3. Resultados y discusión.

3.1. Energía obtenida en el proceso. Rendimientos.

3.1.1. Relación entre la materia prima y el biogás obtenido.

Existen diversos métodos para determinar el rendimiento de una planta de producción de biogás mediante digestión anaerobia. El más comúnmente empleado es la relación entre el biogás producido y las toneladas de materia fresca o toneladas de materia seca.

	Biogás (m^3/a)	Caudal tratamiento (t materia prima/año)	m^3 biogás/ t materia prima	Contenido en metano (%)
Krebeck-Wollbrand.	6.000.000	36.000	166,7	52-53
Reiffenhausen	1.500.000	8.700	172,4	54
Hardegsen	8.800.000	40.000	220,0	55
Relliehausen	800.000	4.855	164,8	55

Tabla 3.1: Biogás producido por tonelada de materia prima utilizada (m^3 biogás/t materia prima).

Los rendimientos obtenidos de las plantas de digestión anaerobia del presente estudio (Tabla 3.1) coinciden con los valores encontrados en la bibliografía para plantas de co-digestión con materias primas de similares. Un mezcla del 44% de residuo ganadero y 56% de silo de cultivos energéticos y con un contenido en metano del 54% puede llegar a producir hasta 222 m^3 biogás/t mezcla (PROBIOGAS, 2009).

Además dichos valores suponen una mejora sobre los valores disponibles en la bibliografía para la digestión de purines porcinos (11,8 m^3 biogás/t), purines vacunos (17,7 m^3 biogás/t) y gallinaza (54,4 m^3 biogás/t) (Flotats, 2008), y sobre la co-digestión

de los mismos con otros co-sustratos como residuos de la industria pesquera (92 m^3 biogás/t de residuo), residuos hortofrutícolas (cebollas, remolacha, patatas y maíz) (100,7 m^3 biogás/t de residuo) o residuos de matadero (48,7 m^3 biogás/t de residuo) (PROBIOGAS, 2009).

3.1.2. Rendimiento eléctrico y rendimiento térmico

Respecto a la **energía obtenida en el proceso**, con los datos obtenidos a lo largo del estudio podemos calcular el rendimiento eléctrico y el rendimiento térmico de los equipos de cogeneración de cada planta, así como el rendimiento total. Para ello debemos conocer el potencial energético del biogás generado en un año. Dicho potencial depende directamente del contenido en metano, dado que todas las plantas producen biogás con un contenido medio en metano cercano al 55% a la salida del digestor (sin ningún tratamiento de purificación) se ha tomado el valor de 5,83 KWh/m^3 de biogás (Murphy, 2005). El **potencial energético** del biogás de cada planta de digestión anaerobia, y el rendimiento eléctrico y el rendimiento térmico de los equipos de cogeneración han sido calculados de acuerdo a las siguientes fórmulas:

Potencial biogás (KWh/a) = Biogás producido (m^3/a)· 5,83 KWh/m^3

Rendimiento eléctrico (%) = Electricidad anual (KWh/a)·100/ Pot. biogás (KWh/a)

Rendimiento térmico (%) = Calor anual (KWh/a)·100/ Potencial biogás (KWh/a)

		Krebeck-Wollbrand	**Reiffen-hausen**	**Rellie-hausen**	**Hardegsen**
Biogás producido	[m^3/a]	6.000.000	1.500.000	800.000	8.800.000
Contenido en metano	(%)	53	54	55	55
Potencial energético	[kWh/m^3]	5,83	5,83	5,83	5,83
Energía neta	[kWh/año]	34.980.000	8.745.000	4.664.000	51.304.000
Electricidad	[kWh/año]	13.500.000	4.000.000	1.600.000	18.000.000
Rto eléctrico	(%)	38,59	45,74	34,31	35,08
Calor	[kWh/año]	8.600.000	2.090.000	950.000	-
Rto térmico	(%)	24,59	23,90	20,37	-

Tabla 3.2: Energía generada, rendimiento eléctrico y rendimiento térmico de cada planta de biogás.

3.1.3. Potencial de abastecimiento.

Con el fin de conocer el potencial de las plantas agrícolas de biogás a pequeña escala para abastecer de calor y electricidad a las poblaciones que gestionan las instalaciones se van a calcular las necesidades de cada municipio. Para ello se dispone de los datos medios anuales de consumo de electricidad y gas natural para calefacción y agua caliente sanitaria per cápita en Alemania.

De acuerdo al Instituto nacional de la energía el consumo medio de electricidad per cápita en Alemania es de 7.184 kWh, y según el informe estadístico de la organización europea de la industria de gas natural (Eurogas) el consumo medio de un alemán es de 10.360 kWh al año. En la siguiente tabla se resumen las necesidades eléctricas y de gas natural de cada población y el porcentaje cubierto por la planta de biogás.

		Krebeck-Woll.	**Reiffen-hausen**	**Rellie-hausen**	**Hardegsen**
Habitantes	[nº]	1.340	720	166	8.222
Consumo medio anual electricidad	[kWh]	9.626.560	5.172.480	1.192.544	59.066.848
Electricidad producida	[kWh]	13.500.000	4.000.000	1.600.000	18.000.000
Abastecimiento	[%]	140	77	134	30
Consumo medio anual calor	[kWh]	13.882.400	7.459.200	1.719.760	85.179.920
Calor producido	[kWh]	8.600.000	2.090.000	950.000	-
Abastecimiento	[%]	62	28	55	-

Tabla 3.3: % del consumo de electricidad y calor generado para cada municipio.

En la Tabla 3.3 se observa que en los tres municipios de los que se disponen de datos las necesidades de calor no están completamente cubiertas con la producción de los motores de cogeneración de las plantas de biogás, estas carencias podrían ser suplidas por una central de calefacción con astillas de madera. Respecto a la electricidad, en Krebeck-Wollbrandhausen y Relliehausen la producción permitiría el

suministro a toda la población y el vertido a red del excedente. Mientras que en Relliehausen y Hardegsen la producción permitiría el suministro a parte de la población.

Respecto a España, las necesidades per cápita de electricidad y calor son ligeramente inferiores, debido a las condiciones climáticas y al nivel de desarrollo. De acuerdo al Instituto Nacional de la Energía el consumo medio de electricidad per cápita en España es de 6.335 kWh, y según el Instituto de Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) el consumo medio de un español es de 9.810 kWh al año.

Por lo que tanto en España como en Alemania la construcción de una pequeña planta de digestión agrícola abastecidas con materias primas locales nos permitiría el abastecimiento de parte de la electricidad y del calor para calefacción y agua caliente sanitaria de pequeñas poblaciones. Siendo más favorable en el caso de implantarlo en poblaciones españolas, con menores necesidades por hogar y pudiendo compartir instalaciones en el caso de municipios pequeños y cercanos, como por ejemplo la central de biogás de Krebeck y Wollbrandhausen.

3.2. Control de calidad del efluente. Resultados de los análisis.

3.2.1. Evolución de los parámetros.

Durante el seguimiento de cada digestor se realizaron análisis semanales del pH, los ST y SV, y FOS/TAC, quincenales de nitrógeno amoniacal y mensuales del ácido acético durante ocho semanas (dichos datos se recogen en el Anejo IV), observándose la estabilidad del proceso. En la Figura 3.1 a la Figura 3.7 se muestran los valores obtenidos para cada uno de los siete digestores estudiados.

Como se puede observar se producen pequeñas variaciones en cada parámetro. No se debe olvidar que se trata de un proceso en el que interactúan multitud microorganismos y en el que la composición de la materia prima utilizada puede variar, produciendo cambios en los ST y SV, así como en el nitrógeno amoniacal. La evolución del pH en los siete digestores se mantuvo próximo a la neutralidad, siendo en ocasiones ligeramente básico (próximo a 8), debido a la alcalinidad de los purines utilizados en la co-digestión.

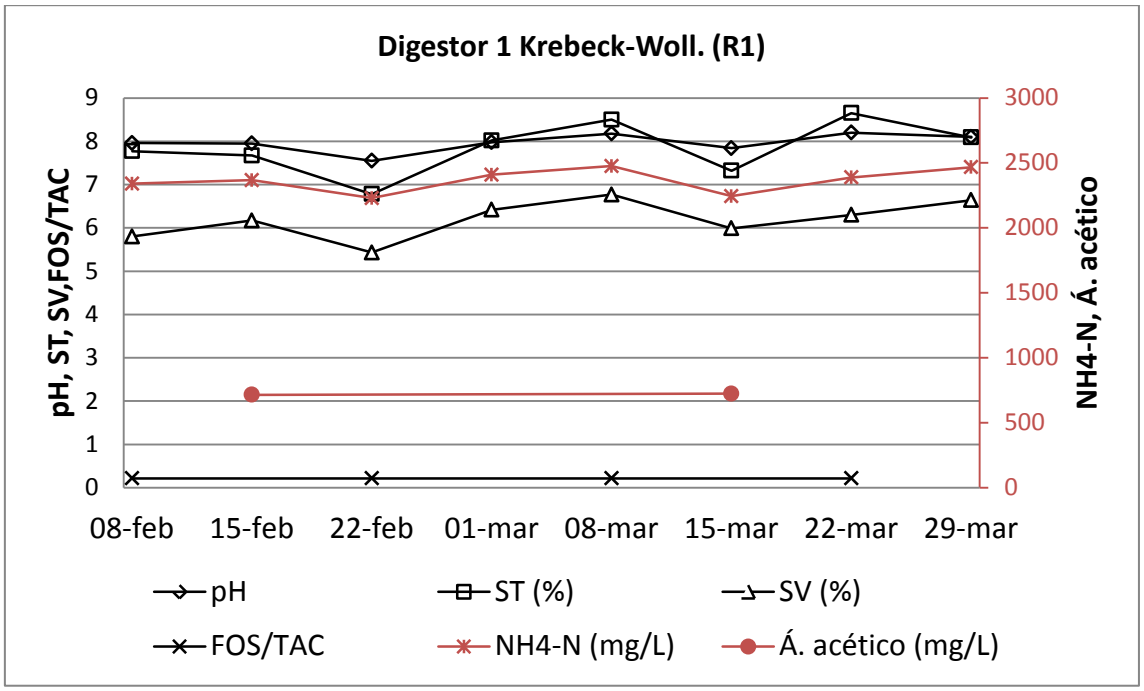

Figura 3.1: Evolución del pH, los ST y Sv, FOS/TAC, nitrógenos amoniacal (NH_4-N) y ácido acético en el digestor 1 de Krebeck-Wollbrandhausen (R1).

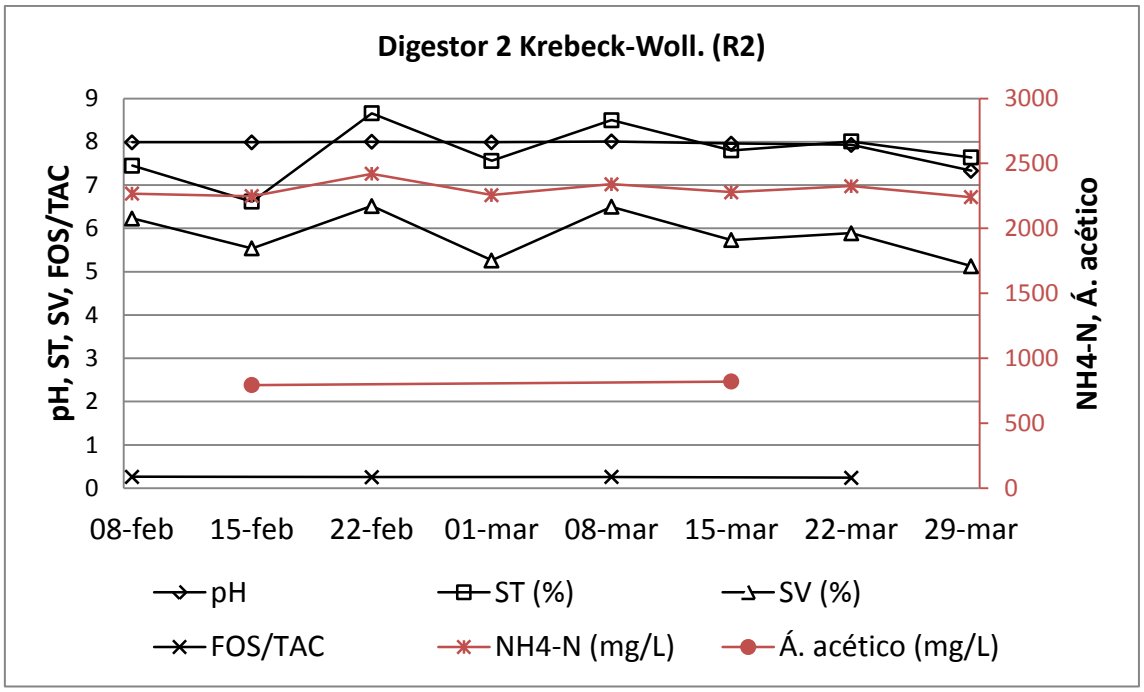

Figura 3.2: Evolución del pH, los ST y Sv, FOS/TAC, nitrógenos amoniacal (NH_4-N) y ácido acético en el digestor 2 de Krebeck-Wollbrandhausen (R2).

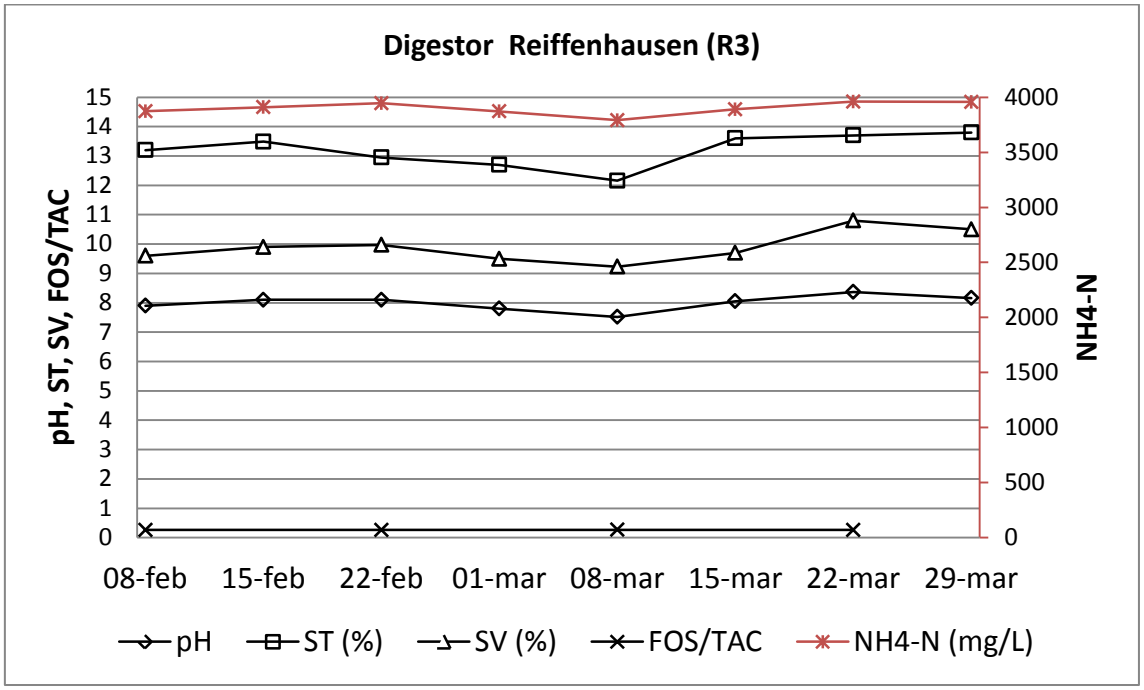

Figura 3.3: Evolución del pH, los ST y Sv, FOS/TAC y nitrógenos amoniacal (NH_4-N) en el digestor de Reiffenhausen (R3).

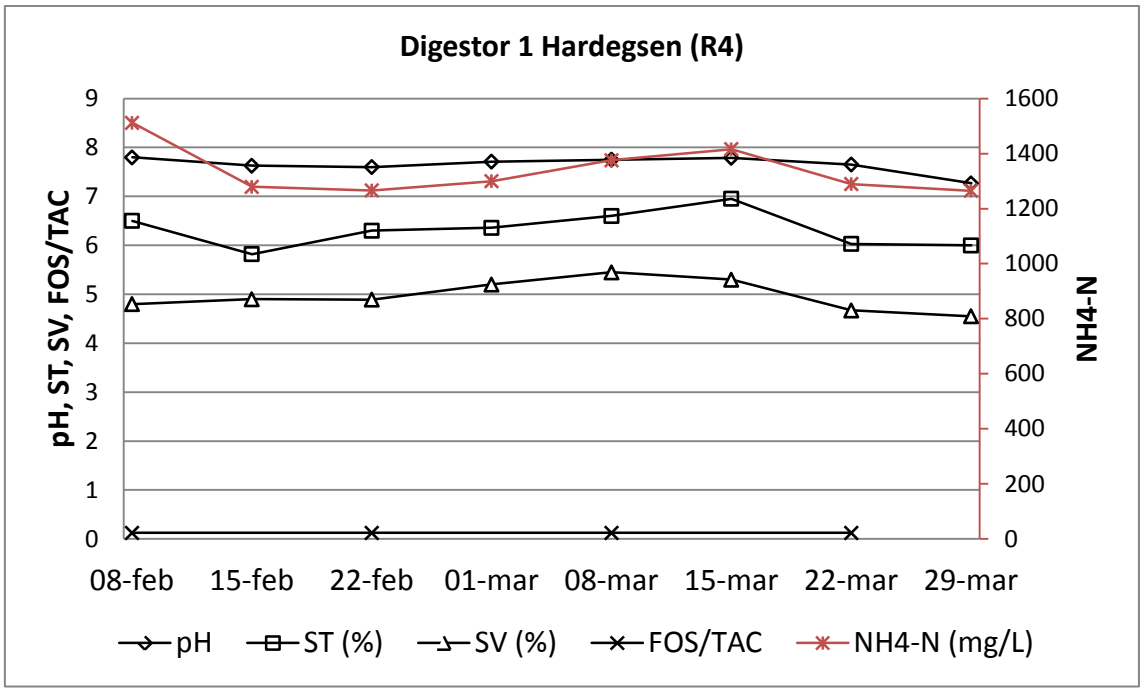

Figura 3.4: Evolución del pH, los ST y Sv, FOS/TAC y nitrógenos amoniacal (NH_4-N) en el digestor 1 de Hardegsen (R4).

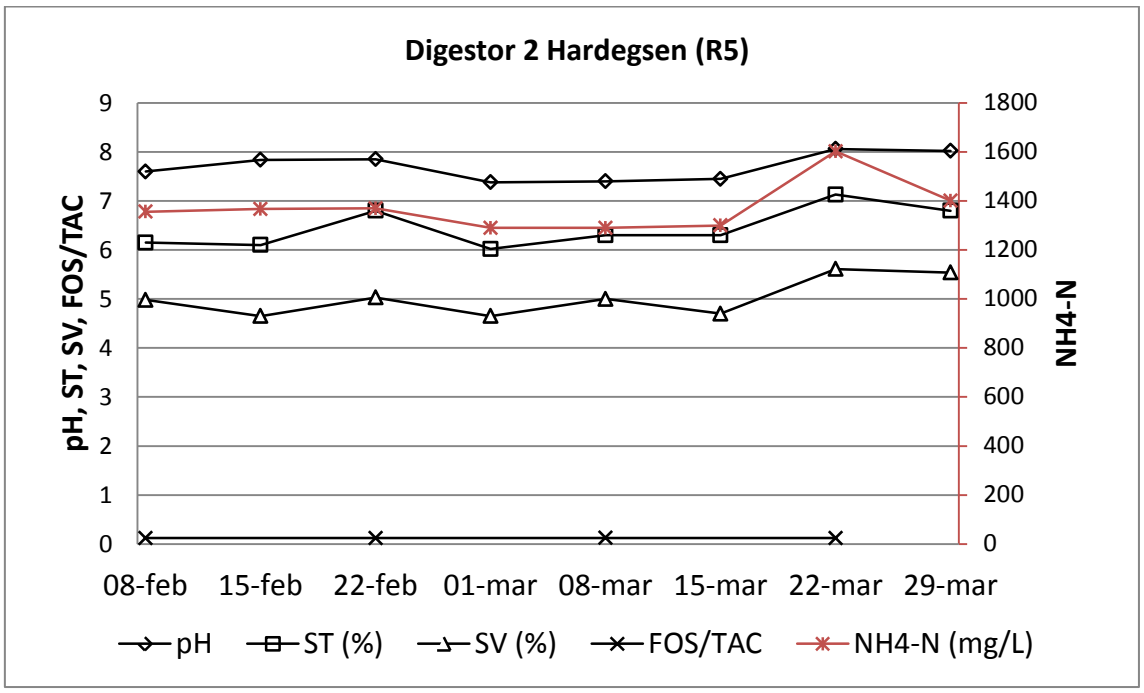

Figura 3.5: Evolución del pH, los ST y Sv, FOS/TAC y nitrógenos amoniacal (NH_4-N) en el digestor 2 de Hardegsen (R5).

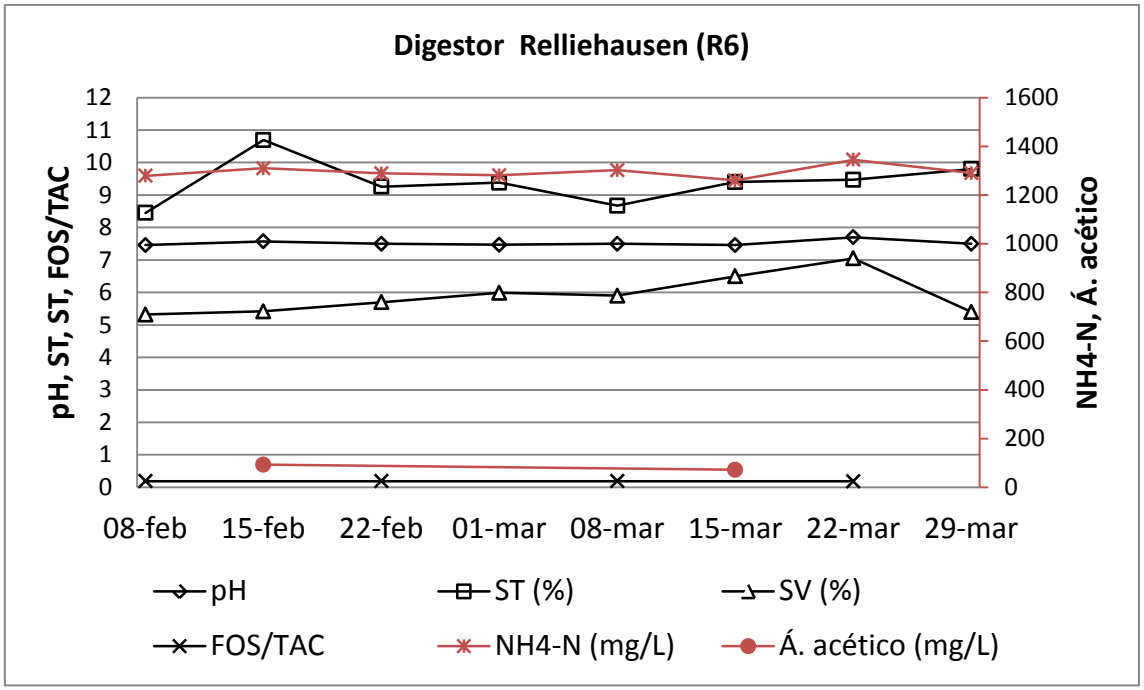

Figura 3.6: Evolución del pH, los ST y Sv, FOS/TAC, nitrógenos amoniacal (NH_4-N) y ácido acético en el digestor de Relliehausen (R6).

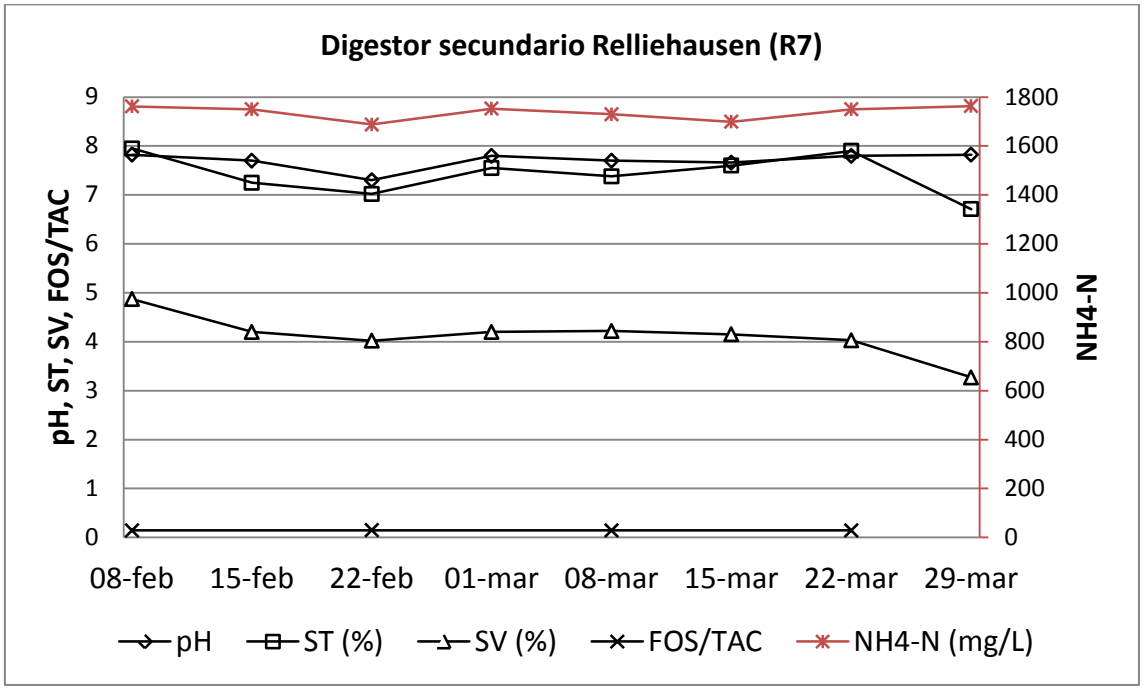

Figura 3.7: Evolución del pH, los ST y Sv, FOS/TAC y nitrógenos amoniacal (NH_4-N) en el digestor secundario de Relliehausen (R7).

En todos los digestores puede apreciarse la estabilidad de los parámetros de control durante el periodo analizado.

3.2.2. Caracterización del efluente.

A continuación, se presenta un resumen de los valores medios, el máximo y el mínimo de los parámetros obtenidos del efluente del digestor o digestores primarios de cada planta de digestión anaerobia de este estudio, además del efluente del digestor secundario en el caso de la planta de digestión anaerobia de Relliehausen (Tabla 3.4 a Tabla 3.10), así como el número de muestras tomadas, la desviación estándar y el intervalo de confianza.

Krebeck Digestor 1 (R1)						
	pH	ST(%)	SV(%)	Á. acético (mg/l)	FOS/TAC	NH4-N (mg/L)
Media	7,97	7,85	6,19	719,48	0,21	2365
Nº de muestras	8	8	8	2	4	8
Max	8,38	9,02	6,77	723,87	0,2142	2476
Min	7,41	6,78	5,43	715,09	0,2126	2230
Std Dev	0,30	0,61	0,44	6,21	0,0007	91,68
95% coincidencia	0,21	0,42	0,31	8,60	0,0007	63,53

Tabla 3.4: Concentraciones de AGV, ST y SV, FOS/TAC y nitrógeno amoniacal y pH medidos en el efluente del digestor 1 de la planta de digestión anaerobia de Krebeck.

Krebeck Digestor 2 (R2)						
	pH	ST(%)	SV(%)	Á. acético (mg/l)	FOS/TAC	NH4-N (mg/L)
Media	7,9	7,78	5,85	807,57	0,25	2297
Nº de muestras	8	8	8	8	4	8
Max	8,4	8,66	6,52	821,26	0,2650	2420
Min	7,71	6,62	5,13	793,88	0,2422	2241
Std Dev	0,25	0,64	0,53	19,36	0,01	61,08
95% coincidencia	0,17	0,44	0,37	13,42	0,01	42,32

Tabla 3.5: Concentraciones de AGV, ST y SV, FOS/TAC y nitrógeno amoniacal y pH medidos en el efluente del digestor 2 de la planta de digestión anaerobia de Krebeck.

Reiffenhausen Digestor 3 (R3)						
	pH	ST(%)	SV(%)	Á. acético (mg/l)	FOS/TAC	NH4-N (mg/L)
Media	8	13,2	9,9		0,26	3900
Nº de muestras	8	8	8	0	4	8
Max	8,37	13,8	10,8		0,2647	3960
Min	7,52	12,16	9,23		0,2600	3792
Std Dev	0,26	0,57	0,52		0,002	56,50
95% coincidencia	0,18	0,39	0,36		0,002	39,15

Tabla 3.6: Concentraciones de AGV, ST y SV, FOS/TAC y nitrógeno amoniacal y pH medidos en el efluente del digestor de la planta de digestión anaerobia de Reiffenhausen.

Hardegsen Digestor 4 (R4)						
	pH	ST(%)	SV(%)	Á. acético (mg/l)	FOS/TAC	NH4-N (mg/L)
Media	7,65	6,32	4,97		0,12	1338
Nº de muestras	8	8	8	0	4	8
Max	8,3	6,95	5,6		0,1243	1512
Min	7,05	5,82	4,55		0,1228	1265
Std Dev	0,49	0,37	0,32		0,0006	89,10
95% coincidencia	0,34	0,25	0,22		0,0006	61,74

Tabla 3.7: Concentraciones de AGV, ST y SV, FOS/TAC y nitrógeno amoniacal y pH medidos en el efluente del digestor 1 de la planta de digestión anaerobia de Hardegsen.

Hardegsen Digestor 5 (R5)						
	pH	ST(%)	SV(%)	Á. acético (mg/l)	FOS/TAC	NH4-N (mg/L)
Media	7,7	6,45	5,02		0,12	1372
Nº de muestras	8	8	8	0	4	8
Max	8,26	7,13	5,61		0,1235	1602
Min	7,38	6,02	4,65		0,1201	1290
Std Dev	0,36	0,41	0,38		0,0015	101,88
95% coincidencia	0,25	0,28	0,26		0,0008	70,60

Tabla 3.8: Concentraciones de AGV, ST y SV, FOS/TAC y nitrógeno amoniacal y pH medidos en el efluente del digestor 2 de la planta de digestión anaerobia de Hardegsen.

Relliehausen Digestor 6 (R6)						
	pH	ST(%)	SV(%)	Á. acético (mg/l)	FOS/TAC	NH4-N (mg/L)
Media	7,52	9,39	5,91	82,34	0,19	1295
Nº de muestras	8	8	8	2	4	8
Max	7,7	10,69	7,05	93,04	0,1879	1345
Min	7,46	8,45	5,32	71,64	0,1861	1260
Std Dev	0,08	0,68	0,60	15,13	0,0008	25,31
95% coincidencia	0,06	0,47	0,42	20,97	0,0008	17,54

Tabla 3.9: Concentraciones de AGV, ST y SV, FOS/TAC y nitrógeno amoniacal y pH medidos en el efluente del digestor de la planta de digestión anaerobia de Relliehausen.

Relliehausen Digestor Secundario 7 (R7)						
	pH	ST(%)	SV(%)	Á. acético (mg/l)	FOS/TAC	NH4-N (mg/L)
Media	7,7	7,42	4,12	0	0,14	1737
Nº de muestras	8	8	8	2	4	8
Max	7,82	7,95	4,87	0	0,1438	1763
Min	7,3	6,71	3,27	0	0,1456	1688
Std Dev	0,17	0,42	0,44	0,00	0,0008	28,82
95% coincidencia	0,12	0,29	0,30	0,00	0,0008	19,97

Tabla 3.10: Concentraciones de AGV, ST y SV, FOS/TAC y nitrógeno amoniacal y pH medidos en el efluente del digestor secundario de la planta de digestión anaerobia de Relliehausen.

3.2.3. Análisis de los resultados.

A partir de los datos anteriores se han elaborado las siguientes gráficas, que muestran los resultados de cada parámetro de los digestores del estudio, señalando el umbral máximo y mínimo de la bibliografía estudiada.

En la Figura 3.8 se observan como los valores medios y la incertidumbre de las muestras tomadas en los diferentes digestores. Como se ha indicado en la introducción, el pH del digestor debe mantenerse próximo a la neutralidad. En este caso, los valores medios se encuentran dentro del rango aceptable entre 7,4 y 8 (Hölker, 2010), estando el valor del digestor de Reiffenhausen (R3) en el límite del umbral superior.

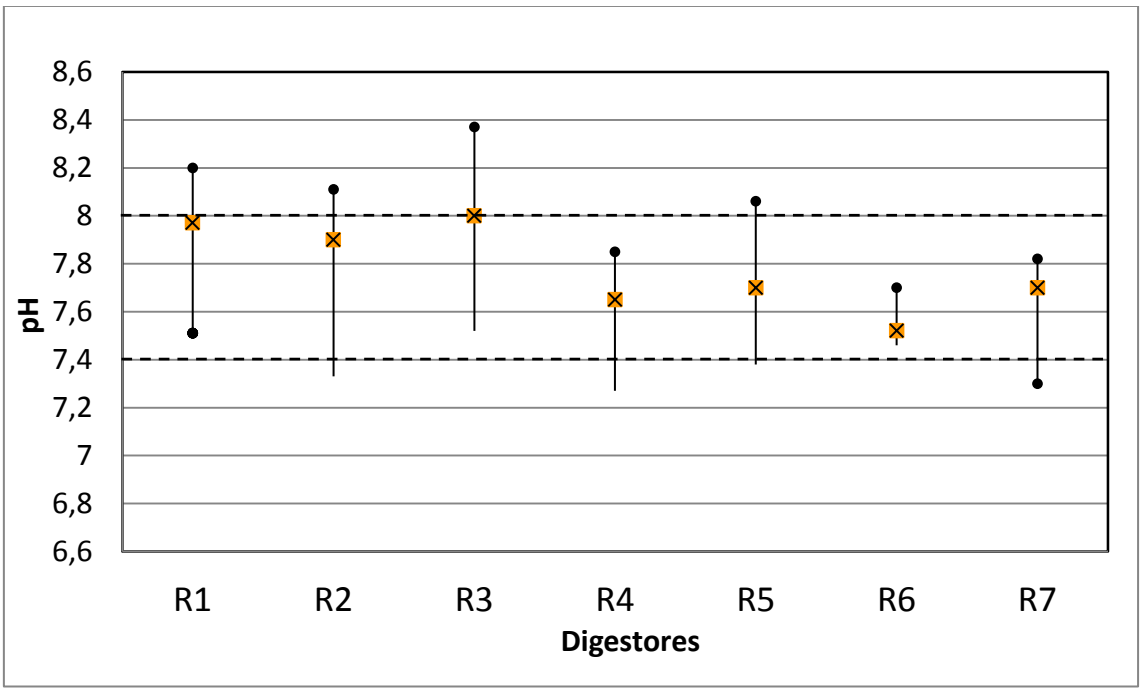

Figura 3.8: pH medio y umbrales críticos de funcionamiento.

En la Figura 3.9 y la Figura 3.10 se muestran los valores medios, indicando el máximo y el mínimo de las muestras tomadas de los sólidos totales (ST) y los sólidos volátiles (SV). De acuerdo a la bibliografía el intervalo aceptable para los ST es entre el 6 y el 10% (Steffen, Szolar, & Braun, 1998), mientras que los valores de SV deben permanecer por debajo del 8% **(**Hölker**,** 2010).

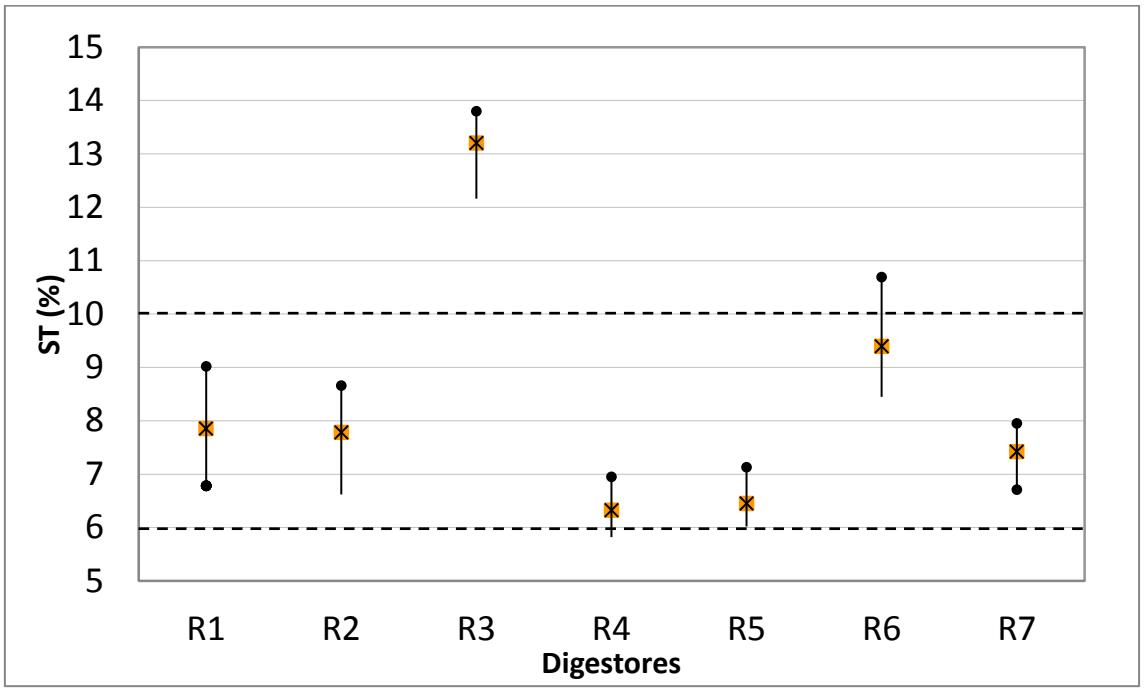

Figura 3.9: Porcentaje de Sólidos Totales (ST) medios y umbrales críticos de funcionamiento.

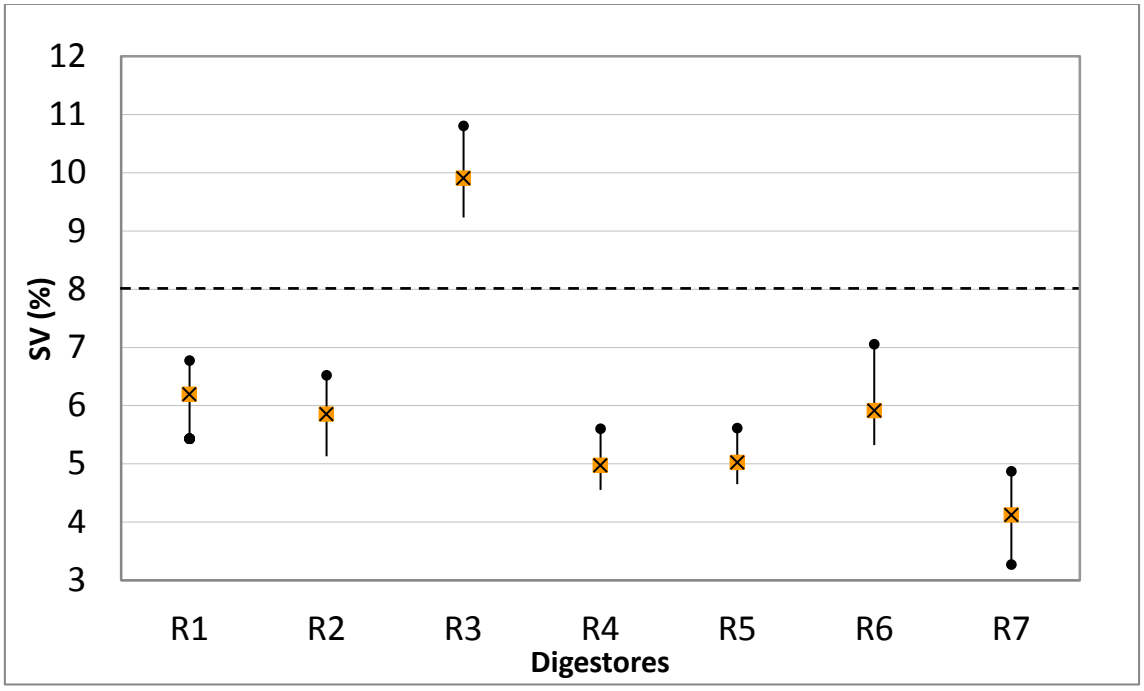

Figura 3.10: Porcentaje de Sólidos Volátiles medios (SV) y umbrales críticos.

Como se observa en las gráficas todos los digestores se encuentran dentro del rango aceptable para ambos parámetros excepto los valores del digestor de Reiffenhausen (R3), que se encuentran por encima del umbral máximo recomendado. Esto puede ser debido a la presencia en los purines de componentes no deseados como paja, virutas de madera o arena que modifican la fracción sólida de la mezcla o a una sobre alimentación del digestor con material vegetal.

En la Figura 3.11 se muestran los valores medios, indicando el máximo y el mínimo de las muestras tomadas del parámetro FOS/TAC. Switzembaum et al. (1990) indican que la relación FOS/TAC para un digestor estable debe ser de entre 0,1 y 0,35, siendo óptima con valores entre 0,1 y 0,2. Como se puede observar todos los valores de los digestores se encuentran en el rango indicado, siendo además cercanos al óptimo. El valor del digestor de Reiffenhausen (R3) es superior al resto, aun estando dentro del rango aceptable.

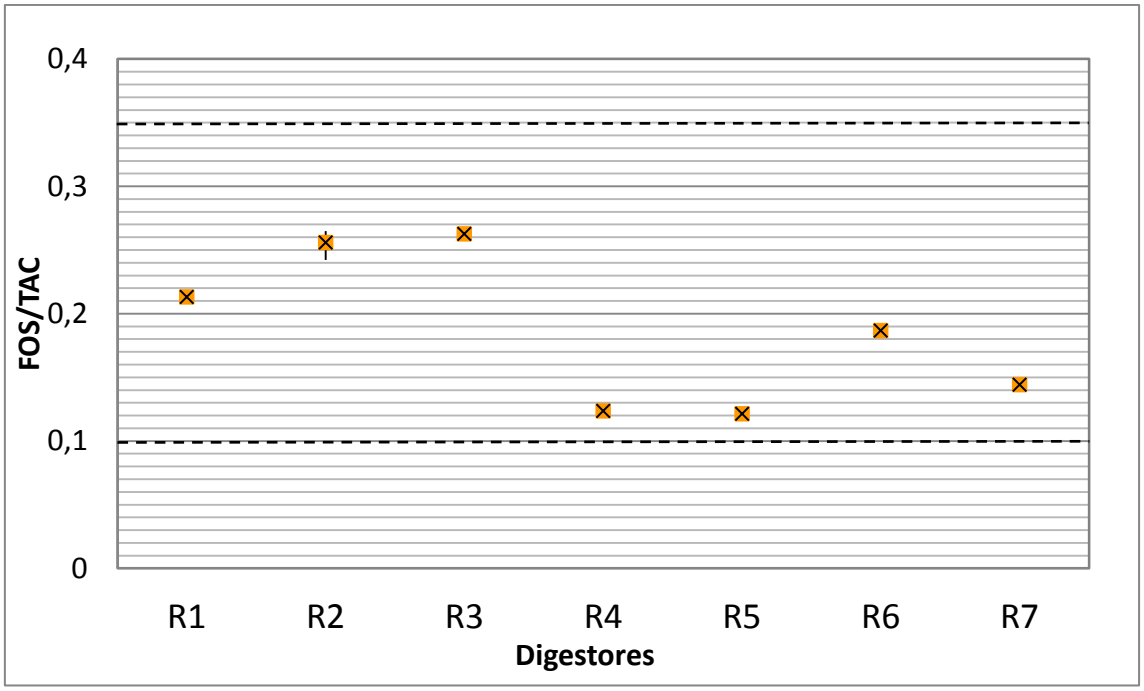

Figura 3.11: Relación FOS/TAC de las muestras analizadas y umbrales críticos.

La Figura 3.12 muestra los valores medios, indicando el máximo y el mínimo de las muestras tomadas de nitrógeno amoniacal (NH_4-N). Todos los valores se encuentran dentro del rango de valores adecuados para un digestor estable (de 1.000 a 3.000 mg/l), excepto el valor del digestor de Reiffenhausen (R3), que supera el umbral máximo aceptable.

Esto puede ser debido a una proporción inadecuada entre purines y cultivos energéticos ensilados, ya que los purines tienen altas concentraciones de nitrógeno amoniacal, o la utilización de purines que han estado demasiado tiempo almacenados produciendo la degradación de las formas amoniacales.

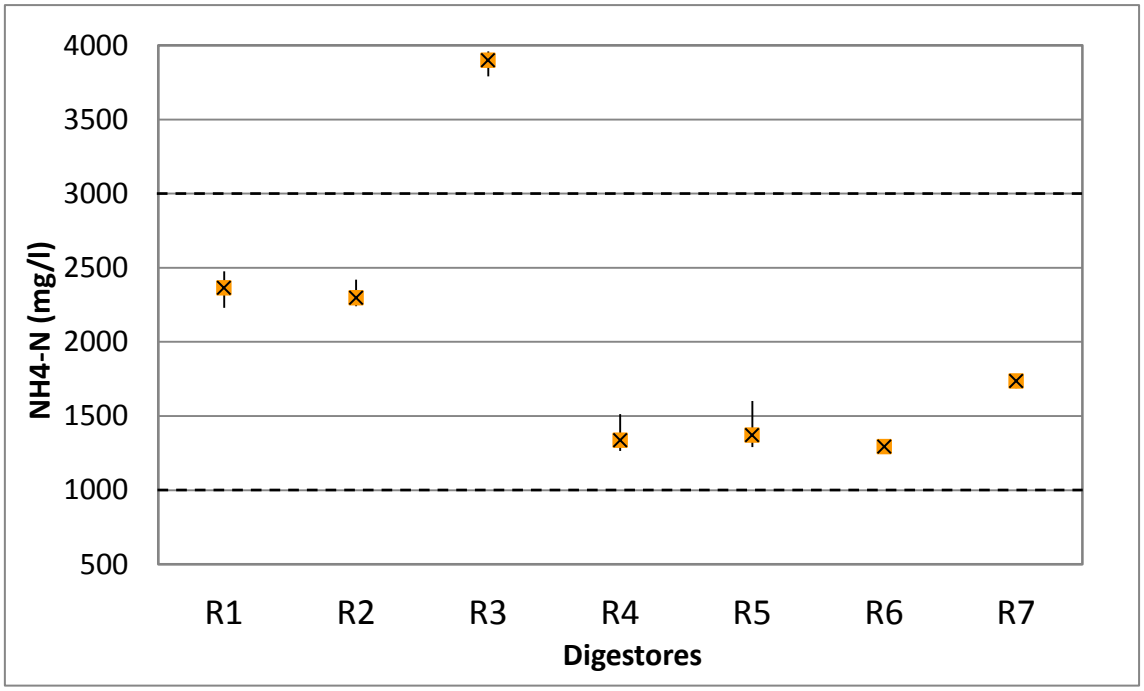

Figura 3.12: Nitrógeno amoniacal, y umbrales para el NH4-N.

Por último, la Figura 3.13 muestra los valores medios y la incertidumbre de las muestras tomadas de ácido acético, como indicador de los ácidos grasos volátiles. Los valores obtenidos en los digestores de la planta de Krebeck y de la planta de Relliehausen son inferiores al umbral de 1.600 mg/l, establecido como valor máximo aceptable (Hölker, 2010).

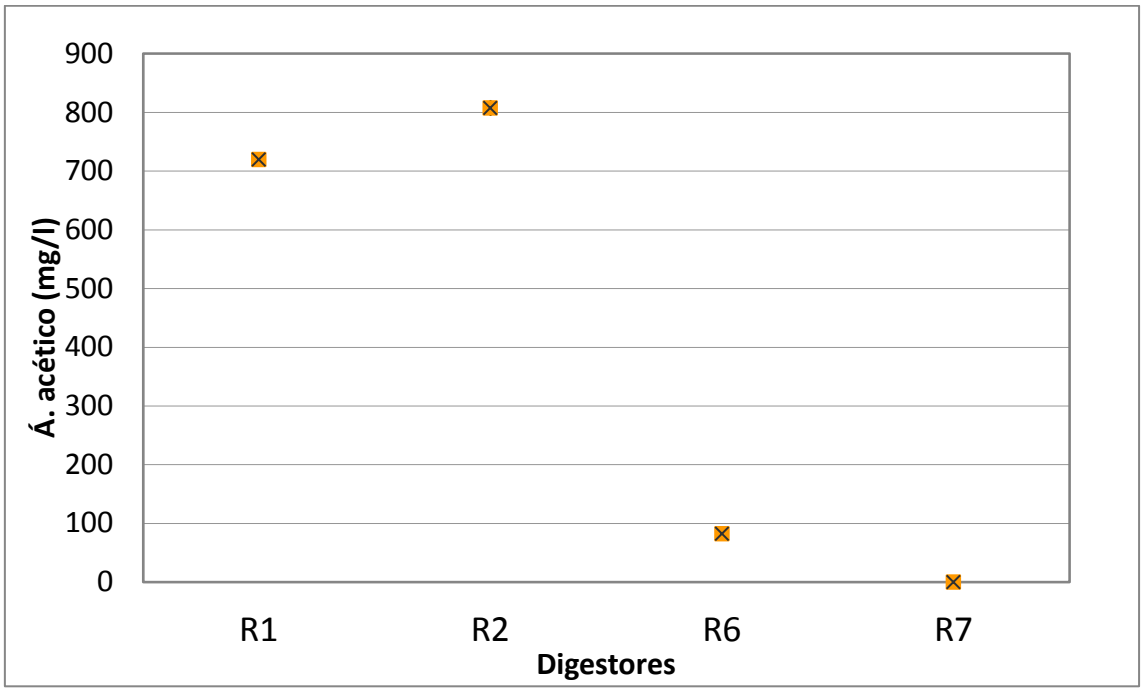

Figura 3.13: Ácido acético y umbral crítico de funcionamiento.

En la cromatografía de gases para el digestor secundario de la planta de Relliehausen obtenemos un valor de 0 mg/l de ácido acético. Dicho valor es debido a que la prácticamente totalidad del ácido acético es degradado, formando precursores del metano como el acetato y el hidrógeno para la producción de metano, y produciendo un aumento del pH. Además al comparar el digestor primario y el secundario de dicha planta se observa una disminución de los ST del 21% debido a la digestión, y el aumento del 34% del nitrógeno amoniacal por la hidrólisis de los compuestos nitrogenados presentes en los residuos ganaderos. Todos estos cambios corresponden con el comportamiento normal del proceso de digestión anaerobia.

Respecto a los resultados de los parámetros con valores por encima de los recomendados del digestor R3 de la población de Reiffenhausen, se observa que tanto los ST como los SV y el nitrógeno amoniacal los exceden, mientras que el pH y la relación FOS/TAC, pese a ser elevados, se encuentran dentro de un rango aceptable.

Esto se debió a un manejo incorrecto de la planta de biogás, sobrealimentando los digestores. Sin embargo se observó que durante el periodo de estudio que dicha

sobrealimentación no afectó al funcionamiento general de la planta de digestión anaerobia. Como se ha explicado en la introducción la variación en la relación FOS/TAC a valores por encima de los óptimos es la primera alerta de fallo del proceso, pero en el digestor de Reiffenhausen se ha mantenido constante sin afectar a la producción de metano. Esto se debe a la capacidad de adaptación de las bacterias al medio, confiriendo estabilidad al proceso.