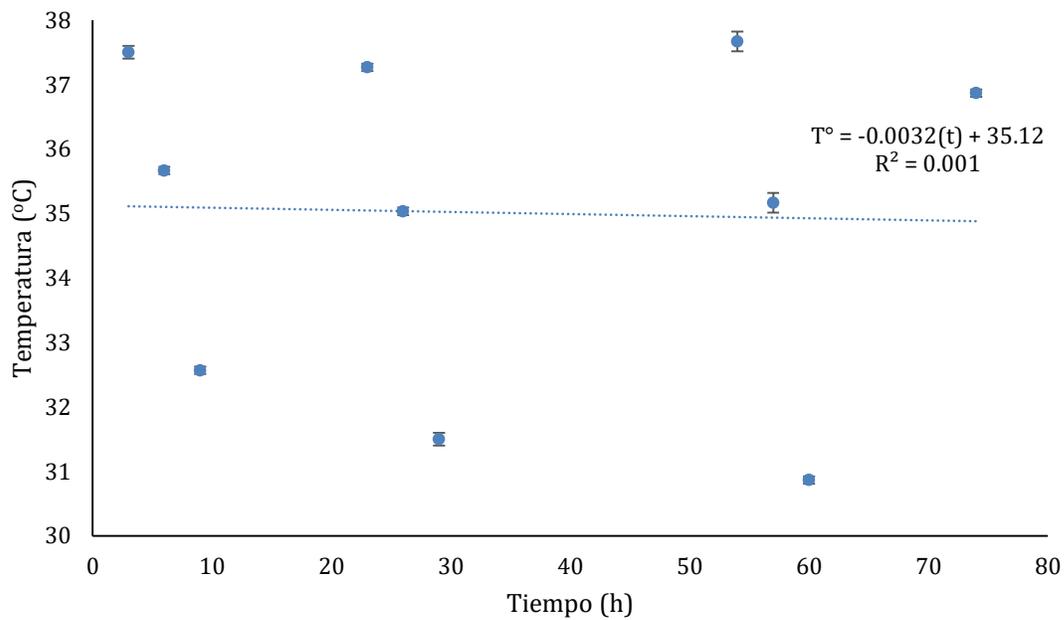


Figura 63. Cinética de la temperatura en función del tiempo, tratamiento 2

### Tratamiento 3: 0.1S/10.0A/3.5F

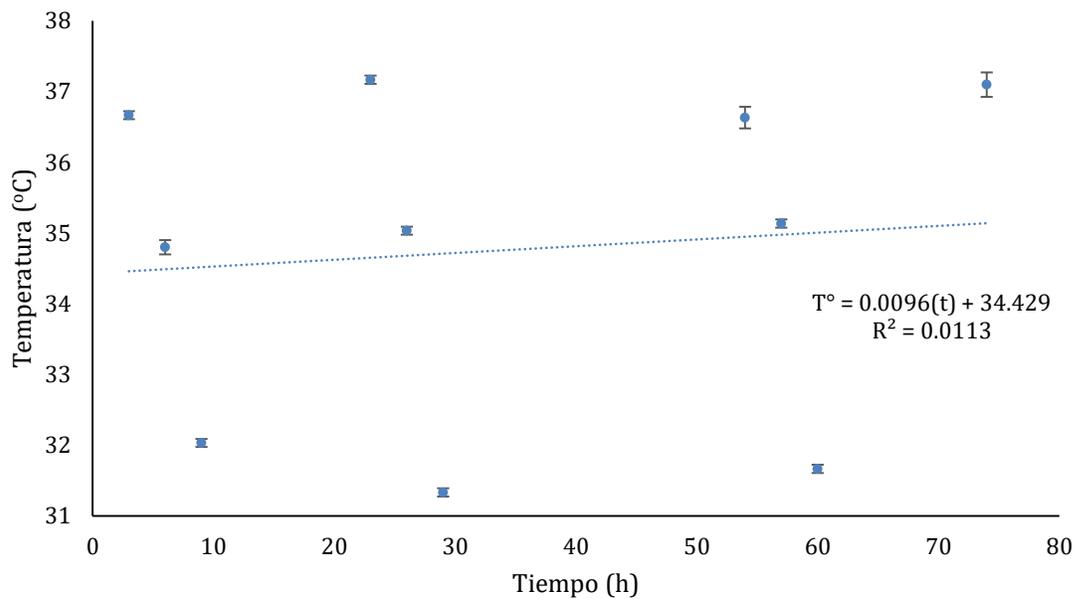


Figura 64. Cinética de la temperatura en función del tiempo, tratamiento 3

### Tratamiento 4: 0.3S/10.0A/3.5F

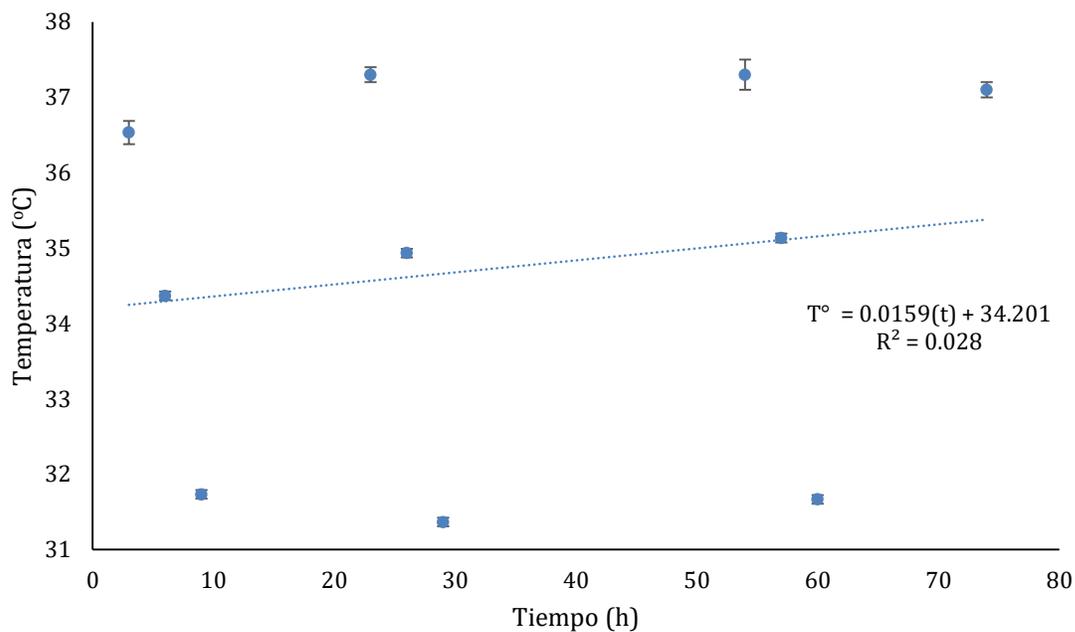


Figura 65. Cinética de la temperatura en función del tiempo, tratamiento 4

**Tratamiento 5: 0.1S/5.5A/2.0F**

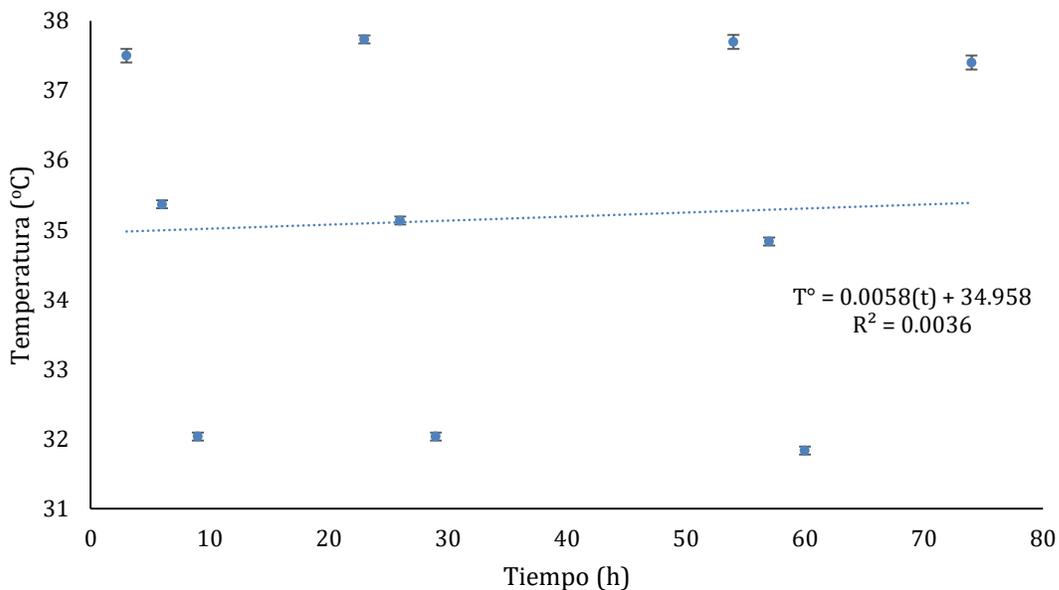


Figura 66. Cinética de la temperatura en función del tiempo, tratamiento 5

**Tratamiento 6: 0.3S/5.5A/2.0F**

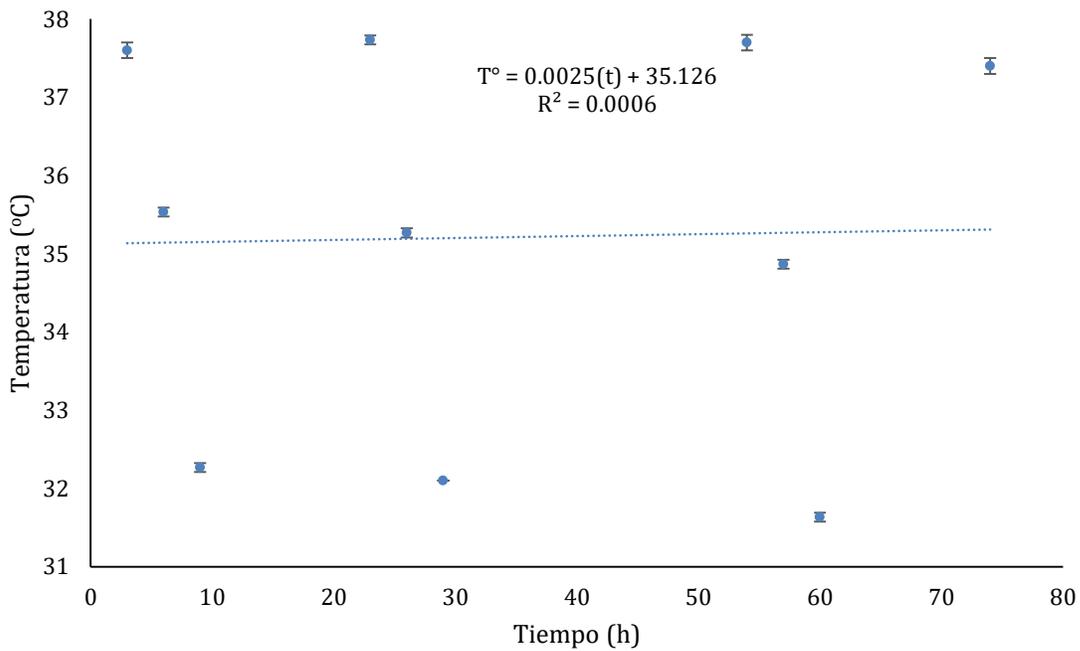


Figura 67. Cinética de la temperatura en función del tiempo, tratamiento 6

**Tratamiento 7: 0.1S/5.5A/5.0F**

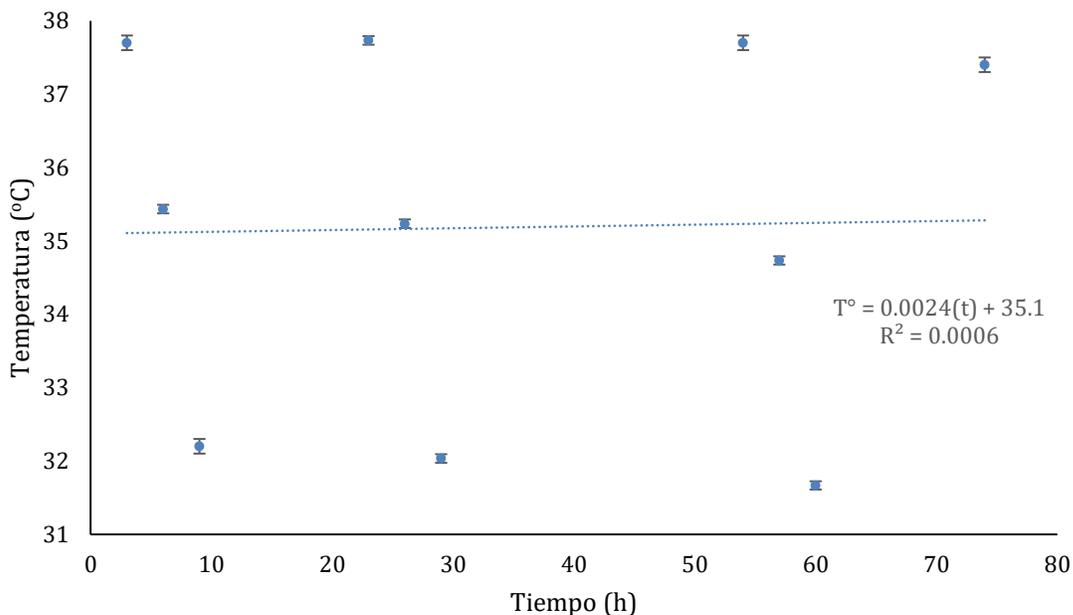


Figura 68. Cinética de la temperatura en función del tiempo, tratamiento 7

**Tratamiento 8: 0.3S/5.5A/5.0F**

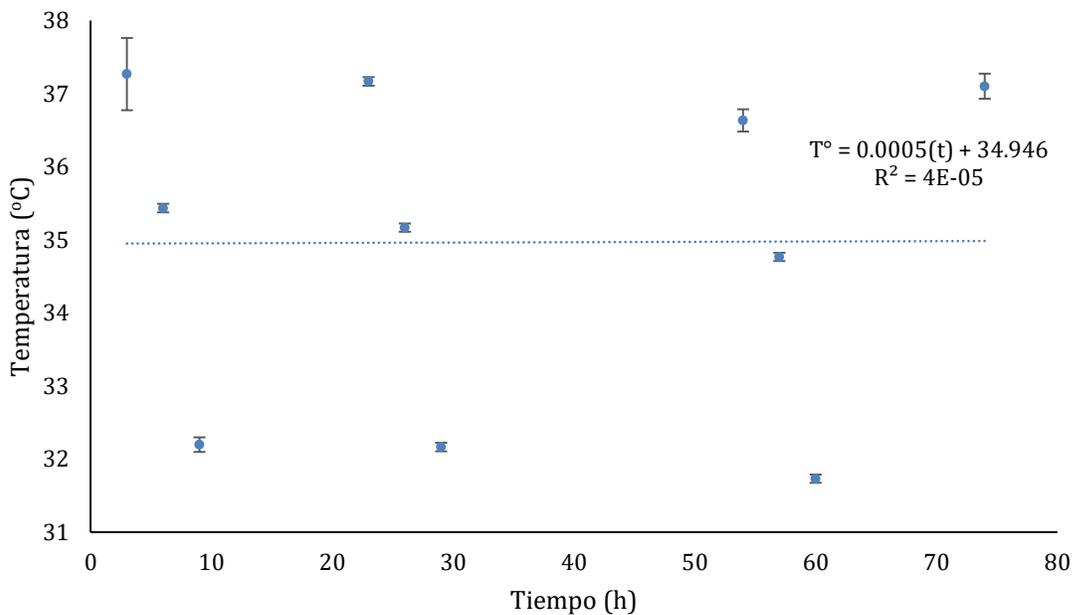


Figura 69. Cinética de la temperatura en función del tiempo, tratamiento 8

**Tratamiento 9: 0.2S/1.0A/2.0F**

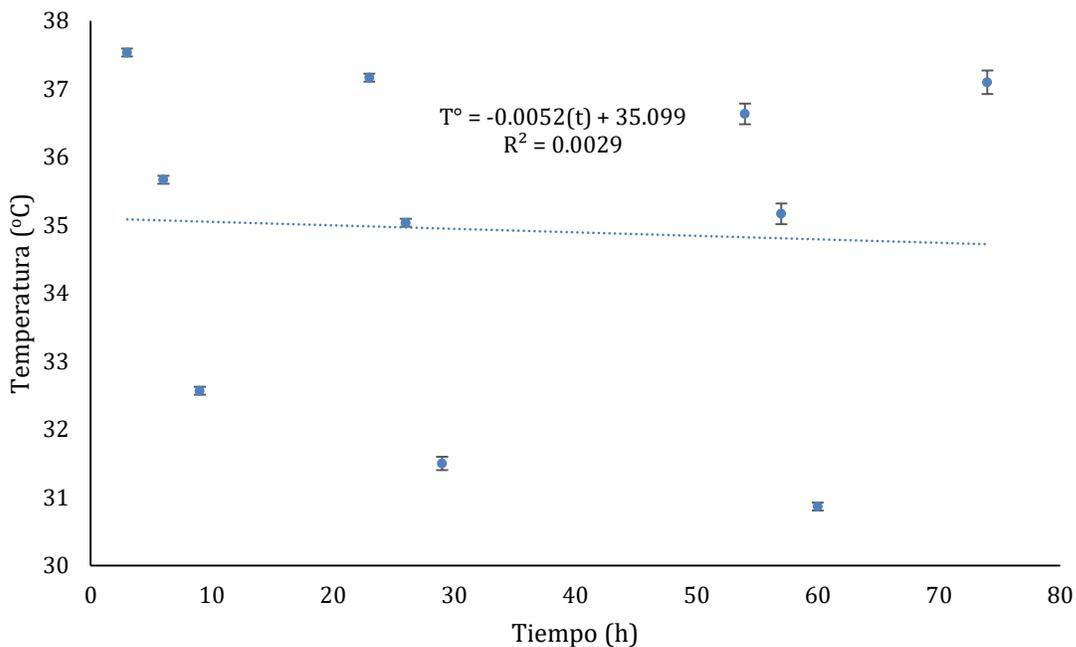


Figura 70. Cinética de la temperatura en función del tiempo, tratamiento 9

**Tratamiento 10: 0.2S/10.0A/2.0F**

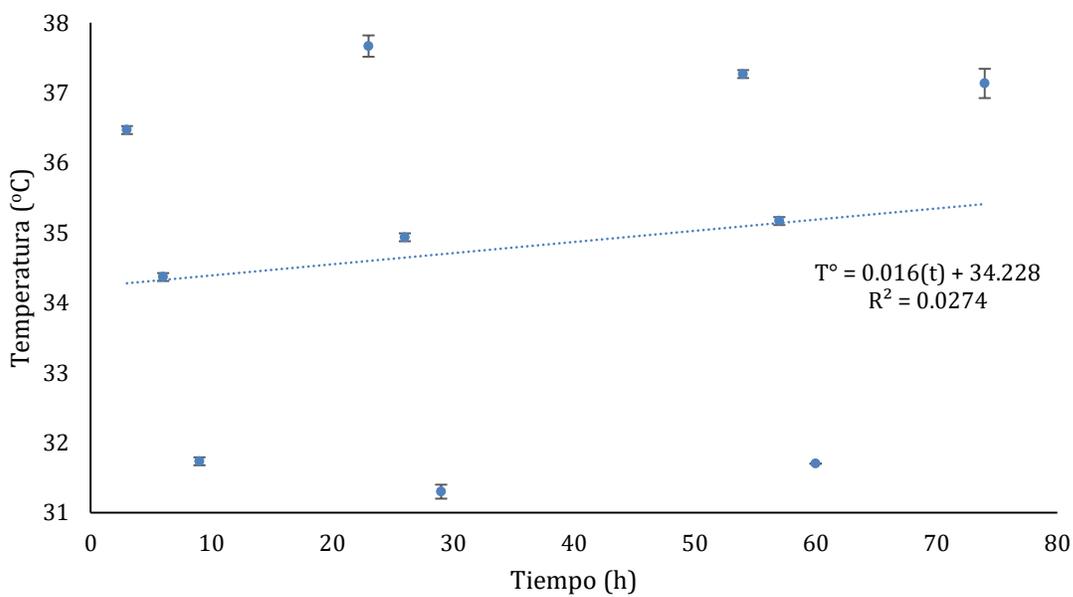


Figura 71. Cinética de la temperatura en función del tiempo, tratamiento 10

**Tratamiento 11: 0.2S/1.0A/5.0F**

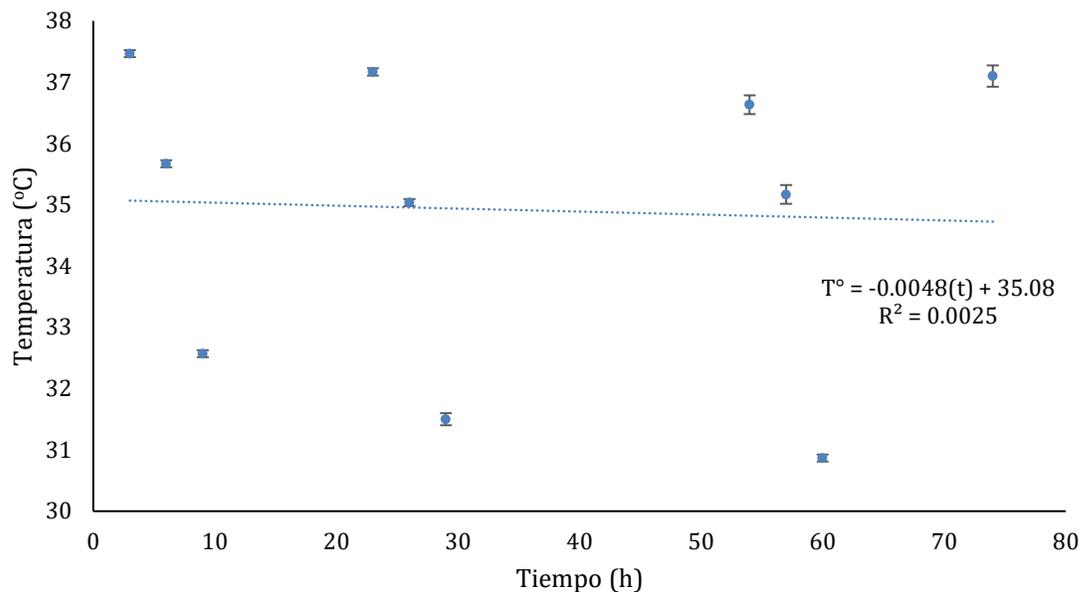


Figura 72. Cinética de la temperatura en función del tiempo, tratamiento 11

**Tratamiento 12: 0.2S/10.0A/5.0F**

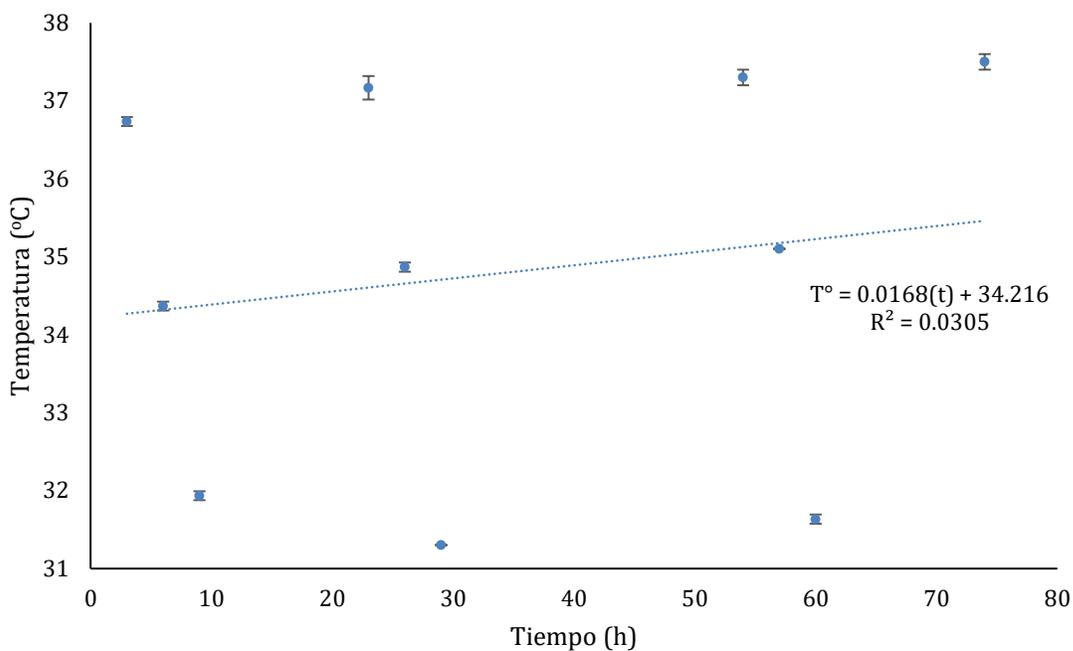


Figura 73. Cinética de la temperatura en función del tiempo, tratamiento 12

**Tratamiento 13: 0.2S/5.5A/3.5F**

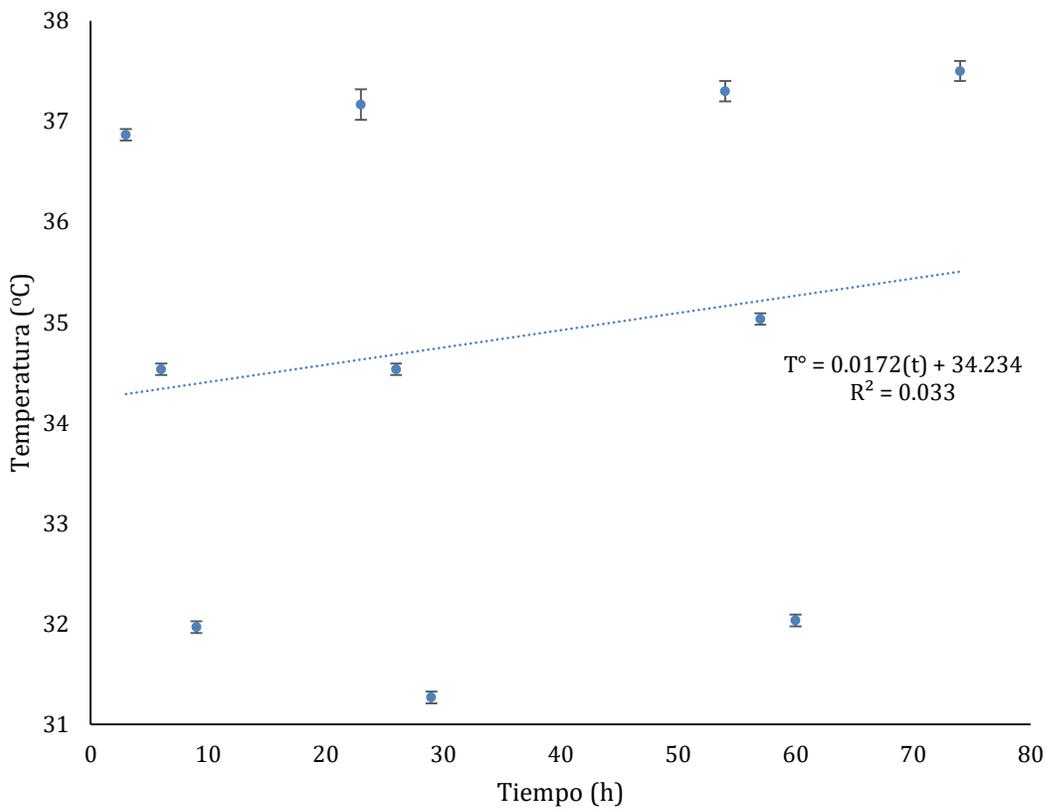


Figura 74. Cinética de la temperatura en función del tiempo, tratamiento 13

## Sólidos solubles

### Tratamiento 1: 0.1S/1.0A/3.5F

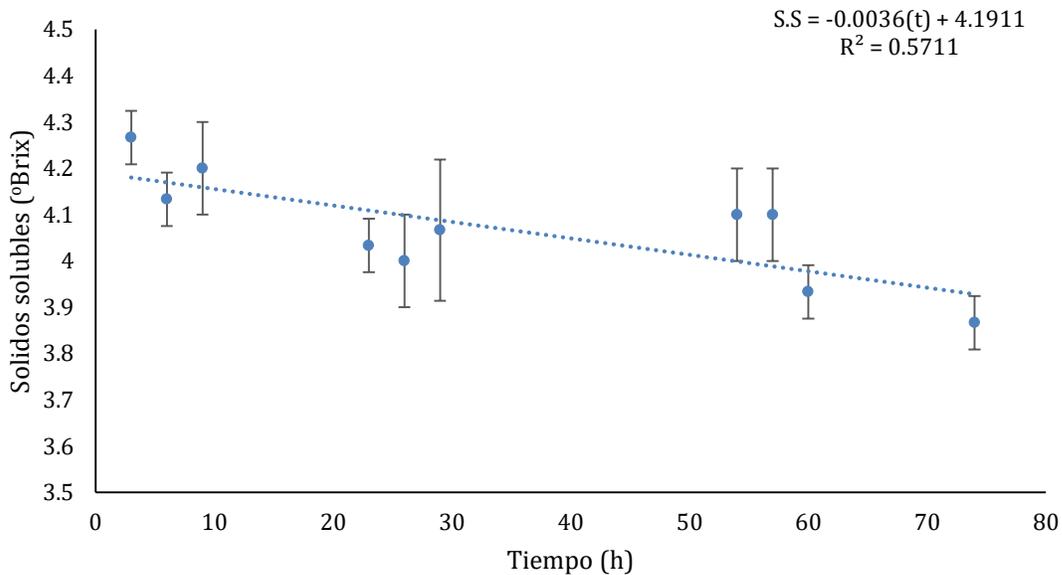


Figura 75. Cinética de los sólidos solubles en función del tiempo, tratamiento 1

### Tratamiento 2: 0.3S/1.0A/3.5F

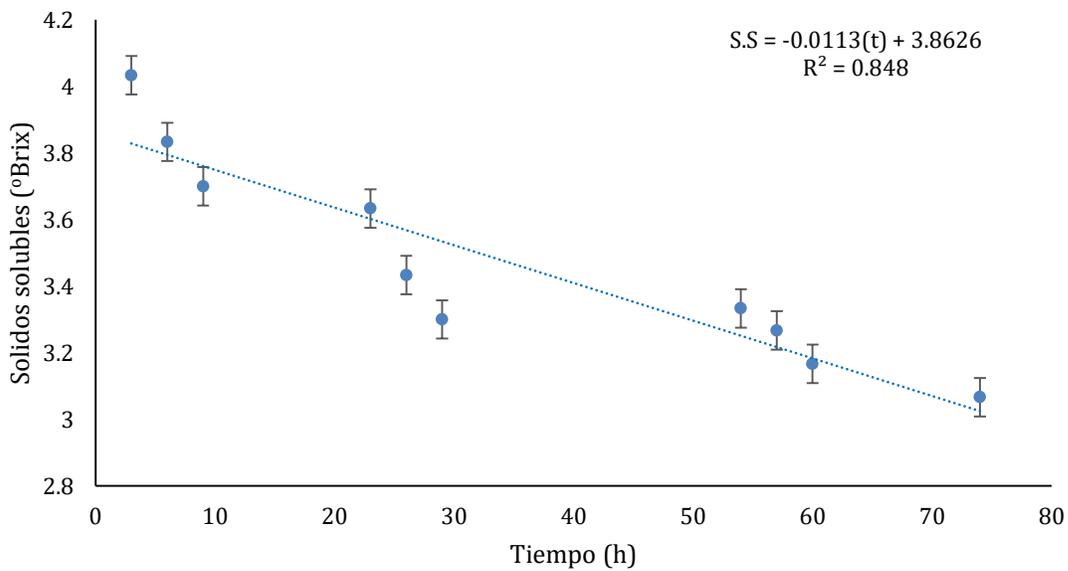


Figura 76. Cinética de los sólidos solubles en función del tiempo, tratamiento 2

### Tratamiento 3: 0.1S/10.0A/3.5F

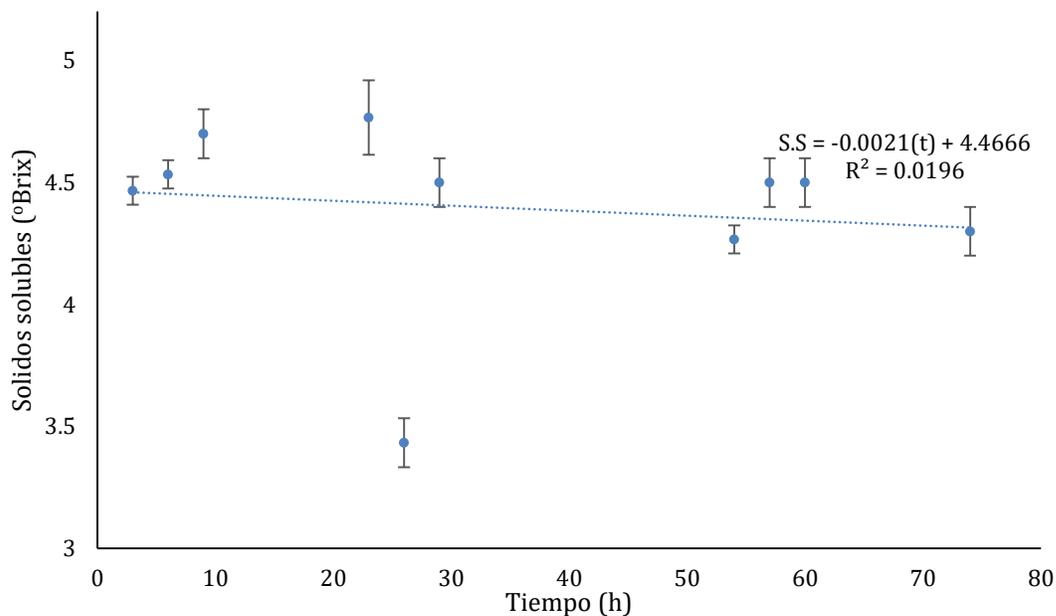


Figura 77. Cinética de los sólidos solubles en función del tiempo, tratamiento 3

### Tratamiento 4: 0.3S/10.0A/3.5F

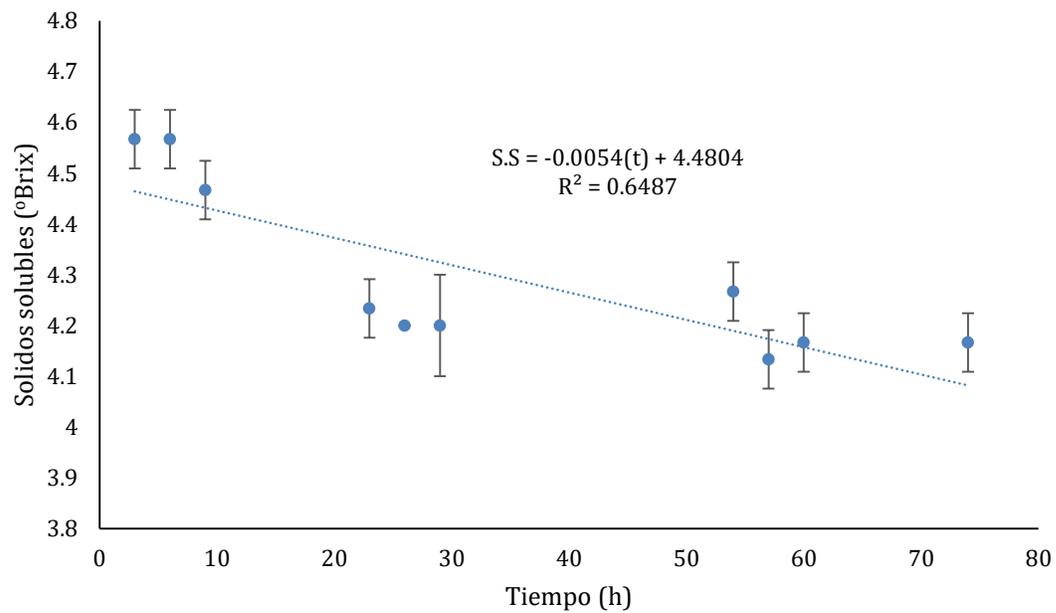


Figura 78. Cinética de los sólidos solubles en función del tiempo, tratamiento 4

**Tratamiento 5: 0.1S/5.5A/2.0F**

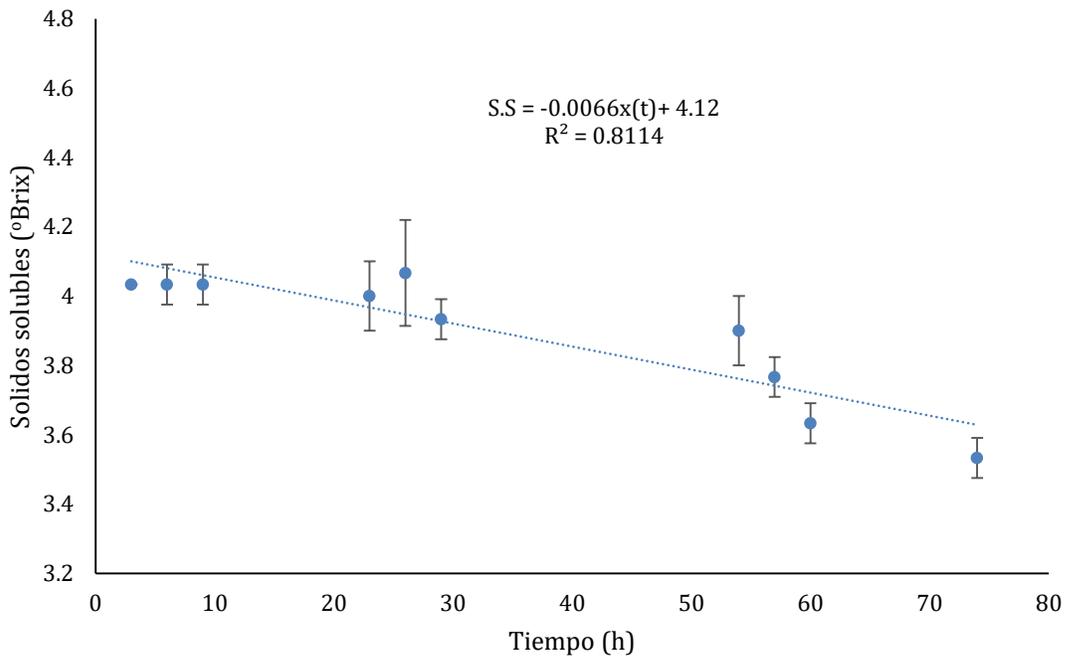


Figura 79. Cinética de los sólidos solubles en función del tiempo, tratamiento 5

**Tratamiento 6: 0.3S/5.5A/2.0F**

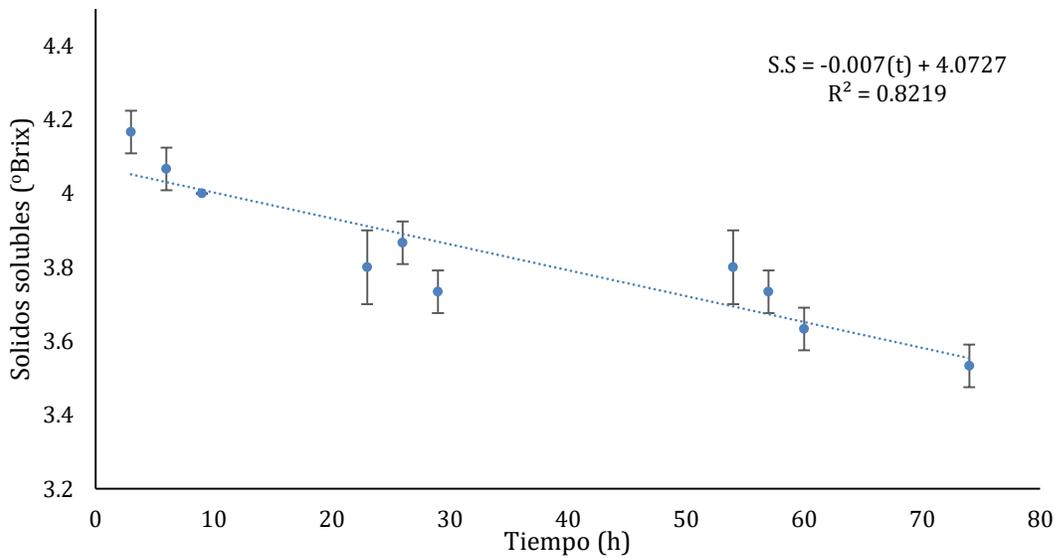


Figura 80. Cinética de los sólidos solubles en función del tiempo, tratamiento 6

**Tratamiento 7: 0.1S/5.5A/5.0F**

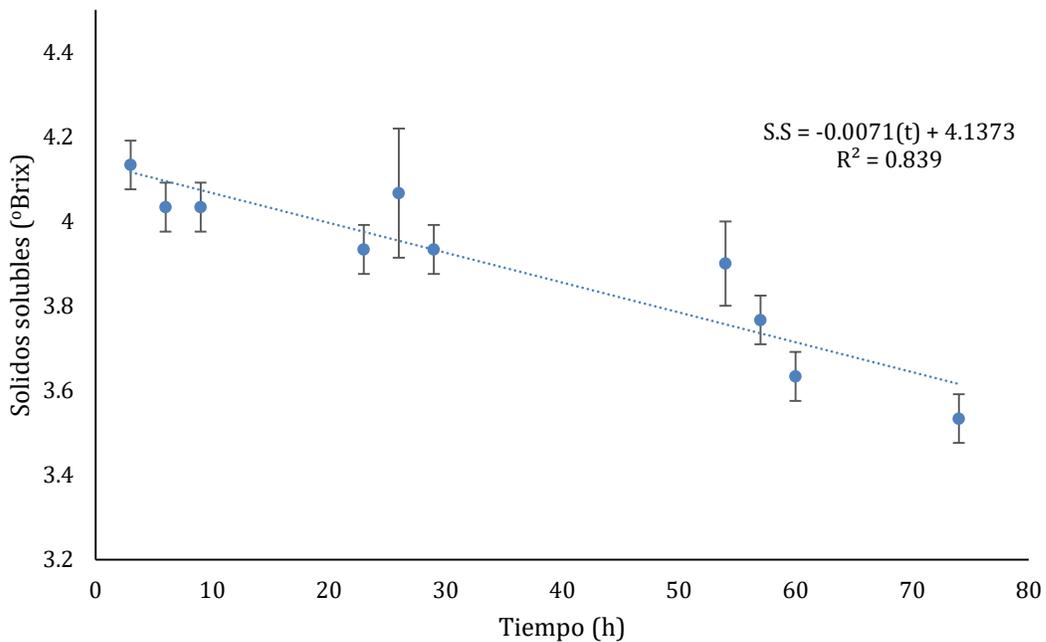


Figura 81. Cinética de los sólidos solubles en función del tiempo, tratamiento 7

**Tratamiento 8: 0.3S/5.5A/5.0F**

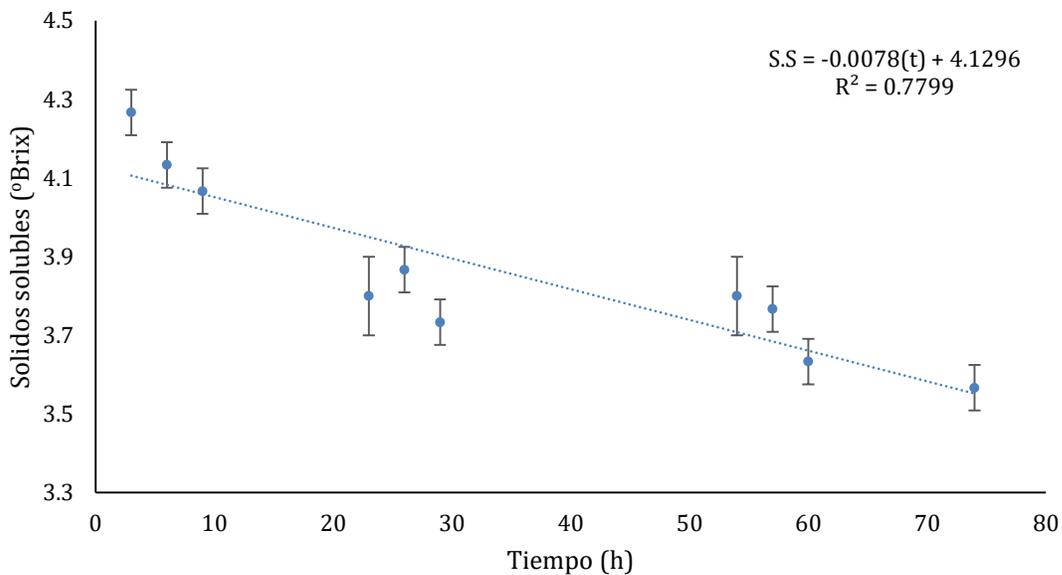


Figura 82. Cinética de los sólidos solubles en función del tiempo, tratamiento 8

**Tratamiento 9: 0.2S/1.0A/2.0F**

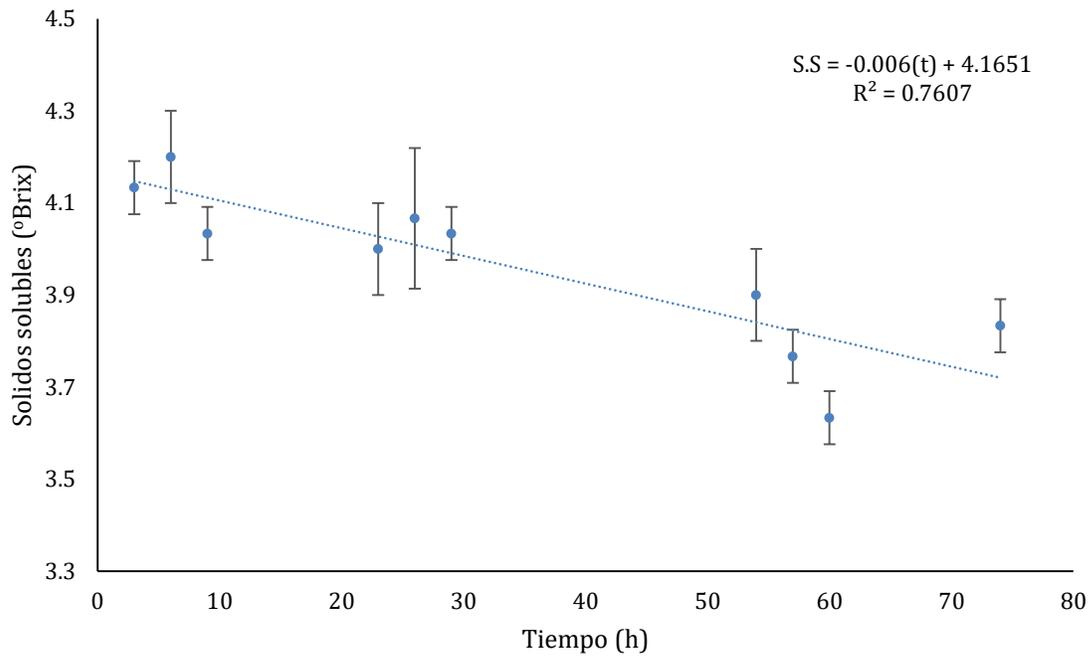


Figura 83. Cinética de los sólidos solubles en función del tiempo, tratamiento 9

**Tratamiento 10: 0.2S/10.0A/2.0F**

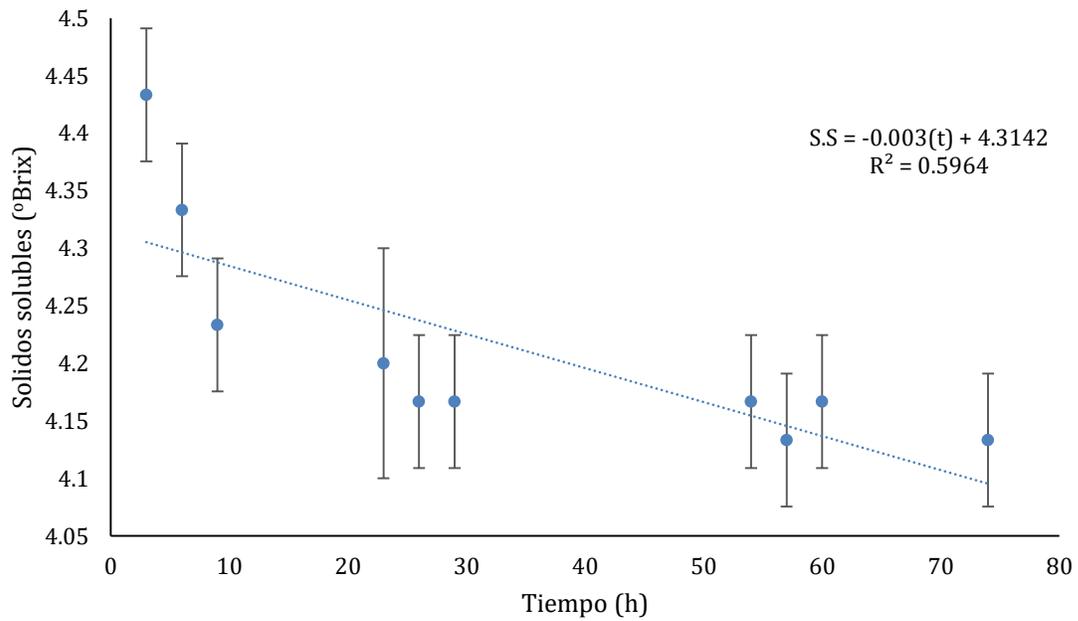


Figura 84. Cinética de los sólidos solubles en función del tiempo, tratamiento 10

**Tratamiento 11: 0.2S/1.0A/5.0F**

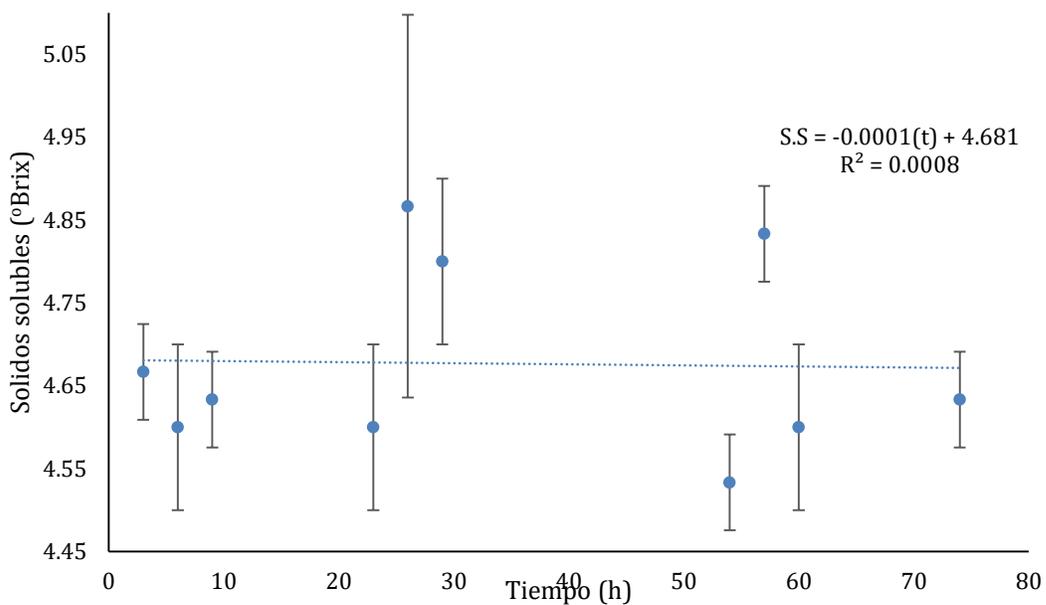


Figura 85. Cinética de los sólidos solubles en función del tiempo, tratamiento 11

**Tratamiento 12: 0.2S/10.0A/5.0F**

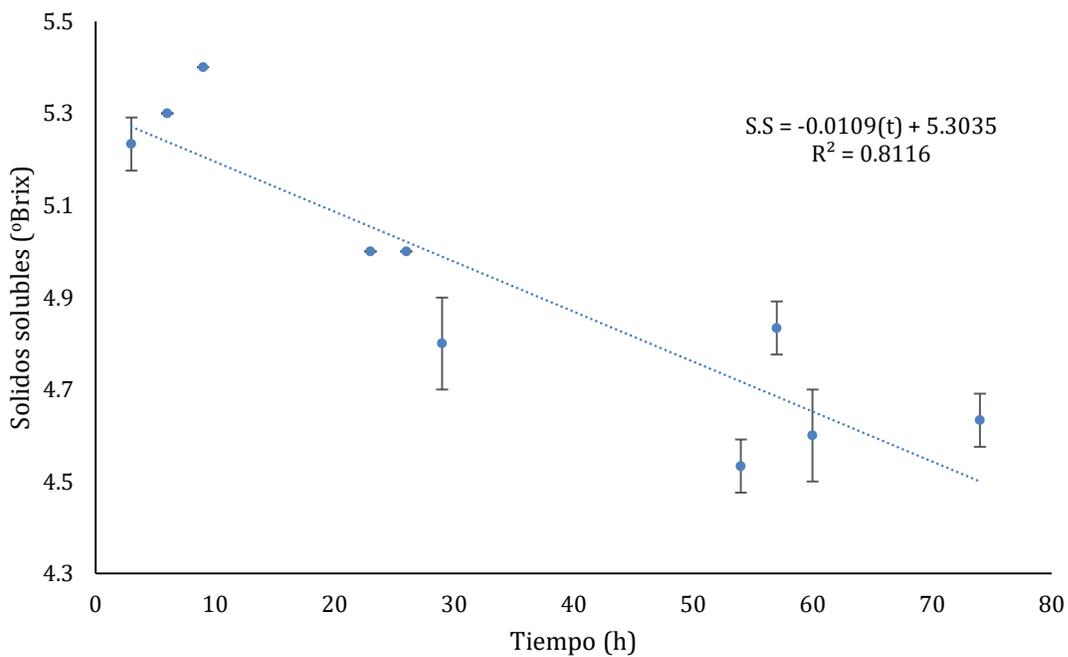


Figura 86. Cinética de los sólidos solubles en función del tiempo, tratamiento 12

**Tratamiento 13: 0.2S/5.5A/3.5F**

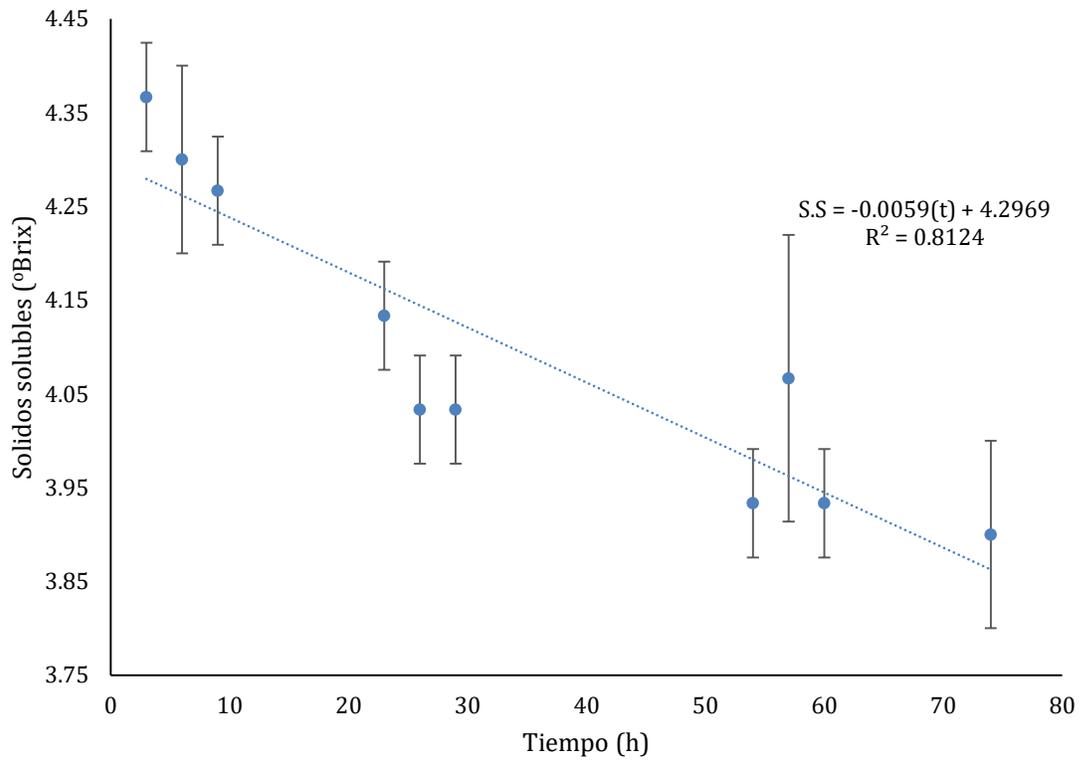


Figura 87. Cinética de los sólidos solubles en función del tiempo, tratamiento 13

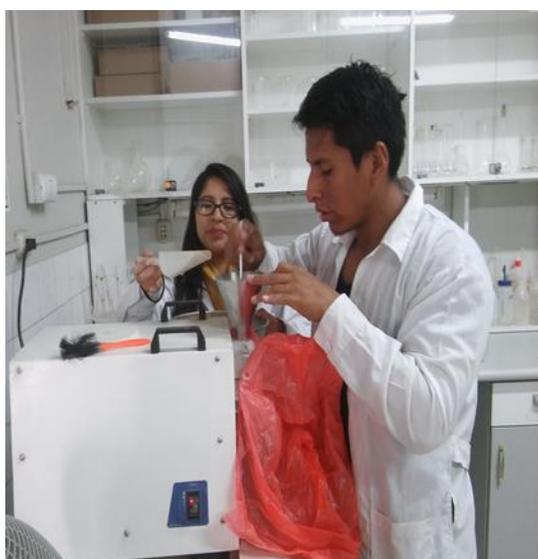
#### Anexo 4. Galería de figuras del proceso de obtención de bioetanol



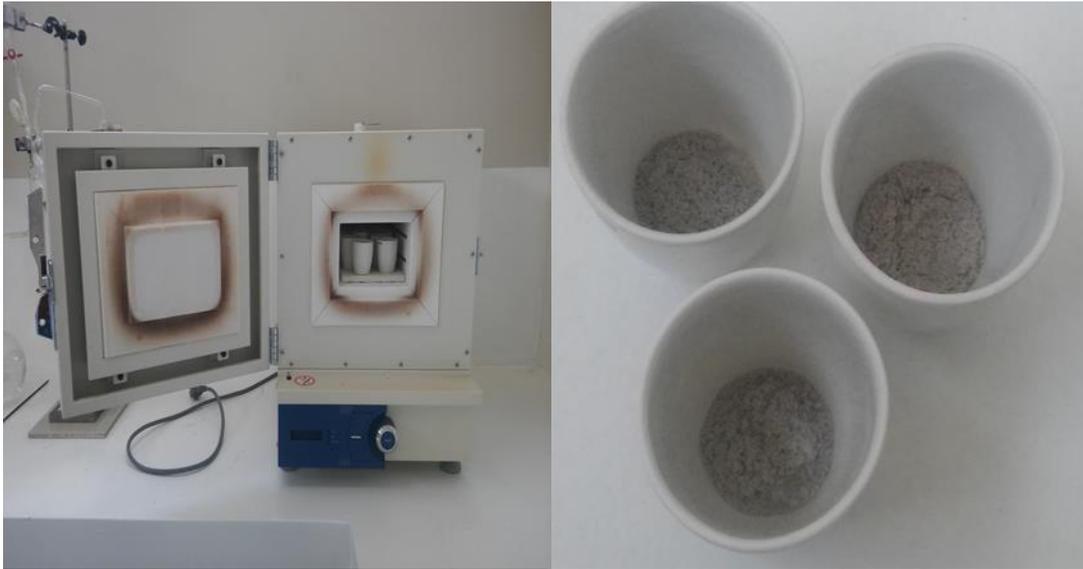
*Figura 88.* Biorreactor anaerobio para la fermentación



*Figura 89. Molienda con molino manual*



*Figura 90. Molienda con molino tipo Wylie*



*Figura*  
91.

Determinación de cenizas por método de calcinación



*Figura 92.* Determinación de cenizas por método AOAC,2000

## **Pretratamiento**

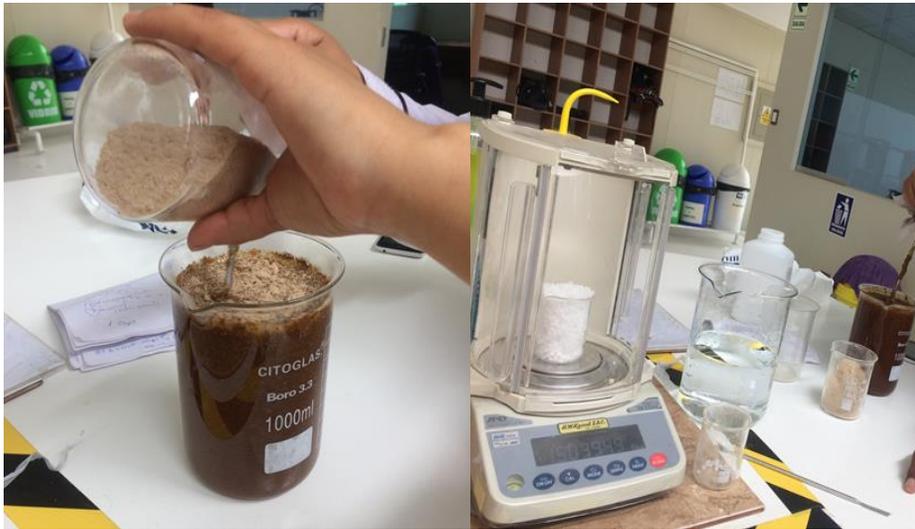


Figura 93. Pretratamiento químico-álcalis diluido



Figura 94. Ebullición en el pretratamiento químico-álcalis diluido



*Figura 95.* Lavado de biomasa deslignificada con agua destilada hasta tener un pH neutro



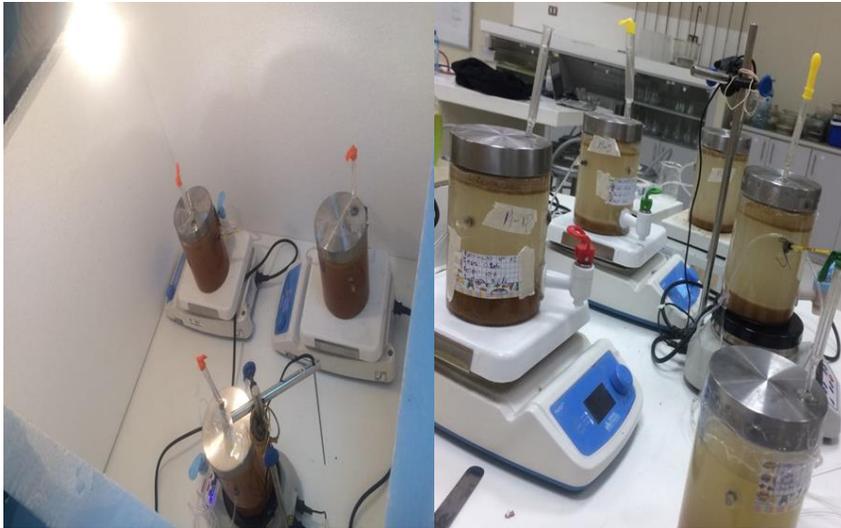
*Figura 96.* Hidrólisis ácida



*Figura 97. Lavado de biomasa celulósica*



*Figura 98. Secado de biomasa celulósica en estufa por 24 horas a 80 °C*



*Figura 99.* Proceso de fermentación



*Figura 100.* Proceso de destilación



*Figura 101. Medición del grado etanólico*