

CAPÍTULO 7

FERMENTACIÓN PRIMARIA DEL AFLUENTE EN LA SEGUNDA FASE EXPERIMENTAL

Una vez caracterizada la aptitud del afluente para la EBIF y sabiendo que el agua residual afluente tenía un potencial de generación de AGV por fermentación acidogénica, se procedió al estudio de un sistema en continuo de fermentación de sólidos primarios. El primer objetivo era conseguir concentraciones similares o iguales a las del potencial de AGV, mediante el uso de un decantador primario operado como prefermentador. La unidad diseñada se designó con el nombre de Tanque Primario Activado (TPA). Los sólidos del ARU eran prefermentados en el fondo de este tanque y los AGV eran elutriados del fango por el afluente y a través del sistema de recirculación adoptado. Los detalles del diseño y montaje del prefermentador fueron expuestos en el apartado 4.2.2 del Capítulo 4. El objetivo final de este estudio fue evaluar el efecto de la prefermentación del afluente sobre el funcionamiento de un reactor biológico secuencial con eliminación de nutrientes. El estudio y seguimiento completo de la prefermentación se dividió en tres periodos, realizados bajo el control de variables como la temperatura, el TRS, el TRH, el caudal de entrada y el caudal de recirculación. Los valores de estas y de las otras variables controladas se encuentran en la Tabla 4.1 del Capítulo 4. Los periodos estudiados fueron los siguientes:

- Periodo A.** El TRS fue de 5 días. En este periodo el prefermentador permaneció abierto a la atmósfera.
- Periodo B.** El TRS fue de 10 días, y el prefermentador también se mantuvo abierto a la atmósfera.
- Periodo C.** El TRS fue de 5 días, pero esta vez el prefermentador permaneció cerrado a la atmósfera con una tapa no hermética de PMMA, con la finalidad de mejorar la regulación de la temperatura y dificultar la transferencia de oxígeno.

En el presente capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos en el seguimiento del proceso de fermentación acidogénica en el TPA.

7.1 CARACTERIZACIÓN Y SEGUIMIENTO DE LOS PARÁMETROS DEL PREFERMENTADOR

7.1.1. Temperatura y potencial oxido-reducción

La Figura 7.1 muestra la evolución de la temperatura y del ORP durante los tres periodos de operación. La temperatura en el fondo del prefermentador fue controlada entre 18,9 y 20,3°C durante la mayor parte del tiempo de operación. Las oscilaciones de la temperatura fueron más altas durante los Periodos A y B que las oscilaciones normales en el Periodo C – probablemente debido a la ausencia de cubiertas en el prefermentador – pero se mantuvieron dentro de este mismo intervalo de temperaturas. La temperatura se mantuvo mucho más estable durante la mayor parte

del Periodo C, probablemente debido a la influencia de las cubiertas no herméticas. Sin embargo, las condiciones meteorológicas de lluvia y frío registradas a mediados de noviembre de 1999 hicieron que el afluente llegara a la planta con una temperatura muy baja ($5,0^{\circ}\text{C}$). Este hecho junto con la estratificación térmica del prefermentador hicieron que el punto de consigna de la resistencia no fuera suficiente para mantener el control óptimo de la temperatura en el fondo del prefermentador; por lo tanto, los valores de la temperatura durante esos días cayeron por debajo de $18,9^{\circ}\text{C}$.

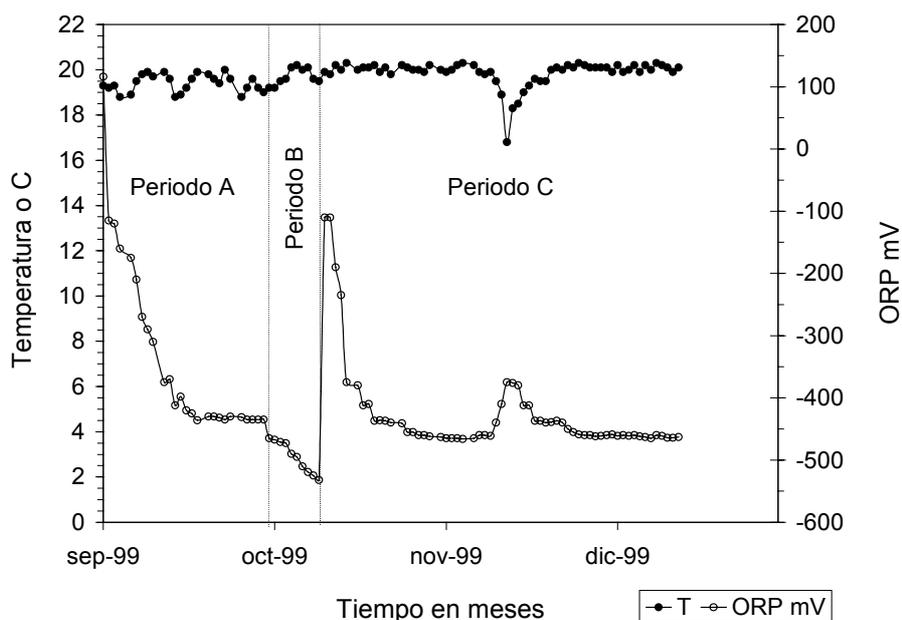


Figura 7.1. Evolución de la temperatura y del ORP durante los tres periodos de operación del prefermentador (TPA).

Los valores del potencial de ORP se mantuvieron muy bajos durante la mayor parte del estudio. En el Periodo A, el ORP decreció gradualmente (en 17 días) de $+116$ a -425 mV y se mantuvo por debajo de este valor el resto del periodo. Por otro lado, el ORP cayó a -465 mV el primer día en que comenzó el Periodo B, y continuó decreciendo hasta -532 mV. La fuerte purga ($1,64$ l de mezcla) realizada antes de comenzar el Periodo C provocó la oxigenación del sistema, haciendo que el potencial ORP subiera hasta -110 mV. A partir de este primer valor obtenido, el potencial ORP volvió a bajar para mantenerse la mayor parte del tiempo por debajo de -460 mV. De la misma manera que la temperatura, el ORP del tercer periodo se vio afectado durante unos días por los episodios de lluvia y frío registradas a mediados del mes de noviembre de 1999, presentando en estas fechas valores próximos a -375 mV.

La fermentación acidogénica tiene lugar por debajo de -300 mV, mientras que la fermentación metanogénica se presenta por debajo de los -550 mV (Randall *et al.*, 1992). Por lo tanto, se puede considerar que los valores de ORP presentados en los Periodos A y C se encuentran en el rango recomendado para la fase acidogénica, mientras que los ORP del Periodo B se acercan a los valores recomendados para el estado metanogénico. Es evidente que el TRS de 10 días adoptado durante el Periodo B fue la causa de las fuertes condiciones reductoras que adquirió el sistema, las cuales inhibieron el estado acidogénico de la fermentación (Pitman *et al.*, 1992).

Por estos motivos, se decidió bajar de nuevo el TRS a 5 días y mejorar su funcionamiento.

7.1.2. MES en el fango primario

La Figura 7.2 muestra la evolución de la MES durante de los tres periodos de operación. Durante el Periodo A, la MES del fango primario osciló entre 8000 y 10700 mg/l, con una media de 9530 mg/l. Durante el Periodo B, la MES fue claramente más alta que en los otros dos periodos de estudio, debido a que la frecuencia de purga de fango fue menor. Sus valores variaron de 10300 a 17200 mg/l, con una media de 13800 mg/l. Finalmente, los valores de MES durante el Periodo C variaron de 7630 a 12100 mg/l, con una media de 10600 mg/l.

La caída en la concentración de MES observada al comienzo del tercer periodo se debió a la purga realizada hacia el final del Periodo B con el fin de eliminar posibles interferencias de bacterias metanogénicas. Las concentraciones promedio mencionadas corresponden a los siguientes porcentajes: 0,95 (Periodo A), 1,38 (Periodo B) y 1,06 (Periodo C). Los tres porcentajes de sólidos totales se encuentran dentro del rango recomendado como óptimo para impedir la inhibición (por sobreproducción de fango) de AGV en un prefermentador. Es decir, 0,5-2,0% según Banister *et al.* (1998).

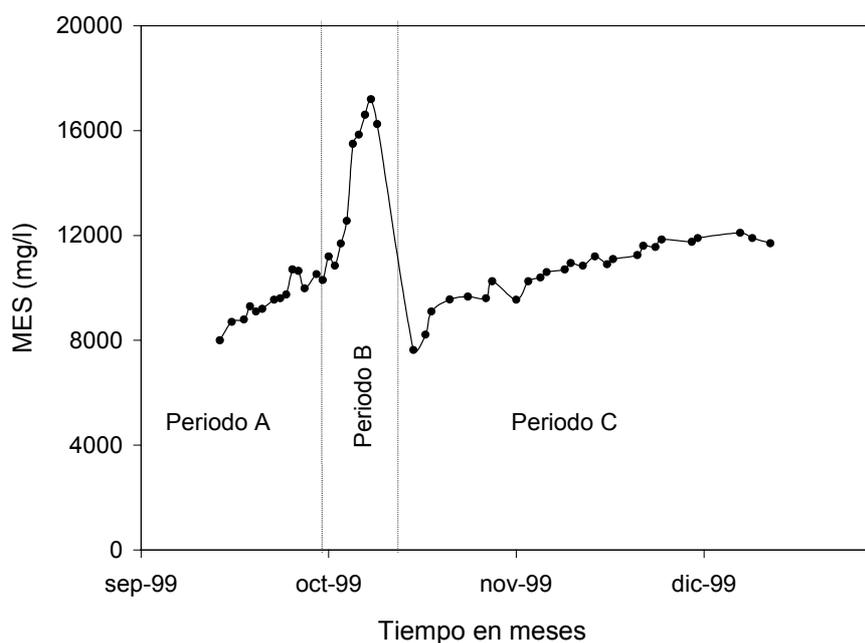


Figura 7.2. Evolución de la MES en el fango primario a lo largo de los tres periodos de operación del prefermentador (TPA).

7.2. CARACTERIZACIÓN Y SEGUIMIENTO DE LOS PARÁMETROS DEL AFLUENTE Y DEL EFLUENTE DEL PREFERMENTADOR

La Tabla 7.1 presenta el número de muestras analizadas, el rango, la media y la desviación típica de los parámetros determinados en el afluente y el efluente del

prefermentador. Estos resultados se presentan por períodos de estudio. El Período A cubre desde el 1 hasta el 30 de septiembre de 1999, el Período B cubre desde el 1 hasta el 10 de octubre de 1999 y el Período C desde el 11 de octubre hasta el 14 de diciembre del mismo año.

Tabla 7.1. Parámetros del afluente y del efluente del prefermentador (TPA).

Periodo A	Afluente				Efluente			
	n	intervalo	media	s	n	intervalo	media	s
MES (mg/l)	20	173-780	305	136	20	69-300	120	52
DQO (mg/l)	13	267-577	399	99	13	190-398	299	60
DQOs (mg/l)	13	96-158	126	22	13	67-158	114	30
AGV (mg AGV-COD/l)	9	1.2-7.6	5.1	2,4	9	5.3 - 28	14	7,8
PO ₄ -P (mg P /l)	13	3.3-9.5	6,3	1,8	13	3.7-9.7	6,7	1,8
NH ₄ -N (mg N /l)	13	22-45	34	6,5	13	23-45	35	6,4
pH	23	7.79-8.52	8,11	0,15	23	7.71-8.40	8,05	0,15
Alcalinidad (mg CO ₃ /l)	17	296-431	377	38	17	302-450	392	39
Periodo B								
MES (mg/l)	10	176-468	280	96	10	77-206	138	45
DQO (mg/l)	10	285-600	424	122	10	191-418	318	80
DQOs (mg/l)	10	88-215	136	42	10	75-189	128	40
AGV (mg AGV-COD/l)	6	1,3-7,6	4,2	3,0	6	0.0-6.1	2,7	2,5
PO ₄ -P (mg P /l)	10	3,9-7,0	5,9	0,9	10	6.4-9.2	8,0	0,7
NH ₄ -N (mg N /l)	10	17-45	32	9,9	10	19-47	35	9,8
pH	10	7,92-8,26	8,13	0,11	10	8.0-8.31	8,17	0,09
Alcalinidad (mg CO ₃ /l)	10	312-410	354	34	10	350-490	413	45
Periodo C								
MES (mg/l)	46	125-500	284	101	46	44-190	114	40
DQO (mg/l)	23	331-749	468	130	23	246-596	355	99
DQOs (mg/l)	23	96-210	135	27	23	80-235	154	37
AGV (mg AGV-COD/l)	9	1,2-13	6,6	4,6	9	17-68	39	17
PO ₄ -P (mg P /l)	23	3,1-9,6	6,2	1,8	23	3,7-10,2	7,1	1,8
NH ₄ -N (mg N /l)	23	14-48	28	9,3	23	14-49	30	9,6
pH	54	7,90-8,25	8,06	0,10	54	7,48-8,12	7,87	0,15
Alcalinidad (mg CO ₃ /l)	23	315-414	370	29	23	345-450	398	31

7.2.1. MES afluente

Durante el Periodo A, los valores de la MES en el afluente del prefermentador oscilaron entre 173 y 780 mg/l, con una media de 305 mg/l. En el Periodo B, los valores de la MES fluctuaron entre 176 y 468 mg/l, con una media de 280 mg/l y en el Periodo C variaron entre 125 y 500 mg/l, con una media de 284 mg/l. Las medias y las varianzas fueron encontradas estadísticamente iguales con un 0,05 de nivel de significación. La media y la desviación típica comunes, estimadas según Montgomery y Runger (1996), fueron 290 y 110 mg/l, respectivamente. El intervalo de confianza para la media es 74 - 506 mg/l, para un nivel de confianza del 95%.

Finalmente, se ha realizado una comparación entre las MES obtenidas en el afluente del prefermentador y el de la primera fase experimental. La pruebas F y t no indican diferencias estadísticas significativas ni en la media ni en la varianza de ambas muestras. En conclusión, puede considerarse que las MES del afluente durante los tres periodos de funcionamiento del prefermentador fueron prácticamente iguales. Más aún, esta igualdad puede ser extendida a los valores de la MES obtenidos en el afluente de la primera fase experimental (sin prefermentador).

7.2.2. MES del efluente

Durante el Periodo A, los valores de la MES en el efluente del prefermentador variaron entre 69 y 300 mg/l, con una media de 120 mg/l. Los valores de MES en el Periodo B fluctuaron entre 77 y 206 mg/l, con una media de 138 mg/l y en el Periodo C variaron entre 44 y 190 mg/l, con una media de 114 mg/l. Los rendimientos de eliminación de MES obtenidos en el Periodo A oscilaron entre 56 y 64%, con una media del 60%. En el Periodo B variaron entre 35 y 60%, con una media del 50% y en el Periodo C fluctuaron entre 40 y 66%, media 60%.

No se puede afirmar que exista una diferencia estadística significativa entre las medias y las varianzas de la MES en el efluente del prefermentador de los tres periodos estudiados. Sin embargo, el rendimiento medio de eliminación de MES fue menor cuando se estudió el proceso de fermentación primaria con un TRS de 10 días. El rendimiento medio de eliminación de MES obtenido con un TRS de 5 días (60%) está dentro del intervalo de valores típicos de un sedimentador primario (50-70%, según Metcalf & Eddy, 1991). Este rendimiento se mantuvo sin grandes oscilaciones durante los dos periodos estudiados con este TRS. Sin embargo, los rendimientos de eliminación obtenidos durante el Período B (TRS de 10 días) mostraron mayor variabilidad y presentaron una disminución continua, obteniéndose un rendimiento medio de eliminación del 50% en este periodo. En conclusión, un valor del TRS de 10 d parece provocar una disminución del rendimiento de eliminación de MES en el prefermentador. Esto puede deberse a una disminución de la decantabilidad de los sólidos favorecida por el incremento de la concentración de MES dentro del sistema. Las altas concentraciones de sólidos primarios en el fango de un prefermentador han sido documentadas como una causa de la baja decantabilidad de los sólidos durante la fermentación acidogénica (Skalsky y Daigger, 1995).

7.2.3. DQO del afluente

Durante el Periodo A, los valores de la DQO en el afluente del prefermentador oscilaron entre 267 y 577 mg/l, con una media de 399 mg/l. En el Periodo B, los valores fluctuaron entre 285 y 600 mg/l, con una media de 424 mg/l y en el Periodo C variaron entre 331 y 749 mg/l, con una media de 468 mg/l. La prueba F para un 0,05

de significación, indica que las varianzas de los valores de DQO en los tres periodos son iguales. De la misma manera, se puede afirmar que los valores medios de la DQO afluente son estadísticamente iguales en los tres periodos estudiados. Por lo anterior, y de la misma manera que para el caso de la MES, es posible estimar una media y una desviación típica comunes para los tres periodos estudiados. Los valores de DQO afluente para los tres periodos estudiados tuvieron una media común de 439 mg/l y una desviación típica común de 120 mg/l. El intervalo de confianza para la media es 202-675 mg/l para un nivel de confianza del 95%.

Considerando todos los valores de la DQO del afluente del prefermentador como miembros de una misma población, es posible compararlos con los valores de DQO obtenidos en el afluente de la primera fase experimental. Las pruebas F y t realizadas no establecen diferencia estadística ni en la media poblacional ni en la varianza. En conclusión, los valores medios y las varianzas de la DQO del afluente fueron estadísticamente iguales durante los tres periodos de funcionamiento del prefermentador. Más aún, esta igualdad es extensible a los valores de DQO obtenidos en el afluente de la primera fase experimental.

7.2.4. DQO del efluente

Durante el Periodo A, los valores de la DQO en el efluente del prefermentador variaron entre 190 y 398 mg/l, con una media de 299 mg/l. Los valores de DQO en el Periodo B fluctuaron entre 191 y 418 mg/l, con una media de 318 mg/l y en el Periodo C variaron entre 246 y 596 mg/l, con una media de 355 mg/l. Asimismo, los rendimientos de eliminación de la DQO obtenidos en el Periodo A oscilaron entre 7 y 35 %, con una media del 24%. En el Periodo B variaron entre 10 y 33%, con una media del 24% y en el Periodo C fluctuaron entre 11 y 37%, con una media del 24%.

No se puede afirmar que exista una diferencia estadísticamente significativa entre las 3 medias poblacionales de la DQO efluente. Los cv para los Periodos A, B y C fueron 0,20, 0,25 y 0,28 respectivamente. Como se puede observar, los valores de la DQO efluente durante el Periodo C fueron los que presentaron la mayor variabilidad respecto a su media. La eliminación de DQO fue del 24% en los tres periodos estudiados. Este valor está de acuerdo con el obtenido en Gonçalves *et al.*, (1994).

7.2.5. DQOs en el afluente

Durante el Periodo A, los valores de la DQOs afluente al prefermentador oscilaron entre 96 y 158 mg/l, con una media de 126 mg/l. Los valores de la DQOs en el Periodo B fluctuaron entre 88 y 215 mg/l, con una media de 136 mg/l y en el Periodo C variaron entre 96 y 210 mg/l, con una media de 135 mg/l. La mayor desviación típica (42 mg/l) se obtuvo en el Periodo B, mientras que las desviaciones típicas de la DQOs en los Periodos A y C fueron similares (22 y 27 mg/l). A pesar de esto, es posible afirmar que las medias poblacionales de los valores de DQOs afluente son estadísticamente iguales en los tres periodos, con un nivel de significación del 5 %. La media común de los tres periodos estudiados es de 133 mg/l. Asimismo, la comparación estadística entre la DQOs del afluente al prefermentador y la DQOs del afluente estudiado durante la primera fase experimental, muestra que ambos afluentes tienen valores medios de la DQOs también iguales.

Utilizando los valores medios comunes se puede decir que la DQOs afluente del prefermentador representó en promedio un 31% de la DQO afluente. Este valor es exactamente igual al obtenido durante la caracterización del ARU en la primera fase

experimental. En conclusión, la DQOs afluente al prefermentador fue similar durante los tres periodos estudiados aunque su variabilidad en el Periodo B resultó más evidente. Asimismo, la DQOs del afluente resultó también estadísticamente igual a la DQOs de la primera fase experimental.

7.2.6. DQOs efluente y solubilización de la DQO

Durante el Periodo A, los valores de la DQOs del efluente del prefermentador variaron entre 67 y 158 mg/l, con una media de 114 mg/l. Los valores en el Periodo B fluctuaron entre 75 y 189 mg/l, con una media de 128 mg/l y en el Periodo C variaron entre 80 y 235 mg/l, con una media de 154 mg/l.

Como se observa, el valor medio de la DQOs se incrementó gradualmente a través de los Periodos A, B y C. Los cv obtenidos fueron 0,26 para el Periodo A, 0,31 para el Periodo B y 0,27 para el Periodo C. De esta manera, el Periodo B fue el que mayor variabilidad mostró respecto a su media. Las proporciones obtenidas entre la DQOs y la DQO efluentes fueron 0,38, 0,40 y 0,42 para los Periodos A, B y C, respectivamente. Estos valores son superiores a los obtenidos en el afluente del prefermentador (0,31), debido a la eliminación parcial de la MES afluente y, como se muestra a continuación, a la fuerte solubilización de la DQO (Periodo C).

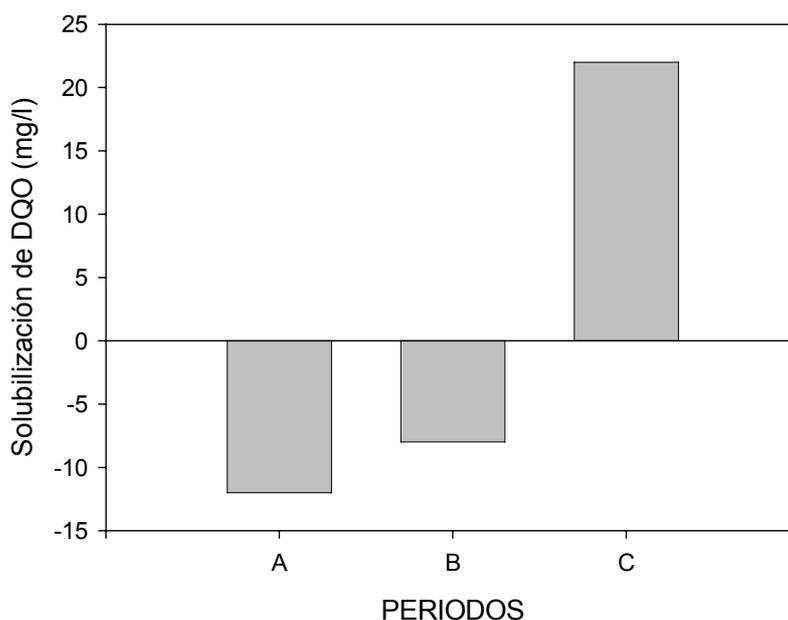


Figura 7.3. Consumo y producción de DQOs en los Periodos A, B y C del estudio de fermentación en un TPA.

La Figura 7.3 presenta la producción de DQOs durante los Periodos A, B y C. No se observó producción de DQOs durante los Periodos A y B. Más aun, la DQOs de sus efluentes sufrió en promedio un ligero decremento (12 mg/l en el Periodo A y 8 mg/l en el Periodo B).

Estos resultados son comparables con el estudio de Christensson (1997), en el que un muestreo de 4 semanas del afluente y del efluente de un prefermentador a escala real no permitió observar la solubilización de la DQO.

La solubilización de DQO en el Periodo C fue observada en 19 de las 23 muestras analizadas. Una de las muestras que no presentó solubilización se encuentra al inicio del estudio del Periodo C. Las demás muestras pertenecen a los días de mitad de noviembre, cuando las condiciones de frío y lluvia inhibieron la fermentación en el fango decantado del TPA. Para las 21 muestras no afectadas por estas condiciones climáticas adversas, el incremento de DQOs promedio en el efluente fue de 22 mg/l (16-28 mg/l, para un nivel de confianza del 95%). Este valor es menor que el valor obtenido por Gonçalves *et al.* (1994), quienes encontraron una producción máxima de DQOs de 30 mg/l, con TRH de 2,1 a 2,8 h en estudios en discontinuo. Por otro lado, Christensson (1997) encontró una solubilización de 10 mg/l cuando comparó los efluentes de dos decantadores primarios, uno de ellos operado como prefermentador.

El grado de solubilización (GDS) de la DQO puede también expresarse como la relación entre la producción de DQOs y la MESV afluente (mg DQOs / g MESV) o como la relación entre la producción de DQOs y la DQOp del afluente (mg DQOs / g DQOp). La Tabla 7.2 presenta el GDS obtenido para la DQO del Periodo C.

Tabla 7.2 Grado de solubilización de la DQO conseguido en el Periodo C mediante un TPA.

GDS	Producción de DQOs
Incremento DQOs en mg/l	22
mg DQOs/g MESV afluente	91
mg DQOs/g DQO particulada afluente	66

La solubilización alcanzó 66 mg DQOs/g DQOp afluente en el Periodo C. Este valor es similar al de 60 mg/g indicado por Gonçalves *et al.* (1994). Los datos de Christensson (1997) permiten deducir un GDS de 32 mg/g. Grados de solubilización más altos han sido indicados por otros investigadores en estudios donde se utilizan fermentadores de mezcla completa o con pre-precipitación de sólidos (Tabla 7.3).

Tabla 7.3. Resultados obtenidos en estudios de fermentación ácida de fango primario (adaptado de Gonçalves *et al.*, 1994).

Solubilización mg DQOs / g DQOp	Fermentación mg AGV-DQO / g DQO	Condiciones de operación	Notas	Referencias
-	83-99	$16 \leq T \leq 21$ °C.	MC (a)	Rabinowitz (1986)
-	90	-	MC	Tseyen (1986)
60-100	-	37-57 g MESV/l	4 fermentadores en serie	Wentzel <i>et al.</i> (1988)
80-120 120-150	-	TRS = 1d, 30 °C TRS = 3 d, 30 °C	Proceso Hypro y pre-precipitación	Jorgensen, 1990
120-130 140-160	-	TRS = 1d, 30 °C TRS = 3 d, 30 °C	MC, lodo primario	Jorgensen, 1990
130-170	-	$18 \leq TRS \leq 72$ h.	MC	Eastman, 1977
60	117	20 ± 1 °C, TRH = 2,3 hrs.	Proceso UASB (b)	Gonçalves, 1994

a) Mezcla completa.

b) Reactor anaeróbico de flujo ascendente con lecho de fango.

7.2.7. AGV afluentes

Durante el Periodo A, la concentración de AGV en el prefermentador osciló entre 1,2 y 7,6 mg AGV-DQO/l, con una media de 5,1 mg AGV-DQO/l. La concentración de AGV en el Periodo B fluctuó entre 1,3 y 7,6 mg AGV-DQO/l, con una media de 4,2 mg AGV-DQO/l y en el Periodo C los AGV variaron entre 1,2 y 13 mg AGV-DQO/l, con una media de 6,6 mg AGV-DQO/l. Las desviaciones típicas de los AGV en cada periodo fueron 2,4 mg AGV-DQO/l para el Periodo A, 3,0 mg AGV-DQO/l para el Periodo B y 4,6 mg AGV-DQO/l para el Periodo C.

La prueba F de comparación de varianzas no permite detectar la existencia de una diferencia significativa entre las 3 varianzas. Los cv obtenidos fueron 0,5 para el Periodo A y 0,7 para los Periodos B y C. Estos valores del cv indican que las concentraciones de AGV han variado considerablemente a lo largo del estudio. Como se explicó en el apartado 6.1.1, la concentración de AGV depende considerablemente de la concentración de DQO y de las condiciones ambientales del agua residual desde su entrada al sistema de alcantarillado hasta su llegada al laboratorio. La gran variabilidad de la concentración de DQO como del grado de fermentación de la DQOFB explica la variabilidad mostrada por los AGV a lo largo de este estudio. El cv de la DQOFB alcanzó un valor de 0,5 en el afluente de la primera fase experimental, muy cercano a los obtenidos por los coeficientes de variación de los AGV.

Tabla 7.4. Concentraciones de AGV en ARU cruda indicadas en diferentes referencias.

Referencias	Concentración AGV (mg AGV-DQO/l)
Narkis et al. (1980)	91,6 ^a and 33,2 ^b
Rabinowitz et al. (1987)	9,1
Gonçalves et al. (1994)	41,3
Abu-ghararah and Randall (1991)	0,0
Haas and Adam (1995)	36,6
Lie and Welander (1997)	45,0
Christensson (1997)	22,3
Münch and Greenfield (1998)	37,5

a) Valor medio del agua residual en la zona residencial de Neveh Shaanan.

b) Valor medio del afluente en la planta de tratamiento municipal de Haifa.

Las pruebas t correspondientes permiten aceptar la hipótesis de igualdad entre las medias poblacionales de los periodos estudiados. Más aún, es posible afirmar que las medias de los AGV obtenidos en el afluente de la primera fase experimental y el afluente del prefermentador son estadísticamente iguales. La media común de AGV afluentes en los tres periodos fue 5,6 mg AGV-DQO/l.

Las concentraciones de AGV en el afluente del prefermentador son mucho menores que las indicadas en la mayoría de los trabajos resumidos en la Tabla 7.4. Los únicos valores similares son los indicados por Rabinowitz *et al.* (1987) y Abu-ghararah y Randall (1991), donde la concentración de AGV en el afluente representó un $1,2 \pm 0,7$ % de la DQO afluente al prefermentador. Este valor es muy parecido al obtenido en el afluente de la primera fase y mucho menor que el indicado para un ARU cruda (del 5-10%) según Henze *et al.* (1995b).

7.2.8. AGV efluentes y producción de AGV

Durante el Periodo A, los valores de AGV en el efluente del prefermentador variaron entre 5,3 y 28 mg AGV-DQO/l, con una media de 14 mg AGV-DQO/l. Los valores de AGV en el Periodo B fluctuaron entre 0,0 y 6,1 mg AGV-DQO/l, con una media de 2,7 mg AGV-DQO/l y en el Periodo C variaron entre 17 y 68 mg AGV-DQO/l, con una media de 39 mg AGV-DQO/l. Las desviaciones típicas de los AGV en cada periodo fueron 7,8 mg AGV-DQO/l para el Periodo A, 2,5 mg AGV-DQO/l para el Periodo B y 17 mg AGV-DQO/l para el Periodo C.

Las pruebas F de comparación entre varianzas, permiten afirmar que existe una diferencia significativa entre las varianzas de los 3 periodos. Los cv obtenidos durante los 3 periodos fueron 0,6 para el Periodo A, 0,9 para el Periodo B y 0,4 para el Periodo C. Como puede apreciarse la variabilidad de los efluentes fue mayor en el Periodo B y menor en el C.

Las pruebas t correspondientes permiten rechazar la hipótesis de igualdad entre medias en los tres casos. Es decir, las medias poblacionales de los tres tipos de

efluentes son significativamente diferentes, con el 0,05 de nivel de significación. Cabe destacar que el Periodo C fue el que mayor incremento de AGV mostró en su efluente, seguido del Periodo A. La concentración media de AGV en el efluente del Periodo C fue 25 mg AGV-DQO/l superior a la del Periodo A (10-39 mg AGV-DQO/l más alto con un 95% de confianza) y 36 mg AGV-DQO/l más alta que la del Periodo B (23-49 mg AGV-DQO/l superior con un 95% de confianza).

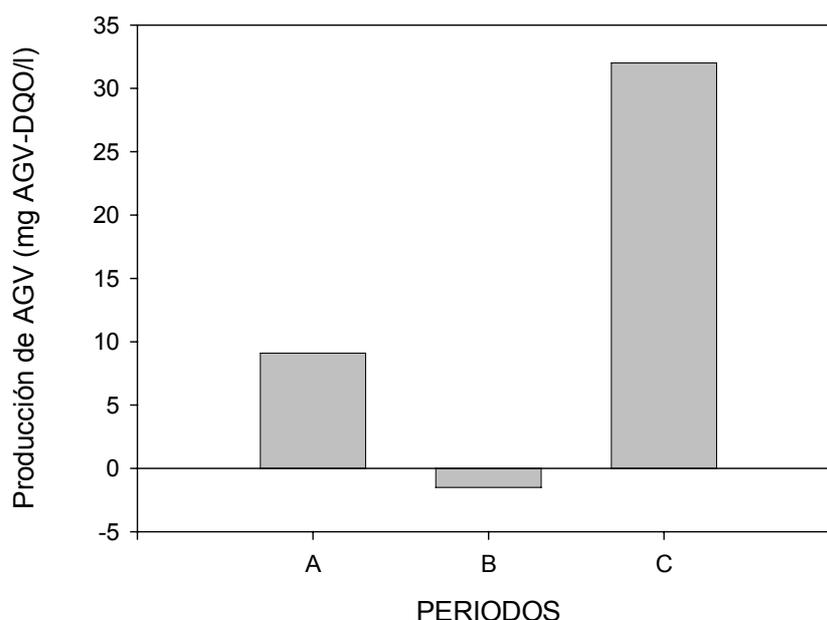


Figura 7.4. Producción media de AGV en cada uno de los 3 periodos estudiados en la prefermentación en un TPA.

Los datos anteriores indican que en los Periodos A y C (TRS de 5 días) registraron producción de AGV, mientras que el Periodo B (TRS de 10 días) no mostró incremento alguno. La Figura 7.4 presenta las producciones medias de AGV en los tres periodos estudiados.

El incremento observado en el Periodo A fue de 9,1 mg AGV-DQO/l. Esta débil producción de AGV tuvo lugar sin producción de DQOs. Christensson (1997) observó una producción de 17 mg AGV-DQO/l, sin solubilización de DQO en 4 semanas de muestreo, lo que fue interpretado como una producción de AGV por utilización de la DQOs original (en especial DQOFB) en lugar de la DQO particulada. Esta misma interpretación puede hacerse en el presente estudio, ya que la hidrólisis de sólidos no fue significativa en el Periodo A.

La generación media de AGV durante el Periodo C fue de 32 mg AGV-DQO/l. Sólo una de las muestras analizadas no registró solubilización de la DQO particulada. Esta muestra también pertenecía al episodio con malas condiciones meteorológicas. Analizando únicamente las muestras en donde se observó producción de DQOs, el incremento de AGV presentó un promedio de 34 mg AGV-DQO/l (2 a 66 mg AGV-DQO/l, para un nivel de confianza del 95%).

La Figura 7.5 muestra la relación entre la producción de AGV y la producción de DQOs registradas en el Periodo C. Se observa una clara correlación entre ambas variables. De acuerdo con este gráfico cada unidad de incremento en la DQOs resultó en 1,4 mg AGV-DQO/l.

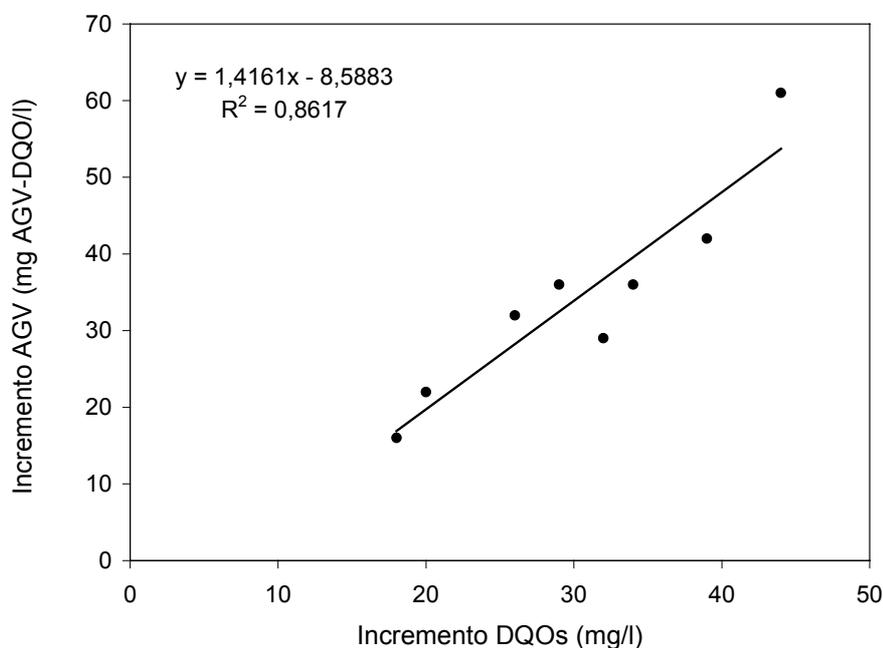


Figura 7.5. Relación entre las producciones de AGV y DQOs en el estudio de prefermentación en un TPA.

La ecuación de la recta y el coeficiente de determinación son muy parecidos a los obtenidos por Gonçalves *et al.* (1994). La ordenada en el origen (-8,6 mg/l) no es significativamente diferente de cero para un nivel de significación de 0,05. Según Eastman y Ferguson (1981), un 90% de la DQO que se solubiliza produce AGV por fermentación. Aplicando este porcentaje, se puede estimar que la DQO solubilizada durante el presente estudio produjo 20 mg AGV-DQO/l. La diferencia entre los 34 mg AGV-DQO/l realmente obtenidos y este valor estimado resultó ser 14 mg AGV-DQO/l, que corresponden a los AGV generados a partir de la DQOFB que se encontraba originalmente en el afluente.

Por lo tanto, el incremento de AGV observado en este estudio se produce tanto por la hidrólisis y fermentación de los sólidos decantados, como por la fermentación de una parte de la DQOFB original.

Otra manera de expresar el grado de fermentación acidogénica (GFA) es mediante la relación mg AGV-DQO producida / g MESV afluente o mediante la relación mg AGV-DQO producida / g DQO afluente. La Tabla 7.5 presenta los resultados de la valoración del GFA conseguido en el Periodo C. Asimismo, la Figura 7.6 presenta diferentes producciones de AGV en función del TRS indicadas en Skalsky y Daigger (1995).

Tabla 7.5. Grado de fermentación acidogénica conseguido en el efluente del Periodo C mediante un TPA.

Relación	GFA (a)
Incremento de mg AGV-DQO/l	34
mg AGV-DQO/g MESV afluente	142
mg AGV-DQO/g DQO afluente	77

a) grado de fermentación acidogénica.

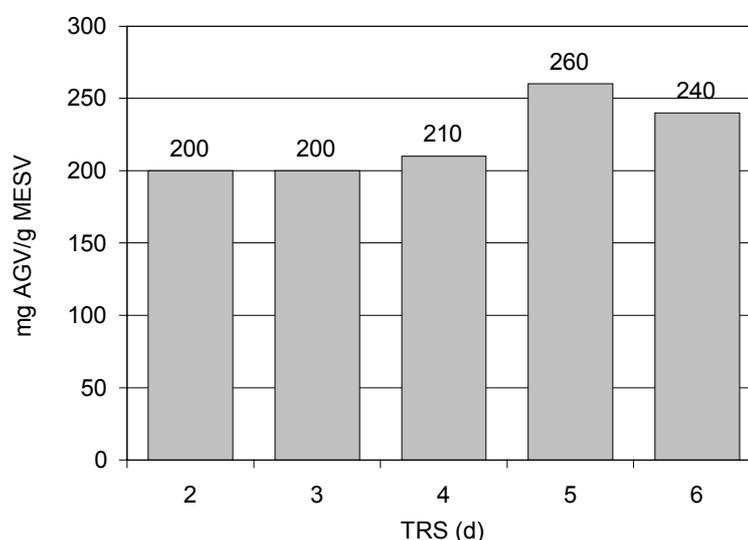


Figura 7.6 Efecto del TRS en la producción de AGV (adaptado de Skalsky y Daigger (1995)).

La producción de AGV por unidad de MESV afluente observada durante el Periodo C fue 142 mg DQO/g MESV, valor muy inferior en comparación con el obtenido por Skalsky y Daigger (1995) para un TRS de 5 días (244 mg AGV-DQO /g MESV). Cabe destacar que estos investigadores trabajaron en condiciones de mezcla completa, y que el fango primario se obtenía por alimento externo y no por decantación primaria de los sólidos del afluente.

La masa de AGV conseguida por masa de DQO en el afluente del Periodo C, fue 77 mg AGV-DQO/g DQO, valor muy inferior al obtenido por Gonçalves *et al.* (1994) (117 mg AGV-DQO/g DQO) con un TRH de 2,3 h. Sin embargo, es comparable a las producciones de AGV indicadas por Rabinowitz (1986) y T'Seyen (1986), ver Tabla 7.3, y superior al obtenido por Christensson (1997), 32 mg AGV-DQO/g DQO.

La prueba del potencial de AGV fue llevada a cabo también en el afluente y el efluente del prefermentador durante el Periodo C (Figura 7.7). Mientras que el potencial de AGV en el afluente del Periodo C fue de 93 mg AGV-DQO/l, en el efluente del mismo

Periodo fue de sólo 67 mg AGV-DQO/l. La relación entre el potencial de AGV y el fosfato soluble (mg AGV-DQO/mg P-PO₄) también fue menor en el efluente del prefermentador. Mientras que en el afluente esta relación tuvo un valor de 15, en el efluente fue de sólo 9,3.

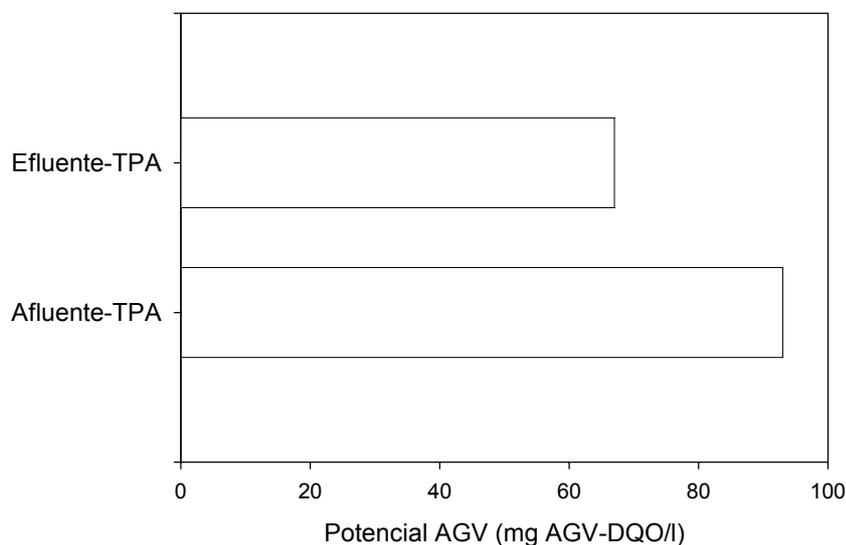


Figura 7.7. Potencial de AGV en el afluente y efluente del TPA (Periodo C).

Estos resultados muestran un decremento en el potencial de AGV al paso del ARU por el fermentador, debido a que el 60 % de sólidos fueron atrapados en el prefermentador y no contribuyeron al potencial de AGV del efluente. Además estos sólidos fueron sólo parcialmente fermentados en el TPA, como se puede deducir de los datos de solubilización y producción de AGV. Christensson (1997) también obtuvo un decremento del potencial de AGV en su proceso de prefermentación.

Por otro lado, también se observa que la producción de AGV en el prefermentador no se aproximó al potencial de AGV del afluente. La producción media de AGV en el prefermentador durante el Periodo C fue tan solo 34 mg AGV-DQO/l, lo que representa un 31 % del potencial de AGV del afluente. Christensson (1997) obtuvo resultados similares en el efluente de su prefermentador, con una producción de AGV correspondiente al 51 % del potencial de AGV del afluente.

El comportamiento antes descrito pudo deberse a que la mayor parte de la DQOFB del ARU y una fracción de sus sólidos no están en contacto con el fango que se está fermentando en los TPA. Éste no es el caso de los UASB o de los reactores de mezcla completa, donde toda el ARU se mezcla o pasa a través del fango que fermenta. La Figura 7.8 muestra una comparación entre la configuración UASB utilizada por Gonçalves *et al.* (1994) y la utilizada en la presente tesis. En una configuración UASB, el ARU entra por debajo del lecho de fango y lo recorre en su totalidad. Como ese lecho es de un grosor considerable, la DQOFB del ARU tiene tiempo de fermentar mientras atraviesa todo el grosor del fango, con lo que la elutriación de los AGV puede ser más eficiente.

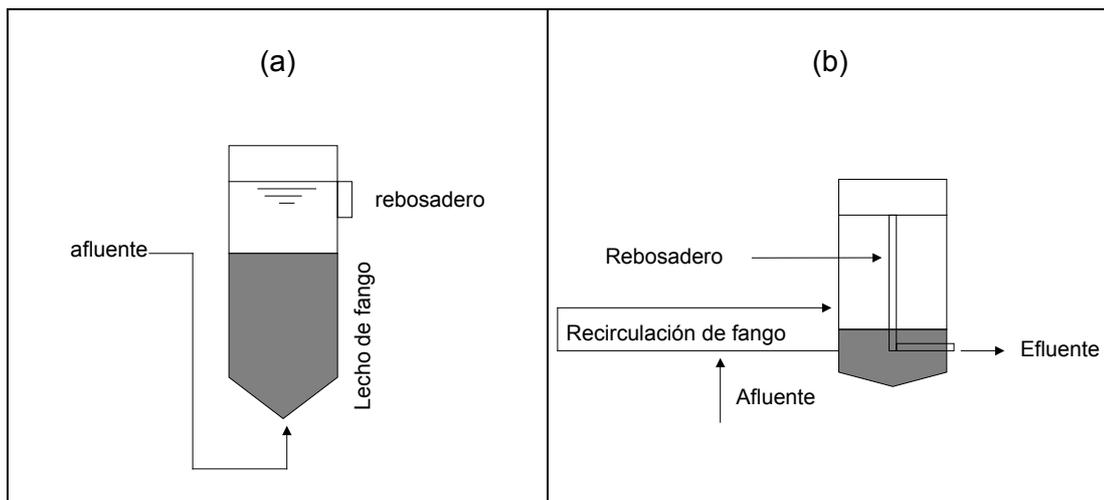


Figura 7.8. Representación gráfica de dos procesos de fermentación primaria: a) proceso UASB utilizado por Gonçalves *et al.* (1994) y b) proceso utilizado en el presente estudio.

Por otro lado, la relación entre la concentración de AGV y el fosfato soluble del efluente del prefermentador fue 5,5 mg AGV-DQO/mg P-PO₄, mientras que en el afluente fue de 0,9 mg AGV-DQO/ mg P-PO₄. Se observa claramente que aunque esta relación mejoró, aún permaneció muy por debajo del valor recomendado para la EBIF (20 mg/mg).

En conclusión, durante el Periodo A, caracterizado por un TRS de 5 días y un sistema abierto a la atmósfera, se observó producción de AGV sin solubilización de DQO, e incluso un decremento de la DQOs en el efluente del prefermentador. Esto puede interpretarse como una formación de AGV a partir únicamente de la DQOs original del agua residual. Por lo tanto, las condiciones anaeróbicas del Periodo A no fueron suficientes para permitir la hidrólisis de los sólidos de la DQOLB. En el Periodo B, el TRS de 10 días hizo probablemente que las condiciones anaeróbicas del sistema se extremaran y se llegara a alcanzar un ORP en el intervalo de la metanogénesis. Aunque la metanogénesis no ha sido confirmada experimentalmente, la concurrencia de metanogénesis y fermentación explicaría el comportamiento del Periodo B, donde tanto la producción de DQOs como de AGV fueron negativas. En el Periodo C, con TRS de 5 días, las tapas no herméticas del sistema favorecieron la regulación de la temperatura y del ORP, consiguiéndose así la hidrólisis y fermentación acidogénica de los sólidos. En este periodo se registró una notable producción de AGV. El TRS de 5 días dio mejores resultados cuando el control de los parámetros fue mejorado (temperatura y ORP).

Skalsky y Daigger (1995) encontraron que un TRS de 5 días era óptimo para la producción de AGV en un prefermentador. Finalmente, aunque la solubilización y la fermentación de los sólidos fueron notables en el Periodo C, la relación AGV a fósforo soluble estuvo lejos de alcanzar el valor recomendado para la EBIF (20 mg/mg). Además el potencial de AGV fue menor en el efluente que en el afluente del TPA.

7.2.9. Solubilización de P

Durante el Periodo A, la concentración de PRS en el afluente del prefermentador osciló entre 3,3 y 9,5 mg P/l, con una media de 6,3 mg P/l. En el Periodo B, la concentración de PRS fluctuó entre 3,9 y 7,0 mg P/l, con una media de 5,9 mg P/l y en el Periodo C el PRS varió entre 3,1 y 9,6 mg P/l, con una media de 6,2 mg P/l. Las desviaciones típicas de los valores en cada periodo fueron 1,8 mg P/l para el Periodo A, 0,9 mg P/l para el Periodo B y 1,8 mg P/l para el Periodo C. Como puede observarse los Periodos A y C fueron los que más variabilidad mostraron en el estudio.

Las pruebas F y t, no permiten afirmar la existencia de una diferencia significativa ni entre las medias ni entre las varianzas de cada periodo. La media común del PRS en el afluente de los tres periodos fue 6,17 mg P/l. Asimismo, es posible afirmar que el PRS en el afluente del prefermentador y el PRS del afluente en la primera fase experimental fueron iguales.

Por otra parte, el PRS del efluente del prefermentador registró un aumento durante los tres periodos estudiados. Los valores del PRS del efluente en el Periodo A variaron entre 3,7 y 9,7 mg P/l, con una media de 6,7 mg P/l. En el Periodo B, los valores del PRS fluctuaron entre 7,4 y 9,2 mg P/l, con una media de 8,0 mg P/l y en el Periodo C variaron entre 3,7 y 10,2 mg P/l, con una media de 7,10 mg P/l. Las desviaciones típicas del PRS en cada periodo fueron 1,8 mg P/l para el Periodo A, 0,7 mg P/l para el Periodo B y 1,8 mg P/l para el Periodo C. Los coeficientes de variación obtenidos fueron 0,2, 0,09 y 0,3 para los Periodos A, B y C respectivamente. Como se puede apreciar, la variabilidad entre los efluentes fue mucho menor en el Periodo B, mientras que en los otros dos periodos fue semejante.

La Tabla 7.6 recoge los resultados de la solubilización del PRS obtenidos durante cada periodo. Los incrementos de P fueron 0,4, 2,0 y 0,9 mg P/l para los Periodos A, B y C respectivamente. Asimismo, la Figura 7.9 ilustra mediante diagramas de caja los tres incrementos de PRS registrados. Se observa claramente que la solubilización del P en el Periodo B fue la más alta. La más baja solubilización fue observada durante el Periodo A.

La liberación de ortofosfato también puede ser estudiada en términos de la masa de PRS liberada por masa de DQO afluente, y de la masa de ortofosfato liberada por masa de AGV-DQO producida. Las solubilizaciones medias obtenidas fueron 0,9, 0,5 y 2,1 mg P/g DQO afluente durante los Periodos A, B y C, respectivamente. Dado que las medias poblacionales de la DQO en los tres periodos fueron iguales, el cálculo de la solubilización de P por masa de DQO inicial se efectuó tomando el valor de la media común del afluente (439 mg/l). Las concentraciones medias de MES en cada periodo fueron 0,95%, 1,38% y 1,06%. Como se puede observar en la Tabla 7.6, la mayor liberación de PRS por masa de DQO inicial se obtuvo en el Periodo B, el cual a su vez registró la mayor concentración de MES en el fango primario, así como el mayor TRS.

Las solubilizaciones de P respecto a la producción de AGV fueron 44 y 26 para los Periodos A y C, respectivamente. Dado que no se observó producción de AGV en el Periodo B, la solubilización de P no puede ser calculada en este caso. Como puede apreciarse en la Tabla 7.6, el valor obtenido en el Periodo A fue mayor que el del Periodo C, a pesar de que el incremento de P observado en el Periodo A fue inferior al presentado en los otros dos periodos.

Tabla 7.6. Solubilización de P observada en el proceso de prefermentación.

Periodo	% MES	Incrementos de P-PO ₄ (mg P-PO ₄ /l)	mg P-PO ₄ / (g DQO afluente)	mg P-PO ₄ / (g AGV-DQO)
A	0,95	0,4	0,9	44
B	1,38	2,0	5,0	-
C	1,06	0,9	2,1	26

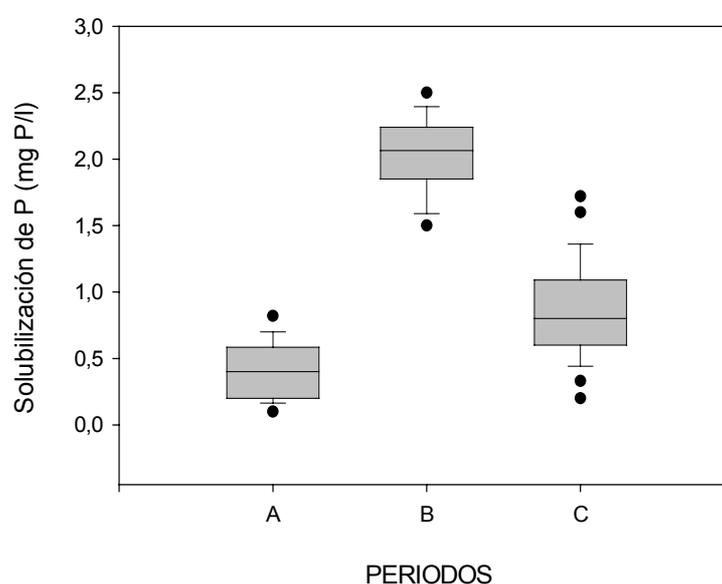


Figura 7.9. Diagramas de caja para la solubilización de P en los Periodos A, B y C del estudio de prefermentación en TPA.

Esta discordancia se debe a que la producción de AGV en el Periodo A fue mínima (probablemente por la débil fermentación de la DQOFB y por la nula hidrólisis de la DQOLB) y, por lo tanto, el denominador del cociente resultante de la relación (masa de P/ masa de AGV-DQO producida) es pequeño.

La Tabla 7.7 permite realizar una valoración comparativa de estos resultados a partir de los resultados obtenidos por Banister *et al.* (1998) sobre la solubilización de fósforo en fangos primarios fermentados con un TRS de 6 días.

Banister *et al.* (1998) realizaron varias pruebas en discontinuo para evaluar la fermentación de 4 tipos de fango primario obtenidos en 4 plantas con eliminación de nutrientes en Johannesburg (Sudáfrica): NRAW, GRAW, ORAW y BRAW. De manera general, obtuvieron una solubilización de fósforo en el fango primario del orden de 2,0 a 8,0 mg P / mg DQO (inicial), con una media de 3,5 mg P / mg DQO y de 19 a 56 mg P / mg AGV-DQO, con una media de 34 mg P / mg AGV-DQO. Estos valores los obtuvieron con fangos primarios que contenían de 0,47 a 5,6 % de MES. En otro

trabajo similar, Skalsky y Daigger (1995) obtuvieron un promedio ligeramente más alto, 47 mg P liberado / mg AGV-DQO con 14-23° C y de 0,43 a 2,6% de MES. Asimismo, las relaciones derivadas de Christensson (1997) son 0,96 mg P/ g DQO afluente y 29 mg P/ g AGV-DQO. Para Banister, las mayores liberaciones de P ocurren con las concentraciones más altas de MES en el fango primario, lo que coincide con lo indicado por Pitman *et al.* (1992).

Tabla 7.7. Solubilizaciones de P obtenidas por Banister *et al.* (1998).

Nombre del experimento	% MES	mg P / g DQOaf	mg P / g AGV-DQO
NRAW ⁽¹⁾	0,72	4,0	30
	0,98	4,0	40
	1,2	2,0	20
	1,7	3,0	30
ORAW ⁽²⁾	3,8	2,0	30
	5,4	4,0	40
	1,1	2,0	50
GRAW ⁽³⁾	0,72	3,0	30
	0,47	8,0	60
BRAW ⁽⁴⁾	0,49	3,0	30

(1-4) Denominación de los experimentos en discontinuo realizados por Banister *et al.* (1998).

Intervalo de temperaturas: 18-20 ° C.

Las solubilizaciones de fósforo por masa de DQO afluente obtenidas en el Periodo B son comparables con las presentadas por Banister *et al.* (1998) para concentraciones similares de MES. Sin embargo, las solubilizaciones P durante los Periodos A y B son muy inferiores a las obtenidas por este mismo autor. Por lo que respecta a las solubilizaciones de fósforo por masa de AGV-DQO producida, los resultados obtenidos en la presente tesis son comparables a los presentados por Banister *et al.* (1998) y por Skalsky y Daigger (1995), para concentraciones de MES similares.

De acuerdo con Christensson (1997), la liberación de P-PO₄ está causada por la reducción de fosfato férrico (insoluble) a fosfato ferroso, que es soluble. Esta reducción es favorecida por los bajos ORP conseguidos en los ambientes anaeróbicos de los prefermentadores. Por lo tanto, el incremento de fósforo en el efluente de un prefermentador es el resultado de las condiciones anaeróbicas a las que es sometido el fango primario, al margen de que exista o no producción de AGV. El grado de solubilización final del P será también función de la composición sólida del agua residual, del TRS, de la concentración de MES, de la temperatura del sistema y de los efectos de mezcla entre el fango y el ARU (Skalsky y Daigger, 1995; Jardin y Pöpel, 1996; Banister *et al.*, 1998).

En conclusión, las solubilizaciones más elevadas de P observadas en el presente trabajo se registraron a mayor TRS y concentración de MES, así como con los valores más bajos del ORP (Periodo B).

El incremento de P en el efluente de un prefermentador primario puede ejercer un impacto negativo en la carga de nutrientes de las plantas reales, haciendo que la relación AGV/P disminuya. Por lo tanto, el grado de solubilización del P determina si el efluente de un prefermentador requerirá un pretratamiento antes de ser alimentado a las plantas con eliminación de nutrientes (Jardin y Pöpel, 1996; Banister y Pretorius,

1998). Otros autores, sin embargo, consideran que el incremento de la carga de fósforo no causa necesariamente un incremento en los AGV necesarios para un proceso con EBIF. Según Christensson *et al.* (1997), el fósforo solubilizado en el prefermentador proviene del fosfato de hierro (III) (insoluble) que, en el ambiente reductor del fermentador, se reduce a fosfato de hierro (II), que es soluble. Esta aportación de fosfato no supone según Christensson (1997) una mayor carga de fósforo para el tratamiento biológico, ya que el hierro (II) se vuelve a oxidar a hierro (III) en las etapas aeróbicas, produciendo la precipitación de una cantidad equivalente de fosfato de hierro (III).

7.2.10. Solubilización de N

Durante el Periodo A, la concentración de N-NH_4^+ del afluente del prefermentador osciló entre 22 y 45 mg N/l, con una media de 34 mg N/l. La concentración de N-NH_4^+ en el Periodo B fluctuó entre 17 y 45 mg N/l, con una media de 32 mg N/l y en el Periodo C el N-NH_4^+ varió entre 14 y 48 mg N/l, con una media de 28 mg P/l. Las desviaciones típicas de los valores de cada periodo fueron 6,5 mg N/l para el Periodo A, 9,9 mg N/l para el Periodo B y 9,3 mg N/l para el Periodo C.

Las pruebas F de comparación de varianzas no permiten afirmar la existencia de una diferencia significativa entre las 3 varianzas. Los cv obtenidos fueron 0,2 para el Periodo A y 0,3 para los Periodos B y C. Estos valores de cv indican que las concentraciones de N-NH_4^+ en el afluente se han mantenido considerablemente estables a lo largo del estudio.

Las pruebas t no permiten rechazar la hipótesis de igualdad entre las medias poblacionales en ningún caso. La media común del N-NH_4^+ del afluente de los tres periodos fue 31 mg N/l. Por otra parte, es posible afirmar que las medias poblacionales del N-NH_4^+ obtenido en el afluente de la primera fase experimental y el afluente de los tres periodos estudiados en la segunda fase experimental, son iguales estadísticamente.

Los valores del N-NH_4^+ obtenidos en el efluente del prefermentador, en el Periodo A, variaron entre 23 y 45 mg N/l, con una media de 35 mg N/l. En el Periodo B los valores de N-NH_4^+ fluctuaron entre 19 y 47 mg N/l, con una media de 35 mg N/l y en el Periodo C variaron entre 14 y 49 mg N/l, con una media de 30 mg N/l. Las desviaciones típicas en cada periodo fueron 6,4 mg N/l (Periodo A), 9,8 mg N/l (Periodo B) y 9,6 mg N/l (Periodo C).

Se observó un cierto grado de solubilización del N en los tres periodos estudiados. Los valores medios de la solubilización de N para los Periodos A, B y C fueron, respectivamente 1,0, 3,0 y 1,7 mg N-NH_4^+ /l (Figura 7.10). Estos valores representan sólo un pequeño incremento del N-NH_4^+ . El mayor incremento de N fue detectado en el Periodo B, cuando las condiciones anaeróbicas del sistema fueron más fuertes.

La Tabla 7.8 presenta los GDS del N expresados como mg N-NH_4^+ /g DQO afluente y como mg N-NH_4^+ /g AGV-DQO producida, y las concentraciones de MES. Las relaciones entre N-NH_4^+ y DQO afluente para los Periodos A, B y C fueron, respectivamente 2, 7 y 4 mg/g. El GDS del N se incrementa también con el incremento de MES y la disminución de ORP. La relación mg N-NH_4^+ / mg AGV-DQO sólo se ha calculado para los Periodos A y C, debido a que la producción de AGV no fue detectada en el Periodo B. De esta manera, los valores son 112 mg N-NH_4^+ / mg AGV-DQO para el Periodo A y 48 mg/g para el Periodo C.

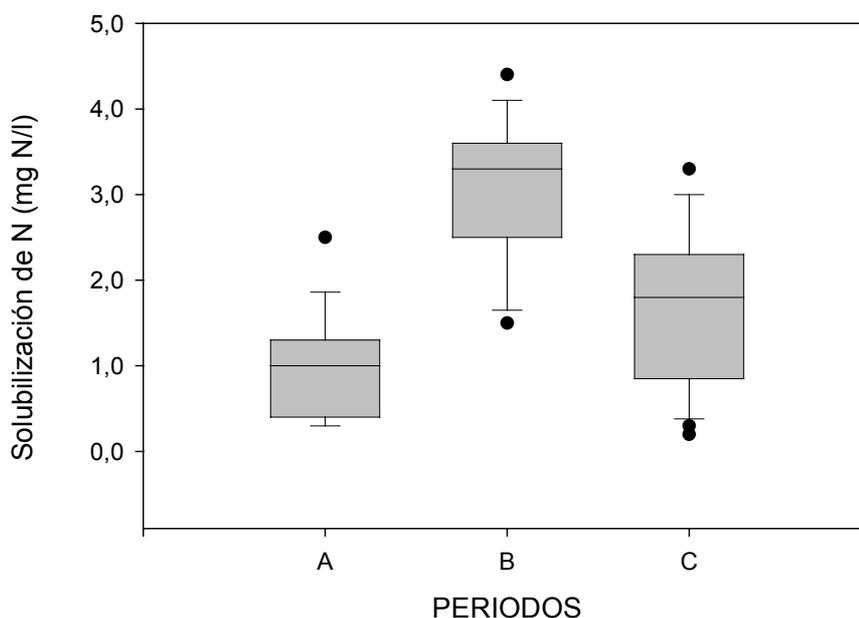


Figura 7.10. Diagramas de caja para la solubilización de N en los Periodos A, B y C del estudio de fermentación en TPA

Tabla 7.8. Solubilización de N observada en los tres periodos estudiados.

Periodo	% MES	Incremento de N- NH ₄ ⁺ (mg/l)	mg N-NH ₄ ⁺ / (g DQO inicial)	mg N-NH ₄ ⁺ / (g AGV-DQO)
A	0,95	1,0	2,0	112
B	1,38	3,0	7,0	-
C	1,06	1,7	4,0	48

La Tabla 7.9 presenta los resultados indicados por Banister *et al.* (1998) sobre la solubilización de N-NH₄⁺ en fangos primarios fermentados con un TRS de 6 días. De manera general se puede decir que Banister *et al.* (1998) obtuvieron una solubilización de nitrógeno en el fango primario del orden de 4,0 a 18 mg N / mg DQO (inicial), con una media de 9,0 mg N / mg DQO y de 10 a 169 mg N / mg AGV-DQO, con una media de 80 mg N / mg AGV-DQO. Estos valores fueron obtenidos con fangos primarios que contenían de 0,47 a 5,6 % de MES. Como se puede deducir de estos resultados, Banister *et al.* (1998) obtuvieron un GDS de N más alto por masa de DQO afluente para concentraciones similares de MES. Sin embargo, la solubilización de N por masa de AGV-DQO producida fue similar a la obtenida en el presente estudio.

Comparando los valores de la solubilización del N y del P se puede observar que los incrementos de N-NH₄⁺ en el efluente fueron más altos que los del PRS. Esto también ha sido observado en Banister *et al.* (1998). Este comportamiento se debe,

según Eastman, (1977), a que la DQO nitrogenada y particulada es fácilmente biodegradable durante la fase ácida de la digestión anaeróbica. Por otra parte, de la misma manera que para el caso del P, el grado de solubilización del N está determinado por la composición de los sólidos del agua residual y por los parámetros de operación básicos del sistema: configuración del proceso, temperatura, concentración de MES, ORP y TRS. En conclusión, la solubilización de N observada en este trabajo aumentó con el TRS y la concentración de MES, y con el decremento de los niveles de ORP.

Tabla 7.9. Solubilizaciones de N obtenidas por Banister *et al.* (1998).

Nombre del experimento	% MES	mg N / g DQO	mg N / g AGV-DQO
NRAW ⁽¹⁾	0,7	11	84
	1,0	8,0	75
	1,2	4,0	38
ORAW ⁽²⁾	1,7	8,0	75
	3,8	5,0	56
	5,4	11	10
GRAW ⁽³⁾	1,1	5,0	169
	0,7	10	84
BRAW ⁽⁴⁾	0,5	18	122
	0,5	11	84

(1-4) Denominación de los experimentos en discontinuo realizados por Banister *et al.*, (1998). Intervalo de temperaturas: 18-20 ° C.

7.2.11. pH afluente

Durante el Periodo A, los valores del pH del afluente oscilaron entre 7,79 y 8,52, con una media de 8,11. En el Periodo B, los valores fluctuaron entre 7,92 y 8,26, con una media de 8,13 y en el Periodo C el pH varió entre 7,90 y 8,25, con una media de 8,06. La desviación típica en cada periodo fue 0,1.

Las pruebas F de comparación entre varianzas no permiten afirmar la existencia de una diferencia significativa entre las 3 varianzas. Las pruebas t correspondientes no permiten rechazar la hipótesis de igualdad entre las medias poblacionales de los tres casos. La media común de pH en el afluente de los tres periodos fue 8,1. Por otra parte, es posible afirmar que las medias poblacionales del pH en el afluente de la primera fase experimental y el afluente de los tres periodos estudiados en la segunda fase, son iguales.

7.2.12. pH efluente

Durante el Periodo A, los valores del pH del efluente variaron entre 7,71 y 8,40, con una media de 8,05. En el Periodo B fluctuaron entre 8,00 y 8,31, con una media de 8,17 y en el Periodo C variaron entre 7,48 y 8,12, con una media de 7,87. Las desviaciones típicas fueron 0,15, 0,09 y 0,15 para los Periodos A, B y C, respectivamente. Las varianzas de los Periodos A y C fueron iguales y más grandes que la varianza del Periodo B. Según la prueba estadística t, para una significación del 0,05, las medias poblacionales de los tres periodos fueron significativamente diferentes. La Figura 7.11 muestra la evolución del pH del afluente y del efluente del prefermentador durante los tres periodos de estudio. Nótese que el efluente del

Periodo C mostró el pH más bajo, seguido de los Periodos A y B. La Figura 7.12 presenta la relación entre el pH y las concentraciones de AGV del efluente de los tres periodos estudiados.

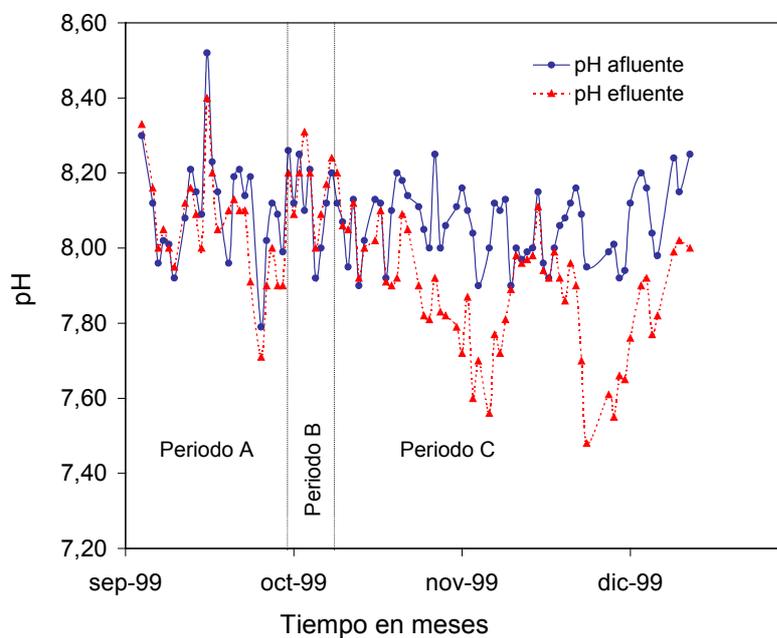


Figura 7.11. Evolución del pH en el afluyente y efluente del prefermentador (TPA).

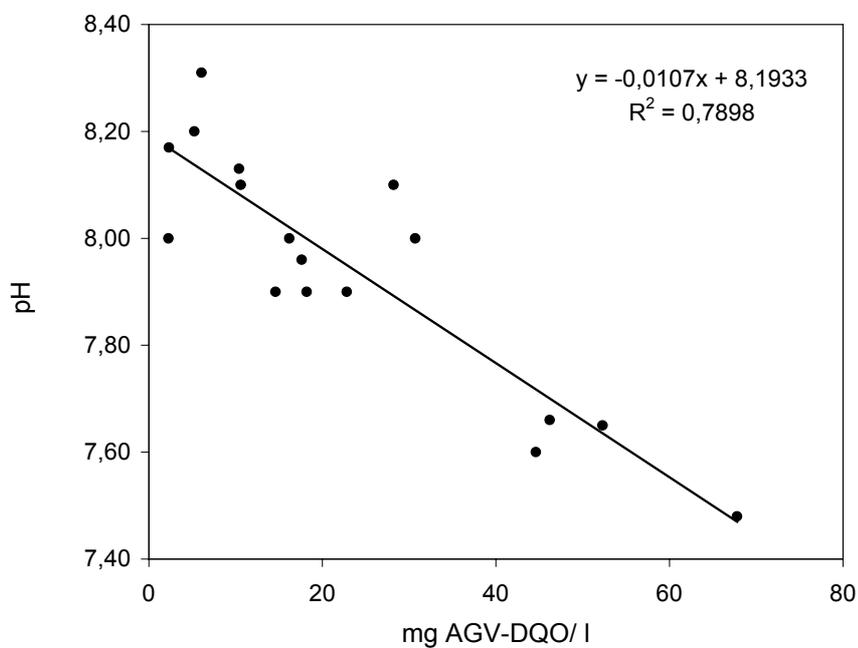


Figura 7.12. Relación entre el pH y la concentración de AGV en el efluente del TPA.

Varios autores han indicado que la producción de AGV en la fermentación acidogénica es inversamente proporcional al pH (Christensson, 1997; Lie y Welander, 1997; Münch y Greenfield, 1998). Esto fue confirmado en el ARU estudiada en la presente tesis, tanto durante la valoración del potencial de AGV como durante la fermentación de los sólidos primarios. Como puede observarse en la Figura 7.12, el incremento de AGV en el efluente del prefermentador provocó un decremento en sus valores del pH.

A pesar del comportamiento descrito, el ARU mantuvo su capacidad tampón notablemente, y logró mantener los valores del pH dentro del rango óptimo para la actividad biológica (7,5 a 8,5). Esto puede atribuirse a la moderada concentración de AGV alcanzada y a la elevada alcalinidad del afluente (367 mg CaCO₃/l). Las condiciones de frío registradas a mitad del mes de noviembre afectaron la generación de AGV, y el pH aumentó durante algunos días como se demuestra en la Figura 7.11.

7.2.13. Alcalinidad afluente

Durante el Periodo A, la alcalinidad del afluente osciló entre 296 y 431 mg CaCO₃/l, con una media de 377 mg CaCO₃/l. En el Periodo B, fluctuó entre 312 y 410 mg CaCO₃/l, con una media de 354 mg CaCO₃/l y en el Periodo C varió entre 315 y 414 mg CaCO₃/l, con una media de 370 mg CaCO₃/l. Las desviaciones típicas de los valores en cada periodo fueron 38 mg CaCO₃/l para el Periodo A, 34 mg CaCO₃/l para el Periodo B y 29 mg CaCO₃/l para el Periodo C. Como puede observarse la variabilidad en los tres periodos fue muy parecida.

Las pruebas F no permiten afirmar la existencia de una diferencia estadística entre las varianzas de los tres periodos para un nivel de significación de 0,05. Asimismo, las pruebas t tampoco permiten rechazar la hipótesis de igualdad entre medias de los tres casos. La media común de la alcalinidad en el afluente de los tres periodos fue de 367 mg CaCO₃/l. Por otra parte, es posible afirmar que las medias poblacionales de la alcalinidad obtenida en el afluente de la primera fase experimental y el afluente de los tres periodos estudiados en la segunda fase experimental son iguales estadísticamente.

7.2.14. Alcalinidad efluente

Durante el Periodo A, los valores de la alcalinidad del efluente variaron entre 302 y 450 mg CaCO₃/l, con una media de 392 mg CaCO₃/l. En el Periodo B, los valores fluctuaron entre 350 y 490 mg CaCO₃/l, con una media de 413 mg CaCO₃/l y en el Periodo C variaron entre 345 y 450 mg CaCO₃/l, con una media de 398 mg CaCO₃/l. Las desviaciones típicas fueron 39, 45 y 31 mg CaCO₃/l para A, B y C respectivamente.

La prueba estadística F, para un nivel de significación del 0,05 no permite afirmar la existencia de una diferencia significativa entre las varianzas de los tres periodos. De la misma manera, la prueba estadística t, para el mismo nivel de significación, indica que las medias poblacionales de los tres periodos fueron también estadísticamente iguales. Por lo tanto, se puede concluir que la liberación de las especies que afectan a la alcalinidad no produjo alcalinidades estadísticamente diferentes entre los periodos. No obstante, la comparación de la alcalinidad afluente con la del efluente del prefermentador, permite detectar un ligero incremento de este parámetro durante todo el estudio realizado (Figura 7.13).

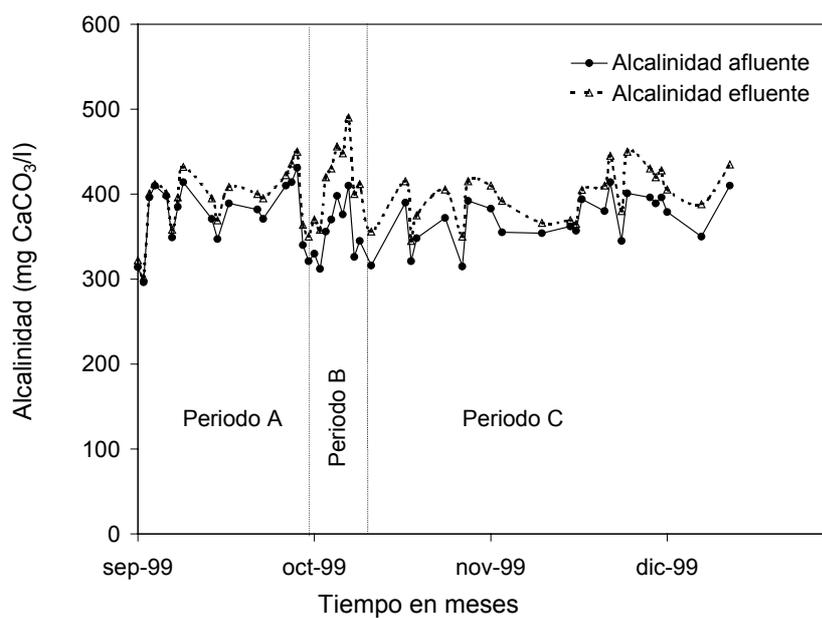


Figura 7.13. Alcalinidad del afluente y del efluente durante los tres periodos del estudio de prefermentación en TPA.

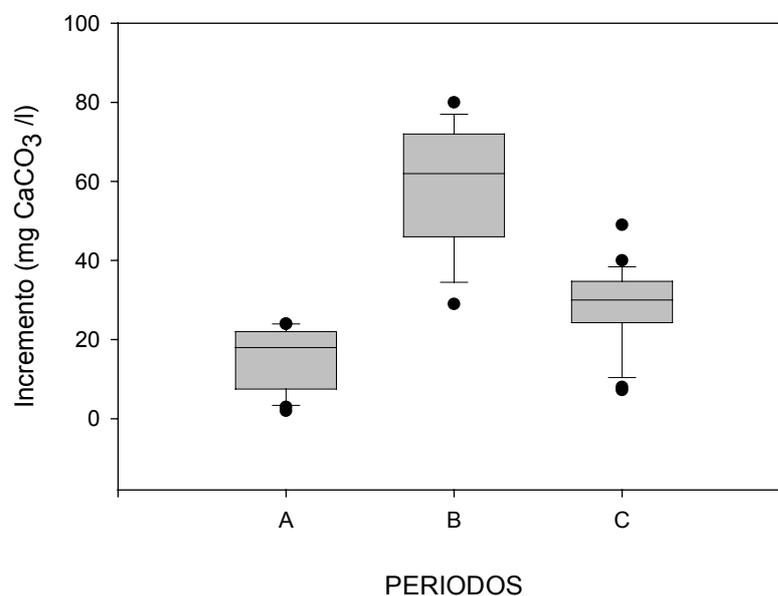


Figura 7.14. Diagramas de caja para la producción de alcalinidad en cada uno de los tres periodos del estudio de la prefermentación en TPA.

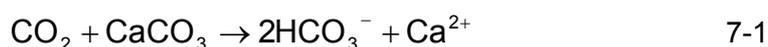
Los incrementos de alcalinidad del efluente observados durante el Periodo A variaron entre 2 y 24 mg CaCO_3/l , con una media de 15 mg CaCO_3/l . En el Periodo B los incrementos oscilaron entre 29 y 80 mg CaCO_3/l , con una media de 59 mg CaCO_3/l y

en el Periodo C variaron entre 7 y 49 mg P/l, con una media de 28 mg CaCO₃/l. La Figura 7.14 presenta un diagrama comparativo de los incrementos de alcalinidad obtenidos en los tres periodos de estudio. Se observa claramente que el incremento registrado en el Periodo B fue superior a los incrementos observados en los otros dos periodos.

La principal base contenida en el agua natural, es el ion bicarbonato (HCO₃⁻) que proviene de la disolución de las rocas calcáreas por el CO₂ del aire y el agua de lluvia. En las aguas residuales urbanas el principal responsable de la alcalinidad sigue siendo normalmente el bicarbonato. No obstante, existen otras bases que también pueden aportar alcalinidad como los fosfatos, los acetatos y los aniones de otros AGV. Asimismo, el amoníaco puede aportar alcalinidad siempre y cuando el agua residual tenga un pH superior a 9,27 (pKa del amonio), ya que de lo contrario el amoníaco se encontrará en forma de amonio y no producirá alcalinidad.

No obstante, el consumo de H⁺ en la amonificación libera OH⁻ que contribuyen a la alcalinidad. Dado que el pH del agua es cercano a 8,0 la concentración de OH⁻ libres es muy baja pero, obviamente, pueden reaccionar con ácidos débiles presentes en el medio, como el ácido acético o el CO₂, para dar la base débil correspondiente. Según este mecanismo (Araujo *et al*, 1998), se generan 3,57 mg CaCO₃/(mg N solubilizado). Cabe recordar que los incrementos de N-NH₄ registrados en los Periodos A, B y C fueron 1,0, 3,0 y 1,7 mg N-NH₄ respectivamente. De esta manera, se obtiene que el proceso de amonificación podría haber producido aproximadamente 1/5 parte de la generación de alcalinidad en la prefermentación.

Por otro lado, la reacción por la que el CO₂ se libera en la fermentación acidogénica puede producir alcalinidad siempre y cuando se genere suficiente CO₂ en el agua residual y que el agua residual contenga carbonato cálcico (sólido). La reacción se presenta en la Ecuación 7.1:



Esta reacción ha sido descrita por Wetzel (1983) como causa del aumento de la alcalinidad en los lagos: el CO₂ producido en la fermentación de los sedimentos reacciona con el carbonato cálcico presente y libera bicarbonato, que contribuye a la alcalinidad. No existe constancia de que el ARU contuviera carbonato cálcico en su MES ya que la alcalinidad de las muestras de ARU fue medida en el afluente y el efluente del prefermentador en muestras filtradas. Esto provocó que el carbonato sólido fuera eliminado antes de medir su aporte a la alcalinidad.

En conclusión, se observaron incrementos moderados de la alcalinidad (en el rango de 4,0 a 17%) durante los tres periodos. Las mayores producciones ocurrieron en el Periodo B, con una producción negativa de AGV y una máxima solubilización de N y de P. Existen diferentes causas a las que puede atribuirse el incremento de alcalinidad observado (solubilización de P, presencia de acetatos y aniones de otros AGV, amonificación y producción de CO₂ durante la prefermentación), sin embargo, no es posible afirmar que todas ellas hayan estado presentes ni tampoco ha sido posible cuantificar su contribución exacta.

7.3. Conclusiones

- 1) El ARU caracterizada en la primera fase experimental fue fermentada en un decantador primario de laboratorio operado como prefermentador, obteniéndose unos grados notables de solubilización y de fermentación.
- 2) Las relaciones de AGV-DQO/P-PO₄ lograron mejorarse respecto al afluente de la primera fase experimental, obteniéndose relaciones de 5,5 mg/mg. Aunque este valor se encuentra lejos de los 20 mg/mg recomendados por Abugararah y Randall (1991), es muy próximo a los sugeridos por otros investigadores, 6-9 mg/mg, según Danesh y Oleszkiewicz (1996).
- 3) Los mejores resultados se obtuvieron con un prefermentador cubierto y con un TRS de 5 días. Las cubiertas no herméticas favorecieron el control de la temperatura y del ORP (Periodo C) dentro de los rangos óptimos para el desarrollo de la fermentación acidogénica. En estas condiciones, se observaron solubilizaciones de DQO del orden de 22 mg/l y producciones de AGV de 34 mg AGV-DQO/l (Periodo C).
- 4) La producción de AGV fue atribuida tanto a la solubilización y fermentación de la DQO particulada como a la fermentación de la DQOs del afluente. El GDS de la DQO obtenido (66 mg DQO/g DQOp afluente) fue similar o mayor que los valores indicados en la bibliografía para procesos de prefermentación similares. Los valores superiores a los obtenidos en el presente trabajo han sido conseguidos en prefermentadores con mezcla completa o con pre-precipitación.
- 5) Aunque el grado de la fermentación fue notable, la producción de AGV (34 mg AGV-DQO/l) representó sólo el 35 % del potencial de AGV del afluente. Esto ha sido atribuido al flujo de mezcla incompleta del prefermentador: la mayoría de la DQOs afluente a un TPA –y una fracción de la DQOp- no están en contacto con el fango fermentado. Asimismo, la recirculación del fango hacia el afluente no fue suficiente para lograr la completa elutriación de los AGV producidos.
- 6) Además de la moderada formación de AGV, el potencial de AGV del ARU también decreció en el prefermentador. Esto significa que el potencial de generación de AGV dentro de la zona anaeróbica del RBS quedó afectado negativamente durante la segunda fase experimental.
- 7) El estudio del prefermentador abierto a la atmósfera con un TRS de 5 días (Periodo A) permitió detectar cierto grado de fermentación, sin solubilización. Esto fue interpretado como una producción de AGV únicamente a partir de la DQOs afluente, sin participación de la DQOLB. Aunque el ORP permaneció dentro del intervalo de la fermentación acidogénica, la hidrólisis y la fermentación fueron muy reducidas en esas condiciones, todo ello atribuible a un control deficiente de la temperatura y del ORP dentro del prefermentador.
- 8) Cuando se adoptó un TRS de 10 días (Periodo B), el ORP registró valores muy bajos. Tanto la solubilización como la producción de AGV fueron negativas en este periodo. Esto fue explicado como la manifestación simultánea de fermentación acidogénica y metanogénesis. La eficiencia de la eliminación de MES decreció en este periodo, haciendo que la concentración

- de MES en el fango del prefermentador aumentara, y que la solubilización de N y de P se incrementará notablemente.
- 9) La alcalinidad y el pH no fueron afectados de forma significativa por la fermentación en ningún periodo. Esto ha sido atribuido a la elevada alcalinidad del afluente y a la moderada hidrólisis y fermentación observadas.
 - 10) Finalmente, los días con malas condiciones climáticas (lluvia y baja temperatura) registraron una inhibición del proceso de fermentación acidogénica. Asimismo, el comportamiento del pH y el control de la temperatura del fango y del ORP se vieron también perjudicados.

