

# **MASTER OFICIAL INGENIERÍA HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE

Universidad Politécnica de Valencia

## **TESINA DE MASTER**

### **ANÁLISIS DE LOS RENDIMIENTOS, DURANTE LA PUESTA EN MARCHA, DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO BASADO EN HUMEDALES ARTIFICIALES DESTINADO A LA RECUPERACIÓN DEL LAGO DE L' ALBUFERA DE VALENCIA.**

**Autora: Nuria Oliver Rajadel**

**Tutor: Dr. Miguel Martín Monerri**

**Valencia, Abril 2011**



## ÍNDICE

---



## ÍNDICE

<b>1 INTRODUCCIÓN.</b>	<b>1</b>
<b>1.1 L'ALBUFERA DE VALENCIA.</b>	<b>1</b>
1.1.1 EL LAGO.	2
<b>1.2 EUTROFIZACIÓN.</b>	<b>4</b>
1.2.1 EJEMPLO DE UN SISTEMA HIPEREUTROFIZADO: EL LAGO DE L'ALBUFERA DE VALENCIA.	10
1.2.2 RESTAURACIÓN DE SISTEMAS EUTROFIZADOS.	13
1.2.2.1 ECOTECNOLOGÍA.	14
<b>1.3 MARCO LEGISLATIVO.</b>	<b>15</b>
<b>2 OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN.</b>	<b>21</b>
<b>3 MARCO TEÓRICO.</b>	<b>27</b>
<b>3.1 HUMEDALES ARTIFICIALES.</b>	<b>27</b>
3.1.1 INTRODUCCIÓN.	27
3.1.2 TIPOS DE HUMEDALES ARTIFICIALES.	30
3.1.3 LAS PLANTAS MACRÓFITAS.	33
3.1.3.1 FUNCIONES.	33
3.1.3.2 EFECTOS.	33
3.1.4 HIDROLOGIA E HIDRÁULICA.	35
3.1.5 MECANISMOS PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AGUA: SÓLIDOS SUSPENDIDOS, FÓSFORO TOTAL Y NITRÓGENO TOTAL.	37
3.1.5.1 SÓLIDOS SUSPENDIDOS.	37
3.1.5.2 FÓSFORO TOTAL.	40
3.1.5.3 NITRÓGENO TOTAL.	42
3.1.6 CONCENTRACIÓN BASE ( <i>BACKGROUND CONCENTRATIONS, C*</i> ).	48
3.1.6.1 CONCENTRACIÓN BASE DEL FÓSFORO TOTAL.	49
<b>3.2 EMPLEO DE HUMEDALES ARTIFICIALES PARA TRATAR AGUAS EUTROFIZADAS.</b>	<b>51</b>
<b>3.3 HUMEDALES ARTIFICIALES EN EL ENTORNO DE L'ALBUFERA DE VALENCIA.</b>	<b>54</b>
<b>3.4 MODELOS MATEMÁTICOS.</b>	<b>56</b>
3.4.1 INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS	56
3.4.2 EMPLEO DE MODELOS EN HUMEDALES ARTIFICIALES.	56
3.4.2.1 PERSPECTIVA HISTORICA	56
3.4.2.2 MODELACIÓN DE PRIMER ORDEN.	57
3.4.2.3 ECUACIONES DE REGRESIÓN.	58
3.4.2.4 ESTIMACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN BASE.	59
<b>4 ESTUDIOS PREVIOS.</b>	<b>63</b>
<b>4.1 DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO MEDIANTE PLANTAS MACRÓFITAS DE LAS AGUAS DE LAGOS ALTAMENTE EUTROFIZADOS. APLICACIÓN AL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS DEL LAGO DE LA ALBUFERA DE VALENCIA. (JURADO, 1999).</b>	<b>63</b>

<b>4.2 ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DEL APOORTE DE NUTRIENTES GENERADOS POR LA DESCOMPOSICIÓN DE LA BIOMASA PLANCTÓNICA DE LA ALBUFERA DE VALENCIA. INFLUENCIA DE LA RADIACIÓN SOLAR. (GUIRADO, 2009)</b>	<b>64</b>
<b>4.3 DESARROLLO Y CALIBRACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO DE LA EVOLUCIÓN DEL APOORTE DE NUTRIENTES POR DESCOMPOSICIÓN DE LA BIOMASA FITOPLANCTÓNICA DE LA ALBUFERA DE VALENCIA. INFLUENCIA DE LA RADIACIÓN SOLAR. (OLIVER, 2010).</b>	<b>66</b>
<b>4.4 ESTIMACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO ANUAL, EN EL HUMEDAL ARTIFICIAL DEL TANCAT DE LA PIPA, CON APOYO DE MODELOS MATEMÁTICOS DE CALIDAD DE AGUAS; PARA CONTAMINANTES CONSERVATIVOS. (ANGARITA, 2010).</b>	<b>68</b>
<b>5 <u>ÁREA DE ESTUDIO.</u></b>	<b>76</b>
<b>5.1 ANTECEDENTES.</b>	<b>76</b>
<b>5.2 TANCAT DE LA PIPA (PARQUE NATURAL DE L'ALBUFERA DE VALENCIA).</b>	<b>77</b>
5.2.1 LOCALIZACIÓN.	78
5.2.2 CLIMA EN EL ENTORNO DEL TANCAT DE LA PIPA.	79
5.2.3 ACTUACIONES PROPUESTAS DENTRO DEL TANCAT DE LA PIPA.	80
<b>5.3 HUMEDALES ARTIFICIALES EN EL TANCAT DE LA PIPA.</b>	<b>81</b>
<b>6 <u>MATERIAL Y MÉTODOS.</u></b>	<b>91</b>
<b>6.1 MUESTREOS DE CAMPO.</b>	<b>91</b>
6.1.1 CRONOLOGIA.	91
6.1.2 DESCRIPCIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO.	92
6.1.3 TOMA DE MUESTRA Y MEDICIONES.	97
6.1.3.1 MEDIDA DE VARIABLES FÍSICO-QUÍMICAS IN SITU.	99
6.1.3.2 TOMA DE MUESTRA DE AGUA.	100
<b>6.2 ANÁLISIS QUÍMICO.</b>	<b>102</b>
6.2.1 MATERIAL UTILIZADO EN LOS ENSAYOS Y MÉTODOS DE ENSAYOS.	103
<b>7 <u>RESULTADOS</u></b>	<b>109</b>
<b>7.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN METEOROLÓGICA.</b>	<b>109</b>
<b>7.2 INCIDENCIAS RECOGIDAS DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO.</b>	<b>110</b>
<b>7.3 SÓLIDOS SUSPENDIDOS.</b>	<b>114</b>
7.3.1 CARACTERIZACIÓN DE SÓLIDOS.	114
7.3.2 CORRELACIONES ENTRE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS Y LA TURBIDEZ.	118
7.3.3 ELIMINACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS.	121
<b>7.4 FÓSFORO TOTAL.</b>	<b>146</b>
7.4.1 ELIMINACIÓN DE FÓSFORO TOTAL.	146
<b>7.5 NITRÓGENO TOTAL.</b>	<b>173</b>
7.5.1 ELIMINACIÓN DE NITRÓGENO TOTAL.	173
<b>7.6 FITOPLANCTON.</b>	<b>212</b>
7.6.1 ELIMINACIÓN DE CLOROFILA A.	212
<b>7.7 OXÍGENO DISUELTO.</b>	<b>244</b>
<b>7.8 TEMPERATURA.</b>	<b>251</b>
<b>7.9 PH</b>	<b>255</b>
<b>7.10 CONDUCTIVIDAD.</b>	<b>259</b>

<b>7.11 INTRODUCCIÓN A LA MODELACIÓN EN SISTEMAS DE HUMEDALES ARTIFICIALES: DESARROLLO DE MODELOS MATEMÁTICOS.</b>	<b>263</b>
7.11.1 DESARROLLO DE UN MODELO EMPÍRICO PARA EL CÁLCULO DE LA <i>CONCENTRACIÓN BASE</i> ( $C^*$ ).	263
7.11.2 DESARROLLO DE UN MODELO EMPÍRICO PARA EL CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN DEL EFLUENTE ( $C_o$ ).	266
<b>8 CONCLUSIONES</b>	<b>275</b>
<b>9 BIBLIOGRAFÍA.</b>	<b>285</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: VALORES LÍMITE DE CLASIFICACIÓN TRÓFICA PARA UN SISTEMA. INFORME OCDE (1982). .....	6
TABLA 2: ALGUNOS MÉTODOS ECOTECNOLÓGICOS APLICADOS EN LA RESTAURACIÓN DE LAGOS. FUENTE: ADAPTADO DE COLLINS, 2008. ....	15
TABLA 3: CONTENIDO DE NUTRIENTES DE LA BIOMASA DE <i>PHRAGMITES</i> CON UNA DENSIDAD DE 90 TALLOS/M <sup>2</sup> . FUENTE: ADAPTADO DE COOPER, 1996 (REED BEDS AND CONSTRUCTED WETLANDS FOR WASTEWATER TREATMENT) .....	47
TABLA 4: VALORES DE CONCENTRACIÓN BASE. FUENTE: BASADO EN KADLEC Y WALLACE (2009). ....	49
TABLA 5: NIVELES DE CONCENTRACIÓN BASE (MG/L) PARA EL FÓSFORO TOTAL. BASADO EN KADLEC Y WALLACE (2009). ....	50
TABLA 6: VALORES MEDIOS SOBRE LOS 29 MESES DE PERIODO OPERACIONAL EN EL INFLUENTE DESDE EL LAGO APOPKA. (COVENEY Y COL., 2002). ....	52
TABLA 7: CAUDAL MEDIO A LA ENTRADA DEL SISTEMA DE HUMEDALES ARTIFICIALES EN LOS PERIODOS ABRIL'09-JUNIO'09, JUNIO'09-JULIO'09, JULIO'09-NOVIEMBRE'09 Y NOVIEMBRE'90-MARZO'10. ....	70
TABLA 8: TIEMPOS DE RESIDENCIA HIDRÁULICO (DÍAS) EN LOS HUMEDALES ARTIFICIALES. FUENTE: ADAPTADO DE "ESTIMACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO ANUAL, EN EL HUMEDAL ARTIFICIAL DEL TANCAT DE LA PIPA, CON APOYO DE MODELOS MATEMÁTICOS DE CALIDAD DE AGUAS, PARA CONTAMINANTES CONSERVATIVOS" (ANGARITA, 2010) .....	71
TABLA 9: LONGITUD, ANCHURA, RELACIÓN DE ASPECTO Y SUPERFICIE DE CADA UNA DE LAS CELDAS. ....	83
TABLA 10: TIPO DE MACRÓFITAS EMERGENTES Y DENSIDAD DE LAS MISMAS PLANTADAS EN CADA UNA DE LAS CELDAS. ....	84
TABLA 11 : INCIDENCIAS DETECTADAS EN LOS MUESTREOS DE CAMPO PARA EL ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL AGUA. ....	110
TABLA 12: CARACTERIZACIÓN DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES. ....	118
TABLA 13: REGRESIONES ENTRE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES Y LA TURBIDEZ, FORZANDO EL ORIGEN EN SS <sub>T</sub> =0, NTU=0....	121
TABLA 14: RENDIMIENTOS GLOBALES DE ELIMINACIÓN DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS CALCULADOS TENIENDO EN CUENTA LA EVAPOTRANSPIRACIÓN O NO. ....	142
TABLA 15: RENDIMIENTOS POR SECTORES DE ELIMINACIÓN DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS. ....	143
TABLA 16: RENDIMIENTOS OBTENIDOS EN ELIMINACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN FUNCIÓN DE LA CARGA HIDRÁULICA DE OPERACIÓN Y EL HUMEDAL CONSIDERADO. ....	143
TABLA 17: RESULTADOS DE DIVERSOS PARÁMETROS EN LAS FECHAS DE PICOS DE P TOTAL Y FOSFATOS. ....	157
TABLA 18: RENDIMIENTOS OBTENIDOS EN ELIMINACIÓN DE FÓSFORO TOTAL EN FUNCIÓN DE LA CARGA HIDRÁULICA DE OPERACIÓN Y EL HUMEDAL CONSIDERADO. ....	167
TABLA 19: RENDIMIENTOS OBTENIDOS EN ELIMINACIÓN DE FÓSFORO TOTAL EN LAS TRES CELDAS GRANDES. ....	168
TABLA 20: RENDIMIENTOS OBTENIDOS EN ELIMINACIÓN DE FÓSFORO TOTAL EN LAS TRES CELDAS PEQUEÑAS. ....	169
TABLA 21: RENDIMIENTOS GLOBALES DE ELIMINACIÓN DEL FÓSFORO TOTAL. ....	170
TABLA 22: RENDIMIENTOS POR SECTORES DE ELIMINACIÓN DEL FÓSFORO TOTAL. ....	171
TABLA 23: VELOCIDADES DE ELIMINACIÓN DEL FÓSFORO TOTAL OBTENIDAS CON DISTINTAS CARGAS HIDRÁULICAS. ....	173
TABLA 24: PORCENTAJE DE MUESTREOS EN QUE LA CONCENTRACIÓN EN LOS PUNTOS 6 Y 7 ES INFERIOR A 3 MG N/L, 2.5 MG N/L, 2 MG N/L, 1.5 MG N/L Y A 1 MG N/L. ....	183
TABLA 25: PORCENTAJES MEDIOS DE ELIMINACIÓN DEL AMONIO, NITRATOS Y NITRITOS EN EL MES DE ABRIL. ....	189
TABLA 26: PORCENTAJES MEDIOS DE ELIMINACIÓN DEL NITRÓGENO ORGÁNICO EN EL MES DE ABRIL. ....	189
TABLA 27: PORCENTAJES MEDIOS DE ELIMINACIÓN DEL AMONIO, NITRATOS Y NITRITOS EL 04 DE MAYO DEL 2009. ....	191
TABLA 28: PORCENTAJES MEDIOS DE ELIMINACIÓN DEL NITRÓGENO ORGÁNICO EL 04 DE MAYO DEL 2009. ....	191
TABLA 29: PORCENTAJES MEDIOS DE ELIMINACIÓN DEL AMONIO, NITRATOS Y NITRITOS EL 27 DE JULIO DEL 2009. ....	195
TABLA 30: PORCENTAJES MEDIOS DE ELIMINACIÓN DEL NITRÓGENO ORGÁNICO EL 27 DE JULIO DEL 2009. ....	195
TABLA 31: PORCENTAJES MEDIOS DE ELIMINACIÓN DEL AMONIO, NITRATOS Y NITRITOS DEL 30 DE NOVIEMBRE DEL 2009 AL 13 DE ENERO DEL 2010. ....	198
TABLA 32: PORCENTAJES MEDIOS DE ELIMINACIÓN DEL NITRÓGENO ORGÁNICO DEL 30 DE NOVIEMBRE DEL 2009 AL 13 DE ENERO DEL 2010. ....	199
TABLA 33: RENDIMIENTOS OBTENIDOS EN ELIMINACIÓN DE NITRÓGENO TOTAL EN FUNCIÓN DE LA CARGA HIDRÁULICA DE OPERACIÓN Y EL HUMEDAL CONSIDERADO. ....	202
TABLA 34 : RENDIMIENTOS OBTENIDOS EN ELIMINACIÓN DE NITRÓGENO TOTAL EN LAS TRES CELDAS GRANDES. ....	204
TABLA 35: RENDIMIENTOS OBTENIDOS EN ELIMINACIÓN DE NITRÓGENO TOTAL EN LAS TRES CELDAS PEQUEÑAS. ....	205
TABLA 36: RENDIMIENTOS GLOBALES DE ELIMINACIÓN DEL NITRÓGENO TOTAL. ....	206
TABLA 37: RENDIMIENTOS POR SECTORES DE ELIMINACIÓN DEL NITRÓGENO TOTAL. ....	206

TABLA 38: CONCENTRACIONES MEDIAS Y VELOCIDADES DE ELIMINACIÓN DEL NITRÓGENO TOTAL EN LOS CUATRO TRAMOS. ....	211
TABLA 39: RENDIMIENTOS OBTENIDOS EN ELIMINACIÓN DE CLOROFILA A EN FUNCIÓN DE LA CARGA HIDRÁULICA DE OPERACIÓN Y EL HUMEDAL CONSIDERADO.....	233
TABLA 40 : RENDIMIENTOS OBTENIDOS EN ELIMINACIÓN DE CLOROFILA A EN LAS TRES CELDAS GRANDES.....	235
TABLA 41: RENDIMIENTOS OBTENIDOS EN ELIMINACIÓN DE LA CLOROFILA A EN LAS TRES CELDAS PEQUEÑAS.....	236
TABLA 42: RENDIMIENTOS GLOBALES DE ELIMINACIÓN DE LA CLOROFILA A. ....	238
TABLA 43: RENDIMIENTOS POR SECTORES DE ELIMINACIÓN DE LA CLOROFILA A. ....	238
TABLA 44: CONCENTRACIONES MEDIAS Y VELOCIDADES DE ELIMINACIÓN DE LA CLOROFILA A EN LOS CUATRO TRAMOS.....	243
TABLA 45: TEMPERATURA MEDIDA EN LOS PUNTOS 1.1, 2, 4 Y 6 DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010 .....	253
TABLA 46: PH MEDIDO EN LOS PUNTOS 1.1, 2, 4 Y 6 DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010 .....	257

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: IMAGEN SATÉLITE DE L' ALBUFERA DE VALENCIA. FUENTE: <i>WWW.GVA.ES</i> .....	2
FIGURA 2: ESTADO TRÓFICO DE LOS EMBALSES DE LA CUENCA DEL JÚCAR (ESPAÑA). FUENTE: "EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY"..	5
FIGURA 3: EVOLUCIÓN OXÍGENO DISUELTUO. FUENTE: PRUEBAS PRELIMINARES EN ZONA PILOTO SOBRE LA RELACIÓN ENTRE LOS SEDIMENTOS, LOS METALES PESADOS Y EL CICLO DE NUTRIENTES. ....	11
FIGURA 4: DIAGRAMA DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL. FUENTE: DEPURANAT. ....	29
FIGURA 5 : CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. FUENTE: ADAPTADO DE VYMAZAL, 2007. ....	31
FIGURA 6: HUMEDALES ARTIFICIALES (H. A.) PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (DE ARRIBA ABAJO): H.A. CON PLANTAS FLOTANTES, H.A. DE FLUJO SUPERFICIAL Y MACRÓFITAS EMERGENTES, H.A. DE FLUJO HORIZONTAL SUBSUPERFICIAL, H.A. DE FLUJO VERTICAL SUBSUPERFICIAL. FUENTE: VYMAZAL, 2007.....	32
FIGURA 7: COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO DE UN HUMEDAL. FUENTE: ADAPTADO DE KADLEC Y WALLACE (2009) <i>TREATMENT WETLANDS</i> .....	35
FIGURA 8: MECANISMOS DE PRODUCCIÓN/ELIMINACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUPERFICIAL. ....	38
FIGURA 9: CICLO DEL FÓSFORO EN UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUPERFICIAL. FUENTE: <i>CONSTRUCTED WETLANDS TREATMENT OF MUNICIPAL WASTEWATERS</i> (EPA, 2000). ....	41
FIGURA 10: TRANSFORMACIONES DEL NITRÓGENO EN UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUPERFICIAL. FUENTE: <i>CONSTRUCTED WETLANDS TREATMENT OF MUNICIPAL WASTEWATERS</i> (EPA, 2000). ....	43
FIGURA 11: HUMEDAL ARTIFICIAL EN EL TANCAT DE MÍLIA. FUENTE: ADAPTADO DEL CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE. CUMBRE DEL DESARROLLO SOSTENIBLE. ....	54
FIGURA 12: HUMEDAL ARTIFICIAL EN EL ESTANY DE LA PLANA. FUENTE: ADAPTADO DEL CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE. CUMBRE DEL DESARROLLO SOSTENIBLE. ....	55
FIGURA 13: CAUDALES DE ENTRADA AL SISTEMA DE HUMEDALES ARTIFICIALES DESDE EL 1 DE JULIO DEL 2009 HASTA EL 22 DE MARZO DE 2010. EN LAS FECHAS ANTERIORES AL 1 DE JULIO DEL 2009, NO HAY REGISTROS DE CAUDALES DE ENTRADA, YA QUE NO SE DISPONÍA DE MEDIDORES EN LOS PUNTOS DE ENTRADA AL SISTEMA. HASTA EL 13 DE JULIO SOLAMENTE ENTRABA AGUA POR EL BARRANCO DEL POYO PERO A PARTIR DE ESTA FECHA TAMBIÉN ENTRA AGUA DESDE LA ACEQUIA DEL PUERTO DE CATARROJA.	69
FIGURA 14: DISTRIBUCIÓN DE LOS CAUDALES DE ENTRADA Y SALIDA DEL TANCAT DE LA PIPA. FUENTE: ADAPTADO DE "ESTIMACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO ANUAL, EN EL HUMEDAL ARTIFICIAL DEL TANCAT DE LA PIPA, CON APOYO DE MODELOS MATEMÁTICOS DE CALIDAD DE AGUAS, PARA CONTAMINANTES CONSERVATIVOS" (ANGARITA, 2010).....	70
FIGURA 15: TIEMPOS DE RESIDENCIA HIDRÁULICO (DÍAS) EN LOS HUMEDALES ARTIFICIALES. FUENTE: ADAPTADO DE "ESTIMACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO ANUAL, EN EL HUMEDAL ARTIFICIAL DEL TANCAT DE LA PIPA, CON APOYO DE MODELOS MATEMÁTICOS DE CALIDAD DE AGUAS, PARA CONTAMINANTES CONSERVATIVOS" (ANGARITA, 2010).....	72
FIGURA 16: DISTRIBUCIÓN DEL CAUDAL DE ENTRADA EN LOS FG, FP Y F4 .....	73
FIGURA 17: FOTOGRAFÍA AÉREA DE LA MARJAL INUNDADA. FUENTE: <i>WWW.ALBUFERA.COM</i> .....	77
FIGURA 18: ANTIGUO MOTOR DEL TANCAT DE LA PIPA, ACTUALMENTE RESTAURADO Y HABILITADO PARA USO PÚBLICO. FUENTE: <i>WWW.TANCATDELAPIPA.NET</i> .....	78
FIGURA 19: MAPA DE SITUACIÓN. FUENTE: "MEMORIA DEL PROYECTO DE RECUPERACIÓN DE ESPACIOS Y ACTUACIONES DE GESTIÓN HÍDRICA EN LA DESEMBOCADURA DEL POYO". ....	78
FIGURA 20: MAPA DE SITUACIÓN. FUENTE: <i>WWW.TANCATDELAPIPA.NET</i> .....	79
FIGURA 21: CLIMOGRAMA DE LA ZONA DEL ESTUDIO. FUENTE: "PROYECTO DE RECUPERACIÓN DE ESPACIOS Y ACTUACIONES DE GESTIÓN HÍDRICA EN LA DESEMBOCADURA DEL POYO". ....	79
FIGURA 22: AMBIENTES UBICADOS EN EL TANCAT DE LA PIPA. FUENTE: ADAPTADO <i>WWW.TANCATDELAPIPA.NET</i> .....	81
FIGURA 23: FOTOGRAFÍA AÉREA DEL TANCAT DE LA PIPA. FUENTE: CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR. ....	81
FIGURA 24: CIRCULACIÓN DEL AGUA A TRAVÉS DE LAS CELDAS DE LOS TRES HUMEDALES. FUENTE: "ESTIMACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO ANUAL, EN EL HUMEDAL ARTIFICIAL DEL TANCAT DE LA PIPA, CON APOYO DE MODELOS MATEMÁTICOS DE CALIDAD DE AGUAS, PARA CONTAMINANTES CONSERVATIVOS" (ANGARITA, 2010).....	85
FIGURA 25: PLANO DE LA PLANTA GENERAL DEL TANCAT EN EL QUE APARECE REMARCADO EN COLOR NEGRO EL RECORRIDO DEL AGUA DESDE QUE ENTRA POR EL PUERTO DE CATARROJA HASTA QUE LLEGA A LA TUBERÍA DE ENTRADA AL F4. ....	86
FIGURA 26: ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE UNA CELDA DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES DEL TANCAT DE LA PIPA. ....	87
FIGURA 27: NÚMERO DE MUESTREOS DE CAMPO REALIZADOS CADA MES. EN TOTAL SE REALIZARON 26 MUESTREOS. ....	92
FIGURA 28: LOCALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO DE CALIDAD DE LAS AGUAS EN EL TANCAT DE LA PIPA.....	93
FIGURA 29: ARQUETA DE ENTRADA DE AGUA, AL SISTEMA DE HUMEDALES, PROCEDENTE DEL BARRANCO DEL POYO.....	94

FIGURA 30: FOTOGRAFÍA DEL PUNTO 16 EN EL MOMENTO QUE SE ESTABA TOMANDO MUESTRA DE AGUA.....	96
FIGURA 31: IMÁGENES DEL MALETÍN MULTISONDA Y DE LAS DIFERENTES SONDAS EN UN MOMENTO DE TOMA DE DATOS IN SITU. ..	100
FIGURA 32: IMÁGENES DEL MATERIAL EMPLEADO EN LA TOMA DE MUESTRAS DE AGUA Y PROCESO DE TOMA DE MUESTRA. ....	101
FIGURA 33: PRECIPITACIÓN TOTAL (MM) REGISTRADA EN LA ESTACIÓN AGROCLIMÁTICA DE PICASSENT. ADAPTADO DEL IVIA ( <a href="http://estaciones.ivia.es/diario0.php3?idprovincia=46&amp;idestacion=17">HTTP://ESTACIONES.IVIA.ES/DIARIO0.PHP3?IDPROVINCIA=46&amp;IDESTACION=17</a> ).....	109
FIGURA 34: EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (MM) REGISTRADA EN LA ESTACIÓN AGROCLIMÁTICA DE PICASSENT. ADAPTADO DEL IVIA ( <a href="http://estaciones.ivia.es/diario0.php3?idprovincia=46&amp;idestacion=17">HTTP://ESTACIONES.IVIA.ES/DIARIO0.PHP3?IDPROVINCIA=46&amp;IDESTACION=17</a> ).....	110
FIGURA 35: CORRELACIÓN ENTRE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS Y LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES EN EL PUNTO 1.1 (IZQUIERDA) Y EL PUNTO 2 (DERECHA).....	114
FIGURA 36: CORRELACIÓN ENTRE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS Y LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES EN EL PUNTO 3 (IZQUIERDA) Y EL PUNTO 4 (DERECHA). ....	115
FIGURA 37: CORRELACIÓN ENTRE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS Y LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES EN EL PUNTO 5 (IZQUIERDA) Y EL PUNTO 6 (DERECHA). ....	115
FIGURA 38: CORRELACIÓN ENTRE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS Y LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES EN EL PUNTO 7 (IZQUIERDA) Y EL PUNTO 8.2 (DERECHA). ....	115
FIGURA 39: CORRELACIÓN ENTRE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS Y LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES EN EL PUNTO 8.1 (IZQUIERDA) Y EL PUNTO 15 (DERECHA).....	116
FIGURA 40: CORRELACIÓN ENTRE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS Y LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES EN EL PUNTO 16 (IZQUIERDA) Y EL PUNTO 1.2 (DERECHA).....	116
FIGURA 41: CORRELACIÓN LINEAL ENTRE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES Y LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES EN EL PUNTO 4 PARA CONCENTRACIONES DE LOS PRIMEROS MENORES DE 30 MG SS/L (IZQUIERDA) Y PARA TODAS LAS CONCENTRACIONES OBTENIDAS DE LOS MISMOS (DERECHA).....	117
FIGURA 42: CORRELACIÓN ENTRE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (MG/L) Y LA TURBIDEZ (NTU) MEDIDOS EN EL PUNTO 1.1 (BARRANCO DEL POYO). ....	119
FIGURA 43: CORRELACIÓN ENTRE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (MG/L) Y LA TURBIDEZ (NTU) MEDIDOS EN EL PUNTO 1.1 (BARRANCO DEL POYO), FORZANDO EL ORIGEN EN $SS_T=0$ , $NTU=0$ .....	120
FIGURA 44: CORRELACIÓN ENTRE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (MG/L) Y LA TURBIDEZ (NTU) OBTENIDOS EN TODOS LOS PUNTOS DE MUESTREO, FORZANDO EL ORIGEN EN $SS_T=0$ , $NTU=0$ .....	120
FIGURA 45: CONCENTRACIONES DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS (MG SS/L) EN EL AGUA DE ENTRADA AL SISTEMA POR EL BARRANCO DEL POYO, DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010. LA LÍNEA DISCONTINUA REPRESENTA LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. ....	122
FIGURA 46: CONCENTRACIONES MEDIDAS (MG SS/L) EN EL AGUA DE ENTRADA POR EL PUERTO DE CATARROJA, DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010. CABE RECORDAR QUE NO ENTRABA AGUA AL HUMEDAL DESDE ESTA ACEQUIA HASTA LA SEGUNDA QUINCENA DE JUNIO DEL 2009. LA LÍNEA DISCONTINUA REPRESENTA LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. ...	122
FIGURA 47: MEDIA (TRAMO INFERIOR) Y DESVIACIÓN TÍPICA (TRAMO SUPERIOR) DE LOS DATOS RECOGIDOS EN LOS PUNTO DE MUESTREO 1.1, 2, 3, 4, 5, 6, Y 7, DURANTE TODO EL PERIODO ANUAL (06/04/2009 AL 22/03/2010). ....	123
FIGURA 48: MEDIA (TRAMO INFERIOR) Y DESVIACIÓN TÍPICA (TRAMO SUPERIOR) DE LOS DATOS RECOGIDOS EN LOS PUNTO DE MUESTREO 1.2 Y 8.2, DURANTE TODO EL PERIODO ANUAL (06/04/2009 AL 22/03/2010).....	123
FIGURA 49: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN LA ENTRADA POR EL BARRANCO DEL POYO (1.1) Y A LA SALIDA DE LAS CELDAS FG3 (6) Y FP3 (7). LAS LÍNEAS REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. ....	124
FIGURA 50: FOTOGRAFÍA FRONTAL DEL FG1 EL DÍA 06/04/2009 (BAJA DENSIDAD DE VEGETACIÓN) Y DEL DÍA 10/06/2009 (ELEVADA DENSIDAD DE VEGETACIÓN). ....	125
FIGURA 51: FOTOGRAFÍA FRONTAL DEL FG2 EL DÍA 06/04/2009 (BAJA DENSIDAD DE VEGETACIÓN) Y DEL DÍA 10/06/2009 (ELEVADA DENSIDAD DE VEGETACIÓN). ....	126
FIGURA 52: FOTOGRAFÍA FRONTAL DEL FG3 EL DÍA 06/04/2009 (BAJA DENSIDAD DE VEGETACIÓN) Y DEL DÍA 10/06/2009 (BAJA DENSIDAD DE VEGETACIÓN). ....	126
FIGURA 53: FOTOGRAFÍA FRONTAL DEL FG1 EL DÍA 02/02/2010 (DESPUÉS DE LA COSECHA DE LA CELDA) Y FOTOGRAFÍA FRONTAL DEL FG3 EL DÍA 05/11/2009 (ELEVADA DENSIDAD DE VEGETACIÓN).....	126
FIGURA 54: FOTOGRAFÍA FRONTAL DEL F4 DEL DÍA 06/04/2009 (IZQUIERDA) Y FOTOGRAFÍA FRONTAL DEL F4 EL DÍA 10/06/2009 (DERECHA). ....	128
FIGURA 55: FOTOGRAFÍA FRONTAL DEL F4 DEL DÍA 02/02/20010 (IZQUIERDA) Y FOTOGRAFÍA LATERAL DEL F4 EL DÍA 02/02/20010 (DERECHA). ....	128
FIGURA 56: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN LA ENTRADA POR EL PUERTO DE CATARROJA (1.2) Y A LA SALIDA DE F4 (8.2). LAS LÍNEAS REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. ....	129
FIGURA 57: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN LA ENTRADA POR EL PUERTO DE CATARROJA (1.2), ENTRADA AL F4 (8.1) Y A LA SALIDA DEL F4 (8.2). LAS LÍNEAS REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. ....	130

FIGURA 58: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN LA ENTRADA POR EL BARRANCO DEL POYO (1.1), SALIDA DEL TANCAT DE LA PIPA (15) Y ZONA DEL LAGO DE VERTIDO DEL AGUA TRATADA (16). LAS LÍNEAS REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2.....	131
FIGURA 59: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN LA ENTRADA POR EL PUERTO DE CATARROJA (1.2), SALIDA DEL TANCAT DE LA PIPA (15) Y ZONA DEL LAGO DE VERTIDO DEL AGUA TRATADA (16). LAS LÍNEAS REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2.....	132
FIGURA 60: EVOLUCIÓN DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS A LO LARGO DEL SISTEMA FG. LOS DÍAS SELECCIONADOS SON: EL 21 DE ABRIL DEL 2009, EL 04 DE MAYO DEL 2009, EL 21 DE SEPTIEMBRE DEL 2009, EL 28 DE DICIEMBRE DEL 2009 Y POR ÚLTIMO, EL 22 DE MARZO DEL 2010. ....	133
FIGURA 61: EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN Y REDUCCIÓN DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES A LO LARGO DEL HUMEDAL FG Y REFERENTES AL 21 DE ABRIL DEL 2009. ....	134
FIGURA 62: EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN Y REDUCCIÓN DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES A LO LARGO DEL HUMEDAL FG Y REFERENTES AL 04 DE MAYO DEL 2009.....	135
FIGURA 63: EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN Y REDUCCIÓN DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES A LO LARGO DEL HUMEDAL FG Y REFERENTES AL 21 DE SEPTIEMBRE DEL 2009.....	136
FIGURA 64: EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN Y REDUCCIÓN DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES A LO LARGO DEL HUMEDAL FG Y REFERENTES AL 28 DE DICIEMBRE DEL 2009. ....	137
FIGURA 65: EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN Y REDUCCIÓN DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES A LO LARGO DEL HUMEDAL FG Y REFERENTES AL 22 DE MARZO DEL 2010. ....	138
FIGURA 66: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN LAS CELDAS EN SERIE GRANDES Y PEQUEÑAS (FG Y FP RESPECTIVAMENTE) Y DE LA CELDA INDEPENDIENTE (F4). TAMBIÉN APARECE REPRESENTADA LA MEDIA DE LA CARGA HIDRÁULICA. LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN NEGATIVOS NO APARECEN REFLEJADOS EN LA FIGURA. LAS LÍNEAS AZUL, VERDE Y MORADA REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2 DE LOS FG, FP Y F4, RESPECTIVAMENTE.....	139
FIGURA 67: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN LOS FILTROS EN SERIE GRANDES. TAMBIÉN APARECE REPRESENTADA LA MEDIA DE LA CARGA HIDRÁULICA. LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN NEGATIVOS NO APARECEN REFLEJADOS EN LA FIGURA. LAS LÍNEAS AZUL, VERDE Y MORADA REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2 DE LOS FG1, FG2 Y FG3, RESPECTIVAMENTE .....	140
FIGURA 68: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN LOS FILTROS EN SERIE PEQUEÑOS. TAMBIÉN APARECE REPRESENTADA LA MEDIA DE LA CARGA HIDRÁULICA. LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN NEGATIVOS NO APARECEN REFLEJADOS EN LA FIGURA. LAS LÍNEAS AZUL, VERDE Y MORADA REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2 DE LOS F1P, F2P Y F3P, RESPECTIVAMENTE.....	141
FIGURA 69: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN EL F4. TAMBIÉN APARECE REPRESENTADA LA MEDIA DE LA CARGA HIDRÁULICA. LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN NEGATIVOS NO APARECEN REFLEJADOS EN LA FIGURA. LA LÍNEA AZUL REPRESENTA LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2 DEL F4.....	142
FIGURA 70: DISTRIBUCIÓN (%) DEL CAUDAL DE ENTRADA AL CONJUNTO DE HUMEDALES.....	144
FIGURA 71: SUPERFICIE EN M <sup>2</sup> DE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE HUMEDALES ARTIFICIALES.....	144
FIGURA 72: MASA DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS ELIMINADA ACUMULADA (Kg SS).....	145
FIGURA 73: MASA DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS ELIMINADA ACUMULADA (Kg SS) A PARTIR DEL MES DE JUNIO DEL 2009. ....	145
FIGURA 74: CONCENTRACIONES DE FÓSFORO TOTAL (MG P/L) EN EL AGUA DE ENTRADA AL SISTEMA POR EL BARRANCO DEL POYO, DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010. LA LÍNEA DISCONTINUA REPRESENTA LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. ....	146
FIGURA 75: CONCENTRACIONES DE ORTOFOSFATOS (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ) Y DE FÓSFORO PARTICULADO, AMBAS MEDIADAS COMO MG P/L, EN EL AGUA DE ENTRADA AL SISTEMA POR EL BARRANCO DEL POYO, DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010. LAS LÍNEAS DISCONTINUAS REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2.....	147
FIGURA 76: CONCENTRACIONES MEDIDAS (MG P/L) EN EL AGUA DE ENTRADA POR EL PUERTO DE CATARROJA, DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010. CABE RECORDAR QUE NO ENTRABA AGUA AL HUMEDAL DESDE ESTA ACEQUIA HASTA LA SEGUNDA QUINCENA DE JUNIO DEL 2009. LA LÍNEA DISCONTINUA REPRESENTA LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2.....	148
FIGURA 77: CONCENTRACIONES DE ORTOFOSFATOS (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ) Y DE FÓSFORO PARTICULADO, AMBAS MEDIADAS COMO MG P/L, EN EL AGUA DE ENTRADA AL SISTEMA POR PUERTO DE CATARROJA, DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010. LAS LÍNEAS DISCONTINUAS REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2.....	149
FIGURA 78: MEDIA (TRAMO INFERIOR) Y DESVIACIÓN TÍPICA (TRAMO SUPERIOR) DE LOS DATOS RECOGIDOS EN LOS PUNTO DE MUESTREO 1.1, 2, 3, 4, 5, 6, Y 7, DURANTE TODO EL PERIODO ANUAL (06/04/2009 AL 22/03/2010). ....	150
FIGURA 79: MEDIA (TRAMO INFERIOR) Y DESVIACIÓN TÍPICA (TRAMO SUPERIOR) DE LOS DATOS RECOGIDOS EN LOS PUNTO DE MUESTREO 1.2 Y 8.2, DURANTE TODO EL PERIODO ANUAL (06/04/2009 AL 22/03/2010).....	150
FIGURA 80: EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL FÓSFORO TOTAL EN LA ENTRADA POR EL BARRANCO DEL POYO (1.1) Y A LA SALIDA DE LAS CELDAS FG3 (6) Y FP3 (7). LAS LÍNEAS REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2.....	151

FIGURA 81: EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL FÓSFORO TOTAL EN LA ENTRADA POR EL BARRANCO DEL POYO (1.1), Y DEL FÓSFORO PARTICULADO Y DEL SOLUBLE A LA SALIDA DE LAS CELDAS <i>FG3</i> (6) Y <i>FP3</i> (7). LAS LÍNEAS REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. ....	152
FIGURA 82: EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL FÓSFORO TOTAL EN LA ENTRADA POR EL PUERTO DE CATARROJA (1.2), ENTRADA AL <i>F4</i> (8.1) Y A LA SALIDA DEL MISMO (8.2). LAS LÍNEAS REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. ....	153
FIGURA 83: EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL FÓSFORO TOTAL EN LA ENTRADA POR EL BARRANCO DEL POYO (1.1), SALIDA DEL TANCAT DE LA PIPA (15) Y ZONA DEL LAGO DE VERTIDO DEL AGUA TRATADA (16). LAS LÍNEAS REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. ....	154
FIGURA 84: EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL FÓSFORO TOTAL EN LA ENTRADA POR EL PUERTO DE CATARROJA (1.2), SALIDA DEL TANCAT DE LA PIPA (15) Y ZONA DEL LAGO DE VERTIDO DEL AGUA TRATADA (16). LAS LÍNEAS REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. ....	155
FIGURA 85: EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL FÓSFORO TOTAL Y DEL FÓSFORO SOLUBLE EN LA ENTRADA POR EL BARRANCO DEL POYO (1.1). LAS LÍNEAS DISCONTINUAS LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. ....	156
FIGURA 86: EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL FÓSFORO TOTAL Y DEL FÓSFORO SOLUBLE EN LA ENTRADA POR EL PUERTO DE CATARROJA (1.2). LAS LÍNEAS DISCONTINUAS REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. ....	156
FIGURA 87: PRECIPITACIÓN REGISTRADA EN LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE PICASSENT (FUENTE: IVIA) Y VALORES DE FÓSFORO INORGÁNICO SOLUBLE RECOGIDOS EN EL BARRANCO DEL POYO. ....	157
FIGURA 88: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA CLOROFILA A EN LA ENTRADA POR EL BARRANCO DEL POYO (1.1). LA LÍNEA REPRESENTA LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. ....	158
FIGURA 89: EVOLUCIÓN DEL FÓSFORO TOTAL LO LARGO DE LAS TRES CELDAS GRANDES EN SERIE. LOS DÍAS SELECCIONADOS SON: EL 06 DE ABRIL DEL 2009, EL 04 DE MAYO DEL 2009, EL 27 DE JULIO DEL 2009, EL 07 DE SEPTIEMBRE DEL 2009 (LÍNEA DISCONTINUA VERDE), EL 21 DE SEPTIEMBRE DEL 2009 (LÍNEA DISCONTINUA ROJA), Y POR ÚLTIMO, EL 01 DE ENERO DEL 2010. ....	159
FIGURA 90: EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE FOSFATOS A LO LARGO DE LAS TRES CELDAS GRANDES EN SERIE EL DÍA 06 DE ABRIL DEL 2009. ....	159
FIGURA 91: EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN Y REDUCCIÓN DEL FÓSFORO TOTAL A LO LARGO DE LOS <i>FG</i> Y REFERENTES AL 06 DE ABRIL DEL 2009. ....	160
FIGURA 92: EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN Y REDUCCIÓN DEL FÓSFORO TOTAL A LO LARGO DE LOS <i>FG</i> Y REFERENTES AL 04 DE MAYO DEL 2009. ....	161
FIGURA 93: EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL FÓSFORO PARTICULADO Y DE LOS FOSFATOS A LO LARGO DEL SISTEMA <i>FG</i> Y REFERENTES AL 04 DE MAYO DEL 2009. ....	161
FIGURA 94: REDUCCIÓN DEL FÓSFORO TOTAL A LO LARGO DE LAS CELDAS GRANDES EN EL PERIODO QUE ABARCA DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 13/07/2009 (AMBOS INCLUSIVE). ....	162
FIGURA 95: EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN Y REDUCCIÓN DEL FÓSFORO TOTAL A LO LARGO DEL SISTEMA <i>FG</i> Y REFERENTES AL 27 DE JULIO DEL 2009. ....	162
FIGURA 96: EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN Y REDUCCIÓN DEL FÓSFORO TOTAL A LO LARGO DEL SISTEMA <i>FG</i> Y REFERENTES AL 07 DE SEPTIEMBRE DEL 2009. ....	163
FIGURA 97: EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN Y REDUCCIÓN DEL FÓSFORO TOTAL A LO LARGO DEL SISTEMA <i>FG</i> Y REFERENTES AL 21 DE SEPTIEMBRE DEL 2009. ....	164
FIGURA 98: EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE FOSFATOS A LO LARGO DEL HUMEDAL <i>FG</i> EL DÍA 21 DE SEPTIEMBRE DEL 2009. ....	164
FIGURA 99: EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN Y REDUCCIÓN DEL FÓSFORO TOTAL A LO LARGO DE LAS CELDAS GRANDES Y REFERENTES AL 13 DE ENERO DEL 2010. ....	165
FIGURA 100: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN DEL FÓSFORO TOTAL EN LAS CELDAS EN SERIE GRANDES Y PEQUEÑAS ( <i>FG</i> Y <i>FP</i> RESPECTIVAMENTE) Y DE LA CELDA INDEPENDIENTE ( <i>F4</i> ). TAMBIÉN APARECE REPRESENTADA LA MEDIA DE LA CARGA HIDRÁULICA. LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN NEGATIVOS NO APARECEN REFLEJADOS EN LA FIGURA. LAS LÍNEAS AZUL, VERDE Y MORADA REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2 DE LOS <i>FG</i> , <i>FP</i> Y <i>F4</i> , RESPECTIVAMENTE. ...	166
FIGURA 101: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN DEL FÓSFORO TOTAL EN LAS CELDAS EN SERIE GRANDES. TAMBIÉN APARECE REPRESENTADA LA MEDIA DE LA CARGA HIDRÁULICA. LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN NEGATIVOS NO APARECEN REFLEJADOS EN LA FIGURA. LAS LÍNEAS AZUL, VERDE Y MORADA REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2 DE LAS <i>FG1</i> , <i>FG2</i> Y <i>FG3</i> , RESPECTIVAMENTE. ....	168
FIGURA 102: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN DEL FÓSFORO TOTAL EN LAS CELDAS EN SERIE PEQUEÑAS. TAMBIÉN APARECE REPRESENTADA LA MEDIA DE LA CARGA HIDRÁULICA. LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN NEGATIVOS NO APARECEN REFLEJADOS EN LA FIGURA. LA LÍNEA AZUL, LA VERDE Y LA MORADA REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2 DE LOS <i>F1P</i> , <i>F2P</i> Y <i>F3P</i> , RESPECTIVAMENTE. ....	169

FIGURA 103: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN DEL FÓSFORO TOTAL EN LA CELDA 4. TAMBIÉN APARECE REPRESENTADA LA MEDIA DE LA CARGA HIDRÁULICA. LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN NEGATIVOS NO APARECEN REFLEJADOS EN LA FIGURA. LA LÍNEA AZUL REPRESENTA LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2 DEL $F4$ .....	170
FIGURA 104: MASA DE FÓSFORO TOTAL ELIMINADA ACUMULADA (KG P) .....	171
FIGURA 105: AJUSTE LINEAL AL FÓSFORO ACUMULADO ELIMINADO (KG P) .....	172
FIGURA 106: AJUSTE LINEAL AL FÓSFORO ACUMULADO ELIMINADO (KG P) EN LAS FECHAS EN QUE LA CARGA HIDRÁULICA ERA DE $0.06 \text{ M}^3/\text{M}^2 \cdot \text{D}$ .....	172
FIGURA 107: AJUSTE LINEAL AL FÓSFORO ACUMULADO ELIMINADO (KG P) EN LAS FECHAS EN QUE LA CARGA HIDRÁULICA ERA DE $0.08 \text{ M}^3/\text{M}^2 \cdot \text{D}$ .....	173
FIGURA 108: CONCENTRACIONES DE NITRÓGENO TOTAL (MG N/L) EN EL AGUA DE ENTRADA AL SISTEMA POR EL BARRANCO DEL POYO, DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010. LA LÍNEA DISCONTINUA REPRESENTA LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. ....	174
FIGURA 109: CONCENTRACIONES DE NITRÓGENO INORGÁNICO DISUELTO (SUMA DE LAS CONCENTRACIONES DE AMONIO, NITRITOS Y NITRATOS <sup>-</sup> ) Y DE NITRÓGENO ORGÁNICO, AMBAS MEDIDAS COMO MG N/L, EN EL AGUA DE ENTRADA AL SISTEMA POR EL BARRANCO DEL POYO, DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010. LAS LÍNEAS REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2 .....	175
FIGURA 110: CONCENTRACIONES MEDIDAS DE AMONIO, NITRITO Y NITRATO, MEDIDAS COMO MG N/L, EN EL AGUA DE ENTRADA POR EL BARRANCO DEL POYO, DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010. LAS LÍNEAS REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2 .....	175
FIGURA 111: CONCENTRACIONES MEDIDAS DE AMONIO, COMO $\text{MG NH}_4^+/\text{L}$ , EN EL AGUA DE ENTRADA POR EL BARRANCO DEL POYO, DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010. LA LÍNEA DISCONTINUA REPRESENTA LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. LA LÍNEA ROJA MARCA EL UMBRAL MÁXIMO FIJADO POR LA INSTRUCCIÓN DE PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA (2008) .....	176
FIGURA 112: CONCENTRACIONES MEDIDAS DE NITRÓGENO TOTAL (MG N/L) EN EL AGUA DE ENTRADA POR EL PUERTO DE CATARROJA, DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010. CABE RECORDAR QUE NO ENTRABA AGUA AL HUMEDAL DESDE ESTA ACEQUIA HASTA LA SEGUNDA QUINCENA DE JUNIO DEL 2009. LA LÍNEA DISCONTINUA REPRESENTA LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2 .....	176
FIGURA 113: CONCENTRACIONES MEDIDAS DE NITRÓGENO SOLUBLE Y DE NITRÓGENO ORGÁNICO, MEDIDAS COMO MG N/L, EN EL AGUA DE ENTRADA POR EL BARRANCO DEL POYO, DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010. LAS LÍNEAS REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2.....	177
FIGURA 114: CONCENTRACIONES MEDIDAS DE AMONIO, NITRITO Y NITRATO, MEDIDAS COMO MG N/L, EN EL AGUA DE ENTRADA POR EL PUERTO DE CATARROJA, DESDE EL 15/06/2009 HASTA EL 22/03/2010. ....	178
FIGURA 115: CONCENTRACIONES MEDIDAS DE AMONIO, COMO $\text{MG NH}_4^+/\text{L}$ , EN EL AGUA DE ENTRADA POR EL PUERTO DE CATARROJA, DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010. LA LÍNEA DISCONTINUA REPRESENTA LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. LA LÍNEA ROJA MARCA EL UMBRAL MÁXIMO FIJADO POR LA INSTRUCCIÓN DE PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA (2008) .....	178
FIGURA 116: MEDIA (TRAMO INFERIOR) Y DESVIACIÓN TÍPICA (TRAMO SUPERIOR) DE LOS DATOS RECOGIDOS EN LOS PUNTO DE MUESTREO 1.1, 2, 3, 4, 5, 6, Y 7, DURANTE TODO EL PERIODO ANUAL (06/04/2009 AL 22/03/2010) .....	179
FIGURA 117: MEDIA (TRAMO INFERIOR) Y DESVIACIÓN TÍPICA (TRAMO SUPERIOR) DE LOS DATOS RECOGIDOS EN LOS PUNTO DE MUESTREO 1.2 Y 8.2, DURANTE TODO EL PERIODO ANUAL (06/04/2009 AL 22/03/2010).....	180
FIGURA 118: EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL NITRÓGENO TOTAL EN LA ENTRADA POR EL BARRANCO DEL POYO (1.1) Y A LA SALIDA DE LAS CELDAS $F3G$ (6) Y $F3P$ (7). LAS LÍNEAS REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2 .....	181
FIGURA 119: EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL NITRÓGENO TOTAL (MG N/L) EN LA ENTRADA POR EL BARRANCO DEL POYO (1.1) Y LOS PORCENTAJES DE ELIMINACIÓN DEL SISTEMA $FG$ . LA LÍNEA REPRESENTA LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2.....	182
FIGURA 120: EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL NITRÓGENO TOTAL (KG N/D) EN LA ENTRADA POR EL BARRANCO DEL POYO (1.1) Y LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN DEL SISTEMA $FG$ . LA LÍNEA REPRESENTA LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2 .....	182
FIGURA 121: EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL NITRÓGENO TOTAL EN LA ENTRADA POR EL PUERTO DE CATARROJA (1.2), ENTRADA AL $F4$ (8.1) Y A LA SALIDA DEL MISMO (8.2). LAS LÍNEAS REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2 .....	184
FIGURA 122: EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL NITRÓGENO TOTAL EN LA ENTRADA POR EL BARRANCO DEL POYO (1.1), SALIDA DEL TANCAT DE LA PIPA (15) Y ZONA DEL LAGO DE VERTIDO DEL AGUA TRATADA (16). LAS LÍNEAS REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2 .....	185
FIGURA 123: EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL NITRÓGENO TOTAL EN LA ENTRADA POR EL PUERTO DE CATARROJA (1.2), SALIDA DEL TANCAT DE LA PIPA (15) Y ZONA DEL LAGO DE VERTIDO DEL AGUA TRATADA (16). LAS LÍNEAS REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2.....	186
FIGURA 124: CONCENTRACIONES DE NITRÓGENO TOTAL (MG N/L) EN EL AGUA DE ENTRADA AL SISTEMA POR EL BARRANCO DEL POYO, DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010. LA LÍNEA DISCONTINUA REPRESENTA LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. ....	187

FIGURA 125: EVOLUCIÓN DEL NITRÓGENO TOTAL LO LARGO DE LAS TRES CELDAS GRANDES EN SERIE. LOS DÍAS SELECCIONADOS SON: EL 06 DE ABRIL DEL 2009, EL 04 DE MAYO DEL 2009, EL 27 DE JULIO DEL 2009, EL 16 DE DICIEMBRE DEL 2009, Y POR ÚLTIMO, EL 10 DE MARZO DEL 2010. ....	188
FIGURA 126: EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN PROMEDIO Y REDUCCIÓN DEL NITRÓGENO TOTAL A LO LARGO DE LOS <i>FG</i> Y REFERENTES AL MES DE ABRIL DEL 2009. ....	189
FIGURA 127: EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE NID (MG N/L) Y DE NITRÓGENO ORGÁNICO (MG N/L) A LO LARGO DEL HUMEDAL <i>FG</i> . ....	190
FIGURA 128: EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN Y REDUCCIÓN DEL NITRÓGENO TOTAL A LO LARGO DE LOS <i>FG</i> Y REFERENTES AL 04 DE MAYO DEL 2009. ....	191
FIGURA 129: EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE NID (MG N/L) Y DE NITRÓGENO ORGÁNICO (MG N/L) A LO LARGO DEL HUMEDAL <i>FG</i> EL 04 DE MAYO DEL 2009. ....	192
FIGURA 130: CONCENTRACIÓN DE NID (MG N/L) EN LA ENTRADA POR EL BARRANCO DEL POYO REFERENTE A LOS DÍAS: 06 DE ABRIL DEL 2009 Y 27 DE JULIO DEL 2009. ....	193
FIGURA 131: CONCENTRACIÓN DE NITRÓGENO ORGÁNICO (MG N/L) EN LA ENTRADA POR EL BARRANCO DEL POYO REFERENTE A LOS DÍAS: 06 DE ABRIL DEL 2009 Y 27 DE JULIO DEL 2009. ....	193
FIGURA 132: EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN Y REDUCCIÓN DEL NITRÓGENO TOTAL A LO LARGO DE LOS <i>FG</i> Y REFERENTES AL 27 DE JULIO DEL 2009. ....	194
FIGURA 133: EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE NID (MG N/L) Y DE NITRÓGENO ORGÁNICO (MG N/L) A LO LARGO DEL HUMEDAL <i>FG</i> . ....	195
FIGURA 134: EVOLUCIÓN DEL NITRÓGENO TOTAL A LO LARGO DE LAS TRES CELDAS GRANDES EN SERIE. LOS DÍAS SELECCIONADOS SON: EL 06 DE ABRIL DEL 2009 Y EL 27 DE JULIO DEL 2009. ....	196
FIGURA 135: CONCENTRACIÓN DE NID (MG N/L) EN LA ENTRADA POR EL BARRANCO DEL POYO REFERENTE A LOS DÍAS: 07 DE OCTUBRE DEL 2009 Y 16 DICIEMBRE DEL 2009. ....	197
FIGURA 136: CONCENTRACIÓN DE NITRÓGENO ORGÁNICO (MG N/L) EN LA ENTRADA POR EL BARRANCO DEL POYO REFERENTE A LOS DÍAS: 07 DE OCTUBRE DEL 2009 Y 16 DICIEMBRE DEL 2009. ....	198
FIGURA 137: EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN Y REDUCCIÓN DEL NITRÓGENO TOTAL A LO LARGO DE LOS <i>FG</i> Y REFERENTES AL 12 DE DICIEMBRE DEL 2009. ....	198
FIGURA 138: EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE NID (MG N/L) Y DE NITRÓGENO ORGÁNICO (MG N/L) A LO LARGO DEL HUMEDAL <i>FG</i> . ....	199
FIGURA 139: EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL AMONIO, NITRATO, NITRITO EN EL BARRANCO DEL POYO (1.1) DURANTE TODO EL PERIODO DE ESTUDIO. ....	200
FIGURA 140: EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL $P_T$ Y DEL $N_T$ EN LA ENTRADA POR EL BARRANCO DEL POYO (1.1). ....	200
FIGURA 141: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN DEL NITRÓGENO TOTAL EN LAS CELDAS EN SERIE GRANDES Y PEQUEÑAS ( <i>FG</i> Y <i>FP</i> RESPECTIVAMENTE) Y DE LA CELDA INDEPENDIENTE ( <i>F4</i> ). TAMBIÉN APARECE REPRESENTADA LA MEDIA DE LA CARGA HIDRÁULICA. LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN NEGATIVOS NO APARECEN REFLEJADOS EN LA FIGURA. LAS LÍNEAS AZUL, VERDE Y MORADA REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2 DE LOS <i>FG</i> , <i>FP</i> Y <i>F4</i> , RESPECTIVAMENTE. ....	201
FIGURA 142: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN DEL NITRÓGENO TOTAL EN LAS CELDAS EN SERIE GRANDES Y PEQUEÑAS ( <i>FG</i> Y <i>FP</i> RESPECTIVAMENTE) Y DE LA CELDA INDEPENDIENTE ( <i>F4</i> ). TAMBIÉN APARECE REPRESENTADA LA CONCENTRACIÓN DE $N_T$ EN LA ENTRADA POR EL BARRANCO DEL POYO (MG/L). LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN NEGATIVOS NO APARECEN REFLEJADOS EN LA FIGURA. LAS LÍNEAS AZUL, VERDE Y MORADA REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2 DE LOS <i>FG</i> , <i>FP</i> Y <i>F4</i> , RESPECTIVAMENTE. ....	202
FIGURA 143: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN DEL NITRÓGENO TOTAL EN LAS CELDAS EN SERIE GRANDES. TAMBIÉN APARECE REPRESENTADA LA CONCENTRACIÓN DE NITRÓGENO TOTAL EN LA ENTRADA POR EL BARRANCO DE POYO. LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN NEGATIVOS NO APARECEN REFLEJADOS EN LA FIGURA. LAS LÍNEAS AZUL, VERDE Y MORADA REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2 DE LAS <i>F1G</i> , <i>F2G</i> Y <i>F3G</i> , RESPECTIVAMENTE. ....	203
FIGURA 144: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN DEL NITRÓGENO TOTAL EN LAS CELDAS EN SERIE PEQUEÑAS. TAMBIÉN APARECE REPRESENTADA LA CONCENTRACIÓN DE NITRÓGENO TOTAL EN LA ENTRADA POR EL BARRANCO DE POYO. LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN NEGATIVOS NO APARECEN REFLEJADOS EN LA FIGURA. LA LÍNEA AZUL, LA VERDE Y LA MORADA REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2 DE LOS <i>F1P</i> , <i>F2P</i> Y <i>F3P</i> , RESPECTIVAMENTE. ....	204
FIGURA 145: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN DEL NITRÓGENO TOTAL EN LA CELDA 4. TAMBIÉN APARECE REPRESENTADA LA CONCENTRACIÓN (MG N/L) A LA ENTRADA DE DICHO HUMEDAL PROVENIENTE DEL PUERTO DE CATARROJA EXCEPTO EN EL PERIODO COMPRENDIDO ENTRE ABRIL Y MEDIADOS DE JUNIO DEL 2009, EN QUE LA CONCENTRACIÓN REPRESENTADAS ES LA QUE PROCEDE DEL BARRANCO DEL POYO. LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN NEGATIVOS NO APARECEN REFLEJADOS EN LA FIGURA. LA LÍNEA AZUL REPRESENTA LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2 DEL <i>F4</i> . ....	205
FIGURA 146: MASA DE NITRÓGENO TOTAL ELIMINADA ACUMULADA (KG). ....	207

FIGURA 147: AJUSTE LINEAL AL NITRÓGENO TOTAL ACUMULADO ELIMINADO (KG N).....	208
FIGURA 148: CONCENTRACIONES DE NITRÓGENO TOTAL (MG N/L) EN EL AGUA DE ENTRADA AL SISTEMA POR EL BARRANCO DEL POYO, DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010. LOS TRAMOS REMARCADOS CON UN TONO DE VERDE MÁS OSCURO REPRESENTAN LOS PERIODOS DE TIEMPO CON CONCENTRACIONES DE NITRÓGENO TOTAL (MG N/L) MAYORES QUE 4 MG N/L Y LOS TRAMOS REMARCADOS CON UN TONO DE VERDE MÁS CLARO REPRESENTAN LOS PERIODOS DE TIEMPO CON CONCENTRACIONES DE NITRÓGENO TOTAL (MG N/L) MENORES QUE 4 MG N/L. ....	209
FIGURA 149: AJUSTE LINEAL AL NITRÓGENO TOTAL ACUMULADO ELIMINADO (KG N) EN EL TRAMO I.....	209
FIGURA 150: AJUSTE LINEAL AL NITRÓGENO TOTAL ACUMULADO ELIMINADO (KG N) EN EL TRAMO II.....	209
FIGURA 151: AJUSTE LINEAL AL NITRÓGENO TOTAL ACUMULADO ELIMINADO (KG N) EN EL TRAMO III.....	210
FIGURA 152: AJUSTE LINEAL AL NITRÓGENO TOTAL ACUMULADO ELIMINADO (KG N) EN EL TRAMO IV. ....	210
FIGURA 153: RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE ELIMINACIÓN DEL NITRÓGENO TOTAL (KG N/D) Y LA CONCENTRACIÓN DE ENTRADA DE $N_T$ DESDE EL BARRANCO DEL POYO. ....	211
FIGURA 154: CONCENTRACIONES DE NITRÓGENO TOTAL (MG CL A /M <sup>3</sup> ) EN EL AGUA DE ENTRADA AL SISTEMA POR EL BARRANCO DEL POYO, DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010. LA LÍNEA DISCONTINUA REPRESENTA LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. ....	213
FIGURA 155: CONCENTRACIONES MEDIDAS (MG CL A /M <sup>3</sup> ) EN EL AGUA DE ENTRADA POR EL PUERTO DE CATARROJA, DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010. CABE RECORDAR QUE NO ENTRABA AGUA AL HUMEDAL DESDE ESTA ACEQUIA HASTA LA SEGUNDA QUINCENA DE JUNIO DEL 2009. LA LÍNEA DISCONTINUA REPRESENTA LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. ....	214
FIGURA 156: CONCENTRACIONES MEDIDAS (MG CL A /M <sup>3</sup> ) EN EL AGUA DE ENTRADA AL SISTEMA F4 (PUNTO 8.1), DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010. LA LÍNEA DISCONTINUA REPRESENTA LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. ....	214
FIGURA 157: CONCENTRACIONES MEDIDAS ( $\mu$ G CL A /L) EN EL BARRANCO DEL POYO Y EN EL PUERTO DE CATARROJA. LA LÍNEA DISCONTINUA REPRESENTA LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. LAS LÍNEAS ROJAS REPRESENTAN LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA A DE 25 MG CL A/M <sup>3</sup> Y LA CONCENTRACIÓN A 75 MG CL A/M <sup>3</sup> . ....	215
FIGURA 158: MEDIA (TRAMO INFERIOR) Y DESVIACIÓN TÍPICA (TRAMO SUPERIOR) DE LOS DATOS RECOGIDOS EN LOS PUNTO DE MUESTREO 1.1, 2, 3, 4, 5, 6, Y 7, DURANTE TODO EL PERIODO ANUAL (06/04/2009 AL 22/03/2010). ....	216
FIGURA 159: MEDIA (TRAMO INFERIOR) Y DESVIACIÓN TÍPICA (TRAMO SUPERIOR) DE LOS DATOS RECOGIDOS EN LOS PUNTO DE MUESTREO 1.2 Y 8.2, DURANTE TODO EL PERIODO ANUAL (06/04/2009 AL 22/03/2010).....	216
FIGURA 160: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA CLOROFILA A EN LA ENTRADA POR EL BARRANCO DEL POYO (1.1) Y A LA SALIDA DE LAS CELDAS F3G (6) Y F3P (7). LAS LÍNEAS REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. ....	217
FIGURA 161: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA CLOROFILA A EN LA ENTRADA POR EL PUERTO DE CATARROJA (1.2), ENTRADA AL F4 (8.1) Y A LA SALIDA DEL MISMO (8.2). LAS LÍNEAS REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. ....	219
FIGURA 162: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA CLOROFILA A EN LA ENTRADA POR EL BARRANCO DEL POYO (1.1), SALIDA DEL TANCAT DE LA PIPA (15) Y ZONA DEL LAGO DE VERTIDO DEL AGUA TRATADA (16). LAS LÍNEAS REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. ....	220
FIGURA 163: EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL CLOROFILA A EN LA ENTRADA POR EL PUERTO DE CATARROJA (1.2), SALIDA DEL TANCAT DE LA PIPA (15) Y ZONA DEL LAGO DE VERTIDO DEL AGUA TRATADA (16). LAS LÍNEAS REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. ....	221
FIGURA 164: CONCENTRACIONES DE CLOROFILA A (MG CL A/M <sup>3</sup> ) EN EL AGUA DE ENTRADA AL SISTEMA POR EL BARRANCO DEL POYO, DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010. LA LÍNEA DISCONTINUA REPRESENTA LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. LOS ÓVALOS ROJOS REPRESENTAN LAS CONCENTRACIONES MENORES DE 50 MG CL A/M <sup>3</sup> . ....	223
FIGURA 165: EVOLUCIÓN DE LA CLOROFILA A A LO LARGO DE LAS TRES CELDAS GRANDES EN SERIE. LOS DÍAS SELECCIONADOS SON: EL 06 DE ABRIL DEL 2009, EL 04 DE MAYO DEL 2009, EL 27 DE JULIO DEL 2009, EL 27 DE DICIEMBRE DEL 2009, Y POR ÚLTIMO, EL 10 DE MARZO DEL 2010. ....	223
FIGURA 166: EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN PROMEDIO Y REDUCCIÓN DE LA CLOROFILA A A LO LARGO DE LOS FG Y REFERENTES AL PERIODO COMPRENDIDO DESDE ABRIL DEL 2009 HASTA EL 15 DE JUNIO DEL 2009, INCLUSIVE.....	224
FIGURA 167: EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN Y REDUCCIÓN LA CLOROFILA A A LO LARGO DE LOS FG Y REFERENTES AL 04 DE MAYO DEL 2009. ....	225
FIGURA 168: EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA A (MG CL A/M <sup>3</sup> ) Y DE NITRÓGENO INORGÁNICO DISUELTO, NID, (MG N/L) EN EL BARRANCO DEL POYO DURANTE TODO EL PERIODO DE ESTUDIO. ....	226
FIGURA 169: CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA A (MG CL A/M <sup>3</sup> ) EN LA ENTRADA POR EL BARRANCO DEL POYO REFERENTE A LOS DÍAS: 01 DE JUNIO DEL 2009 Y 13 DE JULIO DEL 2009. ....	227
FIGURA 170: EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN Y REDUCCIÓN DE LA CLOROFILA A A LO LARGO DE LOS FG Y REFERENTES AL PERIODO COMPRENDIDO DESDE MEDIADOS DE JUNIO DEL 2009 HASTA MEDIADOS DE OCTUBRE DEL 2009 .....	228
FIGURA 171: EVOLUCIÓN DE LA CLOROFILA A A LO LARGO DE LAS TRES CELDAS GRANDES EN SERIE. LOS DÍAS SELECCIONADOS SON: EL 15 DE JUNIO DEL 2009 Y EL 27 DE JULIO DEL 2009. ....	229

FIGURA 172: CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA A ( $\text{MG CL A/M}^3$ ) EN LA ENTRADA POR EL BARRANCO DEL POYO REFERENTE A LOS DÍAS: 07 DE OCTUBRE DEL 2009 Y 30 DE NOVIEMBRE DEL 2009. ....	229
FIGURA 173: EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN Y REDUCCIÓN DE LA CLOROFILA A A LO LARGO DE LOS <i>FG</i> Y REFERENTES AL PERIODO COMPRENDIDO DESDE MEDIADOS DE OCTUBRE DEL 2009 Y HASTA MEDIADOS DE FEBRERO DEL 2010. ....	230
FIGURA 174: EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN Y REDUCCIÓN DE LA CLOROFILA A A LO LARGO DE LOS <i>FG</i> Y REFERENTES AL PERIODO COMPRENDIDO DESDE MEDIADOS DE FEBRERO DEL 2010 HASTA MARZO DEL 2010. ....	231
FIGURA 175: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN DE LA CLOROFILA A EN LAS CELDAS EN SERIE GRANDES Y PEQUEÑAS ( <i>FG</i> Y <i>FP</i> RESPECTIVAMENTE) Y DE LA CELDA INDEPENDIENTE ( <i>F4</i> ). TAMBIÉN APARECE REPRESENTADA LA MEDIA DE LA CARGA HIDRÁULICA. LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN NEGATIVOS NO APARECEN REFLEJADOS EN LA FIGURA. LAS LÍNEAS AZUL, VERDE Y MORADA REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2 DE LOS <i>FG</i> , <i>FP</i> Y <i>F4</i> , RESPECTIVAMENTE. ...	232
FIGURA 176: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN DE LA CLOROFILA A EN LAS CELDAS EN SERIE GRANDES Y PEQUEÑAS ( <i>FG</i> Y <i>FP</i> RESPECTIVAMENTE) Y DE LA CELDA INDEPENDIENTE ( <i>F4</i> ). TAMBIÉN APARECE REPRESENTADA LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA A EN LA ENTRADA POR EL BARRANCO DEL POYO ( $\text{MG CL A/M}^3$ ). LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN NEGATIVOS NO APARECEN REFLEJADOS EN LA FIGURA. LAS LÍNEAS AZUL, VERDE Y MORADA REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2 DE LOS <i>FG</i> , <i>FP</i> Y <i>F4</i> , RESPECTIVAMENTE. ....	234
FIGURA 177: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN DE LA CLOROFILA A EN LAS CELDAS EN SERIE GRANDES. TAMBIÉN APARECE REPRESENTADA LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA A ( $\text{MG CL A/M}^3$ ) EN LA ENTRADA POR EL BARRANCO DE POYO. LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN NEGATIVOS NO APARECEN REFLEJADOS EN LA FIGURA. LAS LÍNEAS AZUL, VERDE Y MORADA REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2 DE LAS <i>F1G</i> , <i>F2G</i> Y <i>F3G</i> , RESPECTIVAMENTE.....	235
FIGURA 178: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN DE LA CLOROFILA A EN LAS CELDAS EN SERIE PEQUEÑAS. TAMBIÉN APARECE REPRESENTADA LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA A ( $\text{MG CL A/M}^3$ ) EN LA ENTRADA POR EL BARRANCO DE POYO. LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN NEGATIVOS NO APARECEN REFLEJADOS EN LA FIGURA. LA LÍNEA AZUL, LA VERDE Y LA MORADA REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2 DE LOS <i>F1P</i> , <i>F2P</i> Y <i>F3P</i> , RESPECTIVAMENTE. ....	236
FIGURA 179: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN DE LA CLOROFILA A EN LA CELDA 4. TAMBIÉN APARECE REPRESENTADA LA CONCENTRACIÓN ( $\text{MG CL A/M}^3$ ) A LA ENTRADA DE DICHO HUMEDAL PROVENIENTE DEL PUERTO DE CATARROJA, EXCEPTO EN EL PERIODO COMPRENDIDO ENTRE ABRIL Y MEDIADOS DE JUNIO DEL 2009, EN QUE LA CONCENTRACIÓN REPRESENTADAS ES LA QUE PROCEDE DEL BARRANCO DEL POYO. LOS RENDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN NEGATIVOS NO APARECEN REFLEJADOS EN LA FIGURA. LA LÍNEA AZUL REPRESENTA LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2 DEL <i>F4</i> . ....	237
FIGURA 180: MASA DE CLOROFILA A ELIMINADA ACUMULADA ( $\text{KG CL A}$ ). ....	239
FIGURA 181: AJUSTE LINEAL A LA CLOROFILA A ACUMULADA ELIMINADA ( $\text{KG CL A}$ ). ....	239
FIGURA 182: CONCENTRACIONES DE CLOROFILA A ( $\text{MG CL A/M}^3$ ) EN EL AGUA DE ENTRADA AL SISTEMA POR EL BARRANCO DEL POYO, DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010. LOS TRAMOS REMARCADOS CON UN TONO DE VERDE MÁS OSCURO REPRESENTAN LOS PERIODOS DE TIEMPO CON CONCENTRACIONES DE CLOROFILA A ( $\text{MG CL A/M}^3$ ) MAYORES QUE 50 $\text{MG CL A/M}^3$ Y LOS TRAMOS REMARCADOS CON UN TONO DE VERDE MÁS CLARO REPRESENTAN LOS PERIODOS DE TIEMPO CON CONCENTRACIONES DE CLOROFILA A ( $\text{MG CL A/M}^3$ ) MENORES QUE 50 $\text{MG CL A/M}^3$ . ....	240
FIGURA 183: AJUSTE LINEAL A LA CLOROFILA A ACUMULADA ELIMINADA ( $\text{KG CL A}$ ) EN EL TRAMO I. ....	241
FIGURA 184: AJUSTE LINEAL A LA CLOROFILA A ACUMULADA ELIMINADA ( $\text{KG CL A}$ ) EN EL TRAMO II. ....	241
FIGURA 185: AJUSTE LINEAL A LA CLOROFILA A ACUMULADA ELIMINADA ( $\text{KG CL A}$ ) EN EL TRAMO III. ....	242
FIGURA 186: AJUSTE LINEAL A LA CLOROFILA A ACUMULADA ELIMINADA ( $\text{KG CL A}$ ) EN EL TRAMO IV. ....	242
FIGURA 187: RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE ELIMINACIÓN DE LA CLOROFILA A ( $\text{KG CL A/D}$ ) Y LA CONCENTRACIÓN DE ENTRADA DE CL A DESDE EL BARRANCO DEL POYO. ....	244
FIGURA 188: CONCENTRACIONES DE OXÍGENO DISUELTO ( $\text{MG O/L}$ ) Y DE LA CONCENTRACIÓN DE SATURACIÓN EN EL AGUA DE ENTRADA AL SISTEMA POR EL BARRANCO DEL POYO Y POR EL PUERTO DE CATARROJA, DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010. LAS LÍNEAS DISCONTINUAS REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. ....	245
FIGURA 189: CONCENTRACIONES DE OXÍGENO DISUELTO ( $\text{MG O/L}$ ) Y DE CLOROFILA A ( $\text{MG CL A/M}^3$ ) EN EL AGUA DE ENTRADA AL SISTEMA POR EL BARRANCO DEL POYO, DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010. LAS LÍNEAS REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. ....	246
FIGURA 190: CONCENTRACIONES DE OXÍGENO DISUELTO ( $\text{MG O/L}$ ) Y DE CLOROFILA A ( $\text{MG CL A/M}^3$ ) EN EL AGUA DE ENTRADA AL SISTEMA POR EL PUERTO DE CATARROJA, DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010. LAS LÍNEAS REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. ....	247
FIGURA 191: CONCENTRACIONES DE OXÍGENO DISUELTO ( $\text{MG O/L}$ ) Y DE SATURACIÓN EN LOS PUNTOS 2,4 Y 6, DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010. LAS LÍNEAS VERDE, AZUL Y ROJO REPRESENTAN LAS MEDIAS MÓVILES CON UN PERIODO DE 2.....	247
FIGURA 192: CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO ( $\text{MG O/L}$ ) Y TEMPERATURA ( $^{\circ}\text{C}$ ) EN EL PUNTO 6, DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010. LAS LÍNEAS REPRESENTAN LAS MEDIAS MÓVILES CON UN PERIODO DE 2. ....	248

FIGURA 193: MEDIA (TRAMO INFERIOR) Y DESVIACIÓN TÍPICA (TRAMO SUPERIOR) DE LOS DATOS RECOGIDOS EN LOS PUNTO DE MUESTREO 1.1, 2, 3, 4, 5, 6, Y 7, DURANTE TODO EL PERIODO ANUAL (06/04/2009 AL 22/03/2010). .....	250
FIGURA 194: MEDIA (TRAMO INFERIOR) Y DESVIACIÓN TÍPICA (TRAMO SUPERIOR) DE LOS DATOS RECOGIDOS EN LOS PUNTO DE MUESTREO 1.2 Y 8.2, DURANTE TODO EL PERIODO ANUAL (06/04/2009 AL 22/03/2010).....	250
FIGURA 195: TEMPERATURA (° C) EN EL AGUA DE ENTRADA AL SISTEMA POR EL BARRANCO DEL POYO Y POR EL PUERTO DE CATARROJA, DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010. LAS LÍNEAS DISCONTINUAS REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. ....	252
FIGURA 196: TEMPERATURA (° C) EN LOS PUNTOS 2,4 Y 6, DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010. LAS LÍNEAS VERDE, AZUL Y ROJO REPRESENTAN LAS MEDIAS MÓVILES CON UN PERIODO DE 2. ....	253
FIGURA 197: MEDIA (TRAMO INFERIOR) Y DESVIACIÓN TÍPICA (TRAMO SUPERIOR) DE LOS DATOS RECOGIDOS EN LOS PUNTO DE MUESTREO 1.1, 2, 3, 4, 5, 6, Y 7, DURANTE TODO EL PERIODO ANUAL (06/04/2009 AL 22/03/2010). ....	254
FIGURA 198: MEDIA (TRAMO INFERIOR) Y DESVIACIÓN TÍPICA (TRAMO SUPERIOR) DE LOS DATOS RECOGIDOS EN LOS PUNTO DE MUESTREO 1.2 Y 8.2, DURANTE TODO EL PERIODO ANUAL (06/04/2009 AL 22/03/2010). ....	255
FIGURA 199: PH (UNIDADES DE PH) EN EL AGUA DE ENTRADA AL SISTEMA POR EL BARRANCO DEL POYO Y POR EL PUERTO DE CATARROJA, DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010. LAS LÍNEAS DISCONTINUAS REPRESENTAN LA MEDIA MÓVIL CON UN PERIODO DE 2. ....	256
FIGURA 200: PH EN LOS PUNTOS 2,4 Y 6, DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010. LAS LÍNEAS VERDE, AZUL Y ROJO REPRESENTAN LAS MEDIAS MÓVILES CON UN PERIODO DE 2. ....	257
FIGURA 201: MEDIA (TRAMO INFERIOR) Y DESVIACIÓN TÍPICA (TRAMO SUPERIOR) DE LOS DATOS RECOGIDOS EN LOS PUNTO DE MUESTREO 1.1, 2, 3, 4, 5, 6, Y 7, DURANTE TODO EL PERIODO ANUAL (06/04/2009 AL 22/03/2010). ....	258
FIGURA 202: MEDIA (TRAMO INFERIOR) Y DESVIACIÓN TÍPICA (TRAMO SUPERIOR) DE LOS DATOS RECOGIDOS EN LOS PUNTO DE MUESTREO 1.2 Y 8.2, DURANTE TODO EL PERIODO ANUAL (06/04/2009 AL 22/03/2010). ....	258
FIGURA 203: CONDUCTIVIDAD ( $\mu\text{S}/\text{CM}$ ) EN EL AGUA DE ENTRADA AL SISTEMA POR EL BARRANCO DEL POYO Y POR EL PUERTO DE CATARROJA, DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010.....	260
FIGURA 204: CONDUCTIVIDAD EN LOS PUNTOS 2,4 Y 6, DESDE EL 06/04/2009 HASTA EL 22/03/2010. LAS LÍNEAS VERDE, AZUL Y ROJO REPRESENTAN LAS MEDIAS MÓVILES CON UN PERIODO DE 2.....	261
FIGURA 205: MEDIA (TRAMO INFERIOR) Y DESVIACIÓN TÍPICA (TRAMO SUPERIOR) DE LOS DATOS RECOGIDOS EN LOS PUNTO DE MUESTREO 1.1, 2, 3, 4, 5, 6, Y 7, DURANTE TODO EL PERIODO ANUAL (06/04/2009 AL 22/03/2010). ....	262
FIGURA 206: MEDIA (TRAMO INFERIOR) Y DESVIACIÓN TÍPICA (TRAMO SUPERIOR) DE LOS DATOS RECOGIDOS EN LOS PUNTO DE MUESTREO 1.2 Y 8.2, DURANTE TODO EL PERIODO ANUAL (06/04/2009 AL 22/03/2010). ....	262
FIGURA 207: RELACIÓN ENTRE EL FÓSFORO TOTAL EN EL PUNTO 6 (SALIDA DE LA CELDA FG3) Y LA TEMPERATURA DEL AGUA EN ESE MISMO PUNTO. FUENTE: BASADO EN KADLEC Y WALLACE (2009). ....	264
FIGURA 208: AJUSTE EXPONENCIAL A LOS VALORES MÁS BAJOS DE FÓSFORO TOTAL EN EL PUNTO 6 (SALIDA DE LA CELDA FG3) PARA DISTINTAS TEMPERATURAS.....	264
FIGURA 209: REPRESENTACIÓN DE LOS VALORES EXPERIMENTALES, AJUSTE EXPONENCIAL Y ECUACIÓN DE ARRHENIUS. ....	265
FIGURA 210: REPRESENTACIÓN DE LOS VALORES EXPERIMENTALES Y DE LOS SIMULADOS, PARA EL $P_T$ EN EL HUMEDAL FG. ....	266
FIGURA 211: REPRESENTACIÓN DE LOS VALORES EXPERIMENTALES Y DE LOS SIMULADOS, PARA LOS $SS_T$ EN EL HUMEDAL FG. ....	267
FIGURA 212: CORRELACIÓN ENTRE LOS VALORES CALCULADOS, MEDIANTE EL MODELO SIMPLE, PARA LOS $SS_T$ A LA SALIDA DEL HUMEDAL FG Y LA CARGA HIDRÁULICA.....	268
FIGURA 213: CORRELACIÓN ENTRE LOS VALORES EXPERIMENTALES DE $SS_T$ A LA SALIDA DEL HUMEDAL FG Y LA CARGA HIDRÁULICA. ....	268
FIGURA 214: REPRESENTACIÓN DE LOS VALORES EXPERIMENTALES Y DE LOS SIMULADOS, DE LA CONCENTRACIÓN DE $P_T$ A LA SALIDA DE LA CELDA FG2.....	269
FIGURA 215: REPRESENTACIÓN DE LOS VALORES EXPERIMENTALES Y DE LOS SIMULADOS, DE LA CONCENTRACIÓN DE $SS_T$ A LA SALIDA DE LA CELDA FG2. ....	270
FIGURA 216: CORRELACIÓN ENTRE LOS VALORES CALCULADOS, MEDIANTE EL MODELO SIMPLE, PARA LOS $SS_T$ EN EL EFLUENTE DE LA CELDA FG2 Y LA CARGA HIDRÁULICA. ....	270
FIGURA 217: CORRELACIÓN ENTRE EL $P_T$ OBSERVADO Y EL SIMULADO. ....	271
FIGURA 218: CORRELACIÓN ENTRE LOS $SS_T$ OBSERVADOS Y LOS SIMULADOS. ....	271

# INTRODUCCIÓN

---



# **1 INTRODUCCIÓN.**

## **1.1 L'ALBUFERA DE VALENCIA.**

El Parque Natural de l'Albufera de Valencia comprende un total de 21.000 hectáreas de superficie y constituye uno de los espacios naturales más representativos e importantes de la Comunidad Valenciana (España).

Uno de sus principales atractivos, es la heterogeneidad de ambientes que presenta, entre los que se encuentra el Lago. Éste está separado del mar Mediterráneo por una estrecha franja arenosa, denominada restinga, cubierta de pinares y monte bajo, conocida como la Dehesa de El Saler. A lo largo de dicha restinga, se abren tres canales de desagüe o "golas" (la de Pujol, El Perellonet y El Perelló).que permiten regular el flujo del agua mediante compuertas que mantienen el nivel de las aguas del lago según las necesidades hídricas de los terrenos limítrofes que se dedican al cultivo de arroz.

Este enclave, en 1986 fue declarado como Parque Natural por la Comunidad Valenciana. En 1990, entró a formar parte de la Lista de Humedales de Importancia Internacional del Convenio Ramsar y un año mas tarde, en 1991 se reconoció a l'Albufera como Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA). Además de los anteriores instrumentos de gestión y conservación, este espacio tan singular posee hábitats y especies recogidos en la Directiva "Hábitat".

### 1.1.1 EL LAGO.

El lago de l'Albufera, es un antiguo golfo marino que quedó aislado del mar por la formación de la restinga. Debido a ello, con el paso del tiempo, el lago fue dulcificándose por los aportes hídricos provenientes de acequias, barrancos y de los "Ullals".

Está situado en la zona centro norte del Parque Natural. Su forma es casi circular, de aproximadamente 8 Km. de diámetro, y una profundidad media de 1.2 m (Soria y Vicente, 2002).



Figura 1: Imagen satélite de l' Albufera de Valencia. Fuente: [www.qva.es](http://www.qva.es)

En el pasado, se estimó que la superficie inicial del lago era de unas 30.000 ha, pero en la actualidad, esta superficie se ha visto reducida a unas 2.800 ha. Esta reducción tan drástica es debido tanto a un proceso natural de colmatación que sucede en todas las albuferas y que da paso a la formación de una marjal (resultado de los aportes, tanto fluviales como marinos, de sedimentos de distintos orígenes), como por la presión humana, la cual ha ayudado a acelerar este proceso. La transformación de estos terrenos pantanosos en campos de cultivo y el desarrollo del proceso urbanizador, han sido claves en la desaparición progresiva de este ecosistema.

Aunque a principios de la década de los 60 era una laguna de aguas limpias, como resultado del crecimiento urbano e industrial y de las agresivas prácticas agrarias que se han ido sucediendo con el tiempo, se ha producido un deterioro de las aguas del lago, pasando de un estado oligotrófico a hipertrófico.

Según las conclusiones extraídas del "Estudio para el Desarrollo Sostenible de l'Albufera de Valencia" (Ministerio de Medio Ambiente, 2004), los problemas con los que hoy en día se enfrenta este singular ecosistema son los siguientes:

- *Aportes hídricos al sistema.* En la actualidad, a pesar de las mejoras en los sistemas de saneamiento y depuración, continúan produciéndose vertidos directos sin depurar de origen urbano o industrial y efluentes procedentes de deficiencias estructurales en las redes unitarias, principalmente en el Colector Oeste, y en todos los municipios comprendidos entre Valencia y Silla, incluidos sus polígonos industriales.
- *Calidad biológica de las aguas del lago.* La calidad biológica del lago se encuentra fuertemente dañada. Los efectos contaminantes de los residuos urbanos e industriales, del uso de pesticidas y de los aterramientos afectan irreversiblemente a la flora acuática, y por ello, a la fauna asociada. Actualmente, el lago es un sistema hipertrófico como consecuencia de entradas excesivas de materia orgánica alóctona y nutrientes inorgánicos. Este exceso genera un gran número de inconvenientes, que repercuten en el lago y que son causa directa de su deterioro.
- *Relación entre sedimentos, metales pesados y el ciclo de nutrientes.* Los ciclos de oxígeno y de nutrientes están desequilibrados. El agua presenta un pH muy elevado, lo que hace que sus sedimentos retengan los metales pesados y nutrientes (fósforo) que recibe, convirtiéndolos en un almacén de materia en el sistema.
- *Aterramiento del lago.* Este proceso natural se ha agravado al haber desaparecido prácticamente la función de la marjal perimetral como trampa de sedimentos, debido a la existencia de una extensa red de canales, acequias, azarbes e instalaciones de bombeo que reducen los tiempos de permanencia del agua por debajo de los necesarios para que se produzca una sedimentación efectiva.
- *Problemas de asignación de usos.* Los usos actuales a los que se ha destinado reducen la variedad de los ambientes y ecosistemas presentes en el entorno. A ello, se le ha de añadir la presión urbanística que se lleva ejerciendo durante los últimos años en las áreas turísticas.
- *Riesgos catastróficos.* Entre ellos, se puede destacar el derivado del almacenamiento de sustancias tóxicas o peligrosas en los polígonos industriales de las cuencas vertientes, que podrían sufrir una movilización masiva si se produjera una inundación de carácter excepcional, lo que inevitablemente acabaría afectando a las llanuras de inundación fluvial, con graves consecuencias ecológicas.

A estos problemas, podríamos añadir otros con carácter más o menos importante, como son la presión cinegética y los impactos debidos a las infraestructuras.

Los aportes hídricos al lago se pueden dividir en función de su calidad y de su procedencia en:

- Vertidos directos de origen urbano e industrial sin previo tratamiento y efluentes procedentes de las estaciones de depuración de aguas.
- Escorrentía natural, de la cual, por un lado tenemos la escorrentía superficial que solamente se produce durante los episodios de lluvia con intensidad y/o duración necesaria como para que se produzca y que además, suele trasportar gran cantidad de sólidos en suspensión. Y por otra parte, también recibe aportes de las aguas subterráneas a través de los denominados “Ullals”, que son la principal fuente de agua de alta calidad del lago. Estos últimos, se encuentran en vías de total desaparición debido a la colmatación de su salida por sedimentos y a la apertura de pozos. No obstante, en los últimos años, se han llevado a cabo una serie de actuaciones para recuperar ambientalmente algunos “Ullals” situados en el Parque.
- Retornos del agua de riego cuya calidad se ve afectada por diversos aportes de origen antrópico.

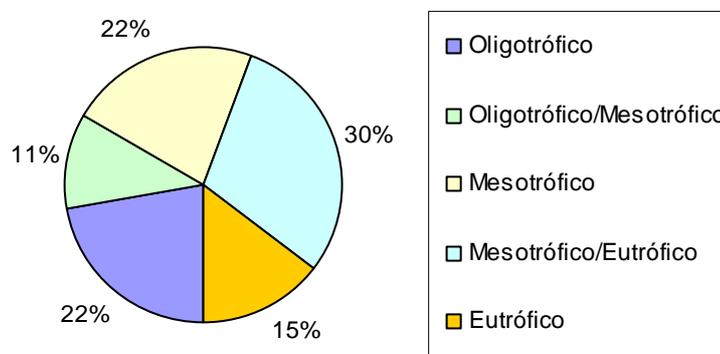
Es necesario señalar que las aportaciones de agua dulce a l’Albufera se han visto reducidas durante los últimos tiempos. Más concretamente, las procedentes del Júcar. Esta reducción, esta teniendo consecuencias importantes en el estado ecológico del Parque.

## **1.2 EUTROFIZACIÓN.**

Según la Real Academia Española, se define eutrofización como el “Incremento de sustancias nutritivas en aguas dulces de lagos y embalses, que provoca un exceso de fitoplancton”. Dichas sustancias nutritivas suelen ser el fósforo en masas de agua dulce y el nitrógeno en zonas costeras y mares.

En la actualidad, la eutrofización de sistemas naturales de aguas superficiales es un problema muy extendido en las zonas más habitadas e industrializadas del planeta. Este proceso no solo afecta al uso del agua para riego y para consumo humano sino que también tiene efectos adversos en los ríos y fauna vinculados con estos cuerpos de agua.

En las zonas semiáridas, el proceso de eutrofización se ve reforzado por la temperatura y la luz, que son dos factores claves en la producción biológica. Además de ello, la evapotranspiración potencial excede a las precipitaciones, y como resultado se produce una pérdida de agua de buena calidad que no es reemplazada por agua de lluvia, quedando las sustancias disueltas ( por ejemplo, el fósforo) con concentraciones más altas que en las zonas húmedas.



**Figura 2: Estado trófico de los embalses de la cuenca del Júcar (España). Fuente: "European Environment Agency".**

La clasificación del estado de eutrofización depende de varios factores siendo el parámetro más utilizado la población de fitoplancton, cuya cantidad de biomasa se suele expresar como concentración de clorofila  $a$ .

El informe de la OCDE, de 1982, establece la siguiente clasificación en función de la concentración de clorofila  $a$ , la transparencia (medida con el disco de Secchi) y la concentración de fósforo total:

Tabla 1: Valores límite de clasificación trófica para un sistema. Informe OCDE (1982).

	Clorofila $\alpha$ Medias (mg/m <sup>3</sup> )	Clorofila $\alpha$ Máximas (mg/m <sup>3</sup> )	Transparencia Media de Secchi (m)	Transparencia Mínimo de Secchi (m)	Fósforo Total (mg P/l)
Ultraoligotrófico	< 1	< 2.5	> 12	> 6.0	
Oligotrófico	< 2.5	< 8.0	> 6.0	> 3.0	< 0.015
Mesotrófico	2.5-8	8-25	6-3	3-1.5	0.015-0.025
Eutrófico	8-25	25-75	3-1.5	1.5-0.7	0.025-0.100
Hipereutrófico	> 25	> 75	< 1.5	< 0.7	> 0.100

Como se ha indicado al inicio del presente apartado, la principal causa de eutrofización es la entrada de elementos nutritivos de diversa procedencia (aguas residuales urbanas, industriales, residuos agrícolas, etc.) en los cuerpos de agua. Los nutrientes más efectivos son el nitrógeno y el fósforo, debido a que en los sistemas acuáticos naturales, se encuentran en muy bajas concentraciones. Se trata de los denominados nutrientes limitantes; ya que condicionan el crecimiento de las poblaciones vegetales.

De estos dos elementos, el primero puede ser extraído de la atmosfera e incorporado en la masa de agua, gracias a los organismos fijadores de nitrógeno (cianobacterias), siendo por tanto el fósforo el verdadero limitante de este proceso de producción primaria. Por tanto, si existe un aporte de nutrientes al sistema, se producirá un crecimiento de las plantas y de otros organismos.

Cuando se produce un aporte excesivo de fósforo, este se acumula dentro de las células de las algas, que lo utilizarán posteriormente para multiplicarse, provocando consecuentemente una proliferación vegetal excesiva y que el elemento limitante pase a ser el nitrógeno. Como resultado, se ve favorecida la aparición de cianobacterias en la superficie del sistema capaces de fijar el nitrógeno atmosférico.

Este "Bloom" de algas, no se mantiene indefinidamente. Llega un momento, en que el sistema se colapsa y los nutrientes se agotan, por lo que las algas no pueden seguir creciendo. Además, el crecimiento excesivo de cianobacterias en superficie, crea una capa superficial que impide la penetración de la luz y el intercambio de oxígeno con la atmosfera.

En ese momento, se produce la muerte de estos organismos fotosintéticos. Nuevos aportes de nutrientes y la entrada de luz en el sistema, permitirán un nuevo crecimiento vegetal.

La materia orgánica tanto alóctona (vertidos) como autóctona (fitoplancton u otros seres vivos) es biodegrada, aportando nuevos nutrientes al sistema y consumiendo oxígeno disuelto. Por la noche, la respiración de los organismos vivos también consume oxígeno, llegando a producir periodos de anoxia en el sistema. En estas condiciones, críticas para la vida de los organismos acuáticos, se desarrollan procesos de fermentación que dan lugar a la aparición de  $\text{SH}_2$  (sulfhídrico) y  $\text{NH}_3$  (amoníaco), responsable del mal olor de estos sistemas y  $\text{CH}_4$  (metano).

Los sedimentos en estos sistemas son también una fuente importante de nutrientes limitantes (sobre todo del fósforo), y de materia orgánica. Por ello, los sedimentos también ejercen una demanda de oxígeno para la biodegradación y son un punto esencial en la gestión de los sistemas eutrofizados a la hora de reducir la entrada de nutrientes.

Como se puede deducir por lo comentado anteriormente, no solo la disponibilidad de nutrientes en el medio es el factor que determina el crecimiento de la biomasa algal, sino que también, son vitales otros factores como por ejemplo la cantidad de luz recibida por estos organismos.

En resumen, los factores que determinan el crecimiento del fitoplancton son:

- La disponibilidad y concentración de los nutrientes inorgánicos. Básicamente se trata del nitrógeno y del fósforo, ya que el carbono suele encontrarse en altas concentraciones (debido a que procede de la atmósfera) y el silicio es limitante solo para determinados tipos de algas (diatomeas). Únicamente podría llegar a ser limitante el carbono, bajo las condiciones más extremas, en las que el metabolismo fuera extremadamente elevado y no existiera turbulencia, de modo que se impediría el paso del carbono desde la atmósfera.
- La intensidad luminosa disponible (tanto en la superficie como en el resto de la columna de agua).
- La temperatura del agua.

- Los mecanismos que permiten a los organismos mantenerse dentro de la zona fótica ante las alteraciones de las tasas de sedimentación (Wetzel, 1981).
- Los micronutrientes inorgánicos y las interacciones entre compuestos orgánicos y nutrientes inorgánicos disponibles (Wetzel, 1981).
- Los factores biológicos de competencia por los recursos disponibles requeridos y la depredación por otros organismos (Wetzel, 1981).

Al incrementarse la tasa de producción algal, debido a las entradas de nutrientes inorgánicos, se produce un aumento de las densidades poblacionales de fitoplancton que reducen progresivamente la luz disponible y la profundidad de la zona fótica. Como consecuencia, aunque exista un exceso de nutrientes, se alcanza un punto en el cual la propia sombra, inhibe el crecimiento de estas poblaciones.

La máxima productividad fotosintética se da, en condiciones de temperatura y nutrientes constantes, para una determinada intensidad lumínica denominada intensidad óptima. En el medio natural, el fitoplancton rara vez se encuentra expuesto a la intensidad lumínica óptima. En la superficie, pueden producirse fenómenos de fotoinhibición debidos a la recepción de intensidades de luz demasiado altas, pero también en profundidad, debido al defecto de luz. No obstante, la respuesta a la intensidad de la luz es variable según las especies, y en muchas de ellas aparecen procesos de adaptación a los cambios en la intensidad de luz.

En los lagos es frecuente observar una distribución vertical de la fotosíntesis, en la cual se distingue una zona superior con elevadas tasas fotosintéticas, seguida de una caída más o menos exponencial de las mismas, conforme aumenta la profundidad. Esta caída se ve favorecida por el aumento de la turbidez del agua (debido a vertidos con altas concentración de sólidos suspendidos, por la propia densidad fitoplanctónica, etc.).

Los efectos ecológicos de la luz y la temperatura sobre la fotosíntesis y el crecimiento de las algas son inseparables, debido a las interrelaciones entre metabolismo y saturación de la luz (Wetzel, 1981).

Los vertidos que llegan a los lagos, pueden modificar la temperatura de estos. Las especies tienen un rango de tolerancia a la temperatura, de modo que su desarrollo óptimo

se encuentra para una temperatura dada. Un aumento de temperatura por debajo del umbral límite, favorece el crecimiento del fitoplancton, siempre que la cantidad de nutrientes y de radiación solar sean favorables.

Algunos de los procesos que se desencadenan debido a la eutrofización de los medios acuáticos son:

- Aumento de la producción y de la biomasa de los productores primarios (fitoplancton y macrófitos).
- Modificación de las características de la masa de agua provocando una pérdida de calidad de las mismas.
- Sustitución de especies piscícolas deseables por otras que lo son mucho menos.
- Producción de toxinas por determinadas algas.
- Disminución del oxígeno del agua, pudiendo ocasionarse mortandad en los peces.
- Colmatación y obstrucción en los canales de riego por la presencia de malas hierbas acuáticas.
- Reducción de la posibilidad de uso del agua para fines recreativos debido a los malos olores producidos por la descomposición de las algas.
- Impedimentos a la navegación por el crecimiento de densas masa de algas.
- Aumento de los gastos de operación de los sistemas públicos de abastecimiento de agua por problemas de olor y sabor.
- Importantes pérdidas económicas.
- Importantes pérdidas de biodiversidad.
- Degradación del ecosistema.

### 1.2.1 EJEMPLO DE UN SISTEMA HIPEREUTROFIZADO: EL LAGO DE L'ALBUFERA DE VALENCIA.

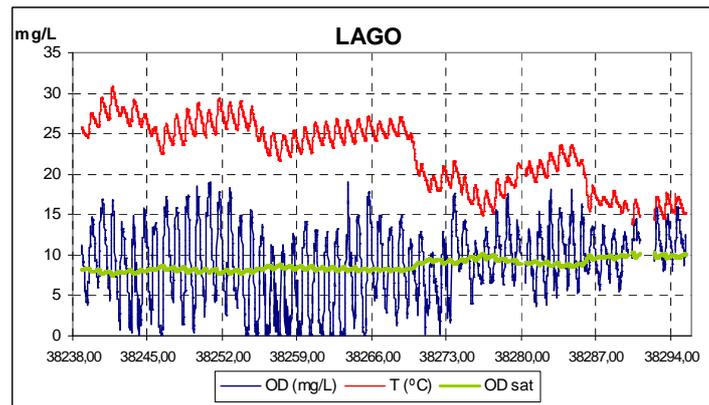
Según la clasificación trófica de la OCDE (1982), el lago de l'Albufera es un sistema hipertrófico ya que, sus niveles de Clorofila  $a$  han oscilado desde 318 mg/m<sup>3</sup> del año 1980-1988 a 163 mg/m<sup>3</sup> en los años 1995-2000. Este marcado descenso, parece coincidir con el inicio del Plan de Saneamiento de l'Albufera (*Estudio para el desarrollo sostenible de la Albufera de Valencia*, 2004).

Soria (2006), señala la entrada excesiva al lago de materia orgánica alóctona y de nutrientes inorgánicos, principalmente compuestos de nitrógeno y fósforo, como responsable del estado actual del mismo, es decir, del estado de hipertrofia.

Por otra parte, estos valores de clorofila  $a$  presentan variaciones anuales. Se observan dos máximos de clorofila  $a$ , uno bien entrado la primavera (mayo) y otro a inicios del otoño (finales de septiembre, octubre). Los valores mínimos suelen aparecer en agosto y a finales de invierno (fenómeno relacionado con las *fases claras* comentadas con anterioridad).

En los últimos tiempos, el grupo de fitoplancton predominante en l'Albufera han sido las cianofíceas o algas verde azuladas (división Cyanophyta). Determinados tipos de estas algas tienen la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico libre (N<sub>2</sub>), a través de unas células especiales denominadas heterocistes, reduciéndolo a iones amonio. Este grupo de algas, pueden ser utilizados como bioindicadores de la contaminación de las aguas, ya que son abundantes en las aguas eutrofizadas.

En un sistema hipereutrofizado, un parámetro íntimamente relacionado con la concentración de fitoplancton es la concentración de sólidos suspendidos, por ello su valor siempre está por encima de los 25 mg SS/l (valor máximo recogido en la DIRECTIVA 2006/44/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 6 de septiembre de 2006 relativa a la calidad de las aguas continentales que requieren protección o mejora para ser aptas para la vida de los peces). Además, la mayor parte de la materia orgánica particulada del sistema procede del propio fitoplancton y el excesivo crecimiento de éste, provoca grandes oscilaciones diarias en la concentración de oxígeno, siendo muy elevada durante el día (en ocasiones por encima de la concentración de saturación) y disminuyendo drásticamente durante la noche (consecuencia del alto consumo de oxígeno provocado por la respiración del abundante fitoplancton).



**Figura 3: Evolución oxígeno disuelto. Fuente: Pruebas preliminares en zona piloto sobre la relación entre los sedimentos, los metales pesados y el ciclo de nutrientes.**

En la ilustración anterior se observa, además de las oscilaciones diarias en la concentración de oxígeno disuelto, cómo en momentos puntuales se pueden alcanzar condiciones de anoxia y también, la influencia de la temperatura en la actividad fotosintética, siendo esta última mayor a temperaturas más elevadas.

Otra característica típica de estos sistemas es que las concentraciones de fósforo total y nitrógeno total sean elevadas, dado que la mayor parte de estos se encuentra formando parte del fitoplancton, y además que las concentraciones de nutrientes inorgánicos, o al menos la del nutriente limitante, sean muy bajas. En el lago, la concentración de nitratos se encuentra entorno a 1 mg N/L, la de nitrógeno amoniacal, normalmente, por debajo de 0,1 mg N/L, la de fósforo inorgánico (fosfatos) suele estar por debajo de 0,01 mg P/L, la de fósforo total alrededor de los 0,3 mg P/L y por último, la de nitrógeno total, sobre los 4 mg P/L. No obstante, las concentraciones de nitratos son muy variables ya que es un parámetro muy afectado por la actividad fitoplanctónica, por la presencia de nitrógeno amoniacal, la presencia de oxígeno y la variabilidad de los aportes externos mediante la agricultura.

La intensa actividad fitoplanctónica que se sucede en el lago, provoca que los valores diarios del pH rara vez se encuentren por debajo de 8,5, como resultado del consumo de grandes cantidades de  $\text{CO}_2$ , que provocan al mismo tiempo, un desplazamiento del equilibrio del carbonato hasta la formación de este gas.

Por último, otras características del lago son:

- poblaciones fitoplancton no controladas por zooplancton dado que la abundancia del último es muy reducida frente a la del primero.

- Proliferación casi permanente de algas.
- Dominancia de unos pocos grupos de fitoplancton. Habitualmente ciertas diatomeas y cianofíceas.
- Desaparición de la vegetación macrófita del fondo de los lagos debido, a la extinción de la luz en las capas más superficiales, a la escasa o nula concentración de oxígeno y al carácter reductor de los sedimentos.
- Aparición de formas tóxicas de compuestos nitrogenados ( $\text{NH}_3$ ).
- Liberación de sulfhídrico como consecuencia de la degradación anaeróbica que se da en los sedimentos durante los periodos de anoxia, provocando el mal olor de las aguas.
- Pérdida de la mayor parte de las especies filtradoras de zooplancton.
- Pobreza de la fauna bentónica y asociada a plantas. Ello determina la reproducción y permanencia de los peces y aves en el lago.
- Disminución de la biodiversidad. Desaparición o disminución drástica de especies de gran importancia económica y ecológica, como las “gambetes”, el “fartet” o el “samaruc”.
- Incremento de la tasa de colmatación del lago.
- Muertes masivas de peces y otros organismos en momentos puntuales.

No obstante, a pesar del mal estado en el que se encuentran las aguas del lago, desde finales de los años 90, se ha ido sucediendo en el mismo la aparición de *fases claras* durante las cuales, se produce una fuerte reducción de la población de fitoplancton. Ello origina un incremento de la transparencia en el lago durante unos días o semanas. Este fenómeno es debido por una lado, a la sustitución de algas de mayor tamaño (algas verdes filamentosas) por algas de menor tamaño o microalgas (diatomeas, entre otras). Esta sucesión poblacional permite la aparición y mantenimiento de zooplancton filtrador (por ejemplo la *Daphnia*) que

a su vez ejerce un control sobre las poblaciones de microalgas, llegando a establecerse un equilibrio e impidiendo las explosiones poblacionales de estas últimas. Por otro lado, también influye en la existencia de estas fases claras, el flujo de aguas limpias procedentes del vaciado de los arrozales que se produce en invierno tras la “perelloná”, la mejora de las infraestructuras de saneamiento en el entorno de l’ Albufera y la reducción de la entrada de nutrientes al lago.

### **1.2.2 RESTAURACIÓN DE SISTEMAS EUTROFIZADOS.**

Las primeras medidas aplicadas sobre estos sistemas, han consistido en reducir la entrada de nutrientes a los mismos:

- Tratando previamente las aguas residuales.
- Modificando la composición de las sustancias que los originan (por ejemplo el fósforo en los detergentes).
- Desviando los caudales de aguas residuales hacia otras zonas mucho menos sensibles.
- Gestionando de manera más eficaz el uso de fertilizantes.

Se ha comprobado, que esta acción no es suficiente para regresar al estado ecológico anterior al proceso de eutrofización. En numerosos casos, el propio sistema aporta los nutrientes suficientes desde el sedimento, por lo que a largo plazo no dan buenos resultados. Por tanto, no solo hay que actuar sobre los aportes externos, sino que además, se han de realizar actuaciones dentro del propio sistema como por ejemplo:

- El dragado completo del sistema. De este modo se elimina la capa de sedimentos que acabará siendo fuente de nutrientes.
- La fijación de fósforo en los sedimentos, mediante la adición de algún compuesto químico. De esta forma, se impide que se movilice este elemento hacia la columna de agua inmediatamente superior.
- El empleo de humedales artificiales para tratar las aguas eutrofizadas.

Además, también es importante realizar aportes de agua en cantidad y en calidad. Algunas medidas en relación con ello serían la recuperación de los “Ullals” y los aportes de desembalses.

### **1.2.2.1 ECOTECNOLOGÍA.**

Los métodos ecotecnológicos han sido empleados por países desarrollados como Estados Unidos, Europa, Australia y Japón en la restauración de sus degradados ecosistemas de aguas dulces (Collins, 2008).

En la bibliografía se define ecotecnología como el uso de medios tecnológicos para la gestión de los ecosistemas, basado en la comprensión profunda de la ecología, para minimizar el coste de las medidas y sus daños al ambiente.

En la bibliografía encontramos definida la ingeniería ecológica y ecotecnología como el diseño de la sociedad humana con su entorno natural para el beneficio de ambos.

Los principales objetivos de la ingeniería ecológica y la ecotecnología abarcan (Collins, 2008):

- Restauración de ecosistemas que han sido sustancialmente perturbados por impactos humanos tales como la contaminación ambiental, cambio climático o perturbación de la tierra.
- Desarrollo de nuevos ecosistemas sostenibles, que tiene tanto valores ecológicos como humanos y la identificación y protección de los valores que soportan la vida en los ecosistemas.

En los problemas de contaminación de aguas, los métodos ecotecnológicos son a menudo utilizados por su capacidad natural a adsorber una cierta cantidad de contaminantes. De aquí se deduce, que la naturaleza tiene una capacidad limitada para adsorber la contaminación.

**Tabla 2: Algunos métodos ecotecnológicos aplicados en la restauración de lagos. Fuente: Adaptado de Collins, 2008.**

Método	Problema a resolver	
	En lagos eutrofizados.	En lagos ácidos.
<b>Humedales Artificiales</b>	Eliminación de nitrógeno y fósforo desde fuentes difusas.	Tratamiento de los efluentes ácidos
<b>Pre-embalse (preimpoundment)</b>	Reducción de entradas de Nitrógeno y Fósforo	
<b>Biomanipulación</b>	Incremento del consumo de fitoplancton.	Incremento del consumo de fitoplancton.
<b>Eutrofización controlada (controlled eutrophication)</b>	No aplicable	Promoción de la producción primaria, de ese modo se neutraliza el ácido.

- **Humedales artificiales:** los humedales juegan un papel crítico en reducir la contaminación de fuentes no puntuales por intercepción de la escorrentía superficial, flujo subsuperficial y ciertas aguas subterráneas. Su papel en la mejora de calidad de agua incluye el procesamiento, eliminación, transformación y almacenamiento de contaminantes tales como los sedimentos, nitrógeno, fósforo y ciertos metales pesados. Por lo tanto humedales amortiguan las aguas recibidas de los efectos de los contaminantes, o evitan la entrada de contaminantes en las aguas receptoras (Collins, 2008).

### 1.3 MARCO LEGISLATIVO.

Debido a la creciente presión a la que están sometidas las aguas de la Comunidad Europea, surge la necesidad de tomar medidas para protegerlas, tanto en cantidad como en calidad. Con este fin, entra en vigor el 22 de diciembre de 2000, la Directiva Marco del Agua (DMA): *nace como respuesta a la necesidad de unificar las actuaciones en materia de gestión de agua en la Unión Europea.*

En el artículo 1 de la citada directiva se señala el objeto de la misma: *establecer un marco para la protección de las aguas superficiales continentales, las aguas de transición, las aguas costeras y las aguas subterráneas* para que entre otras acciones:

- *prevenga todo deterioro adicional y proteja y mejore el estado de los ecosistemas acuáticos y, con respecto a sus necesidades de agua, de los ecosistemas terrestres y humedales directamente dependientes de los ecosistemas acuáticos;*
- *promueva un uso sostenible del agua basado en la protección a largo plazo de los recursos hídricos disponibles;*
- *contribuya a paliar los efectos de las inundaciones y sequías*

<<Los Estados miembros deben tratar de lograr el objetivo mínimo del buen estado de las aguas mediante la definición y aplicación de las medidas necesarias dentro de los programas integrados de medidas, teniendo en cuenta los requisitos comunitarios existentes. >>

En el artículo 4 se señala:

<<los Estados miembros habrán de **proteger, mejorar y regenerar todas las masas de agua superficial**, sin perjuicio de la aplicación del inciso iii) por lo que respecta a las masas de agua artificiales y muy modificadas, con objeto de **alcanzar un buen estado de las aguas superficiales** a más tardar **quince años después** de la entrada en vigor de la presente Directiva, de conformidad con lo dispuesto en el anexo V, sin perjuicio de la aplicación de las prórrogas establecidas de conformidad con el apartado 3, de la aplicación de los apartados 4, 5 y 6 y no obstante lo dispuesto en el apartado 7>>

El actual Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, creó el programa A.G.U.A. (Actuaciones para la Gestión y la Utilización del Agua) con el objeto de reorientar la política del agua en España. A través de este programa, el Ministerio ha adoptado una serie de medidas medioambientales con el objetivo de recuperar la calidad ecológica que contaba el lago de l' Albufera de Valencia en los años 60. Por tanto, en el Programa A.G.U.A.-Albufera se propone un conjunto de actuaciones cuyo objetivo final será la regeneración de l' Albufera de Valencia y su entorno más próximo. *Para ello, se presentan una serie de actuaciones que centrarán en la erradicación de los aportes contaminados al lago y la dotación de recursos fluviales de calidad, en frenar la entrada masiva de sólidos procedentes de la pérdida del*

*suelo tras episodios de lluvias intensas, así como realizar un control, seguimiento y evaluación de ciertos indicadores medioambientales, reflejo de la evolución del entorno a recuperar.*

El programa engloba 4 líneas de trabajo:

- Programa 1. – Rehabilitación del lago y del marjal: con actuaciones de mejora en las infraestructuras de saneamiento y recuperación de aportes.
- Programa 2. – Control de los procesos de aterramiento: con actuaciones de reforestación y prevención de avenidas
- Programa 3. – Seguimiento y evaluación: mediante la implantación de redes de control e investigación.
- Programa 4. – Red de itinerarios medioambientales interpretativos: con la creación de un humedal artificial en el Tancat de la Pipa

Las actuaciones llevadas a cabo en el Tancat de la Pipa, están incluidas en el marco de Programación y Regeneración de Espacios Naturales subvencionables con fondos europeos (FEDER). Se trata de obras de carácter de “Interés General” englobadas dentro del Marco Comunitario de Apoyo para las regiones españolas objetivo 1 en su Programa Operativo de la Comunidad Valenciana en el eje 3 (medio ambiente, entorno natural y recursos hídricos), medida 6 (protección y regeneración del entorno natural ) del Programa Operativo FEDER.

Las actuaciones previstas para la restauración de los hábitats y la adecuación para el uso público del Tancat de la Pipa, en la desembocadura del Poyo en el Lago de l’Albufera, quedan incluidas en la zona de afección del “Proyecto de restitución y adaptación de cauces naturales de los barrancos Poyo, Torrente, Chiva y Pozalet (Valencia)” presentado por la Confederación Hidrográfica del Júcar, en el que se proponía ampliar la superficie del cauce en su desembocadura y modificar la tipología de los taludes con el objeto de minimizar los efectos de las avenidas torrenciales que se suceden ocasionalmente.

El objeto de la actuación da cumplimiento a lo establecido en el artículo 1 de la Directiva Marco de Agua al prevenir de deterioros adicionales del cauce, proteger y mejorar

el estado de los ecosistemas acuáticos y terrestres, promover un uso sostenible del agua y contribuir a paliar los efectos de las inundaciones.

## OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN



## **2 OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN.**

El 22 de diciembre de 2000, entró en vigor la Directiva Marco del Agua (DMA), en la que se establece que *los Estados miembros deben tratar de lograr el objetivo mínimo del buen estado de las aguas mediante la definición y aplicación de las medidas necesarias dentro de los programas integrados de medidas*. En base a ello, dentro de las actuaciones llevadas a cabo por las administraciones públicas, con el objetivo final de lograr la regeneración de l' Albufera de Valencia y su entorno más próximo, se crea un sistema de humedales artificiales de flujo superficial en el Tancat de la Pipa destinado a mejorar la calidad del agua del lago.

Dicho humedal trata las propias aguas del lago, por tanto, aguas eutrofizadas, al producirse en él un conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos, que permiten la conversión de la materia orgánica fitoplanctónica presente en agua del lago, en nutrientes, así como, la de éstos en materia orgánica en forma de biomasa vegetal. Para la eliminación de los nutrientes del sistema, periódicamente se procede a la recolección de esta biomasa vegetal. El agua tratada permitirá favorecer el desarrollo de comunidades biológicas prioritarias y potenciar la recuperación de especies raras y amenazadas que no obstante, están presentes de forma natural en este tipo de ambientes.

El presente estudio tiene como objetivo principal el análisis de los rendimientos obtenidos, en cuanto a parámetros de calidad de agua, durante el primer año de funcionamiento del humedal artificial de flujo superficial emplazado en el "Tancat de La Pipa" (Albufera de Valencia). También se obtendrán parámetros de diseño, extrapolables a otros lugares y además a escala real, de los humedales artificiales de flujo superficial para tratar aguas eutrofizadas. Por último, se elaborarán modelos empíricos como fase previa al desarrollo de un modelo matemático general, que represente la interacción entre las plantas, el agua y el sedimento en el sistema de tratamiento.

Para la consecución de los objetivos ha sido necesario:

- Llevar a cabo una revisión de trabajos realizados en el ámbito de estudio con la finalidad de conocer la situación actual del Parque Natural de l'Albufera de Valencia, la evolución

de la calidad de las aguas del lago, el estado actual del lago y los procesos que han conducido a tal situación, etc.

- Realizar también, una revisión bibliográfica, tanto del funcionamiento de los humedales artificiales destinados a depuración de aguas, como de experiencias en otros lugares, en su uso como sistemas de tratamiento de aguas eutrofizadas.
- Llevar a cabo muestreos quincenales, desde el 6 de abril del 2009 hasta el 22 de marzo del 2010, de todos los puntos seleccionados para el control del funcionamiento del humedal. En cada punto, además de tomar muestra de agua para su posterior análisis en el laboratorio, se miden *in situ* parámetros físico-químicos (temperatura, pH, conductividad y oxígeno disuelto).
- Las muestras de agua recogidas, son analizadas para demanda química de oxígeno soluble y total (DQO), nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_4^+ \text{--} \text{N}$ ), nitratos ( $\text{NO}_3^- \text{--} \text{N}$ ), nitritos ( $\text{NO}_2^- \text{--} \text{N}$ ), ortofosfatos ( $\text{PO}_4^{2-} \text{--} \text{P}$ ), sílice (Si), sólidos suspendidos totales y volátiles ( $\text{SS}_T$  y  $\text{SSV}$ ), fósforo total ( $\text{P}_T$ ) y nitrógeno total ( $\text{N}_T$ ). Además, también se determina en todos los puntos, la cantidad de clorofila  $a^1$ , como medida indirecta de la biomasa de fitoplancton presente en cada uno de ellos.
- Durante todo el periodo anual, se han realizado mediciones de los caudales de entrada y de salida de los humedales. Estos caudales se encuentran expuestos en otro trabajo (Angarita, 2010).
- Los resultados obtenidos, tanto de las mediciones *in situ* como de los análisis químicos, se recogen en Hojas de cálculo elaboradas al efecto. Ellos nos permite calcular los rendimientos obtenidos en la eliminación de todos los contaminantes estudiados en cada humedal así como en el conjunto del sistema. También nos ha permitido estudiar la evolución de esos rendimientos a lo largo del ciclo anual, llevar a cabo medidas para mejorarlos, etc.
- Se han analizado y discutido los resultados obtenidos durante el primer año de operación de humedal artificial y se han comparado los resultados obtenidos con los encontrados

---

<sup>1</sup> Estos trabajos fueron llevados a cabo por el grupo de investigación del *Institut Cavanilles de Biodiversitat i Biologia Evolutiva*.

en la bibliografía. Además se han obtenido una serie de parámetros operativos del humedal artificial de flujo superficial para el tratamiento de aguas eutrofizadas.

- Finalmente, se ha realizado una revisión bibliográfica de una serie de modelos empíricos empleados en humedales artificiales que nos permiten obtener la *concentración base* de cada parámetro estudiado, y que por tanto, será la mínima que podrá salir con el efluente y también, calcular la concentración de salida de los mismos conociendo la concentración de ellos en la entrada entre otros parámetros fácilmente medibles.
- Elaboración de los modelos empíricos con la ayuda de hojas de cálculo y comparación con los resultados obtenidos por otros autores.



## MARCO TEÓRICO

---



### **3 MARCO TEÓRICO.**

#### **3.1 HUMEDALES ARTIFICIALES.**

##### **3.1.1 INTRODUCCIÓN.**

En la actualidad, cada vez se encuentra más extendido el empleo de **Sistemas de Depuración Natural** para el tratamiento de las aguas residuales. En las pequeñas comunidades rurales, donde por su propia localización geográfica y por su grado de desarrollo, presentan una problemática particular frente a la provisión de los servicios de saneamiento y depuración, los sistemas de depuración natural, ofrecen buenas prestaciones.

Estos sistemas son el resultado de un trabajo de diseño ecológico tomando como fuente de inspiración, los ecosistemas acuáticos naturales. Con ello se consigue no sólo el tratamiento de las aguas residuales sino, además, convertir los residuos presentes en el agua, en una serie de productos potencialmente aprovechables.

Por lo tanto, se plantea el tratamiento de las aguas residuales no sólo como una acción de mejora ambiental, sino que también, como un mecanismo de recuperación, de ahorro y de integración ambiental y socioeconómica. Estos sistemas, poseen un alto valor paisajístico y además fomentan la biodiversidad de los ecosistemas húmedos, los cuales actualmente se encuentran en vías de deterioro y desaparición por la presión del hombre.

La diferencia fundamental entre un sistema de depuración natural y un sistema convencional de tratamiento de aguas, estriba en que, en este último, el proceso ocurre de manera secuencial, en tanques y reactores, y a una velocidad acelerada debido al aporte de energía (es decir, precisa de bajos tiempos de residencia); mientras que, en el primero, el proceso se desarrolla en un único "reactor" y el proceso ocurre a la velocidad natural (sin aporte de energía de manera artificial), por tanto, precisa de tiempos de residencia hidráulica mayores. Este hecho hace que el ahorro de energía que se consigue mediante los sistemas de depuración natural, se compense con la necesidad de una mayor superficie para realizar el proceso.

Las ventajas que presentan los sistemas de depuración natural frente a otros sistemas de tratamientos convencionales se resumen a continuación:

- *Bajos requerimientos energéticos.* Recurren a energías renovables pasivas. No obstante, dado que la velocidad de aporte de oxígeno por métodos naturales es muy baja, en comparación a la que se obtiene mediante el empleo de medios electromecánicos, la ventaja que supone el ahorro energético de los sistemas naturales, se ve contrarrestada por la necesidad de una mayor superficie para conseguir buenos resultados.
- *Simplicidad de mantenimiento y explotación.*
  - Procesos de tratamiento muy fáciles de controlar.
  - Inexistencia o mínima presencia de equipos electromecánicos: se minimizan o eliminan las incidencias por averías.
  - Las operaciones de mantenimiento y explotación pueden llevarse a cabo por personal no especializado (conlleva a su vez un abaratamiento de los costes).
  - La mayoría de las operaciones de mantenimiento y explotación, son asimilables a labores agrícolas clásicas (siega, poda, eliminación de hierbas, etc.).
- *Garantía de funcionamiento eficaz frente a grandes oscilaciones de caudal y carga en el influente a tratar.* Gracias a su capacidad de resiliencia, como los ecosistemas naturales, son sistemas autorreguladores, absorbiendo grandes oscilaciones, tanto de caudal como de carga contaminante.
- *Simplificación del manejo de lodos.*

Un tipo de sistemas de depuración natural son los denominados **humedales artificiales**, en los que se simulan las condiciones propias de un **humedal natural**.

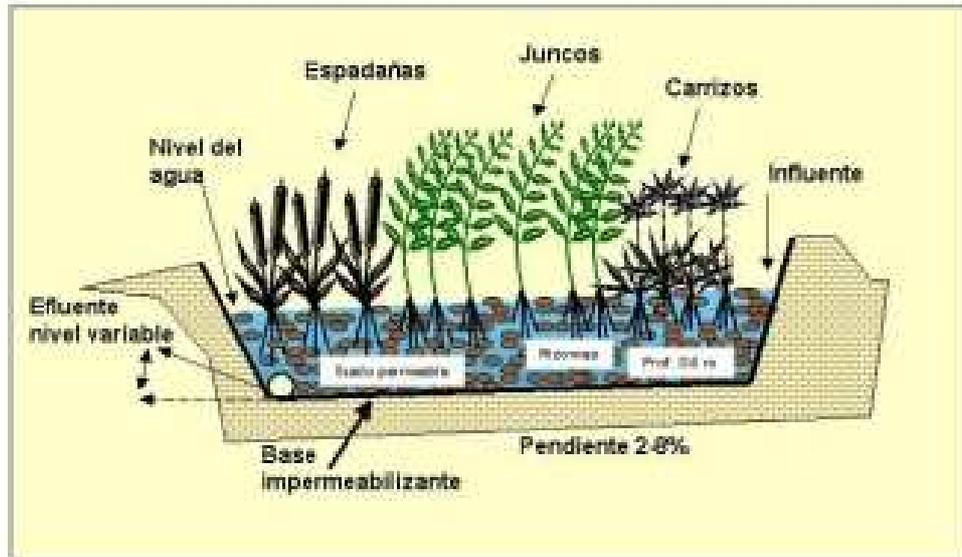


Figura 4: Diagrama de un humedal artificial. Fuente: depuranat.

Los humedales se definen como áreas inundadas o saturadas por agua superficial o subterránea con la frecuencia y duración suficiente para soportar una vegetación adaptada para ello, es decir, vegetación hidrófila. Las funciones de los humedales incluyen: la mejora de la calidad del agua, hábitat acuático, sombreado de arroyos, atenuación de inundaciones, estabilización de las orillas e intercambio con las aguas subterráneas. Los humedales típicamente actúan como amortiguadores naturales entre las tierras altas y los cuerpos de agua adyacentes. La pérdida de estos sistemas permite una participación más directa de la contaminación procedente de fuentes no puntuales a las aguas receptoras (Collins, 2008).

Según Ramsar, “son humedales las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros”.

Los humedales artificiales también se pueden utilizar para restaurar ecosistemas, siendo la depuración un objetivo secundario.

En estos sistemas participan dos elementos fundamentales:

- I. **El sustrato.** Por un lado, se emplea para la eliminación de los sólidos en suspensión presentes en el agua por medio de un sistema de filtración. Pero además, sirve como

soporte para la fijación de las bacterias, aumentando de este modo, la superficie de contacto existente entre éstas y el agua, y con ello, el grado de depuración biológica.

- II. **Las plantas acuáticas emergentes.** Son plantas macrófitas, que están adaptadas a la hidrología y a las condiciones del suelo que se dan en estos ecosistemas. Viven en aguas poco profundas, arraigadas en el suelo. Sus tallos y hojas emergen fuera del agua, y pueden alcanzar alturas de entre 2 y 3 metros. Son vegetales más productivos que los terrestres de zonas templadas. La parte fotosintética es aérea, lo que evita la atenuación de la luz y los problemas de intercambio de gases con el medio acuático.

No obstante, el influente que se aplica a los humedales artificiales se somete, generalmente, a un pretratamiento (rejas de desbaste y desengrasado) y a un tratamiento primario (habitualmente en Tanques Imhoff).

### **3.1.2 TIPOS DE HUMEDALES ARTIFICIALES.**

Existen diferentes modalidades y diseños de humedales artificiales. Entre estos destacan los siguientes:

- **Humedales Artificiales de Flujo Libre o Superficial.** Éstos se suelen emplear para tratar agua residual pretratada de forma continua. El tratamiento se produce durante la circulación del agua a través de los tallos y raíces de la vegetación emergente. Están constituidos por un conjunto de balsas o canales paralelos, con vegetación emergente y niveles de agua poco profundos (0,1 a 0,6 m).
- **Humedales Artificiales con Flujo Subsuperficial Horizontal.** Las aguas residuales, tras un desbaste y un tratamiento primario, discurren de manera horizontal, a través de un medio poroso, confinando en un canal impermeable, en el cual se encuentra la vegetación emergente. La alimentación es continua y el nivel del agua se mantiene unos 5 cm por debajo de la superficie del sustrato.
- **Humedales Artificiales con Flujo Subsuperficial Vertical.** Las aguas residuales, tras un desbaste y un tratamiento primario, discurren de manera vertical, a través de un medio poroso, y se recogen en una red de drenaje que se sitúa en el fondo del humedal. La alimentación es discontinua o continua.

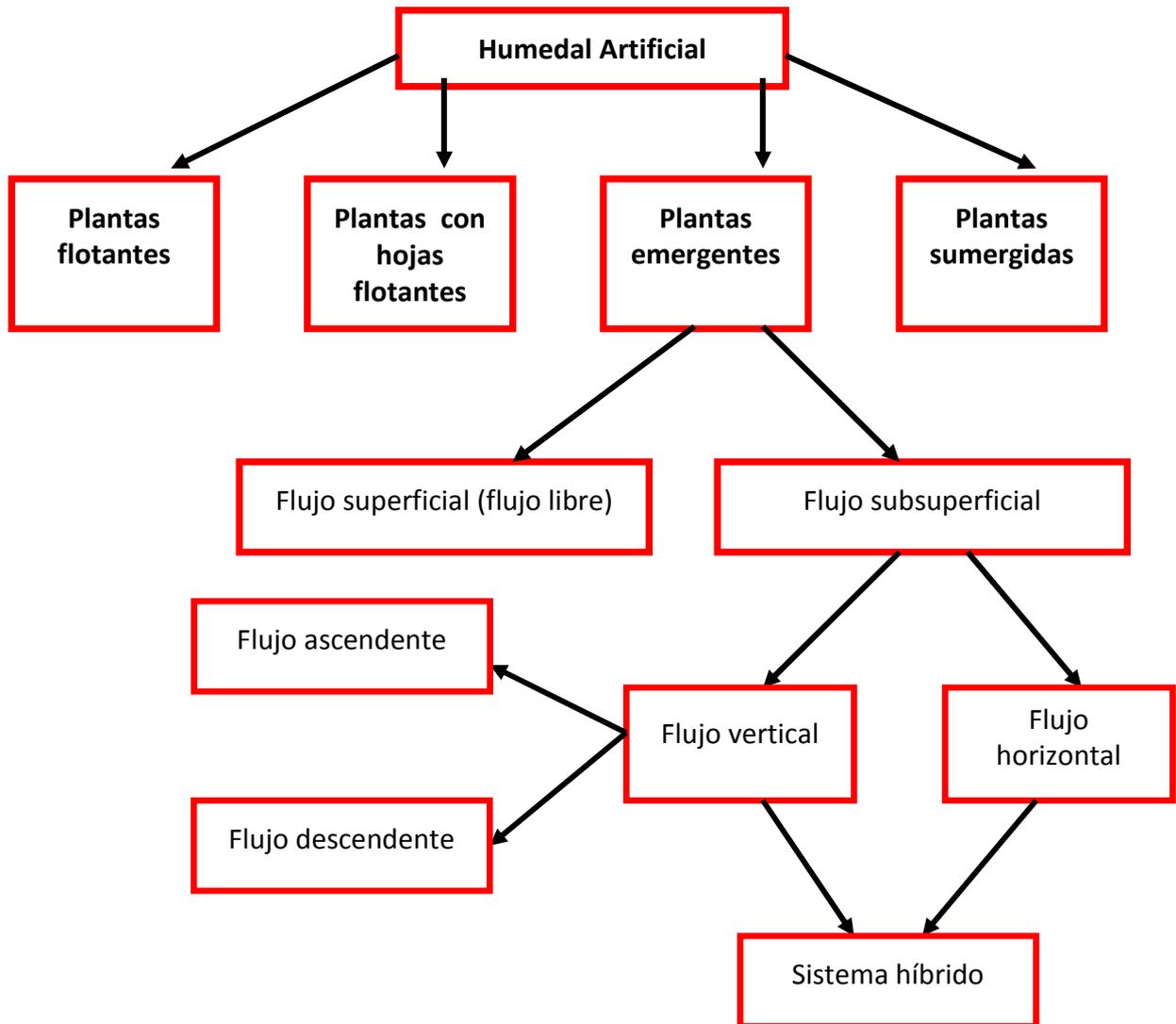


Figura 5 : Clasificación de los humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Fuente: Adaptado de Vymazal, 2007.

Los humedales artificiales de flujo libre pueden también diseñarse para crear nuevos hábitats para la flora y fauna, mejorar las condiciones de terrenos pantanosos naturales próximos o incrementar la calidad de los efluentes depurados en las estaciones de tratamiento.

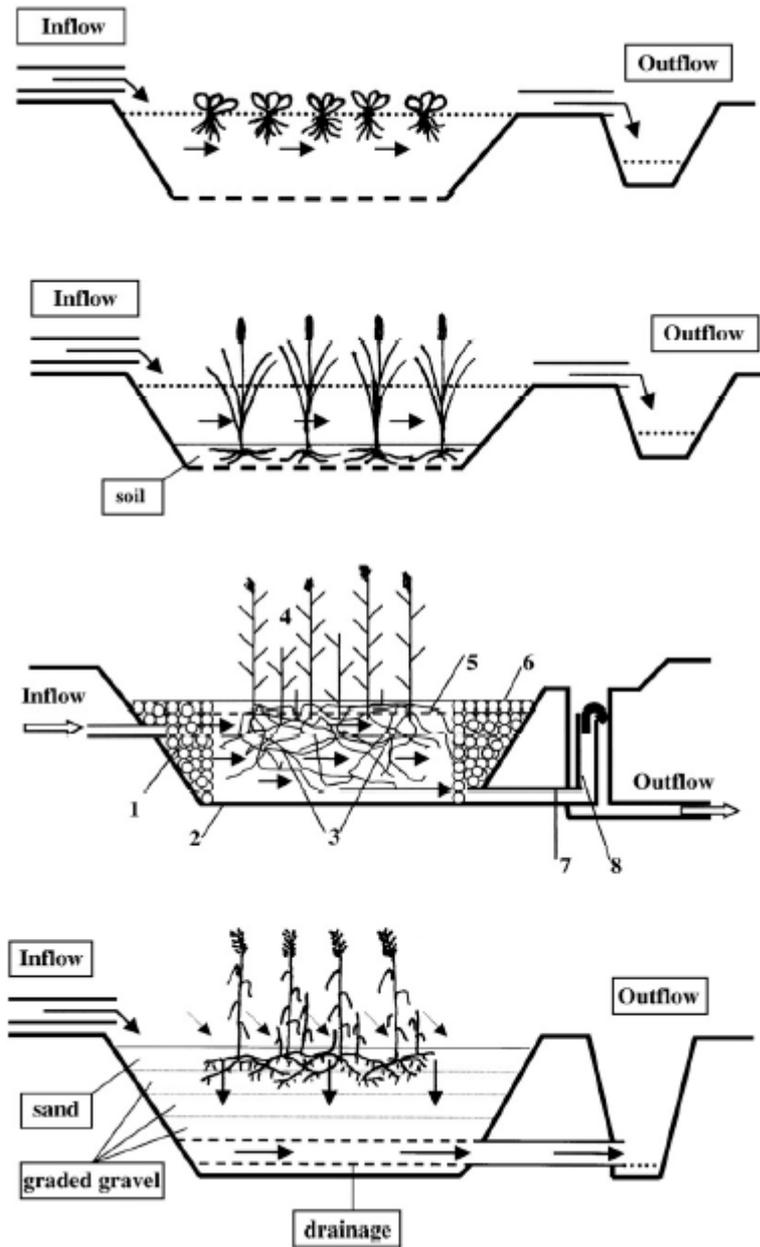


Figura 6: Humedales artificiales (H. A.) para el tratamiento de aguas residuales (de arriba abajo): H.A. con plantas flotantes, H.A. de flujo superficial y macrófitas emergentes, H.A. de flujo horizontal subsuperficial, H.A. de flujo vertical subsuperficial. Fuente: Vymazal, 2007.

### **3.1.3 LAS PLANTAS MACRÓFITAS.**

#### **3.1.3.1 FUNCIONES.**

En los sistemas de tratamiento en los que se emplean plantas acuáticas, el agua residual es tratada principalmente por medio del metabolismo bacteriano y de la sedimentación, tal y como ocurre en las plantas de tratamiento convencionales. La diferencia principal estriba, en que en este caso, además de lo anterior, las plantas acuáticas llevan a cabo su propia función, de modo que complementan la capacidad depuradora del ambiente. Su función principalmente radica en:

- Servir como medio de soporte al crecimiento microbiano, medio filtrante y medio adsorbente de sólidos y nutrientes.
- Suministrar oxígeno.
- Atenuar la radiación solar, de modo que impida o limite el crecimiento de las algas.
- Atenuar el efecto del viento sobre las aguas.
- Estabilizar la superficie de los humedales.
- Aíslan a la superficie de las de las heladas del invierno.
- Asimilación de nutrientes.
- Liberación de antibióticos (con lo cual, se eliminan patógenos).
- Proporcionan un hábitat adecuado para numerosas especies.

#### **3.1.3.2 EFECTOS.**

##### **3.1.3.2.1 EFECTOS FÍSICOS.**

- ◆ La presencia de macrófitas en el agua, distribuye y disminuye la velocidad de la corriente de agua. Con ello se consigue:
  - Una mejora en la sedimentación de los sólidos suspendidos.

- Una reducción del riesgo de erosión y resuspensión.
  - Un incremento del tiempo de contacto entre el agua y la superficie de la planta.
- ◆ Además, estabilizan la superficie del suelo, aíslan del frío a los humedales y atenúan la recepción de la radiación lumínica por la columna de agua.

#### 3.1.3.2.2 EFFECTOS EN LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DEL SUELO.

La conductividad hidráulica del medio, mide la facilidad de conducción del flujo del agua través del medio poroso, expresándose normalmente en unidades de velocidad (por ejemplo, en m/s). Existen opiniones contrapuestas referentes a que si la presencia de macrófitas favorece o no, la conductividad hidráulica del suelo.

Algunos autores sostienen que, cuando mueren las raíces y rizomas, los poros tubulares y macroporos que dejan, incrementan y estabilizan la conductividad hidráulica del suelo. Sin embargo, existen otros autores que afirman que la conductividad hidráulica decrece.

#### 3.1.3.2.3 EFFECTOS SOBRE EL ÁREA PARA EL CRECIMIENTO MICROBIANO.

Las hojas y los tallos de las macrófitas, suponen una gran superficie para la fijación de los “biofilms” (película formada alrededor de hojas, tallos y raíces por microorganismos y bacterias, y que es la responsable de la mayor parte de los procesos microbiológicos que ocurren en los humedales). Además de ello, los tejidos de estas plantas están colonizados por algas fotosintéticas, bacterias y protozoos.

#### 3.1.3.2.4 EFFECTOS DE LA TOMA DE NUTRIENTES POR PARTE DE LAS PLANTAS.

Las plantas asimilan nutrientes para llevar a cabo su crecimiento y reproducción. Pueden tomarlos tanto por las raíces, como por las hojas sumergidas y tallos. Sólo si la biomasa vegetal es cosechada, se produce una eliminación de nutrientes, ya que sí no es así, los nutrientes que fueron asimilados por las plantas, volverán al agua, por mecanismos de descomposición.

### 3.1.4 HIDROLOGIA E HIDRÁULICA.

El agua puede entrar al humedal vía precipitación, descargas de agua subterránea, escorrentía y/o por flujos de agua procedentes de ríos, arroyos, etc. El agua, se pierde del sistema por recarga a aguas subterráneas y/o a aguas superficiales y por evapotranspiración. La evapotranspiración se produce con fuertes ciclos tanto diarios como estacionales, ya que, está dominada por la radiación solar, la cual provoca tales ciclos.

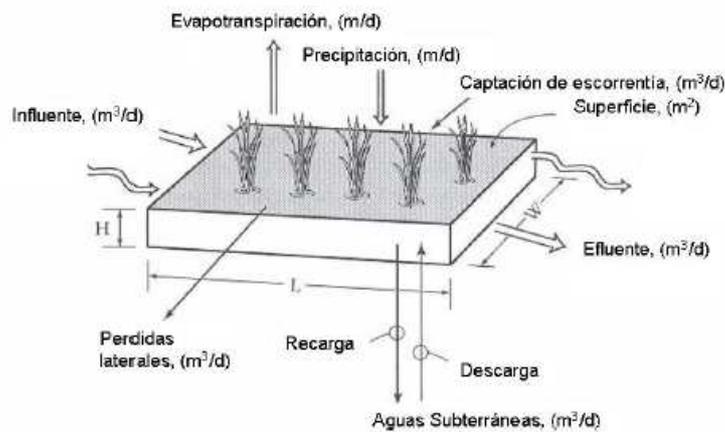


Figura 7: Componentes del balance hídrico de un humedal. Fuente: Adaptado de Kadlec y Wallace (2009) *Treatment Wetlands*.

Las características importantes de la hidrología del humedal desde el punto de vista de la eficiencia en el tratamiento son aquellas que determinan la duración de la interacción agua-biota, y la proximidad de las sustancias transportadas por el agua a los sitios de actividad física y biológica. Algunas de estas características son:

- Carga hidráulica ( $q$ ): es el volumen de agua aplicado por unidad de superficie en un determinado período de tiempo.

$$q = \frac{Q}{A}$$

En donde,

$q$ : carga hidráulica (m/d).

$Q$ : flujo de agua de entrada (m<sup>3</sup>/d).

$A$ : área del humedal ó superficie mojada (m<sup>2</sup>).

- Profundidad media del agua en el humedal.
- Tiempo de retención hidráulico. Para un humedal de flujo superficial el volumen de agua del mismo está definido como el volumen encerrado por la superficie de agua superior e inferior y los lados del humedal. En cambio, para un humedal de flujo vertical o un subsuperficial de flujo horizontal, este volumen encerrado se multiplica por la porosidad del medio.

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

En donde,

TRH: tiempo de retención hidráulico (d).

Q: flujo de agua (m<sup>3</sup>/d).

V: volumen del Humedal que contiene el agua (m<sup>3</sup>).

La hidráulica en los humedales artificiales es muy importante ya que la eficiencia hidráulica está directamente relacionada con la eficiencia del tratamiento.

Uno de los principales problemas con los que se encuentra la eficiencia del tratamiento en los humedales artificiales es la existencia de caminos preferenciales en los mismos. Éstos, reducen el tiempo de retención hidráulico en las celdas del humedal y por tanto, decrecen los rendimientos del tratamiento.

En la bibliografía aparecen reflejados diferentes factores que afectan a la existencia de los caminos preferenciales en los humedales. Algunos son (Min, 2009):

- Forma del humedal o la relación longitud-ancho.
- Profundidad del humedal o nivel del agua.
- Caudal del agua.
- Batimetría del humedal.
- Vegetación del humedal: densidad, tipo y distribución espacial.
- Estructuras hidráulicas del humedal: tipo y localización.
- Estructuras internas del humedal tales como bermas subsuperficiales e islas.
- Viento.

### **3.1.5 MECANISMOS PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AGUA: SÓLIDOS SUSPENDIDOS, FÓSFORO TOTAL Y NITRÓGENO TOTAL.**

#### **3.1.5.1 SÓLIDOS SUSPENDIDOS.**

##### **3.1.5.1.1 INTRODUCCIÓN.**

Aparte de los sólidos suspendidos que alcanzan el humedal, también hay cantidades importantes de estos que se generan internamente. Tanto unos como otros son transportados a través del humedal. Por tanto, de forma natural, en estos sistemas, los sólidos suspendidos son tanto eliminados como producidos, mediante los procesos que allí ocurren. Los mecanismos físicos predominantes para su eliminación son:

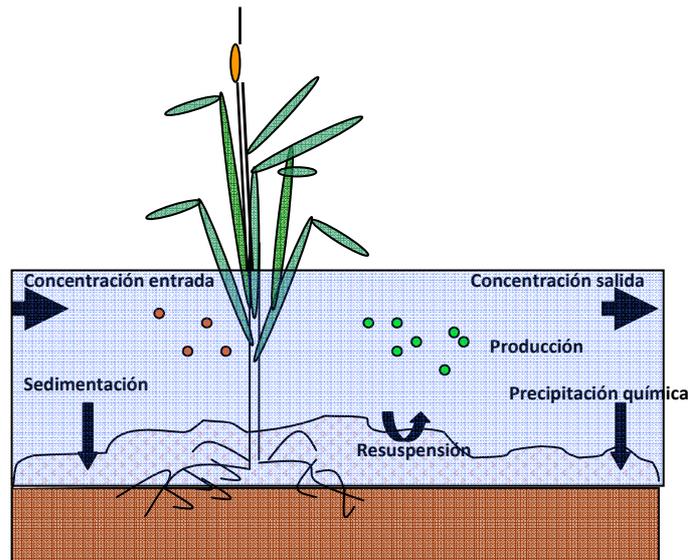
- floculación/sedimentación
- filtración/intercepción.

Por el contrario, los mecanismos responsables de la generación de sólidos dentro del humedal son:

- muerte de los invertebrados
- fragmentación de los restos de las plantas
- producción de plancton y de microorganismos dentro de la columna de agua o sobre la superficie de las plantas
- y la formación de precipitados químicos.

En un humedal de flujo superficial, como es el caso que nos ocupa, es frecuente que se produzca la resuspensión de sólidos ya sedimentados debido a la turbulencia provocada por los animales, los caudales altos a la entrada o el viento.

La concentración de sólidos suspendidos en el efluente del humedal, no suele derivar de no haber sido estos eliminados del influente, sino que más bien, proceden de la generación de los mismos en el interior del sistema. La aparición de nueva biomasa mediante la producción primaria o a través del metabolismo de los constituyentes del influente, resultará finalmente en el retorno a la columna de agua de sólidos suspendidos.



**Figura 8: Mecanismos de producción/eliminación de sólidos suspendidos en un humedal artificial de flujo superficial.**

### 3.1.5.1.2 MECANISMOS PARA LA PRODUCCIÓN/ELIMINACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS.

#### **3.1.5.1.2.1 SEDIMENTACIÓN.**

En el caso que nos ocupa, la fuente principal de sólidos suspendidos, en prácticamente todos los meses, es el fitoplancton. Para la supervivencia de la mayoría de estos organismos es necesario mantenerse en suspensión en la columna de agua. Ello lo pueden conseguir mediante diferentes mecanismos como puede ser la presencia intracelular de vacuolas de gas (algas verde azuladas).

Una vez las células algales mueren por falta de nutrientes y/o de radiación solar, pierden su capacidad para flotar y por tanto, serán susceptibles de sedimentar. Las velocidades de sedimentación rondan los 0.0-1.0 m/s (los valores típicos son de 0.1 a 0.3 m/s) dependiendo de la especie y de las condiciones fisiológicas. Es probable, que muchas de estas células se eliminen por sedimentación en humedales cubiertos por vegetación emergente que les proporcionan sombra y además reducen la acción del viento (EPA, 2000).

#### **3.1.5.1.2.2 INTERCEPCIÓN/FILTRACIÓN.**

En humedales artificiales de flujo superficiales (HAFS), la filtración probablemente no sea un mecanismo importante de eliminación de sólidos suspendidos, sin embargo, la adhesión y la intercepción de partículas en la superficie de las plantas sí que posiblemente lo

sea. La eficiencia de estos procesos puede depender del tamaño de las partículas, velocidad, características de la superficie de las plantas, etc. Sobre la superficie de estas últimas que queda dentro de la columna de agua, se deposita una capa activa (biofilm) de perifitón. Este biofilm puede adsorber tanto partículas coloidales y supracoloidales como absorber moléculas solubles. Según la naturaleza de los sólidos suspendidos, estos podrán ser metabolizados y transformados en compuestos solubles, gases y biomasa o ser físicamente adheridos a la superficie del biofilm para finalmente ser desprendido a la columna de agua (EPA, 2000).

#### **3.1.5.1.2.3 RESUSPENSIÓN.**

En los HAFS, la velocidad del agua es demasiado baja como para inducir la resuspensión de partículas ya sedimentadas (EPA, 2000). En los humedales completamente cubiertos de vegetación, los restos de hojas y la red de raíces, proporcionan una excelente estabilización de los suelos y sedimentos (Kadlec y Wallace, 2009). La vegetación reduce, pero no elimina la resuspensión.

La reintroducción de sólidos sedimentados probablemente sea, en la mayoría de las ocasiones, debido a la elevación de gases en la zona vegetada, a la bioturbación, o por la turbulencia inducida por la acción del viento. Los sedimentos de los humedales situados en las capas superiores, suelen ser fácilmente perturbados debido a la acción de peces, aves y de mamíferos, conduciendo a un incremento de los sólidos suspendidos en estos sistemas. Por otra parte, los gases generados (por ejemplo, oxígeno liberado por las plantas sumergidas, el nitrógeno gas procedente de la desnitrificación o el metano formado en procesos anaeróbicos) pueden causar la flotación de partículas.

#### **3.1.5.1.2.4 PRECIPITACIÓN QUÍMICA.**

Bajo determinadas condiciones dentro del humedal (pH, cambios redox, composición química), se puede producir materia particulada, como producto de ciertas reacciones químicas que ahí tienen lugar. No obstante, también pueden disolverse y ser eliminados desde el sedimento.

Los precipitados químicos más comunes son los de hierro (oxi-hidróxidos de hierro), los de aluminio (oxi-hidróxidos de aluminio), carbonato cálcico y los sulfuros metálicos.

### **3.1.5.1.2.5 GENERACIÓN DE UN SEDIMENTO BIOLÓGICO.**

El principal generador de sólidos suspendidos dentro del humedal, posiblemente sea la productividad algal y en segundo lugar, los procesos que añaden polen y semillas al agua. Estos sólidos suspendidos producidos, tienen un alto contenido en carbón orgánico y por tanto, una alta proporción de sólidos suspendidos volátiles. También son importantes los sólidos originados por la caída de hojas y restos de tallos y producción y posterior muerte de organismos (por ejemplo *Daphnia*).

Todos estos procesos, se deben de tener en cuenta a la hora de evaluar los rendimientos de eliminación, ya que contribuyen a determinar los niveles de concentración base (o *Background*). En apartados posteriores se entrará en más detalle en este tema.

### **3.1.5.2 FÓSFORO TOTAL.**

#### **3.1.5.2.1 INTRODUCCIÓN.**

Los humedales artificiales son capaces de eliminar fósforo, tanto a corto plazo como a largo plazo.

El fósforo es un nutriente esencial para el crecimiento de la vegetación, de modo que en ocasiones, si la cantidad disponible no es suficiente, puede ser un factor limitante para la productividad vegetal. La introducción de cantidades trazas de este elemento en las aguas receptoras, puede ocasionar importantes efectos en la estructura de los ecosistemas acuáticos.

Para entender el ciclo del fósforo, el humedal puede ser visualizado como un conjunto de varios compartimentos: agua, plantas, microbiota, lecho y suelo. Las entradas de fósforo en el humedal son los influentes superficiales, y la deposición atmosférica (tanto la seca como la húmeda). Las salidas en cambio son, los efluentes superficiales y las infiltraciones a aguas subterráneas. Las entradas de agua desde las aguas subterráneas o liberación de gases a la atmósfera son menos comunes. Por otro lado, la migración animal, que va desde el movimiento de insectos hasta los desplazamientos de los peces y aves, ha sido identificada como una contribución potencial al balance de fósforo. No obstante, no existen datos cuantitativos.

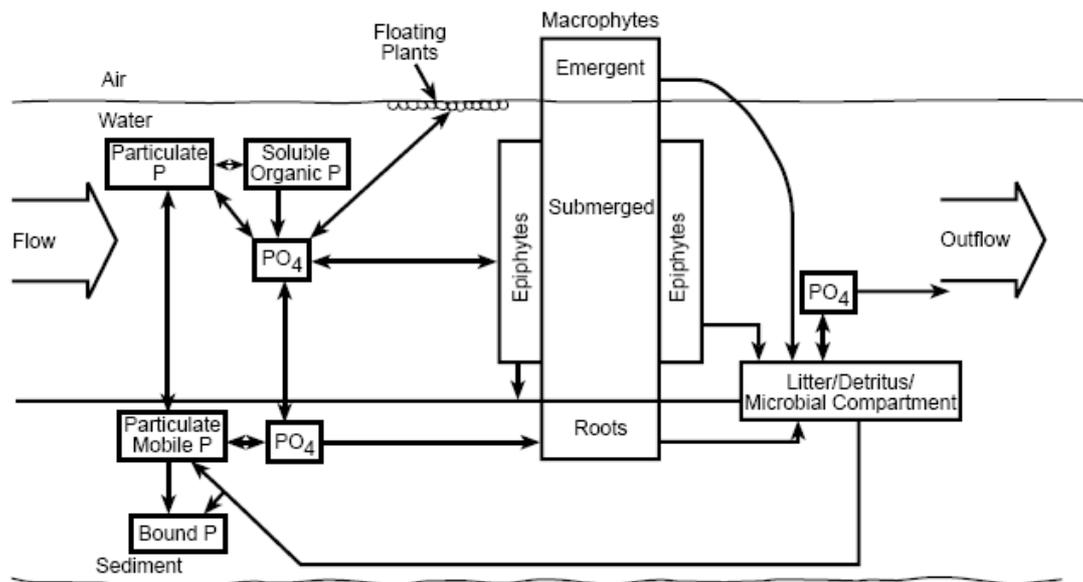


Figura 9: Ciclo del fósforo en un humedal artificial de flujo superficial. Fuente: *Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters* (EPA, 2000).

Los humedales artificiales parten unas condiciones iniciales determinadas por el tipo de suelo, tipo de vegetación y densidad de la misma. Cuando se inunda el terreno, para crear el humedal, los suelos y la vegetación, necesitan de un periodo de adaptación, durante el cual, son sometidos a cambios dictados por las condiciones ambientales de profundidad de agua y disponibilidad de nutrientes. Un ejemplo, son los humedales de flujo superficial construidos sobre suelos agrícolas, que tienen que hacer frente a grandes cantidades de fósforo almacenado en los suelos, pudiendo dar lugar a altas concentraciones del mismo en el agua.

En un proyecto llevado a cabo en el lago Apopka (Florida), detectaron que durante el periodo inicial de operación, la concentración en el efluente de la primera celda fue mayor que la del influente debido a una lixiviación inicial de fósforo reactivo soluble procedente de los suelos orgánicos originales y de la muerte y descomposición de una porción de la inicial cobertura vegetal (Coveney, 2002).

También se ha visto, que los humedales pueden tener inicialmente una alta capacidad de eliminación de fósforo que después se estabiliza.

En resumen, el periodo inicial de funcionamiento de un humedal de flujo superficial puede presentar menores o mayores rendimientos de eliminación de fósforo que a largo plazo. Los factores decisivos son las cargas antecedentes de fósforo en los suelos y la importancia del ciclo de la vegetación en comparación con la carga de fósforo aplicada (Kadlec y Wallace, 2009).

#### 3.1.5.2.2 MECANISMOS PARA LA PRODUCCIÓN/ELIMINACIÓN DE FÓSFORO TOTAL.

Las transformaciones de fósforo en suelos y columna de agua de los humedales son múltiples e incluyen:

- Adsorción y desorción
- Precipitación y disolución
- Consumo por plantas y microorganismos
- Fragmentación y lixiviación
- Mineralización
- Sedimentación y enterramiento.

La oxidación biológica resulta en la conversión de la mayoría del fósforo a las formas de ortofosfato. En los humedales artificiales, la eliminación de estas últimas formas ocurre principalmente como una consecuencia de la adsorción, formación de complejos y reacciones de precipitación con aluminio (Al), hierro (Fe), calcio (Ca) y minerales de arcilla en la matriz del suelo. No obstante, también existe un consumo de éste por parte de las plantas y de los microorganismos, pero generalmente, es menos importante que el mecanismo anterior. Otro mecanismo posible es la reducción del fósforo bajo condiciones anaerobias.

La adsorción del fósforo está controlada por la interacción del potencia redox, pH, Fe, Al y minerales de calcio. El fósforo inorgánico es retenido por los óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, calcita y complejos organometálicos.

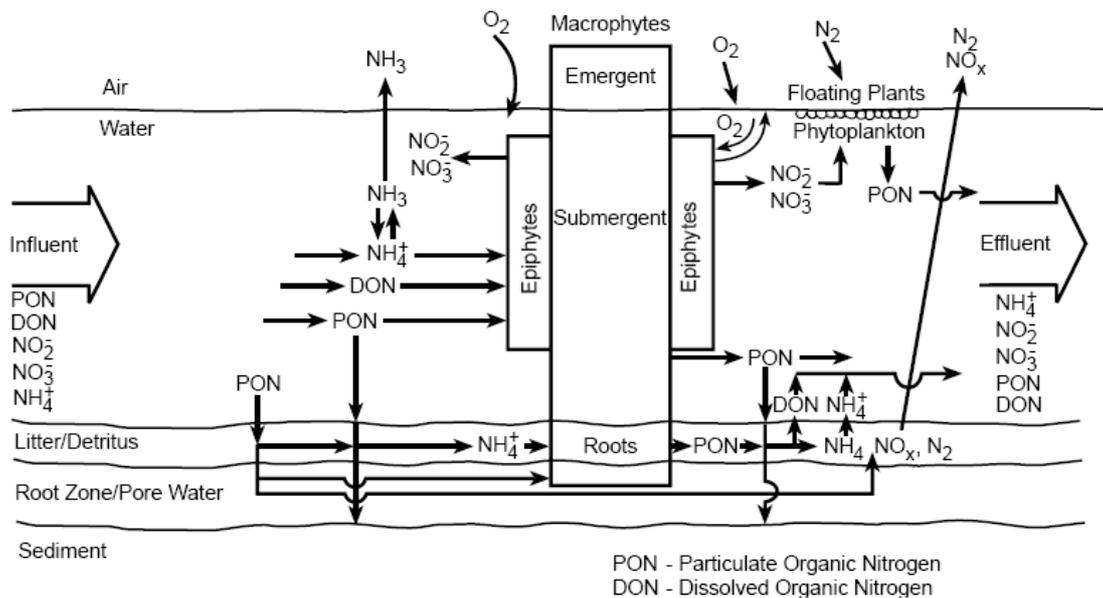
#### **3.1.5.3 NITRÓGENO TOTAL.**

##### 3.1.5.3.1 INTRODUCCIÓN.

El mayor mecanismo de eliminación de nitrógeno en los sistemas de humedales artificiales es por nitrificación y desnitrificación. El amonio es oxidado por las bacterias nitrificantes en las zonas aerobias. Los nitratos son convertidos a nitrógeno gas (N<sub>2</sub>) por

bacterias desnitrificantes (facultativas), en zonas anóxicas. El oxígeno requerido para la desnitrificación es suministrado por difusión desde la atmósfera y desde las raíces de las macrófitas.

El nitrógeno es también tomado por las plantas e incorporado dentro de la biomasa. Otros mecanismos de eliminación de nitrógeno incluyen la volatilización y la adsorción. Sin embargo estos mecanismos son menos importantes que la nitrificación-desnitrificación. No obstante, estacionalmente, pueden ser importantes.



**Figura 10: Transformaciones del nitrógeno en un humedal artificial de flujo superficial. Fuente: *Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters* (EPA, 2000).**

### 3.1.5.3.2 MECANISMOS PARA LA PRODUCCIÓN/ELIMINACIÓN DE NITRÓGENO.

#### 3.1.5.3.2.1 MINERALIZACIÓN.

El contenido en nitrógeno orgánico es fácilmente mineralizado en ambas zonas (aerobia y anaerobia) a nitrógeno amoniacal. Este proceso es denominado también como amonificación.

Las tasas de mineralización son mayores en las zonas oxigenadas y decrecen cuando se pasa a zonas anóxicas y anaeróbicas. Además, esta tasa de mineralización en humedales es dependiente de la temperatura, del pH, de la relación C:N en el residuo, disponibilidad de

nutrientes en el sistema, y de condiciones del suelo como la textura y la estructura, enzimas extracelulares( tales como la proteasa), biomasa microbial y condiciones redox del suelo.

El rango de pH óptimo para el proceso de amonificación está entre 6.5 y 8.5. En suelos saturados el pH está tamponado alrededor de la neutralidad. En condiciones de buen drenaje del suelo, el pH decrece como resultado de la acumulación de nitrato y la producción de iones  $H^+$  durante la mineralización.

En la bibliografía aparece que la tasa de mineralización aeróbica se dobla al incrementar la temperatura  $10^{\circ}C$  (Vymazal, 2008).

### **3.1.5.3.2.2 NITRIFICACIÓN BIOLÓGICA.**

La nitrificación es un proceso quimioautótrofo. La energía necesaria para el crecimiento de las bacterias es obtenida de la oxidación del amonio y el dióxido de carbono se emplea como fuente de carbono para la síntesis de nuevas células.

Dos géneros microbianos son los responsables de la nitrificación microbiana:

- *Nitrosomonas*,
- *Nitrobacter*.

En un primer paso, el nitrógeno amoniacal es transformado en nitrito mediante la acción de bacterias (denominadas amoniooxidantes) estrictamente aeróbicas, que obtienen, de la oxidación del amonio, la energía necesaria para su crecimiento. En un segundo paso, el nitrito es transformado en nitratos. Este último paso, es llevado a cabo por bacterias facultativas (nitritooxidante), que necesitan la energía generada en el proceso, para crecer.

En contraste con las amoniooxidantes, algunas nitritooxidantes pueden crecer mixotróficamente con nitrito y con una fuente de carbón, y además hay que incluso son capaces de crecer en ausencia de oxígeno.

Aproximadamente son necesarios 4.3 mg Oxígeno por mg de nitrógeno amoniacal oxidado a nitrato. En este proceso de transformación, se consume una gran cantidad de alcalinidad, aproximadamente, 8.64 mg  $HCO_3^-$  por mg de nitrógeno amoniacal oxidado.

Las bacterias nitrificantes son organismos sensibles y extremadamente susceptibles a un amplio rango de inhibidores. Vymazal (2008) resume que la nitrificación es un proceso influenciado por los siguientes factores:

- Temperatura.
- pH.
- Alcalinidad.
- fuente de carbono inorgánico.
- población de microorganismos.
- Concentración de amonio.
- Oxígeno disuelto.
- Humedad.

Altas concentraciones de nitrógeno amoniacal son inhibitorias. El rango de pH óptimo es estrecho, está entre 7.5 y 8.6. Sin embargo, sistemas aclimatados pueden operar a valores de pH bastante más bajos. Los óptimos de pH pueden variar entre 6.6-8 (Vymazal, 2008)

La nitrificación es altamente dependiente de la temperatura. El mínimo de temperatura para el crecimiento de las *nitrosomonas* es de 5°C y de las *nitrobacter* de 4°C. Concentraciones de oxígeno disuelto por debajo de 1mg/l pueden desencadenar en que el oxígeno sea el sustrato limitante para el crecimiento de estas bacterias.

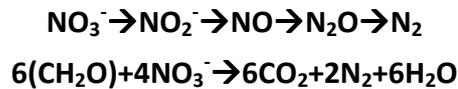
### **3.1.5.3.2.3 DESNITRIFICACIÓN BIOLÓGICA (DEGRADACIÓN ANÓXICA).**

La eliminación de nitrógeno debida a la conversión del nitrato en nitrógeno gas puede llevarse a cabo biológicamente debajo de condiciones anóxicas (cuando no hay oxígeno presente pero si que hay otros aceptores de electrones como los nitratos, nitritos o incluso sulfatos). Este proceso es conocido como desnitrificación.

Hay varios géneros de bacterias heterótrofas, incluyendo: *Achromobacter*, *Aerobacter*, *Alcaligenes*, *Bacillus*, *Brevibacterium*, *Lactobacillus*, *Micrococcus*, *Proteus*, *Pseudomonas* y *Spirillum*, que son capaces de reducir el nitrato. Este proceso se lleva a cabo en dos pasos:

- El primer paso es la transformación de nitrato a nitrito.
- El segundo paso es la producción de óxido nítrico, óxido nitroso, y nitrógeno gas.

Resumiendo el proceso es el siguiente,



Esta reacción es irreversible y ocurre solo bajo condiciones anóxicas, en las que el nitrato es empleado como aceptor de electrones en lugar del oxígeno. No obstante, hoy en día hay evidencias<sup>2</sup> de que la reducción del nitrato, también puede ocurrir en presencia de oxígeno.

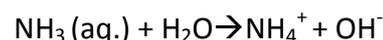
Los 3 últimos productos son gaseosos y son liberados a la atmósfera, pero en la mayor parte de los sistemas el óxido nítrico y el óxido nitroso son transitorios y es principalmente el nitrógeno gas el que se libera a la atmósfera.

La presencia de oxígeno disuelto suprime el sistema enzimático necesario para la desnitrificación y es un parámetro crítico. El rango óptimo de pH se encuentra entre 7 y 8, sin embargo, la alcalinidad producida durante la desnitrificación puede resultar en incrementos de pH. Este proceso también es fuertemente dependiente de la temperatura.

Debe existir suficiente carbono (materia orgánica), como fuente de energía para la conversión de nitrato a nitrógeno gas por las bacterias. Esta fuente de carbono debe estar disponible en el agua a tratar o dentro del humedal. Fuentes externas de carbono podrían ser el metanol, etanol o ácido acético. Éstas últimas serán añadidas cuando sea necesario.

#### **3.1.5.3.2.4 VOLATILIZACIÓN DEL AMONIO.**

La volatilización del amonio es un proceso físico-químico en el que el amonio está en equilibrio entre su forma gaseosa y su forma hidroxilo como se indica a continuación,



En la bibliografía se recoge que las pérdidas de amonio a través de su volatilización desde suelos inundados y sedimentos es insignificante si el pH está por debajo de 7.5 y muy a menudo las pérdidas no son graves si el pH está por debajo de 8.0. A pH de 9.3, la relación

<sup>2</sup> Del estudio de cultivos puros (Vymazal, 2008)

amoniacal y ión amonio es 1:1, y entonces las pérdidas por volatilización son importantes. La fotosíntesis algal en los humedales artificiales, así como, la fotosíntesis de las plantas flotantes y las sumergidas, a menudo, origina altos valores de pH (Vymazal, 2008).

La tasa de volatilización está controlada por la concentración de amonio en el agua, la temperatura, la velocidad del viento, la radiación solar, la naturaleza y número de las plantas acuáticas, y la capacidad del sistema de cambiar el pH en ciclos diurnos (la ausencia de CO<sub>2</sub> incrementa la volatilización) (Vymazal, 2008).

### 3.1.5.3.2.5 CONSUMO POR PLANTAS.

Las macrófitas pueden tomar nitrógeno en su estado mineralizado e incorporarlo dentro de su biomasa.

En la siguiente tabla se muestra el contenido de nutrientes de *Phragmites* en diferentes momentos de un periodo anual. No obstante, este mecanismo de eliminación, solo es significativo para muy bajas cargas de nitrógeno.

**Tabla 3: Contenido de nutrientes de la biomasa de *Phragmites* con una densidad de 90 tallos/m<sup>2</sup>. Fuente: Adaptado de Cooper, 1996 (Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment)**

Mes	Biomasa superficial (g/m <sup>2</sup> )		Biomasa subsuperficial (g/m <sup>2</sup> )	
	N <sub>T</sub>	P <sub>T</sub>	N <sub>T</sub>	P <sub>T</sub>
Agosto	35.0	13.0	27.0	19.8
Noviembre	10.4	2.4	20.7	8.0

Es importante señalar, que la mayoría de las plantas acuáticas pasan por un ciclo anual de crecimiento y posterior muerte. El nitrógeno acumulado durante la etapa de crecimiento, es re-liberado dentro del agua durante la época de muerte. Esta re-liberación puede ser evitada mediante el cosechado de las macrófitos antes de su muerte.

### 3.1.5.3.2.6 ADSORCIÓN A LA MATRIZ.

En estado reducido el nitrógeno amoniacal es estable y puede ser adsorbido en los sitios activos del lecho (matriz). Sin embargo, el intercambio del ión NH<sub>4</sub>-N en los sitios de intercambio de cationes de la matriz no es considerado como un receptor de largo plazo

para la eliminación del  $\text{NH}_4\text{-N}$ . Además, la adsorción del  $\text{NH}_4\text{-N}$  se presume que es rápidamente reversible.

Como el amonio es eliminado del sistema por nitrificación, el equilibrio de intercambio se espera que se redistribuya. Por tanto, el amonio adsorbido del sistema de flujo continuo estará en equilibrio con el amonio en solución. Solo los sistemas de carga intermitente muestran rápidas eliminaciones de amonio por mecanismos de adsorción debido al agotamiento del amonio en los sitios de adsorción durante el resto de periodos.

### **3.1.6 CONCENTRACIÓN BASE ( *BACKGROUND CONCENTRATIONS, C\** ).**

Los humedales son sistemas dominados por plantas (organismos autótrofos), que actúan como productores primarios de biomasa. No obstante, en estos ecosistemas también encontramos comunidades de microorganismos (heterótrofos), y de animales superiores, que se alimentan de las anteriores, reduciendo por tanto, su biomasa.

Es conocido que la mayoría de los humedales, sostienen más productores que consumidores, resultando en un suministro neto de biomasa. Este exceso de material, normalmente queda enterrado en el sedimento o es exportado desde el humedal. La exportación neta resulta en una liberación interna de biomasa particulada y disuelta a la columna de agua, que es medida como niveles distintos de cero de demanda biológica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos totales ( $\text{SS}_T$ ), nitrógeno total ( $\text{N}_T$ ) y fósforo total ( $\text{P}_T$ ). Estas concentraciones base del humedal son típicamente representadas por el término  $C^*$  (Kadlec y Wallace, 2009).

Los humedales sometidos a aguas con alta carga de nutrientes (como los empleados para el tratamiento de las aguas residuales) probablemente producen una mayor concentración base que los humedales alimentados con aguas con baja carga de nutrientes. Ello se debe al incremento de la producción de biomasa como resultado de los altos niveles de nutrientes y carbono orgánico procedentes del agua residual a tratar.

Como consecuencia de lo señalado, la mayoría de los contaminantes (incluyendo los citados en el párrafo superior) no son reducidos a cero en los humedales artificiales.

Es importante señalar que los cortocircuitos (o también denominados caminos preferenciales) pueden conducir a altos valores de  $C^*$  para sistemas fuertemente cargados. No obstante, estos altos  $C^*$  pueden tratarse con mejoras hidráulicas.

En la literatura podemos encontrar rangos de concentración base para diferentes contaminantes del agua. En la siguiente tabla aparecen reflejados algunos de los valores:

**Tabla 4: Valores de concentración base. Fuente: Basado en Kadlec y Wallace (2009).**

Parámetro	Baja carga	Alta carga
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	2	10
SS <sub>T</sub> (mg/l)	2	15
N orgánico (mg/l)	1	3
Amonio (mg/l)	<0.1	<0.1
N oxidado (mg/l)	<0.1	<0.1
Fósforo total (mg/l)	<0.01	0.04

### **3.1.6.1 CONCENTRACIÓN BASE DEL FÓSFORO TOTAL.**

A través del humedal desde la entrada del agua por un extremo hasta la salida del agua por el extremo contrario, se produce un decaimiento exponencial en la concentración de fósforo, desde el valor que presenta el influente hasta el valor de la más baja concentración no nula de la salida. Si el humedal es grande comparado con el flujo de agua adicionado y con la carga química, la concentración tiende hacia una meseta a la salida del sistema, a partir de la cual, ya no tiene lugar más reducción. La concentración de la meseta es la  $C^*$ .

El ciclo del fósforo en los ambientes naturales conduce a bajas concentraciones de fósforo en las aguas superficiales, y no se puede esperar, que reducirá el humedal artificial fósforo por debajo de esos niveles ambientales.

Tabla 5: Niveles de *concentración base* (mg P/l) para el fósforo total. Basado en Kadlec y Wallace (2009).

	Niveles de <i>concentración base</i> (mg P/l)
<i>Cuencas relativamente poco desarrolladas de los Estados Unidos (EEUU).</i>	0.022
<i>Áreas de las montañas rocosas y llanuras centrales</i>	>0.10
<i>Everglades (Florida)</i>	0.006-0.01

◆ **Mecanismos de creación de la *concentración base*:**

En la ubicación del humedal artificial, hay varias posibles razones para la existencia de una real o aparente no nula *concentración base* para el fósforo. La primera es que puede haber una parte del fósforo de entrada que es resistente al almacenamiento o la transformación en el ambiente del humedal. Alguna porción del fósforo orgánico puede ser altamente resistente al consumo por el ciclo biogeoquímico. Un ejemplo extremo podría ser un pesticida organofosforado que no es fácilmente degradado en el humedal. Sin embargo, más fuentes benignas pueden contener una fracción no disponible biológicamente, debido al tamaño y el carácter de las moléculas que contiene el fósforo. Estas fracciones de fósforo pueden pasar a través del humedal sin ser tomadas.

La segunda razón para una concentración no nula de fósforo total es la asociación con partículas. El fósforo particulado no reactivo (NRPP) forma parte de el fósforo total de la columna de agua, y es una importante parte de la fracción de fósforo en los sedimentos. Debido a que el fósforo está asociado a materia particulada suspendida ( $SS_T$ = sólidos suspendidos totales) un nivel de concentración base no nulo de  $SS_T$  implica un nivel no nulo en la concentración base de fósforo. Aunque es complicado medir los  $SS_T$  dentro del humedal, niveles de 5-10 mg  $SS_T$ /l son comúnmente encontrados en sistemas de vegetación densamente vegetados (Kadlec y Knight, 1996).

En humedales artificiales de flujo superficial, con más superficie de aguas abiertas, la presencia de fitoplancton en la columna de agua se ve favorecida debido a los altos niveles de luz. La presencia de estos organismos lleva asociado una concentración de fósforo suspendido.

Una tercera razón para que la *concentración base* no sea cero, es un conjunto de procesos del humedal que proporcionan entradas distribuidas en toda la extensión del área del sistema. Descargas de aguas subterráneas y lluvias pueden llevar fósforo a todas las porciones del humedal. El fósforo puede ser utilizado en el ciclo biogeoquímico, que también está distribuido por todo el humedal. No obstante, este mismo ciclo puede producir retornos de las sustancias a la columna de agua, usualmente por los procesos de descomposición y lixiviación.

La cuarta razón, es que la existencia de caminos preferenciales en los humedales artificiales, conduce a que parte del agua que entra en los mismos no sea sometida a tratamiento, alcanzando la salida del sistema con las concentraciones de los contaminantes prácticamente invariables y mezclándose con el agua tratada.

### **3.2 EMPLEO DE HUMEDALES ARTIFICIALES PARA TRATAR AGUAS EUTROFIZADAS.**

Durante las últimas décadas, numerosos proyectos de restauración han sido llevados a cabo para controlar y reducir los efectos negativos de la eutrofización y mejorar la calidad del agua. Los métodos usados en estos proyectos incluyen la eliminación directa del fitoplancton mediante agentes químicos, la restricción en las entradas de contaminantes y disminución de las entradas de nutrientes, dragado de los sedimentos, dilución de las aguas eutróficas con aguas limpias, biomanipulación y la restauración ecológica de macrófitos (Wang y col. 2009).

En la bibliografía se puede encontrar mucha información sobre el empleo de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales urbanas, industriales, efluentes de granjas, escorrentías agrícolas, efluentes de la minería e incluso para aguas de escorrentía urbana, entre otras. Pero hay menos casos en el mundo, en que estos sistemas hayan sido empleados para tratar aguas eutrofizadas procedentes de ríos y lagos (Tang, 2009; Huang, 2007; X. N. Li, 2010; Hu, 2008; Jing, 2004; Wang, 2009; Bing, 2009; Lu, 2010; Li L. F., 2008; Coveney, 2002; S.B. He, 2007).

Dos casos destacables son los que se resumen a continuación:

- I. El lago Apopka, es un lago hipereutrófico, localizado cerca de Orlando, Florida (Estados Unidos). El agua de este lago está caracterizada por elevadas concentraciones de Clorofila  $\alpha$ , sólidos suspendidos, y de nitrógeno y fósforo particulados.

**Tabla 6: Valores medios sobre los 29 meses de periodo operacional en el influente desde el Lago Apopka. (Coveney y col., 2002).**

Variable	Media (mg/l)
SS <sub>T</sub>	76
Cl $\alpha$	0.078
N <sub>T</sub>	4.60
P <sub>T</sub>	0.173

Se construyeron 2 km<sup>2</sup> de un humedal artificial, a escala piloto, para poner a prueba la eliminación de nutrientes y los rendimientos hidráulicos. Para ello, el agua del lago fue recirculada durante 29 meses, y la eliminación de los sólidos suspendidos y de los nutrientes en forma particulada fue evaluada. La carga hidráulica varió desde 6.5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*año (0.0178 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d) a 65 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*año (0.178 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d), con un tiempo de residencia medio de 7 días.

El contenido en el influente fue de:

- SS<sub>T</sub>: 40-180 mg SS/l.
- P<sub>T</sub>: 0.08-0.38 mg P/l (mayoritariamente orgánico particulado).
- N<sub>T</sub>: 3-9 mg N/l (mayoritariamente disuelto y orgánico particulado).

En conjunto, la materia particulada fue eliminada (más de un 90%) por el humedal, y en cambio, los componentes orgánicos solubles no fueron afectados. Los componentes inorgánicos solubles (amonio, nitrato y fósforo reactivo soluble) fueron bajos en el agua del lago pero incrementados durante su transporte a lo largo del humedal.

Las eficiencias de eliminación en masa fueron:

- SS<sub>T</sub>: 89-99 %
- P<sub>T</sub>: 30-67 % (mayoritariamente orgánico particulado).
- N<sub>T</sub>: 30-52 % (mayoritariamente disuelto y orgánico particulado).

**Fuente: Coveney y col., 2002.**

- II. Para estudiar la capacidad de purificar el agua eutrofizada del lago Taihu, China, tres unidades de humedales artificiales, a escala piloto (de flujo subsuperficial vertical, de flujo subsuperficial horizontal y de flujo superficial), dispuestos en paralelo fueron construidos.

El agua del lago fue continuamente bombeada dentro de los humedales con una carga hidráulica de  $0.64 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$  para cada humedal.

Los rendimientos de un año muestran que las tasas de eliminación promedio fueron:

- DQO: 17-40 %
- $P_T$ : 35-66%
- $N_T$ : 20-52%
- $\text{NH}_4^+$ : 23-46%
- $\text{NO}_3^-$ : 34-65%

Se resalta la importancia del consumo y almacén por parte de las plantas, en la eliminación del nitrógeno y del fósforo en los tres humedales.

Sus resultados sugieren que podrían emplearse humedales artificiales para tratar las aguas del lago Taihu.

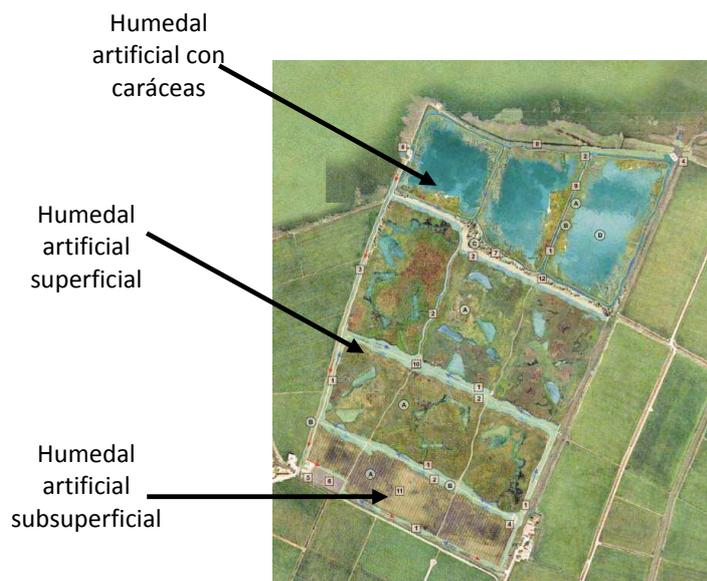
**Fuente: Li, L. F. y col., 2008.**

Las plantas macrófitas, han sido ampliamente empleadas en la ingeniería ambiental, para el tratamiento de aguas superficiales y aguas residuales debido principalmente a su eficacia en asimilar nutrientes y crear condiciones favorables para la descomposición microbiana de la materia orgánica (Wang y col. , 2009).

La restauración con macrófitos es considerada crucial para regular la estructura biológica de los lagos, ya que estas plantas, limitan el crecimiento algal por competencia de nutrientes y de radiación solar y también incrementan la biomasa de peces herbívoros por proporcionar comida y alimento (Li, L. F.200 y col., 2010).

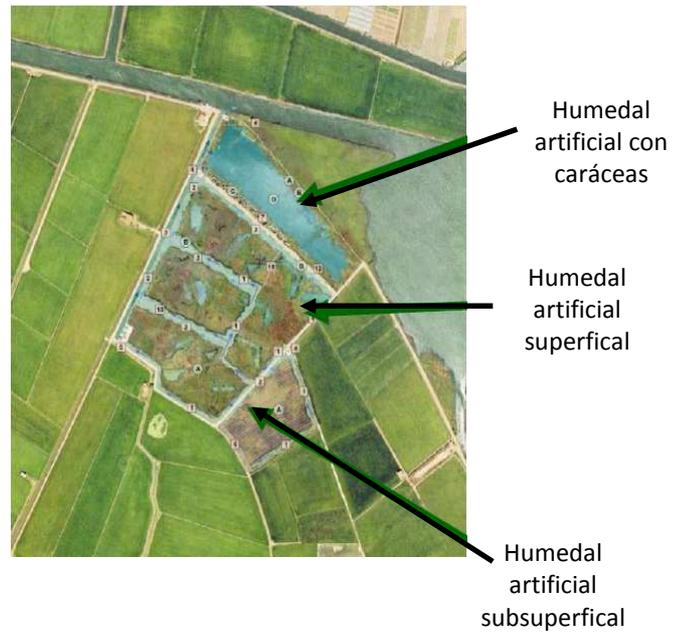
### 3.3 HUMEDALES ARTIFICIALES EN EL ENTORNO DE L'ALBUFERA DE VALENCIA.

Dentro del programa A.G.U.A para el desarrollo sostenible de l' Albufera de Valencia se encuentra la actuación: *Reutilización de las aguas residuales depuradas de la Albufera Sur* en la que se contempla el emplazamiento de un humedal artificial en el "Tancat de Mília", que consiste en 10 ha de humedal artificial con caráceas, 18 ha de humedal artificial de flujo superficial y 4,5 ha de humedal artificial de flujo subsuperficial. Con esta actuación se pretende mejorar en calidad y cantidad las aportaciones hídricas al lago de l'Albufera, al verter al mismo, el efluente (que no ha sido utilizado para riego) procedente del tratamiento terciario de la depuradora Albufera Sur, previo tratamiento del mismo mediante el humedal artificial. Éste último, reducirá aún más el contenido de nutrientes en el agua, contribuyendo a revertir el estado trófico que padece el lago y alcanzar los parámetros establecidos como óptimos según el artículo 55 del Plan Rector de Uso y Gestión del Parque Natural de l'Albufera (R.D 259/2004 de 19 de noviembre del Consell de la Generalitat).



**Figura 11: Humedal Artificial en el Tancat de Mília. Fuente: Adaptado del Congreso Nacional del Medio Ambiente. Cumbre del desarrollo sostenible.**

Además, dentro del mismo programa se prevé la ubicación de otro humedal artificial en el "Estany de la Plana" que constará de 3.2 ha de humedal artificial con caráceas, 9.5 ha de humedal artificial superficial y 2 ha de humedal artificial subsuperficial.



**Figura 12: Humedal Artificial en el Estany de la Plana. Fuente: Adaptado del Congreso Nacional del Medio Ambiente. Cumbre del desarrollo sostenible.**

### 3.4 MODELOS MATEMÁTICOS.

#### 3.4.1 INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS

Un modelo matemático se define como una descripción desde el punto de vista de las matemáticas de un hecho o fenómeno del mundo real. Se trata de una representación de la realidad física, química y biológica de un sistema natural. *Debido a la dificultad que conlleva la representación exacta de los sistemas naturales, los modelos simplifican esta realidad hasta alcanzar la aproximación que mejor se ajuste a la dinámica del sistema.*

La modelación tiene por objetivo último la creación de un medio ficticio en el que poder experimentar situaciones sin que sea necesario llevarlas a la realidad para poder observarlas, pueden servir como herramienta para gestionar los recursos hídricos o para obtener medidas correctoras en sistemas naturales degradados, a la vez que mejorar el conocimiento que se tiene de los ecosistemas.

Existen dos grandes grupos de modelos en el campo de calidad de las aguas:

- **Modelos inductivos o empíricos.** Estos modelos se basan en el establecimiento de relaciones entre variables a partir de un gran número de datos de campo.
- **Modelos deductivos o mecanicistas.** Estos modelos aplican la ley de la conservación de la materia para llegar a la ecuación general de transporte. Establecen una serie de relaciones teóricas entre las variables que intervienen en el proceso, por tanto, necesitan de una serie de parámetros químicos, físicos y biológicos para poder ser resueltos.

#### 3.4.2 EMPLEO DE MODELOS EN HUMEDALES ARTIFICIALES.

##### 3.4.2.1 PERSPECTIVA HISTORICA

Históricamente los modelos mecanicistas de humedales han sido de poca utilidad debido a la dificultad de su calibración. Las regresiones entradas-salidas permiten calcular la concentración a la salida para sistemas específicos.

Casi todas las técnicas estadísticas existentes no tienen en cuenta aspectos importantes en el rendimiento de los humedales, incluidos los efectos de la hidráulica, la meteorología, las interacciones de la biota y el tratamiento, los problemas de suministro, y la variabilidad estacional y estocástica.

Existe también una elevada incertidumbre de usar relaciones empíricas fuera el entorno para las cuales ellas fueron desarrolladas.

Tres principales temas han sido frecuentes en la historia del diseño de humedales artificiales:

- ◆ Consideración de los contaminantes y de la carga hidráulica.
- ◆ Modelos de primer orden de eliminación.
- ◆ Ecuaciones de regresión.

### **3.4.2.2 MODELACIÓN DE PRIMER ORDEN.**

Los modelos de primer orden están en uso común para el diseño de los humedales artificiales. Estos frecuentemente se basan en datos de entradas y de salidas. A menudo se suele asumir que los parámetros de estos modelos son verdaderas constantes y que por tanto, no dependen de factores tales como la carga hidráulica y las concentraciones en la entrada. Otra hipótesis común es que el flujo a pistón es una razonable aproximación a las condiciones hidráulicas en el humedal.

Un ejemplo del empleo de modelos de primer orden para la eliminación de nutrientes, es el modelo k-C\* (Kadlec y Knight, 1996).

Coveney (2002), empleó este modelo para caracterizar el proceso de eliminación de nutrientes en la primera celda de su humedal.

El modelo k-C\* puede representarse como:

$$C_o = C^* + (C_i - C^*) \exp(-kA/Q)$$

Donde,

$C_o$ : Concentración (mg/l) en el efluente.

$C^*$ : *Concentración base* (mg/l) en el humedal (*background concentration*).

$C_i$ : Concentración (mg/l) en el influente.

$K$ : Tasa de eliminación de primer orden (m/año).

$A$ : Área del humedal (m<sup>2</sup>).

$Q$ : Caudal de agua (m<sup>3</sup>/año).

Este modelo describe el promedio a largo plazo de eliminación de sustancias en un humedal, bajo condiciones ideales de flujo a pistón. Son necesarias ciertas asunciones sobre las características hidrológicas del humedal y la distribución temporal de la carga.

La tasa de eliminación de primer orden ( $k$ ), describe la disminución en la concentración de un constituyente en el humedal desde el nivel en la entrada hacia una *concentración base* ( $C^*$ ), establecida por procesos internos, lluvia o otros factores.

Kadlec (2000) usó datos simulados para demostrar debilidades en el modelo de primer orden. En particular, parámetros asumidos en el modelo como constantes, realmente presentan variaciones con la carga de entrada.

### **3.4.2.3 ECUACIONES DE REGRESIÓN.**

Los modelos de regresión lineales permiten analizar la relación existente entre una variable aleatoria  $Y$ , y una o mas variables explicativas  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_i$ , a partir de una muestra de  $n$  valores observados.

Las variables principales que determinan la concentración a la salida ( $C_o$ ) son la carga hidráulica ( $q$ ), o el equivalente tiempo de retención hidráulico ( $h/q$ ), y la concentración en la entrada ( $C_i$ ). Otras influencias incluyen la temperatura, la radiación solar y el pH.

Un ejemplo de las ecuaciones de regresión que aparecen en la bibliografía es la presentada por Kadlec y Knight (1996), para la concentración de nitrato (Kadlec y Wallace, 2009):

$$C_o = 0.093C_i^{0.474} q^{0.745}$$

### 3.4.2.4 ESTIMACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN BASE.

Frecuentemente, en la aplicación del modelo k-C\*, la *concentración base* (C\*), es asumida cero. Sin embargo, Kadlec (2000), demostró la existencia de debilidades en el modelo de primer orden que fueron menos severas, cuando se asumieron valores distintos de cero para la C\*.

Coveney (2002), estimó los valores de C\* para las fracciones de nutrientes en el humedal a partir de las más bajas concentraciones observadas en el efluente. Para ello, describieron un límite inferior de concentraciones para cada fracción de nutrientes, como una función curvilínea de la temperatura. De este modo, usaron una aproximación de la ecuación de Arrhenius, para adaptar una línea que interceptara uno o dos puntos y formara un límite inferior para los datos observados.

Las ecuaciones obtenidas por Coveney (2002) fueron las siguientes:

$$C^* (SS_T) = 0.5 \cdot 1.25^{T-18.98} \quad \text{mg/l}$$

$$C^* (P_T) = 0.0720 \cdot 1.025^{T-21.29} \quad \text{mg/l}$$

Donde T es la temperatura expresada en grados Celsius.



## ESTUDIOS PREVIOS



## **4 ESTUDIOS PREVIOS.**

En este apartado se recogen los estudios realizados en el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia relacionados con la aplicación de humedales artificiales para tratar las aguas del lago de l'Albufera de Valencia.

### **4.1 DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO MEDIANTE PLANTAS MACRÓFITAS DE LAS AGUAS DE LAGOS ALTAMENTE EUTROFIZADOS. APLICACIÓN AL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS DEL LAGO DE LA ALBUFERA DE VALENCIA. (Jurado, 1999).**

*M. Martín, D. Jurado Environmental restoration of hypereutrophic lakes by means of the treatment with artificial wetlands. Analysis of viability in the case of the Albufera of Valencia, Spain. Environment 2010: Situation and Perspectives for the European Union. Porto (Portugal).*

En el año 1999 en el Departamento de Ingeniería Hidráulica y de Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia, ya se empezó a investigar en la posibilidad de emplear un humedal artificial en l'Albufera de Valencia, como una medida para la restauración de sistemas naturales eutrofizados.

Para ello se llevaron a cabo dos líneas de trabajo:

1. Se estudió en profundidad y de forma exhaustiva los resultados que se habían obtenido en las dos últimas décadas en cuanto a tratamiento de aguas residuales urbanas con humedales artificiales. Con ello se pretendía alcanzar la mayor base científica y experimental posible, para la posterior aplicación de estos sistemas en la restauración de sistemas naturales eutrofizados.
2. Se analizó la situación en que se encontraba el lago de l'Albufera de Valencia en ese momento y se propuso un método de trabajo para el cálculo y el diseño de los humedales artificiales necesarios para la restauración de dicho

lago, presentando una posible solución y las posibles repercusiones de ésta, tanto en el medio natural como en el social.

Las conclusiones más importantes que se obtuvieron de este trabajo fueron las siguientes:

- ◆ Se demostró que el lago, de l'Albufera de Valencia, seguía en estado hipereutrófico.
- ◆ Para el diseño del humedal se empleó como parámetro fundamental, la velocidad de sedimentación del fitoplancton.
- ◆ El cálculo de dicha velocidad dio un valor de 0.14m/día. Este valor fue muy similar al que obtuvo Margalef (1983) de 0.09 m/día para la sedimentación de las cianofíceas en lagos.
- ◆ Se estimó que el caudal para el tratamiento, con un sistema de 4 ha de superficie útil, variaría entre 520.000 y 400.000 m<sup>3</sup>/año. Ello suponía que para tratar al menos 1 vez al año toda el agua del lago se necesitarían entre 40 y 50 ha de humedal.
- ◆ Se comprobó que la descomposición del fitoplancton, suponía un aporte importante de nutrientes, necesarios para el crecimiento de las plantas.
- ◆ El cosechado del 30% de la vegetación plantada (parte aérea) anual, supondría la total eliminación del fósforo que entraría al sistema.

#### **4.2 ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DEL APOORTE DE NUTRIENTES GENERADOS POR LA DESCOMPOSICIÓN DE LA BIOMASA PLANCTÓNICA DE LA ALBUFERA DE VALENCIA. INFLUENCIA DE LA RADIACIÓN SOLAR. (Guirado, 2009)**

El objetivo principal de este estudio fue evaluar el aporte de nutrientes, para un sistema de humedal artificial de flujo superficial, que se generaría, tras la descomposición de la biomasa fitoplanctónica presente en las aguas eutrofizadas del lago de l'Albufera de

Valencia, y la evaluación del aumento de la transparencia generada por la sedimentación de los sólidos suspendidos.

Se realizó un análisis de la evolución de la concentración de nutrientes, un análisis de la evolución de la concentración de oxígeno, un análisis de la influencia de la radiación luminosa, y por último, un estudio de la sedimentación de los sólidos suspendidos.

Las aguas que fueron objeto de este estudio, eran aguas con una alta eutrofización; tal y como sigue sucediendo en la actualidad. Uno de los factores clave en el diseño de estos sistemas naturales, es el porcentaje de sombreado que proporcionan las macrófitas, ya que, la supervivencia del fitoplancton depende, entre otros factores, de la intensidad luminosa que recibe.

Las conclusiones más importantes de este trabajo fueron:

- ◆ Se comprobó que la materia orgánica fitoplanctónica de l' Albufera es capaz de ser eliminada del agua mediante procesos de sedimentación.
- ◆ La sedimentación está muy afectada por las condiciones de iluminación. En presencia de radiación luminosa, incluso a muy bajas intensidades (<58 watt/m<sup>2</sup>, un 10% de la que alcanza la superficie) el fitoplancton no sedimenta con tanta facilidad ya que puede realizar la fotosíntesis gracias a los propios nutrientes que se aportan cuando parte de él muere.
- ◆ De las tres condiciones que se estudiaron (oscuridad total, iluminación alta e iluminación baja), la mayor sedimentación se produjo en condiciones de total oscuridad. La velocidad de sedimentación obtenida fue de 0.079 m/d (valor medio de los cinco ensayos), lo cual significa que, en una laguna de 0.4 m de profundidad, el fitoplancton tardará unos 3 días en reducirse en un 50% y unos 11 días en reducirse en un 90%.
- ◆ Se comprobó que la materia orgánica fitoplanctónica fue descompuesta durante el periodo de estudio y proporcionó nutrientes, tanto en el agua como en el sedimento, que servirán para el crecimiento de plantas macrófitas.

- ◆ El aporte de nutrientes fue muy variable no solamente en función de las condiciones de luz, sino también de la temperatura y del oxígeno disuelto.
- ◆ Las concentraciones de oxígeno disuelto medidas no mostraron problemas de anoxia en ninguno de los experimentos. Sí se observaron menores concentraciones en los conos en oscuridad (ausencia de fotosíntesis, pero también de respiración algal) debido al consumo asociado a la descomposición de la materia orgánica fitoplanctónica.
- ◆ Se registraron concentraciones de oxígeno por encima de saturación en los conos iluminados, lo cual refleja, de nuevo, la actividad fitoplanctónica.
- ◆ A efectos del diseño de humedales artificiales para la reducción del fitoplancton de l' Albufera, se puede tomar como parámetros orientativos los valores de  $7.5 \text{ l/m}^2 \text{ d}$  para la carga superficial y de  $0.95 \text{ g SS/m}^2 \text{ d}$  para la carga de sólidos.

#### **4.3 DESARROLLO Y CALIBRACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO DE LA EVOLUCIÓN DEL APORTE DE NUTRIENTES POR DESCOMPOSICIÓN DE LA BIOMASA FITOPLANCTÓNICA DE LA ALBUFERA DE VALENCIA. INFLUENCIA DE LA RADIACIÓN SOLAR. (Oliver, 2010).**

El objetivo principal de este ejercicio final de carrera, fue el desarrollo de un modelo matemático, a escala horaria, que representara la evolución en la calidad de las aguas de un sistema altamente eutrofizado, como el de l'Albufera de Valencia, a partir de los datos obtenidos en los trabajos anteriores.

Con ello, se pretendió conocer mejor los factores que influyen en el aporte de nutrientes interno (procedentes del propio fitoplancton). Ello permitiría por un lado, evaluar la capacidad de mantenimiento de la eutrofización del lago gracias a esos aportes internos, y por otro lado, estudiar la capacidad de crecimiento de un sistema de humedales artificiales alimentado con esta agua.

Las conclusiones principales que se obtuvieron de este trabajo fueron las que se detallan seguidamente:

- ◆ Se consiguió desarrollar y calibrar un modelo matemático de calidad de aguas, que representa la eutrofización a escala horaria.
- ◆ La anulación de los efectos que produce la radiación solar en el sistema, permitió detectar, la influencia en el mismo de la nitrificación.
- ◆ En los conos sometidos a luz, en cambio, el proceso de nitrificación no se identificó fácilmente, probablemente la causa de ello fue que el consumo de nitrato y de amonio para el crecimiento del fitoplancton, es tan importante en los sistemas eutrofizados, que el proceso de nitrificación prácticamente no tenga ocurrencia.
- ◆ Se introdujo una nueva variable en el modelo, que se denominó como *fósforo acumulado*, y que hace referencia al fósforo inorgánico que se acumula en el interior de las células fitoplanctónicas.
- ◆ Los buenos resultados obtenidos, indicaron que en sistemas hipereutrofizados, como en nuestro caso, el ciclo interno de reciclaje de nutrientes (sobretudo, del fósforo y del nitrógeno) llevado a cabo, tanto por el propio fitoplancton, como por las bacterias nitrificantes, es muy importante.
- ◆ Por último, hay que indicar, que este modelo matemático se incluirá, en un modelo general de los humedales artificiales del “Tancat de la Pipa” (Albufera de Valencia). El modelo general incluirá agua, plantas y sedimentos, y el presente ejercicio servirá como modelo de apoyo para su desarrollo.
- ◆ En este sentido, se pueden extrapolar las condiciones del laboratorio al medio natural, y estaríamos por tanto, ante tres sistemas acuáticos con distintos grados de cobertura vegetal:
  - ◆ El cono sometido a total oscuridad, representaría las condiciones que se darían en un sistema que presentara

una cobertura vegetal aproximadamente del 100%. Como consecuencia de ello, no podría penetrar al medio acuático, ni un pequeño porcentaje de la radiación fotosintéticamente activa y todo el sistema acuático estaría, bajo el efecto sombra.

- ◆ El cono sometido a una intensidad de radiación media, representaría mejor las condiciones que se dan en el medio natural, ya que la cobertura vegetal, nunca suele ser del 100 % ni tampoco suele estar totalmente desnudo.
- ◆ El cono sometido a la más alta intensidad luminosa, simularía las condiciones que se dan en un sistema lacustre donde el grado de cobertura vegetal fuese bastante elevado.

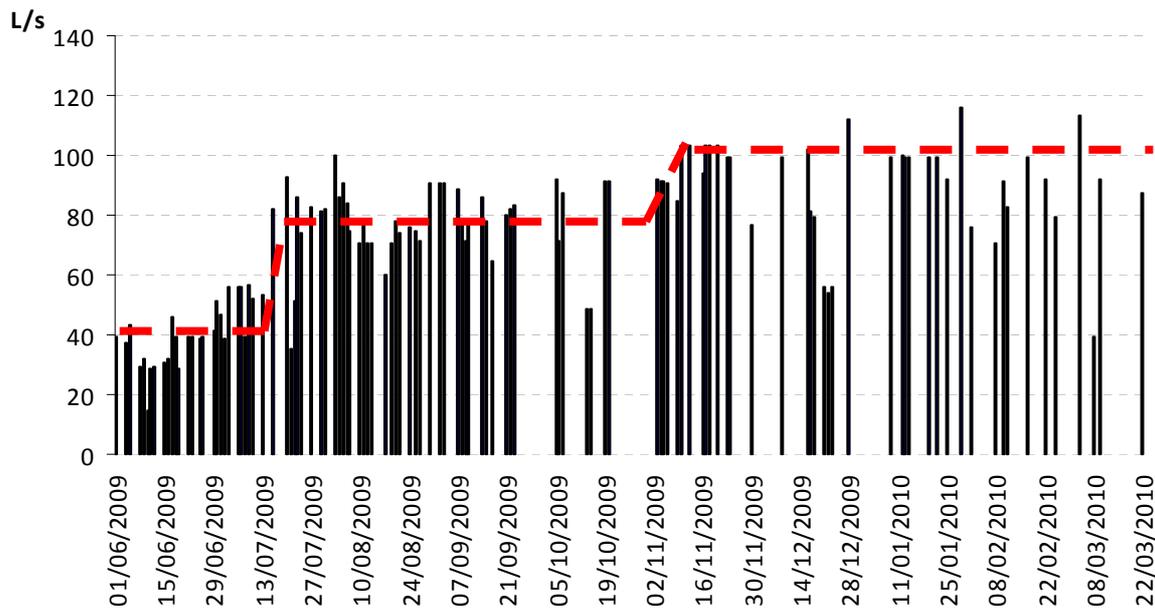
#### **4.4 ESTIMACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO ANUAL, EN EL HUMEDAL ARTIFICIAL DEL TANCAT DE LA PIPA, CON APOYO DE MODELOS MATEMÁTICOS DE CALIDAD DE AGUAS; PARA CONTAMINANTES CONSERVATIVOS. (Angarita, 2010).**

En un estudio previo realizado en el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia, se realizaron mediciones de caudales circulantes por los las celdas de los humedales artificiales en diferentes fechas, comprendidas dentro del periodo de tiempo de análisis en la presente tesina.

Ello se llevó a cabo mediante el empleo de un Minimolinete M1 (Marca SEBA), que permitió medir la velocidad del flujo que atravesaba una compuerta determinada en un instante concreto.

En este trabajo también se determinaron los tiempos de residencia hidráulicos en cada uno de los humedales, y la distribución de caudales en el sistema.

Los caudales de entrada al humedal artificial durante el periodo estudiado fueron los que aparecen reflejados en el siguiente gráfico:



**Figura 13: Caudales de entrada al sistema de humedales artificiales desde el 1 de Julio del 2009 hasta el 22 de Marzo de 2010. En las fechas anteriores al 1 de Julio del 2009, no hay registros de caudales de entrada, ya que no se disponía de medidores en los puntos de entrada al sistema. Hasta el 13 de Julio solamente entraba agua por el Barranco del Poyo pero a partir de esta fecha también entra agua desde la Acequia del Puerto de Catarroja.**

En la figura superior se observa claramente tres periodos con distinto caudal medio. Al inicio del arranque del sistema de tratamiento (abril del 2009), el caudal fijado en la entrada fue de unos 12 l/s. Este caudal se mantuvo hasta principios de junio donde se aumentó a unos 40 l/s. Esta medida se tomó para facilitar el enraizamiento y establecimiento de la vegetación (plantada en las celdas entre enero y febrero del 2009), y conseguir de este modo, la densidad de vegetación deseada.

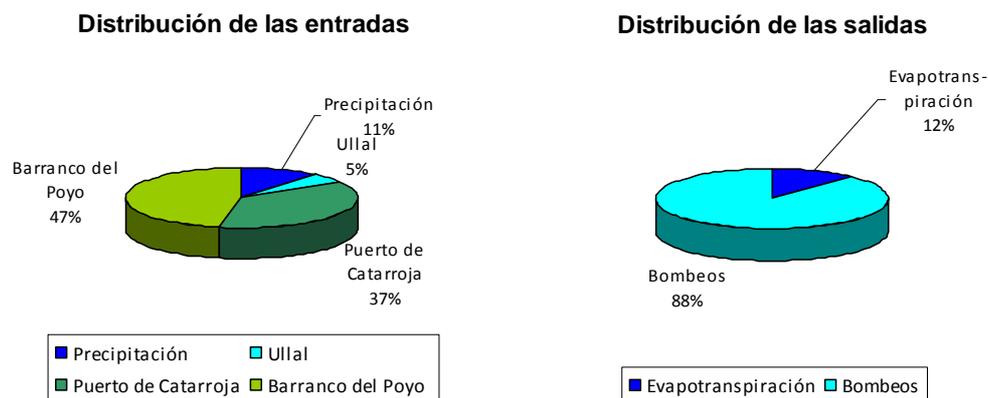
En julio del 2009, dado que la vegetación ya había conseguido una densidad aceptable y los rendimientos obtenidos hasta el momento estaban mejorando, se decidió aumentar el caudal a tratar. El objetivo perseguido en cuanto a caudal de entrada, no era posible de alcanzar a menos que se abriera paso por la Acequia del Puerto de Catarroja, ya que los niveles del lago eran lo suficientemente bajos como para limitar la entrada por el Barranco del Poyo. Es por tanto, a partir de este mes, cuando el caudal de entrada al sistema es la suma del caudal de entrada por el Barranco del Poyo y del caudal de entrada por la Acequia de Catarroja (sin tener en cuenta la precipitación sobre las celdas).

Finalmente, siendo satisfactorios los rendimientos conseguidos hasta el momento, se decide nuevamente aumentar el caudal de entrada a partir del mes de noviembre del 2009, buscando conseguir un caudal medio de unos 100 l/s.

**Tabla 7: Caudal medio a la entrada del sistema de humedales artificiales en los periodos abril'09-junio'09, junio'09-julio'09, julio'09-noviembre'09 y noviembre'09-marzo'10.**

Periodos	Caudal medio(l/s)
Abril-Junio	12
Junio-Julio	40,50
Julio-Noviembre	78,78
Noviembre-Marzo	90,47

Como se indicó al inicio de este apartado, en este trabajo previo a la presente tesina, se determinó la distribución de los caudales de entrada y de salida al Tancat de la Pipa y los resultados que se obtuvieron son los que aparecen reflejados en la siguiente figura:

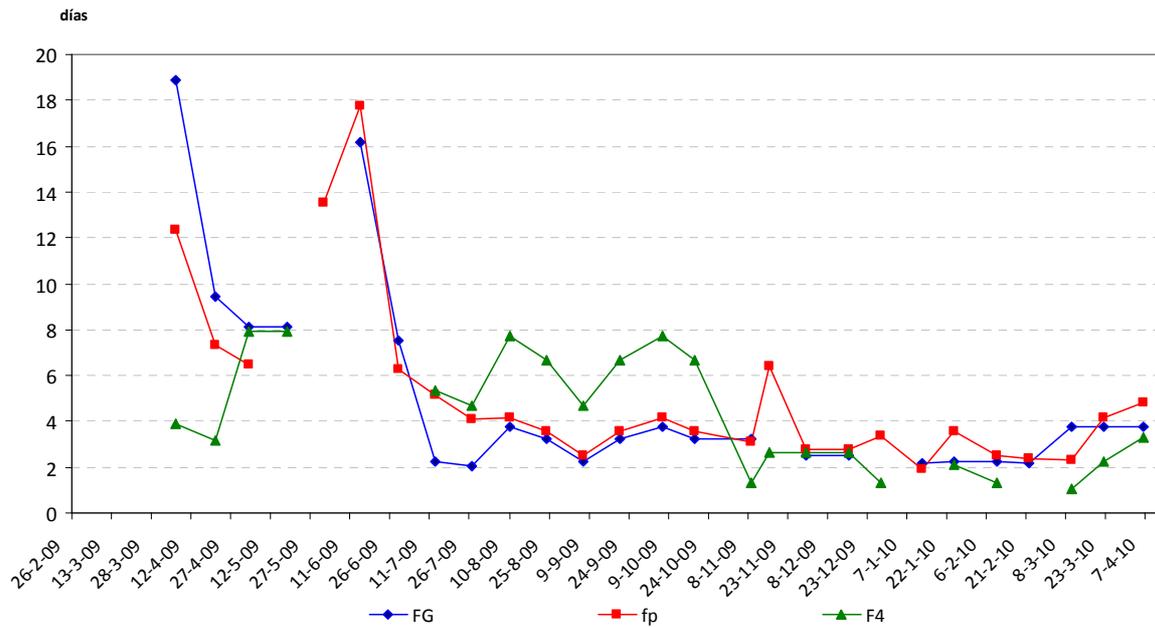


**Figura 14: Distribución de los caudales de entrada y salida del Tancat de la Pipa. Fuente: Adaptado de "Estimación del balance hídrico anual, en el humedal artificial del Tancat de la Pipa, con apoyo de modelos matemáticos de calidad de aguas, para contaminantes conservativos" (Angarita, 2010)**

Los tiempos de residencia de cada sistema de celdas en serie calculados en este trabajo se presentan a continuación:

**Tabla 8: Tiempos de residencia hidráulico (días) en los humedales artificiales. Fuente: Adaptado de “Estimación del balance hídrico anual, en el humedal artificial del Tancat de la Pipa, con apoyo de modelos matemáticos de calidad de aguas, para contaminantes conservativos” (Angarita, 2010)**

<i>Tiempo de residencia (días)</i>			
FECHA	FG	fp	F4
06/04/2009	18,89	12,36	3,88
21/04/2009	9,44	7,33	3,20
04/05/2009	8,09	6,45	7,89
18/05/2009	8,09		7,89
01/06/2009		13,55	
15/06/2009	16,19	17,73	
29/06/2009	7,55	6,25	
13/07/2009	2,22	5,12	5,36
27/07/2009	2,06	4,08	4,68
10/08/2009	3,78	4,13	7,76
24/08/2009	3,24	3,54	6,65
07/09/2009	2,27	2,48	4,65
21/09/2009	3,24	3,54	6,65
07/10/2009	3,78	4,13	7,76
19/10/2009	3,24	3,54	6,65
09/11/2009	3,24	3,12	1,34
16/11/2009		6,40	2,65
30/11/2009	2,52	2,75	2,65
16/12/2009	2,52	2,75	2,65
28/12/2009		3,36	1,32
13/01/2010	2,18	1,89	
25/01/2010	2,27	3,57	2,11
10/02/2010	2,27	2,48	1,34
22/02/2010	2,18	2,38	
10/03/2010	3,78	2,29	1,06
22/03/2010	3,78	4,13	2,23



**Figura 15: Tiempos de residencia hidráulico (días) en los humedales artificiales. Fuente: Adaptado de “Estimación del balance hídrico anual, en el humedal artificial del Tancat de la Pipa, con apoyo de modelos matemáticos de calidad de aguas, para contaminantes conservativos” (Angarita, 2010).**

En la figura superior se observa como durante los primeros meses de operación del humedal artificial, los tiempos de residencia hidráulicos eran bastante elevados, siendo el promedio en los humedales *FG* y *fp* de unos 12 días, a excepción del *F4* en el que los tiempos de residencia rondaban los 6 días. Ello se explica por los bajos caudales que estaban entrando en el sistema hasta el mes de julio del 2009.

Finalmente, el reparto del promedio de los caudales de entrada en el sistema de humedales artificiales que se determinó es el siguiente: del caudal de entrada total proveniente de la Acequia del Puerto de Catarroja y del Barranco del Poyo, aproximadamente el 56% ingresa al sistema *FG*, el 15% al sistema *fp* y el restante 29% ingresa al *F4*.

### Reparto del caudal de entrada

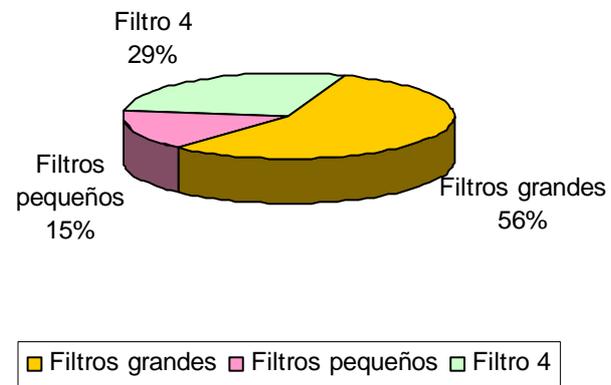


Figura 16: Distribución del caudal de entrada en los *FG, fp* y *F4*

## ÁREA DE ESTUDIO

---



## 5 ÁREA DE ESTUDIO.

### 5.1 ANTECEDENTES.

La actuación se lleva a cabo en el sector norte del lago de l'Albufera, dentro de la zona de afección del "Proyecto de restitución y adaptación de cauces naturales de los barrancos Poyo, Torrente, Chiva y Pozalet (Valencia)" presentado por la Confederación Hidrográfica del Júcar.

Este proyecto de restauración medioambiental ha sido desarrollado de forma conjunta por la Generalitat Valenciana, a través de la Consejería de Medio Ambiente, Agua, Urbanismo y Vivienda y el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, a través de la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ). La inversión de la actuación ascendió a 6,8 millones de euros, de los cuales el 70% fueron financiados por el Ministerio, a través de Fondos FEDER, y el 30% restante a través de los presupuestos de la Generalitat.

La ejecución del proyecto se ha realizado en dos fases. Por un lado, la "*Recuperación de espacios y actuaciones de gestión hídrica en la desembocadura del Poyo*" y, por otro lado, la "*Restauración de hábitats y adecuación para el uso público en la desembocadura del Poyo*".

Entre las actuaciones propuestas en el proyecto, se contempló el emplazamiento de un humedal artificial de flujo superficial en el Tancat de la Pipa, para depurar las aguas del lago. De este modo, las lagunas artificiales, contempladas también en el proyecto, se alimentarían de agua de buena calidad. Ello permitiría favorecer el desarrollo de comunidades biológicas prioritarias y potenciar la recuperación de especies raras y amenazadas que no obstante, están presentes de forma natural en este tipo de ambientes.

En resumen, los objetivos del proyecto llevado a cabo en este singular enclave fueron:

- Delimitar, como entorno natural, una extensa superficie de titularidad pública dentro del Parque Natural de l'Albufera.
- Realizar una experiencia piloto de manejo y mejora de la calidad del agua de l'Albufera, gracias a la puesta en marcha de un sistema de humedales artificiales para depurar el agua del lago.

- Favorecer el desarrollo de comunidades biológicas prioritarias y potenciar la recuperación de especies raras y amenazadas presentes en este tipo de ambientes.
- Favorecer el uso didáctico y educacional del espacio.
- Preservar este enclave y garantizar su incorporación como zona de reserva.

Para una gestión adecuada de la zona, se están llevando a cabo desde principios de 2009, un seguimiento científico de los principales parámetros ambientales, con especial interés, en los relacionados con las aguas. Se estudian, además del sistema de depuración, la evolución de las comunidades de plancton, de macrófitos, de artrópodos, de aves y de murciélagos. El análisis de toda la información, permitirá evaluar la eficiencia de los humedales artificiales, como sistema de mejora de la calidad de las aguas en todo el Parque Natural de l'Albufera de Valencia.

## 5.2 TANCAT DE LA PIPA (PARQUE NATURAL DE L'ALBUFERA DE VALENCIA).

El Tancat de la Pipa se trata de un espacio de aproximadamente 40 hectáreas, pertenecientes al término municipal de Valencia, dedicadas con anterioridad a la presente actuación al cultivo del arroz. Estos terrenos, fueron expropiados, pues hasta ese momento, eran de propiedad privada. Actualmente, solo el 17 % de la extensión del Parque Natural de l'Albufera de Valencia es de titularidad pública.



**Figura 17: Fotografía aérea de la marjal inundada. Fuente: [www.albufera.com](http://www.albufera.com)**

Los denominados Tancats de l'Albufera, son terrenos que antaño formaban parte del lago y que poco a poco, debido a los aterramientos llevados a cabo durante los siglos XIX y XX, se han ido transformando en zonas de arrozal. Por tanto, un Tancat es un conjunto de

arrozales que cuentan con un servicio común para llenar y vaciar las parcelas que lo componen.

El término Tancat es la traducción en valenciano de *cerrado*. Se denominan así, porque el nivel de los arrozales está por debajo del nivel del lago, y por tanto, se necesita aislar el cultivo de L'Albufera. Ello se consigue mediante altas motas que impiden que el nivel de agua en los campos se iguale al nivel del lago, y, de este modo que no permanezca constantemente inundado.

No obstante, en época de inundación de los Tancats, normalmente a principios de noviembre, esta diferencia de niveles permite el llenado de los arrozales por gravedad.

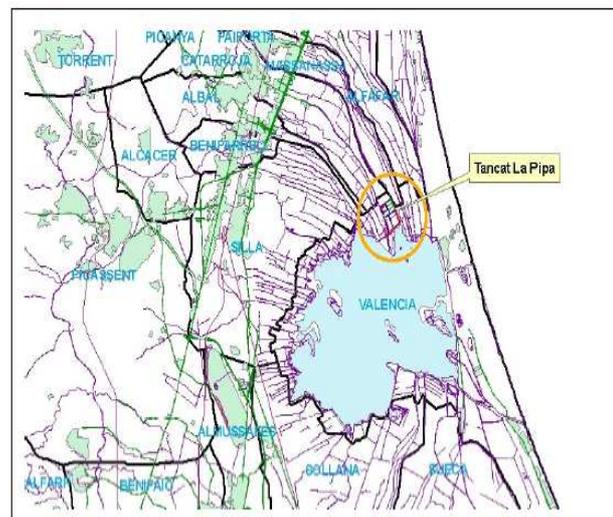
Cuando los Tancats se vacían para realizar las labores de cultivo pertinentes, normalmente a principios de enero, toda el agua saliente del Tancat va a parar al llamado *sequiol dormidor*, que la conduce hacia la laguna, en ocasiones con la ayuda de un motor.



**Figura 18: Antiguo motor del Tancat de la Pipa, actualmente restaurado y habilitado para uso público. Fuente: [www.tancatdelapipa.net](http://www.tancatdelapipa.net)**

### 5.2.1 LOCALIZACIÓN.

El Tancat de la Pipa está situado al norte del Parque Natural de l'Albufera. Concretamente, entre el barranco del Poyo y la Acequia del Puerto de Catarroja, en las inmediaciones del lago de l'Albufera, en la zona conocida como Punta del LLebeig.



**Figura 19: Mapa de situación. Fuente: "Memoria del proyecto de recuperación de espacios y actuaciones de gestión hídrica en la desembocadura del Poyo".**



Figura 20: Mapa de situación. Fuente: [www.tancatdelapipa.net](http://www.tancatdelapipa.net)

### 5.2.2 CLIMA EN EL ENTORNO DEL TANCAT DE LA PIPA.

El conocimiento de factores climáticos como la temperatura, la precipitación y la evapotranspiración es muy importante a la hora de determinar los objetivos que en materia de calidad y grado de depuración se pueden llegar a conseguir.

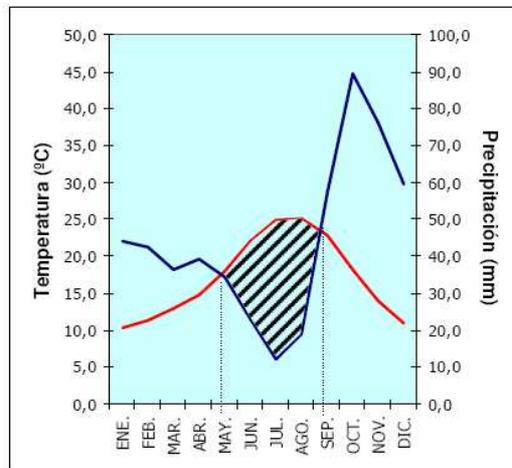


Figura 21: Climograma de la zona del estudio. Fuente: “Proyecto de recuperación de espacios y actuaciones de gestión hídrica en la desembocadura del Poyo”.

Como se observa en la figura 21, el clima de la zona de estudio es Mediterráneo, con un periodo estival que abarca desde el mes de mayo hasta el de septiembre, y un periodo de fuertes precipitaciones (lluvias torrenciales) entre los meses de octubre y diciembre

(*Memoria del proyecto de recuperación de espacios y actuaciones de gestión hídrica en la desembocadura del Poyo*).

Además, la evaporación es de 866 mm, valor superior al de precipitación (534mm). Ello tendrá incidencias en el régimen de circulación del agua por el Tancat (*Memoria del proyecto de recuperación de espacios y actuaciones de gestión hídrica en la desembocadura del Poyo*).

### **5.2.3 ACTUACIONES PROPUESTAS DENTRO DEL TANCAT DE LA PIPA.**

Dentro del Tancat de la Pipa, se contemplaba la construcción de 3 ambientes diferentes. Estos son los siguientes:

- Un ecosistema palustre con función de humedal artificial, para tratar las propias aguas del lago, a fin de reducir sus contenidos de materia orgánica, principalmente en forma de fitoplancton, y de nutrientes inorgánicos.
- Un ecosistema de Ullal. Para la obtención de agua de buena calidad se realiza la captación de la misma desde un acuífero cercano. Este ecosistema permite el mantenimiento de poblaciones de macrófitos sumergidos y especies de fauna piscícola y macroinvertebrada propias de la zona.
- Un ecosistema de marjal, cuya función es la recuperación de los antiguos marjales de l'Albufera y de las especies de macrófitos sumergidos características de la misma.

Acompañando a estos ecosistemas, se encuentran todos los canales de drenaje y de alimentación necesarios para la gestión hídrica del Tancat de la Pipa.



Figura 22: Ambientes ubicados en el Tancat de la Pipa. Fuente: adaptado [www.tancatdelapipa.net](http://www.tancatdelapipa.net)

### 5.3 HUMEDALES ARTIFICIALES EN EL TANCAT DE LA PIPA.

Los humedales artificiales del Tancat de la Pipa, se engloban dentro del grupo de humedales artificiales de flujo superficial, con macrófitas emergentes típicas de este tipo de ecosistemas. Estos ocupan un 25 % (unas 10 Has) aproximadamente de la superficie del Tancat (unas 40 Has).



Figura 23: Fotografía aérea del Tancat de la Pipa. Fuente: Confederación hidrográfica del Júcar.

Al encontrarse los humedales artificiales, dentro del Parque Natural, el diseño de este sistema fue diferente al de los encontrados en bibliografía. Se intentó integrar de la manera más natural posible al conjunto del enclave, generando un hábitat más, para el desarrollo de comunidades biológicas prioritarias y para la recuperación de especies raras y amenazadas típicas de estos ambientes. Debido a ello, su construcción se adaptó a las características del

terreno y del ecosistema preexistente, intentando provocar el menor impacto posible al ambiente original.

Las consecuencias de lo anterior, fueron:

- Relación Aspecto, AR, (Longitud/Anchura) no reglamentaria. Esta relación es importante en el diseño base debido a su efecto en la distribución del flujo y en la aparición de cortocircuitos.

$$AR = \frac{L}{W}$$

Por tanto, la relación de aspecto del humedal tiene una gran influencia en el régimen hidráulico y en la resistencia al flujo del agua. En teoría, un humedal artificial con una gran relación longitud/anchura (10:1 o mayores) asegurarían un flujo pistón, pero por el contrario, menor es el área transversal al flujo y, por lo tanto, es más susceptible de colmatarse, sobre todo al principio del humedal, donde el agua se desbordaría debido al incremento en la resistencia al flujo causado por la acumulación de residuos.

Por tanto, relaciones de 1:1 hasta aproximadamente 3:1 o 4:1 son aceptables.

Los cortocircuitos pueden ser minimizados con una cuidadosa construcción y mantenimiento del fondo del humedal, con el uso de múltiples celdas, e intercalando zonas abiertas (sin vegetación) para la redistribución del flujo.

En resumen, el no poder construir los humedales la relación de aspecto recomendada tiene implicaciones en:

- ◆ Aparición de recorridos preferenciales.
- ◆ Reducción del rendimiento.
- Terreno no impermeabilizado, por lo que es muy probable la aparición de infiltraciones.

- El caudal de entrada es limitado. El agua no entra al sistema por bombeo, si no que lo hace, gracias a la existencia de un gradiente hidráulico entre el nivel de la lámina de agua en el lago y la cota del terreno del Tancat.

En la bibliografía se recomienda que como mínimo, los humedales artificiales de flujo superficial, deban estar constituidos de un mínimo de tres celdas en serie. Ello favorece una alta eficiencia hidráulica y minimiza la aparición de caminos preferenciales.

En el sistema que nos ocupa, se han construido tres humedales. Dos de ellos constan de tres celdas en serie (denominados *FG* y *fp*), y el tercero de una única celda independiente (*F4*).

Los humedales *FG* y *fp* están separados por un canal de agua cerrado, ligeramente sinuoso, denominado *Anguilera*. Con esta división, se pretendió aproximar la relación de aspecto a la recomendada y además, tener espacios más pequeños (*fp*), para poder experimentar cambios en ellos y evaluar los efectos.

Las áreas y las relaciones de aspecto de cada una de las celdas aparecen en la tabla siguiente:

**Tabla 9: Longitud, anchura, relación de aspecto y superficie de cada una de las celdas.**

<b>Celda</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Anchura (m)</b>	<b>Longitud/Anchura</b>	<b>Superficie (m<sup>2</sup>)</b>
<b><i>FG1</i></b>	90.26	143.71	0.6	12971.3
<b><i>FG2</i></b>	114.56	159.22	0.7	18240.2
<b><i>FG3</i></b>	110.31	145.44	0.8	16043.5
<b><i>Fp1</i></b>	90.26	34.82-44.30	2.59-2.04	3570.7
<b><i>Fp2</i></b>	114.56	45.04	2.54	5159.8
<b><i>Fp3</i></b>	110.31	49.89	2.21	5503.4
<b><i>F4</i></b>	139.78	197.26	0.71	27573.0
<b><i>FG1+FG2+FG3</i></b>	315.13	149.46	2.11	47099.3
<b><i>fp1+fp2+fp3</i></b>	315.13	44.83	7.03	14127.3

La vegetación se plantó en los meses de enero y febrero de 2009. El tipo de macrófita que fue plantada en cada celda es la que aparece en la siguiente tabla:

**Tabla 10: Tipo de macrófitas emergentes y densidad de las mismas plantadas en cada una de las celdas.**

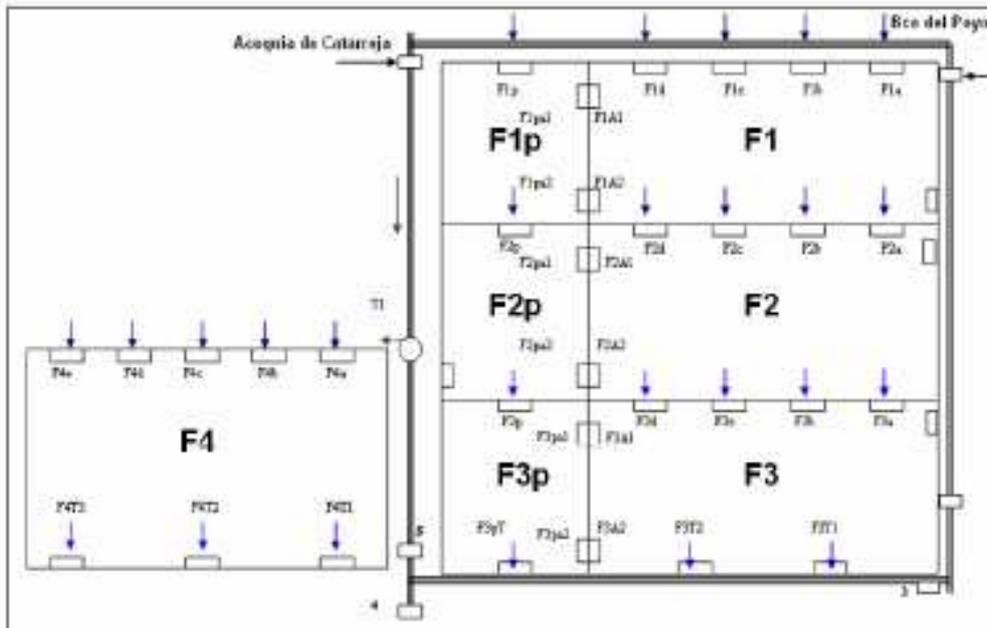
Celda	Vegetación	Densidad (planta /m <sup>2</sup> )
<b>FG1</b>	Monocultivo de enea ( <i>Typha latifolia</i> )	1
<b>FG2</b>	Monocultivo de enea ( <i>Typha latifolia</i> )	1
<b>FG3</b>	Policultivo de: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Enea (<i>Typha latifolia</i>)</li> <li>• Juncos (<i>Scirpus maritimus</i>, <i>S. holoschoenus</i>, <i>Juncus acutus</i>, etc.)</li> <li>• Castañuelas (<i>Scirpus mucronatus</i>, <i>Cyperus rotundus</i>)</li> <li>• Masiega (<i>Cladium mariscus</i>)</li> </ul>	0.25
<b>Fp1</b>	Monocultivo de enea ( <i>Typha latifolia</i> )	1
<b>Fp2</b>	Monocultivo de enea ( <i>Typha latifolia</i> )	1
<b>Fp3</b>	Policultivo de: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Enea (<i>Typha latifolia</i>)</li> <li>• Juncos (<i>Scirpus maritimus</i>, <i>S. holoschoenus</i>, <i>Juncus acutus</i>, etc.)</li> <li>• Castañuelas (<i>Scirpus mucronatus</i>, <i>Cyperus rotundus</i>)</li> <li>• Masiega (<i>Cladium mariscus</i>)</li> </ul>	0.25
<b>F4</b>	Policultivo de: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Enea (<i>Typha latifolia</i>)</li> <li>• Juncos (<i>Scirpus maritimus</i>, <i>S. holoschoenus</i>, <i>Juncus acutus</i>, etc.)</li> <li>• Castañuelas (<i>Scirpus mucronatus</i>, <i>Cyperus rotundus</i>)</li> <li>• Masiega (<i>Cladium mariscus</i>)</li> </ul>	0.25

La profundidad media de la lámina de agua en todas las celdas es de 20 cm. Cada parcela está nivelada a una misma cota para permitir que el tiempo de residencia del agua sea uniforme en toda la superficie del terreno.

El agua a tratar por el sistema de humedales artificiales, proviene por el este del Barranco del Poyo y por el oeste de la Acequia del Puerto de Catarroja. Estos dos caudales de agua se mezclan en el canal situado más al norte del enclave e ingresan al sistema, mediante las compuertas de entrada a las celdas *FG1*, *fp1* y *F4*.

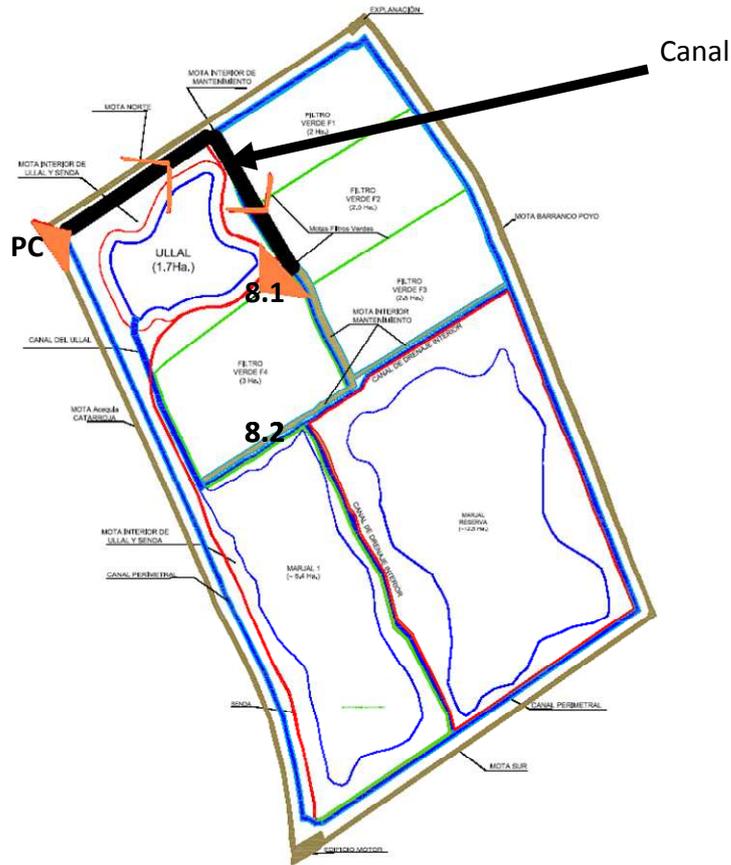
El sistema de compuertas dentro del conjunto de humedales permite el manejo de las aguas a voluntad, según las características de calidad de las aguas entrantes, periodo de depuración, mantenimiento de los humedales, rendimientos obtenidos, funcionamiento del sistema, etc. Además, permite repartir el agua a tratar de manera uniforme por las celdas.

La circulación del flujo de agua por los humedales, así como las compuertas existentes en cada celda, es la que aparece en la siguiente ilustración:



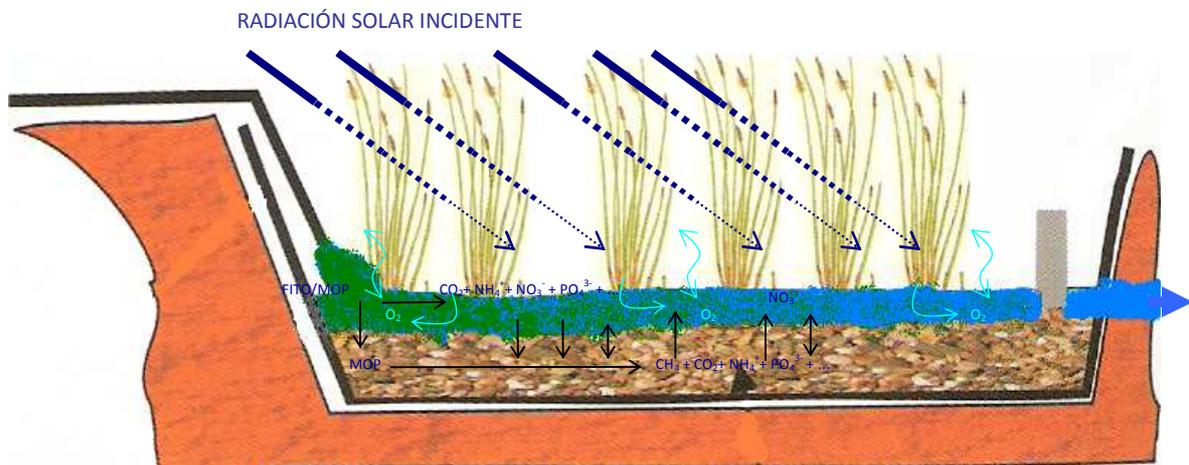
**Figura 24:** Circulación del agua a través de las celdas de los tres humedales. Fuente: *“Estimación del balance hídrico anual, en el humedal artificial del Tancat de la Pipa, con apoyo de modelos matemáticos de calidad de aguas, para contaminantes conservativos”* (Angarita, 2010)

Es importante recalcar, que el agua a tratar antes de entrar a la celda *F4* discurre por un canal paralelo al *Ullal* desde que entra al sistema hasta que alcanza dicha celda. En este pueden darse transformaciones tanto físicas, como químicas y/o biológicas. En la figura que se presenta a continuación, aparece remarcado dicho canal:



**Figura 25: Plano de la planta general del Tancat en el que aparece remarcado en color negro el recorrido del agua desde que entra por el Puerto de Catarroja hasta que llega a la tubería de entrada al F4.**

El objetivo principal de este sistema de humedales es tratar las propias aguas del lago de modo que la intercepción de la radiación solar por parte de las macrófitas emergentes plantadas, impida el crecimiento de la biomasa fitoplanctónica, la cual, finalmente sedimentará. La descomposición biológica de dicha biomasa, liberará nutrientes (nitrógeno y fósforo) que posteriormente, tomarán las plantas para su crecimiento. A continuación se presenta un esquema sencillo del funcionamiento:



**Figura 26: Esquema de funcionamiento de una celda de los humedales artificiales del Tancat de la Pipa.**

La localización de la vegetación emergente, el tipo y la densidad de vegetación y el clima son factores importantes en el diseño de un humedal artificial de flujo superficial, así como, contemplar áreas abiertas (es decir, áreas no vegetadas) (EPA, 2000).

Históricamente, la mayoría de estos sistemas fueron diseñados y construidos como celdas completamente vegetadas sin contar con áreas abiertas. Muchos de estos sistemas dieron problemas debido a una muy baja o cero concentración de oxígeno disuelto en la columna de agua, que resultó en una producción de olor y problemas de vectores.

Los humedales naturales suelen contener una mezcla de aguas abiertas y áreas con vegetación emergente. Las áreas de aguas abiertas proporcionan muchas funciones como:

- ◆ La oxigenación de la columna de agua por reaireación atmosférica.
- ◆ Macrófitos sumergidos.
- ◆ Fotosíntesis algal.
- ◆ Prelación de larvas de mosquito por peces y otros animales
- ◆ Hábitat y zonas de alimentación para aves acuáticas.
- ◆ Pueden incrementar la oxidación de la materia orgánica soluble y la nitrificación debido a que incrementan los niveles de oxígeno.

Por estas razones se recomienda que los humedales artificiales no estén completamente vegetados (EPA, 2000).

Debido a la falta de sombra, pueden ocurrir *blooms* de algas en grandes áreas de aguas abiertas, lo cual puede tener efectos negativos en la calidad del efluente. Para minimizar este problema de crecimiento algal, las áreas abiertas deberían estar diseñadas para tiempos de residencia hidráulicos menores de 2 o 3 días. En general, el ciclo de crecimiento algal es aproximadamente de 7 días, por ello proporcionar áreas de aguas abiertas con tiempos de retención hidráulico menores de 2 o 3 días, ayudará a minimizar el crecimiento de las algas (EPA, 2000).

Por tanto, por una parte es importante conseguir el máximo grado de cobertura vegetal que permita la inactivación del fitoplancton que entra del lago, como resultado de la incapacidad de éste de realizar la fotosíntesis debido a la intercepción de la radiación solar por parte de la vegetación emergente. Y por otro lado, es importante que existan zonas sin vegetación para evitar problemas de falta de oxígeno disuelto en la columna de agua.

## MATERIAL Y MÉTODOS

---



## **6 MATERIAL Y MÉTODOS.**

### **6.1 MUESTREOS DE CAMPO.**

En el Tancat de la Pipa se realizaron varios trabajos. Por un lado, se midieron los caudales circulantes por el sistema humedales artificiales (no objeto de análisis en la presente tesina) y por otro lado, se realizaron mediciones *in situ* de las variables físico-químicas consideradas relevantes para el seguimiento de la calidad del agua y también se recogieron muestras de agua de cada uno de los puntos que a continuación se pasan a describir. Además, el grupo de investigación del *Institut Cavanilles de Biodiversitat i Biologia Evolutiva* tomó muestras de zooplancton y de fitoplancton en una serie de puntos que más tarde se detallarán.

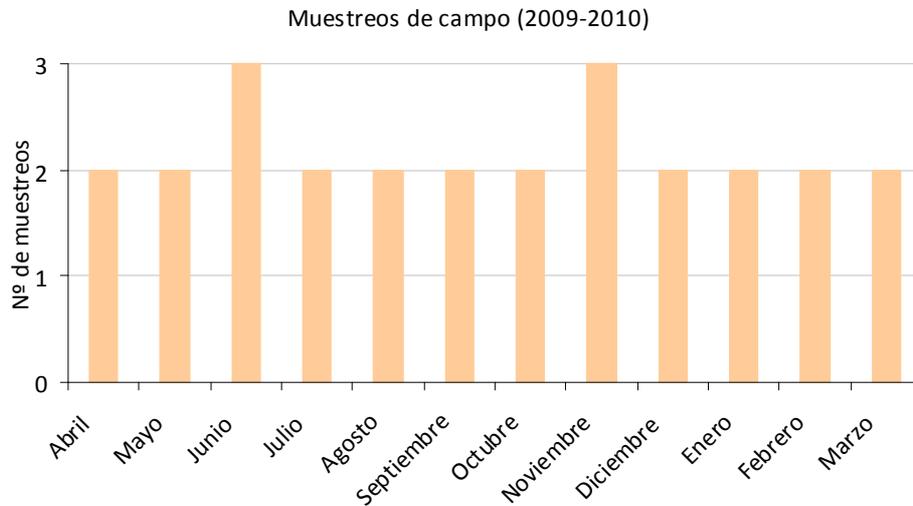
Con una frecuencia menor que la del muestreo de agua, se recogieron muestras de vegetación y de sedimentos pertenecientes al sistema de humedales artificiales.

#### **6.1.1 CRONOLOGIA.**

En la presente tesina fin de master, se van a evaluar los resultados obtenidos durante el periodo de puesta en marcha del sistema de humedales artificiales.

Los muestreos de campo y los trabajos de laboratorio, se iniciaron el 6 de Abril del 2009 y se sucedieron, con la frecuencia que más tarde se describirá, hasta el 22 de Marzo del 2010.

En la siguiente figura se observa el periodo anual estudiado y el número de muestreos de campo realizados cada mes:



**Figura 27:** Número de muestreos de campo realizados cada mes. En total se realizaron 26 muestreos.

### 6.1.2 DESCRIPCIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO.

Con el fin de seguir la evolución de la calidad del agua a lo largo del Tancat de la Pipa, se seleccionaron un total de 18 puntos de muestreo. Estos se nombraron numéricamente de la siguiente manera: 1,1, 1,2 ,2 ,3 ,4 ,5 ,6 ,7 ,8,1 ,8,2 ,9 ,10 ,11 ,12 ,13 ,14 ,15 y 16.

En la siguiente figura, aparecen representados los diferentes puntos.

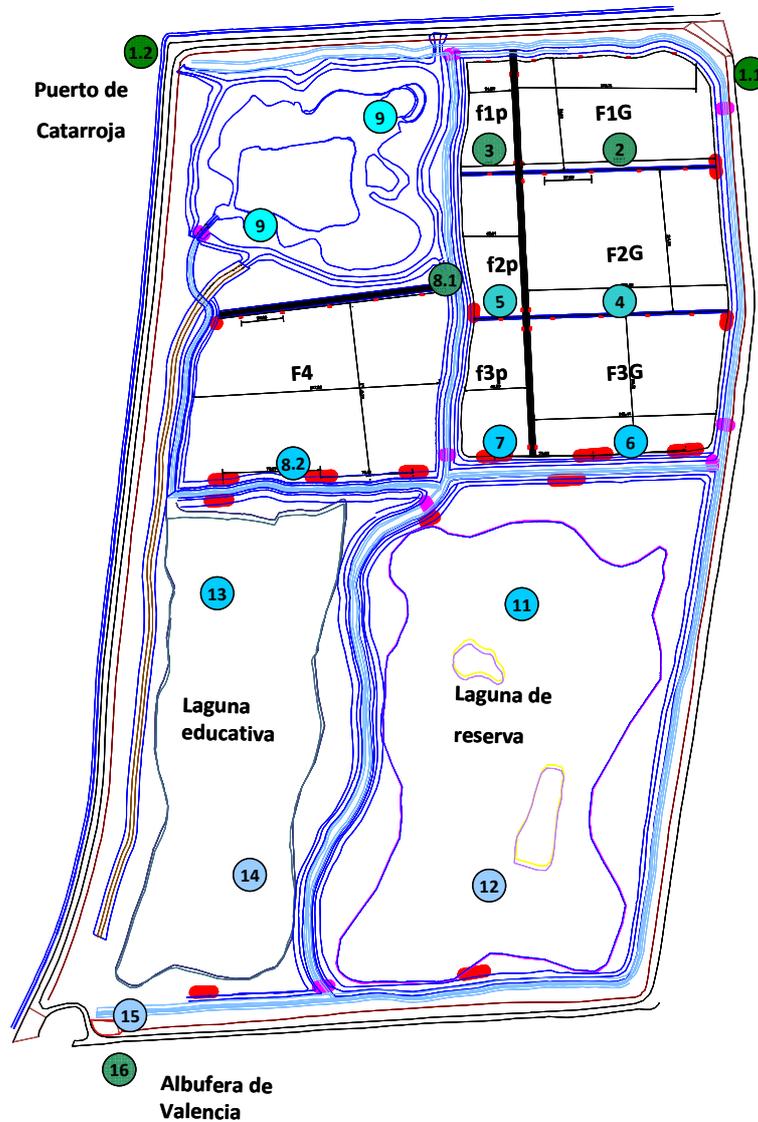


Figura 28: Localización de los puntos de muestreo de calidad de las aguas en el Tancat de la Pipa.

A continuación se pasan a describir los diferentes puntos de muestreo:

- Entradas de agua al Tancat:

Los **puntos 1.1 y 1.2** corresponden a las entradas desde el Barranco del Poyo y desde la Acequia del Puerto de Catarroja, respectivamente. En ambos puntos, se miden todas las

variables que se describirán a continuación, excepto el zooplancton y fitoplancton en el punto 1.2.



**Figura 29:** Arqueta de entrada de agua, al sistema de humedales, procedente del Barranco del Poyo.

Inicialmente, solamente entraba agua al sistema de humedales artificiales por el Barranco del Poyo, pero debido a que en el periodo estival, los niveles de agua en dicho Barranco eran bajos y por tanto, impedían la entrada del caudal deseado al sistema, se decidió a mediados de julio del 2009, complementar el agua al sistema con entrada de la misma desde la Acequia del Puerto de Catarroja.

Por tanto, se realizaron muestreos del punto 1.1 desde el 6 de abril del 2009 y del 1.2 desde el 13 de julio del mismo año.

- Humedales artificiales:
  - **Punto 2:** En este punto se recoge el agua de salida de la celda 1 grande (FG1), y que pasará a ser el agua de entrada a la celda 2 grande (FG2).
  - **Punto 3:** En él se recoge el agua que después de haber sido tratada en la celda 1 pequeña (fp1), pasa a la celda 2 pequeña (fp2).
  - **Punto 4:** Es el paso celda 2 grande (FG2) a la celda 3 grande (FG3).

- **Punto 5:** El agua que se recoge en este punto es la que sale de la celda 2 pequeña (*fp2*) y que se incorpora a la celda 3 pequeña (*fp3*).
  
- **Punto 6:** Es la salida de la celda 3 grande (*FG3*) hacia la laguna de Reserva.
  
- **Punto 7:** Es la salida de la celda 3 pequeña (*fp3*) hacia la laguna de Reserva.
  
- **Punto 8.1:** Es la entrada a la celda 4 o lo que es lo mismo, al humedal que solo está compuesto por una única celda (*F4*). Dado que el agua circula por una acequia paralela al humedal *fp*, desde la entrada al sistema hasta la entrada al *F4*, se toma muestra de agua en este punto, pues se entiende que en el viaje del agua por dicho canal ocurren procesos físicos, químicos y biológicos que modifican la calidad del agua de entrada.
  
- **Punto 8.2:** Es la salida del *F4* y paso a la laguna Educativa.
  - Ullal:
  
- **Punto 9:** En este punto se recoge el agua que recibe el “Ullal”, es decir, es la zona de descarga de la tubería que extrae agua del pozo.
  
- **Punto 10:** Este punto está localizado cerca del canal de salida del “Ullal” hacia la Laguna Educativa. Representa por tanto, el agua de salida de este sistema.
  - Laguna de Reserva:

En las dos lagunas pertenecientes al Tancat de la Pipa se tomó como criterio para la selección de los 2 puntos de muestreo, que uno fuera representativo de una zona con presencia de vegetación macrófita sumergida y que el otro representará una zona libre de esta misma vegetación. Con ello se pretendía conocer la posible influencia de esta vegetación sobre las variables estudiadas.

- **Punto 11:** Zona con vegetación macrófita sumergida.

- **Punto 12:** Zona sin vegetación macrófita sumergida.
  - Laguna Educativa.
- **Punto 13:** Zona con vegetación macrófita sumergida.
- **Punto 14:** Zona sin vegetación macrófita sumergida.
  - Salidas del sistema:
- **Punto 15:** Este punto se encuentra en el canal de salida del sistema, justo antes de las bombas de extracción, las cuales permiten evacuar el agua del sistema al lago adyacente.
- **Punto 16:** Canal exterior al Tancat que forma parte del lago de l'Albufera de Valencia. Es el punto de desagüe del sistema. La toma de muestras se realiza pasados varios minutos de la parada de la bomba que impulsa el agua hacia el lago.



**Figura 30:** Fotografía del punto 16 en el momento que se estaba tomando muestra de agua.

Para seguir la evolución de la calidad del agua a lo largo del humedal artificial y evaluar los rendimientos de eliminación de los componentes objeto de estudio, solamente se van a estudiar en la presente tesina de master los puntos: 1.1, 1.2, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8.1, 8.2, 15 y 16.

### **6.1.3 TOMA DE MUESTRA Y MEDICIONES.**

Como se ha podido observar en la figura 27, la frecuencia de muestreo fue de cada dos semanas (es decir, dos veces al mes). El día de la semana elegido para la realización del muestreo fue el lunes, a excepción de aquellos en que las condiciones meteorológicas obligaron a retrasarlo uno o dos días.

El grupo de investigación del *Institut Cavanilles de Biodiversitat i Biologia Evolutiva*, realizaron los muestreos de las variables bióticas cada 4 semanas (una vez al mes), coincidiendo con un muestreo de calidad de aguas.

Las fechas donde se realizó la recogida de muestras de agua y el muestreo de fitoplancton y zooplancton (*Institut Cavanilles de Biodiversitat i Biologia Evolutiva*) son las siguientes:

**Tabla 11: Fechas en las que se realizaron los muestreos de calidad de agua y de las variables bióticas consideradas de interés en el sistema de humedales artificiales.**

Fechas	UPV <sup>3</sup>	UV <sup>4</sup>
	Calidad de Agua	Variables bióticas
06/Abril/2009	✓	✓
21/Abril/2009	✓	
04/Mayo/2009	✓	✓
18/Mayo/2009	✓	
01/Junio/2009	✓	✓
15/Junio/2009	✓	
29/Junio/2009	✓	✓
13/Julio/2009	✓	
27/Julio/2009	✓	✓
10/Agosto/2009	✓	
24/Agosto/2009	✓	✓
07/Septiembre/2009	✓	
21/Septiembre/2009	✓	✓
07/Octubre/2009	✓	
19/Octubre/2009	✓	✓
09/Noviembre/2009	✓	
16/Noviembre/2009	✓	✓
30/Noviembre/2009	✓	
16/Diciembre/2009	✓	✓
28/Diciembre/2009	✓	
13/Enero/2010	✓	✓
25/Enero/2010	✓	
10/Febrero/2010	✓	✓
22/Febrero/2010	✓	
10/Marzo/2010	✓	✓
22/Marzo/2010	✓	

<sup>3</sup> UPV: *Universitat Politècnica de València* (Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente)

<sup>4</sup> UV: *Universitat de València* (Institut Cavanilles de Biodiversitat i Biologia Evolutiva)

### **6.1.3.1 MEDIDA DE VARIABLES FÍSICO-QUÍMICAS IN SITU.**

En todos los puntos descritos en la figura 28, se midieron los siguientes parámetros físico-químicos:

- Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- pH.
- Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y concentración de sales ( $\text{g}/\text{l}$ ).
- Concentración de oxígeno disuelto ( $\text{mg O}_2/\text{l}$ ) y porcentaje de saturación (%).

Para ello se empleó un equipo multiparamétrico de campo (modelo WTW- Multi 340i) con las correspondientes sondas de pH y conductividad y un oxímetro (modelo Oxi 325). Las mediciones se realizaron en el mismo momento en que se recogían las muestras de agua.

Un factor importante en la interpretación de los valores de estas variables es la hora del día a la que fueron medidas, por ello se registraba también este dato. Tanto el oxígeno disuelto como el pH, están muy relacionados con la actividad biológica en el agua, principalmente con la actividad fotosintética, y ésta varía en función de la hora del día. Otro factor a tener en cuenta, es que la presencia de vegetación en las proximidades de la sonda de medición del oxígeno, puede dar lugar a valores no correspondientes con la realidad, al igual que la medición de dicha variable en zonas de corriente, estancamiento o turbulencias. Por todo ello, se tuvo especial cuidado a la hora de situar las sondas para proceder a la obtención de los datos.



Figura 31: Imágenes del maletín multisonda y de las diferentes sondas en un momento de toma de datos in situ.

#### **6.1.3.2 TOMA DE MUESTRA DE AGUA.**

En todos los puntos que han sido descritos en la figura 28, se tomaron muestras de agua para los correspondientes análisis químicos realizados en el laboratorio. Las muestras de agua fueron recogidas manualmente con recipientes de plástico con capacidad de 2 litros y almacenadas en frío para su transporte hasta el laboratorio.



**Figura 32:** Imágenes del material empleado en la toma de muestras de agua y proceso de toma de muestra.

Tanto para la preparación del material de muestreo (selección de recipientes, limpieza, etc.), como para las técnicas de muestreo y el transporte de las muestras hasta el laboratorio, se ha seguido las directrices recogidas en la norma española **UNE-EN ISO 5667**:

- Parte 1: Guía para el diseño de los programas de muestreo y técnicas de muestreo (septiembre 2007).
- Parte 3: Guía para la conservación y manipulación de las muestras de agua (septiembre 2004).

La muestra se tomó a la profundidad media de la lámina de agua, y prestando especial cuidado en no remover sedimentos ni vegetación que podrían alterar los resultados reales.

Una vez recibidas las muestras en el laboratorio, se filtran y se almacenan en nevera a temperatura de 4º C, realizándose el análisis químico en un plazo entre 24 y 48 horas.

## 6.2 ANÁLISIS QUÍMICO.

Para obtener los rendimientos de eliminación del fitoplancton y de los nutrientes contenidos en el agua de entrada al sistema, se determinó analíticamente, en cada uno de los puntos descritos anteriormente, la concentración de los siguientes parámetros:

- Materia orgánica medida como demanda química de oxígeno (DQO), expresada en mg O<sub>2</sub>/l. Se determinó la demanda química de oxígeno soluble y la total.
- Sólidos suspendidos totales (mg SS/l) y volátiles (SSV/l).
- Nitrógeno total (mg N/l).
- Nitrógeno amoniacal (mg N/l).
- Nitratos (mg N/l).
- Nitritos (mg N/l).
- Fósforo total (mg P/l).
- Ortofosfatos (mg P/l).
- Sílice (mg Si /l).
- Turbidez (NTU).

- Clorofila  $a^5$  (mg Cl  $a$  / m<sup>3</sup>).

### 6.2.1 MATERIAL UTILIZADO EN LOS ENSAYOS Y MÉTODOS DE ENSAYOS.

A continuación se enumera el material y los métodos empleados para determinar la concentración en las muestras de agua de cada una de las variables descritas en el apartado anterior.

- La demanda química de oxígeno (DQO) se determina mediante un método colorimétrico, concretamente el método MERCK. En él, se oxida la muestra con una solución sulfúrica caliente de dicromato potásico y empleando sulfato de plata como catalizador. Para evitar posibles interferencias, los cloruros son enmascarados con sulfato de mercurio. Finalmente, se determina fotométricamente la concentración de los iones  $Cr_2O_7^{2-}$  amarillos no consumidos. En el caso de la DQO soluble se filtra la muestra previamente con filtros de 0.45  $\mu$ m.
- Para la determinación del nitrógeno total se utiliza también, un método colorimétrico de MERCK. Mediante la reacción de Koroleff los compuestos de nitrógeno orgánico e inorgánico se transforman a nitratos. En ácido sulfúrico concentrado, este nitrato reacciona con ácido benzoico derivando a un nitrocompuesto de color rojo intenso.
- Para la determinación del amonio se utiliza un método colorimétrico, método MERCK, después de una filtración con filtros de 0.45  $\mu$ m. El nitrógeno amoniacal se presenta en forma de iones amonio y en forma de amoniaco. En solución fuertemente alcalina, en la que prácticamente sólo existe amoniaco, tiene lugar con un agente clorante una transformación en monocloramina. Ésta forma con timol un derivado azul de indofenol que se determina fotométricamente.

---

<sup>5</sup> Determinación realizada por el grupo de investigación del *Institut Cavanilles de Biodiversitat i Biologia Evolutiva*,

- Los nitratos se determinan mediante colorimetría con el método MERCK después de una filtración con filtros de 0.45  $\mu\text{m}$ . Se realiza una colorimetría en ácido sulfúrico concentrado con un derivado del ácido benzoico para dar un nitrocompuesto de color rojo intenso.
- Los nitritos se determina mediante filtración con filtros de 0.45  $\mu\text{m}$  y colorimetría con el método MERCK. En solución ácida los iones nitrito forman con el ácido sulfanílico una sal de diazonio que reacciona con el diclorhidrato de N-(1-naftil)-etilendiamina, dando un azocolorante violeta rojizo. Este se determina fotométricamente.
- La sílice se determina mediante filtración con filtros de 0.45  $\mu\text{m}$  y colorimetría con el método MERCK. En solución sulfúrica los iones silicato forman con iones molibdato un heteropoliácido amarillo. Este último se reduce a azul de silicomolibdeno que se determina fotométricamente.
- Para la determinación del fósforo total se utiliza un método colorimétrico, el método MERCK. En solución sulfúrica los iones ortofosfato forman con los iones molibdato ácido molibdofosfórico, el cual con ácido ascórbico se reduce a azul de fosfomolibdeno que se determina fotométricamente.
- El fósforo inorgánico (ortofosfatos) se determina mediante filtración con filtros de 0.45  $\mu\text{m}$  y colorimetría con el método MERCK. Se realiza una colorimetría del amarillo anaranjado del ácido molibdovanadato-fosfórico.
- Los sólidos suspendidos se calculan mediante filtración con filtros de 0.45  $\mu\text{m}$ , desecación de la muestra filtrada a 103-105 °C en estufa y posterior pesada en balanza de precisión.
- Los sólidos suspendidos volátiles se determinan por calcinación (a una temperatura del orden de 550 °C en horno de mufla) del residuo que queda en la cápsula de sólidos suspendidos, y posterior pesada.
- La turbidez se determina mediante colorimetría con el Método MERCK.

- El fotómetro utilizado en las colorimetrías fue SQ 118. MERCK.
- En los análisis de nitrógeno total, fósforo total y DQO por colorimetría se utiliza un Termodigestor TR 300, MERCK.
- Se ha medido la concentración de clorofila *a* en el fitoplancton (como medida rápida y aproximada de la cantidad total del mismo) mediante dos procedimientos. Uno *in situ* utilizando un fluorímetro de campo Aquafluor – Turner Designs- que determina la clorofila *a in vivo* (Filtro excitación  $460 \pm 20$  nm; Filtro emisión  $>665$  nm; LED azul) y que ofrece medidas semicuantitativas, y otro **en el laboratorio** por extracción con acetona al 90% de los pigmentos fotosintéticos, determinación de los valores de absorbancia (método tricromático) mediante un espectrofotómetro y finalmente aplicando las formulaciones de Jeffrey y Humphrey (1975).

Los valores de clorofila *a* obtenidos mediante extracción de pigmentos han sido utilizados como calibración del fluorímetro y para la transformación de las unidades relativas de fluorescencia (URF) en concentración de clorofila *a*. Para cada mes de muestreo se realizaban las mediciones por los dos métodos y se calculaba la recta de regresión entre ambas variables

Estos trabajos fueron llevados a cabo por el grupo de investigación del *Institut Cavanilles de Biodiversitat i Biologia Evolutiva*.



## RESULTADOS



## 7 RESULTADOS

La naturaleza de las sustancias que entran a un humedal artificial, puede ser muy diversa y depende principalmente del origen de las aguas que van a ser sometidas al tratamiento (agua residual urbana, efluentes industriales, escorrentía agrícola, etc.).

### 7.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN METEOROLÓGICA.

Dado que los eventos de lluvia son muy localizados, es importante disponer en el Tancat de una pequeña estación meteorológica que nos permita obtener mediciones de precipitación, temperatura, evapotranspiración, etc. Dicha estación se instaló y estuvo recogiendo información durante el periodo comprendido entre Junio del 2009 y principios de Noviembre del mismo año, fecha en la que dejó de funcionar. Ello condujo a la recogida de los datos meteorológicos de la estación de Picassent, a través de la página Web <http://estaciones.ivia.es/diario0.php3?idprovincia=46&idestacion=17>.

Los datos de precipitación recogidos son los referidos a precipitación total (mm) y los de evapotranspiración a la evapotranspiración de referencia, la cual es calculada mediante el método de Penman-Monteith, salvo en el caso de incidencias con el anemómetro donde se utiliza, el método de Hargreaves.

La precipitación registrada durante todo el periodo de estudio (abril 2009-marzo 2010) es la siguiente:

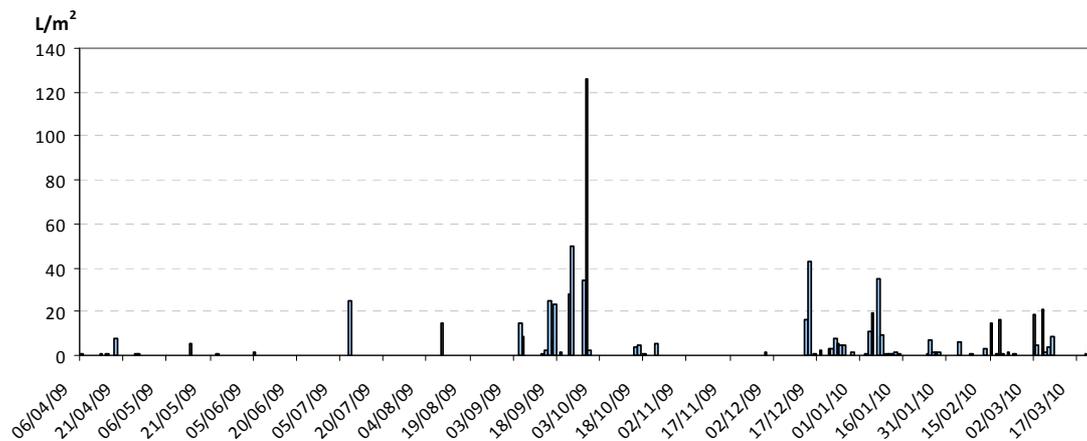
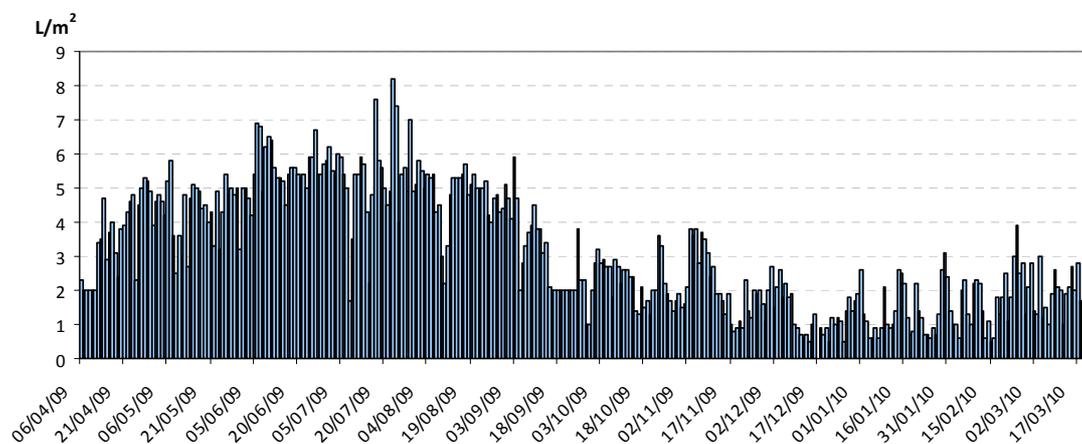


Figura 33: Precipitación total (mm) registrada en la estación agroclimática de Picassent. Adaptado del IVIA (<http://estaciones.ivia.es/diario0.php3?idprovincia=46&idestacion=17>).

Por último, la información recogida en cuanto a evapotranspiración, aparece reflejada en la figura que se muestra a continuación,



**Figura 34: Evapotranspiración de referencia (mm) registrada en la estación agroclimática de Picassent. Adaptado del IVIA (<http://estaciones.ivia.es/diario0.php3?idprovincia=46&idestacion=17>).**

## 7.2 INCIDENCIAS RECOGIDAS DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO.

En cada muestreo de campo, con el fin de disponer de la máxima información posible para poder interpretar a posteriori los resultados que se iban obteniendo, se registraban las incidencias más importantes que se sucedían en el sistema. Estas son las que aparecen en la tabla siguiente:

**Tabla 12 : Incidencias detectadas en los muestreos de campo para el estudio de la calidad del agua.**

Fecha	Observación
06/04/2009	<ul style="list-style-type: none"> <li>– En la celda 2 grande, el agua se encuentra estancada en las zonas próximas a la salida de la misma.</li> <li>– En el F4, el agua se encuentra muy turbia y con abundante materia flotante acumulada en las zonas próximas a la salida.</li> <li>– En los puntos 3, 5 y 4 se observa una importante abundancia de Daphnia (zooplancton).</li> <li>– En la celda 3 la densidad de vegetación es muy baja.</li> </ul>
21/04/2009	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Se toma muestra del Barranco del Poyo porque el caudal de agua que discurre a través de él es bastante importante. La concentración de oxígeno medida es baja, de aproximadamente 3 mg/l.</li> <li>– Abundante presencia de aves en el sistema de humedales artificiales. Entre ellas, se detecta</li> </ul>

Fecha	Observación
	<p>la presencia de Calamones. El operario del Tancat comenta que la abundancia de aves durante la noche es también elevada.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Sobre los sedimentos de los humedales, se observa un tapiz de briofitos (concretamente de musgos). Estas plantas sumergidas ejercen un efecto oxigenador en la columna de agua. Este hecho se verifica con las altas concentraciones de oxígeno disuelto encontradas, incluso por encima de la saturación, en los puntos donde se detecta.</li> <li>– Por otro lado, aunque la presencia de Daphnia es más escasa, si que se visualizan en algunos puntos, como es el caso del punto 6.</li> <li>– Elevadas concentraciones de oxígeno disuelto también en l' Albufera.</li> </ul>
04/05/2009	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Se observa que el caudal de entrada al sistema es menor (aproximadamente la mitad), debido al descenso del nivel del lago (la gola del Pujol ha estado abierta).</li> <li>– Presencia abundante de excrementos de aves en las motas, que indirectamente nos indica que la presencia de aves es importante.</li> <li>– Se detecta la aparición de Asprella (<i>Chara vulgaris</i>) en la acequia de salida.</li> <li>– Se aprecia una elevada turbidez en los humedales, que podría estar relacionada con el fuerte episodio de viento que se sucedió el día 30/04/09.</li> <li>– Se observa una fuga del F2 hacia la Anguilera.</li> </ul>
18/05/2009	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Vientos moderados/fuertes provenientes del norte, se aprecia la influencia en los humedales.</li> <li>– En zona sur oeste del F3, el agua está muy turbia y en el F1 se nota la acumulación de materia orgánica y de algas flotantes en la misma zona.</li> <li>– Por los puntos 3 y 5 no circula agua.</li> <li>– Se detectan Daphnias en los puntos 5,6 y 7.</li> </ul>
01/06/2009	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Nivel bajo del agua debido a que las válvulas han estado cerradas, prácticamente toda la semana anterior, para construir la caseta de la sonda de calidad.</li> <li>– En los puntos 4 y 5 se detecta abundante Daphnia.</li> <li>– No se toman muestras de los puntos 5,6 y 7, ya que no circula agua por ellos.</li> </ul>
15/06/2009	<ul style="list-style-type: none"> <li>– No se toma muestra en los puntos 8.1 y 8.2 porque están replantando el humedal.</li> </ul>
29/06/2009	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La compuerta a la anguilera del F3p está abierta.</li> <li>– Ya no hay tanta Daphnia.</li> <li>– No se toma muestra en los puntos 8.1 y 8.2 porque están replantando el humedal.</li> </ul>
02/07/2009	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Ya se observa un manto de gramíneas en los F2 y F3.</li> </ul>
13/07/2009	<ul style="list-style-type: none"> <li>– El sistema estuvo parado los días 9 y 10 de julio debido a las obras que se estaban realizando en la arqueta del Barranco del Poyo.</li> <li>– <b>Se toma la primera muestra del Puerto de Catarroja.</b></li> <li>– No hay circulación por el punto 5.</li> <li>– No se toma muestra de los puntos: 2, 3, 4 y 5.</li> <li>– La muestra de 16 se toma nada más desaguar el sistema.</li> </ul>
27/07/2009	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Punto 4: Solamente pasa agua por la compuerta F3b, y además, el caudal es muy pequeño y lento.</li> <li>– Punto 7: sale abundante agua. Mucha más que la que circula por el F3p→desborde de</li> </ul>

Fecha	Observación
	<i>anguilera.</i>
10/08/2009	<ul style="list-style-type: none"> <li>– -Se observan emulsiones flotando en el F2.</li> <li>– Punto 5: Caudal muy bajo.</li> <li>– Punto 8: Caudal muy bajo a la salida por las 3 compuertas.</li> <li>– Punto 6: Sale más agua por la T1 que por la T2.</li> <li>– Punto 7: Sale muchísima agua. Sigue habiendo paso de F3 a F3p.</li> </ul>
24/08/2009	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Se observan emulsiones flotando en el F2.</li> <li>– El oxímetro se descalibró, no funcionaba correctamente.</li> <li>– 8.1: Oxígeno medido en la botella.</li> </ul> <p>Días anteriores no estaba entrando el caudal deseado por el Barranco del Poyo porque había bajado el nivel de la Albufera.</p>
07/09/2009	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Punto 7: Compuerta T2, aspecto negruzco del agua y olor a sulfuros.</li> <li>– Punto 3: Aguas abajo acumulación de espumas.</li> <li>– Punto 6: olor fuerte a sulfuros.</li> <li>– La anguilera desbordada en las proximidades del punto 4.</li> <li>– Punto 1: agua de color oscuro y con aspecto de estancada.</li> <li>– Punto 15: Aspecto más eutrofizado del agua.</li> </ul>
21/09/2009	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Existe una fuga del F2 a la anguilera, por ello en el punto 4 no hay casi flujo.</li> <li>– En el punto 5 tampoco hay flujo. Posible fuga del F2 pequeño a la anguilera.</li> <li>– Todavía se detecta la presencia de aves en los humedales.</li> </ul>
07/10/2009	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Las compuertas de entrada y salida del sistema estuvieron cerradas del 02/10/09 al 05/10/09.</li> <li>– El Barranco del Poyo ofrece un olor característico asociado a procesos anaerobios.</li> </ul>
19/10/2009	<ul style="list-style-type: none"> <li>– No se toman muestras de los humedales, ya que estos se han dejado secar para proceder a las labores de siega de los F1 (grande y pequeño).</li> <li>– El “Ullal” ha permanecido cerrado durante dos semanas.</li> </ul>
5/11/2009	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Obras para la reconstrucción de la anguilera. Se forma un pasillo lateral contiguo a la anguilera en el que no crece la vegetación. Este pasillo tiene una anchura de 5.75 m (en 2/3 de la longitud de la celda) y 8.5 m (en 1/3 de la longitud de la celda); estas medidas se han tomado en F2 pequeño pero suponemos que en todos es similar. Lo que supone una extensión de 763,7 m<sup>2</sup> en F2 grande y en el F2 pequeño, 735.4 m<sup>2</sup> en F3 grande y en el F3 pequeño y 601.7 m<sup>2</sup> en el F1 grande y en el F1 pequeño.</li> </ul>
09/11/2009	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Días anteriores de mucho viento.</li> <li>– Las labores de siega de los humedales comenzaron el viernes 06/11/09. Este día, también se estaba trabajando en la siega.</li> <li>– No se toma muestra de los puntos 2, 3, 5 y 7.</li> </ul>
16/11/2009	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La circulación por las celdas pequeñas en serie está parada.</li> <li>– El agua procedente del Barranco del Poyo entra directamente por el F2 grande</li> <li>– No se toma muestra de los puntos 2, 3, 5 y 7.</li> </ul>
16/12/09	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Las válvulas se cerraron en lunes 14/12/09, se abrieron ligeramente el día siguiente y completamente el día del muestreo.</li> </ul>

Fecha	Observación
	– Se detecta la presencia abundante de Calamones en el F1 grande y en el F1 pequeño.
28/12/2009	– No hay circulación entre las celdas pequeñas ni entre los F1 y F2 grandes.
13/01/2010	– No se toma muestra del F4 (puntos 8.1 y 8.2) porque no ha estado circulando prácticamente nada de agua. – -las compuertas de los F2 y F3 pequeños a la anguilera están abiertas.
25/01/2010	– Día nublado con lluvia ligera (también el día anterior al muestreo). – Se observan aves (entre los que se encuentran Cormoranes) en los humedales, sobre todo en el F3 donde además se detecta el agua bastante más turbia. – Ya han empezado a vaciar Tancats. El de arriba del Tancat de la Pipa ha bajado su nivel apreciablemente.
10/02/2010	– Apreciable turbidez de las aguas en los puntos: 2, 3 y 6. – Abundantes algas filamentosas en el punto 4. – Color verdoso del agua procedente del Puerto de Catarroja y del agua del punto 16.
22/02/2010	– No se toman medidas ni muestra del F4, ya que se encuentra parada su circulación debido a las obras que se están realizando para el rebombeo. – Se observan varios brotes verdes en el F1, y el agua bastante turbia. – Se detectan excrementos de aves (indirectamente nos indica presencia de aves). – Entrada de agua por una compuerta lateral de la anguilera al F3 pequeño.
10/03/2010	– Se abre un nuevo paso de agua desde el F1 pequeño al F2 pequeño, y desde este último, al F3 pequeño. Solamente circula agua entre las celdas anteriores, a través de estos pasos. Las compuertas están cerradas.
22/03/2010	– Abundante presencia de aves. – Abundante biomasa de zooplancton en el punto 4.

Debido, a la ocurrencia de diversas incidencias como la siega del *FG1* o la ausencia de flujo a través de alguna compuerta, no todos los muestreos fueron completos. Además, es importante tener en cuenta, a la hora de evaluar los resultados obtenidos, determinados factores como son la presencia de aves, con la consiguiente resuspensión de sólidos, la turbulencia del agua por acción del viento en el momento de la toma de muestra, las fugas detectadas a lo largo del sistema, o la presencia de aves que, como el Calamón común (*Porphyrio porphyrio*), son consumidores de brotes tiernos de Enea, impidiendo por tanto, el desarrollo de las densidades de la misma deseadas.

## 7.3 SÓLIDOS SUSPENDIDOS.

### 7.3.1 CARACTERIZACIÓN DE SÓLIDOS.

Para el presente trabajo, los sólidos suspendidos son aquellas partículas contenidas en el agua de estudio que son separadas de la misma, por filtración mediante filtros con tamaño de poro igual a 0.45  $\mu\text{m}$ .

La materia suspendida se puede dividir en las siguientes fracciones: orgánica, arcilla, limos y arenas. La fracción de sólidos suspendidos volátiles (SSV) se toma, normalmente, como medida del contenido de materia orgánica en los sólidos en suspensión. La fracción restante de sólidos (parte no volátil, SSNV), se asume que es la fracción mineral de los anteriores.

En un sistema natural, como el caso de estudio que nos ocupa, la relación  $\text{SSV}/\text{SS}_T$  no tiene por qué ser constante y seguir una correlación lineal, dado que dicha relación depende de diversos factores como pueden ser la existencia de vertidos de Aguas Residuales Urbanas, la abundancia de fitoplancton o el aporte de escorrentía superficial procedente de la cuenca.

Con los datos recogidos para cada punto de muestreo, se han obtenido las siguientes correlaciones, que como se aprecia en las figuras siguientes, en su mayoría ajustan a una tendencia de tipo logarítmico antes que lineal:

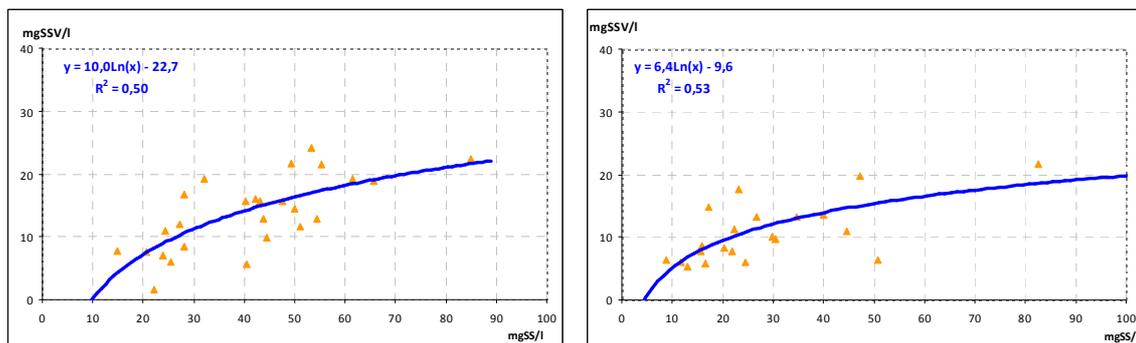
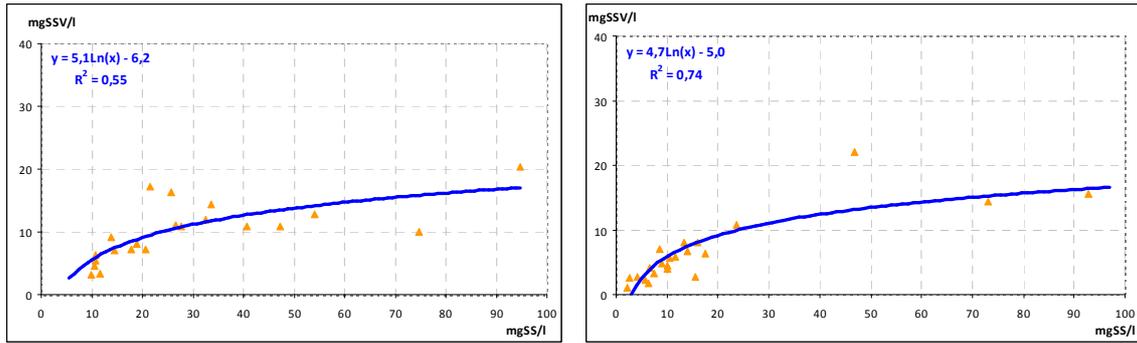
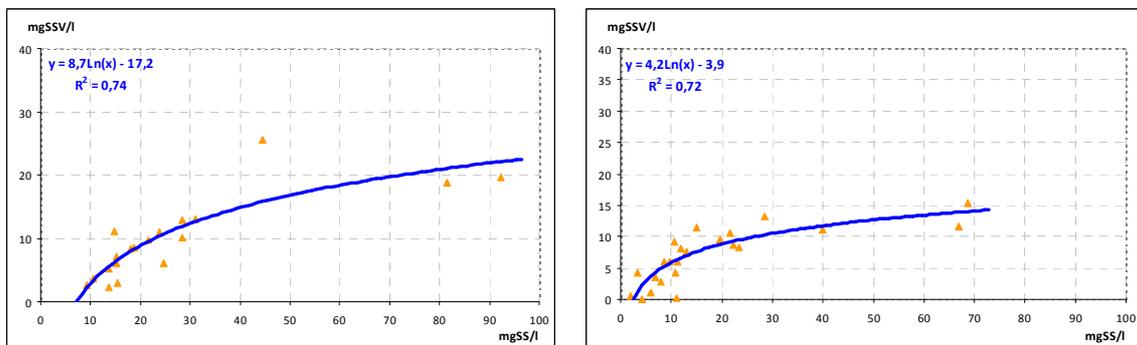


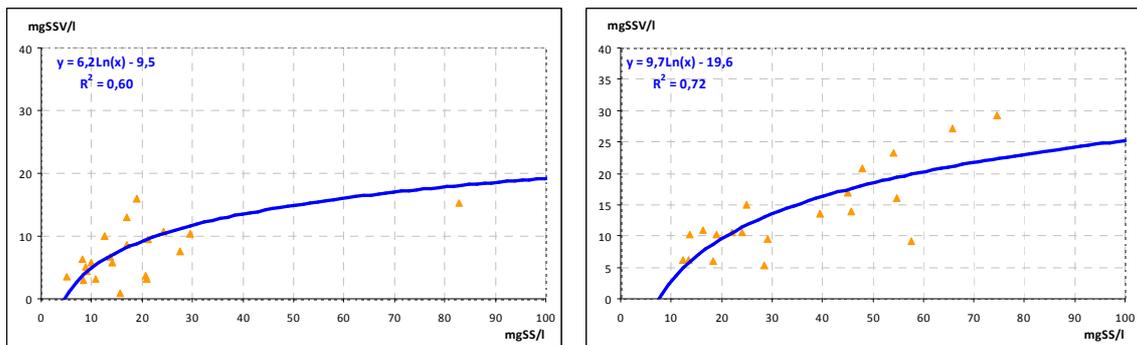
Figura 35: Correlación entre los sólidos suspendidos y los sólidos suspendidos volátiles en el punto 1.1 (izquierda) y el punto 2 (derecha).



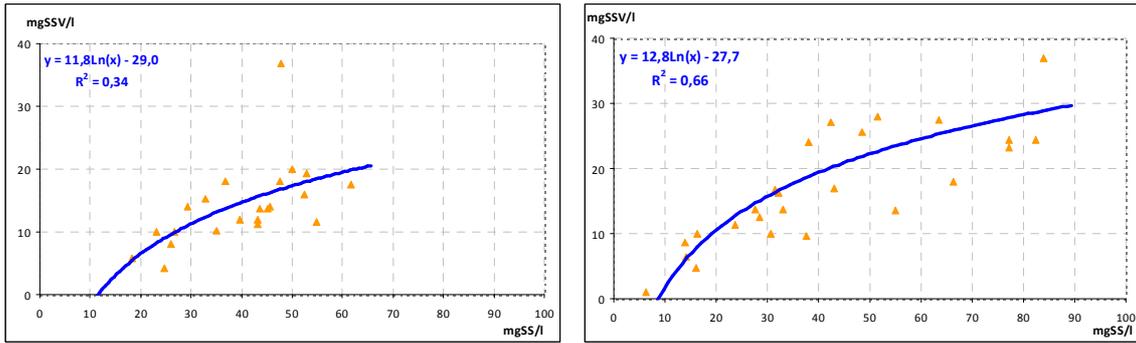
**Figura 36: Correlación entre los sólidos suspendidos y los sólidos suspendidos volátiles en el punto 3 (izquierda) y el punto 4 (derecha).**



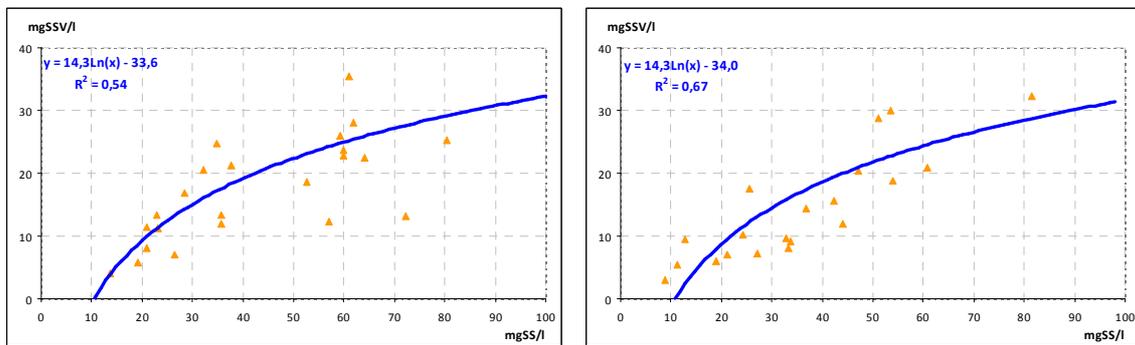
**Figura 37: Correlación entre los sólidos suspendidos y los sólidos suspendidos volátiles en el punto 5 (izquierda) y el punto 6 (derecha).**



**Figura 38: Correlación entre los sólidos suspendidos y los sólidos suspendidos volátiles en el punto 7 (izquierda) y el punto 8.2 (derecha).**

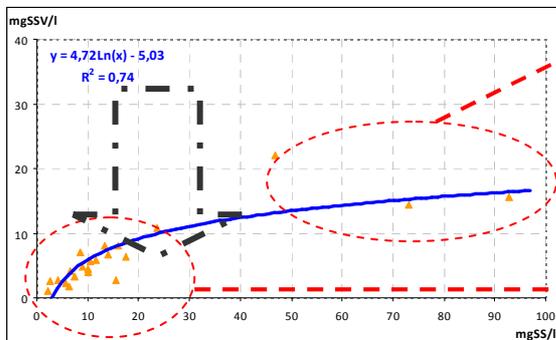


**Figura 39:** Correlación entre los sólidos suspendidos y los sólidos suspendidos volátiles en el punto 8.1 (izquierda) y el punto 15 (derecha).



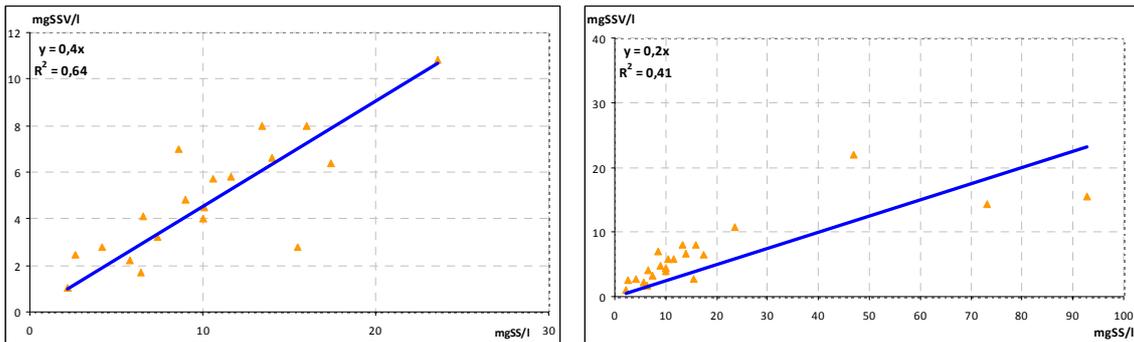
**Figura 40:** Correlación entre los sólidos suspendidos y los sólidos suspendidos volátiles en el punto 16 (izquierda) y el punto 1.2 (derecha).

Aunque en todos los puntos los ajustes de tipo logarítmico se muestran adecuados, sí que se observa que para concentraciones bajas de sólidos suspendidos (menos de 30 mg SS/l) existe una relación lineal con la cantidad de sólidos suspendidos volátiles. Por ejemplo, observemos el punto 4:



A altas concentraciones de  $SS_T$ , no aumentan los SSV con un incremento de los primeros.

A bajas concentraciones de  $SS_T$ , aumentan los SSV con un incremento de los primeros.



**Figura 41: Correlación lineal entre los sólidos suspendidos totales y los sólidos suspendidos volátiles en el punto 4 para concentraciones de los primeros menores de 30 mg SS/l (izquierda) y para todas las concentraciones obtenidas de los mismos (derecha).**

En la figura 42 se observa como a partir de los 30 mg SS/l se pierde la correlación lineal entre los resultados, y por tanto, un ajuste de este tipo da valores del coeficiente de correlación más bajos que un ajuste a una curva de tipo logarítmica.

Para todos los puntos que se encuentran dentro de los humedales, los valores elevados en la concentración de sólidos suspendidos y que no se corresponden con valores elevados de sólidos suspendidos volátiles, se dieron en el mes de mayo del 2009, en el que la población de aves en el Tancat era importante. La explicación a esta pérdida de linealidad a elevadas concentraciones, al menos en los puntos de dentro del humedal artificial, parece ser el hecho de que las aves, el viento, etc., al resuspender los sedimentos, resuspenden más sólidos inorgánicos que orgánicos, ya que los SSV se van degradando con el tiempo mientras que, los SSNV (sólidos suspendidos no volátiles) permanecen inalterables.

En la tabla siguiente se presenta, para cada punto de muestro, el promedio de la concentración de sólidos suspendidos y su porcentaje de volátiles, tanto para todos los datos obtenidos (columnas 2 y 3) como para el conjunto de datos con valores inferiores a de 30 mg SS/l (columnas 4 y 5)

**Tabla 13: Caracterización de los sólidos suspendidos totales.**

Punto	SS <sup>6</sup> (mg/l)	%SSV	SS <sup>7</sup> (mg/l)	%SSV
1.1	41.3	33	23.9	36
1.2	38.8	41	18.8	44
2	32.2	35	19.1	48
3	28.4	35	16.4	51
4	17.5	37	9.8	49
5	25.8	38	17.2	42
6	17.8	39	11.9	51
7	24.3	34	15.9	44
8.1	40.0	35	24.7	35
8.2	44.2	34	20.2	45
15	43.3	42	18.4	47
16	45.5	42	21.9	44

En general, en todos los puntos el porcentaje de materia orgánica que forma parte de los sólidos suspendidos está entorno un 40%. Este porcentaje corresponde en los puntos de entrada (1.1 y 1.2) principalmente a organismos fitoplanctónicos y a detritos, pues como se indicó en el apartado reservado a la introducción de la tesina, el lago se encuentra hipereutrofizado.

Si el cálculo se realiza únicamente con las concentraciones de sólidos suspendidos menores de 30 mg SS/l, el porcentaje de volátiles obtenido es mayor (por ejemplo, en el punto 6 aumenta de un 39% a un 51%), ya que no se consideran para su cálculo, los valores de sólidos suspendidos con los que se pierde linealidad en la relación  $SSV/SS_T$ .

### 7.3.2 CORRELACIONES ENTRE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS Y LA TURBIDEZ.

En las aguas, la presencia de sólidos suspendidos es la principal causa de aparición de turbidez; no obstante, también los compuestos orgánicos solubles coloreados, pueden contribuir a ello. Es por esta razón de causalidad directa, por lo que a menudo se emplea la turbidez como medida indirecta de la cantidad de sólidos suspendidos que hay en las aguas.

<sup>6</sup> Promedio de las mediciones realizadas quincenalmente desde el 6 de abril del 2009 hasta el 22 de marzo del 2010.

<sup>7</sup> Promedio de las mediciones realizadas quincenalmente desde el 6 de abril del 2009 hasta el 22 de marzo del 2010, para concentraciones de sólidos suspendidos inferiores a 30 mg SS/l.

La correlación entre sólidos suspendidos y turbidez es a menudo buena para un sistema específico de humedal, pero se debe de tener especial cuidado en la extrapolación de un lugar a otro (Kadlec y Wallace, 2009).

A continuación, se muestran dos gráficos con la correlación obtenida en la entrada al sistema de humedales por el Barranco del Poyo:

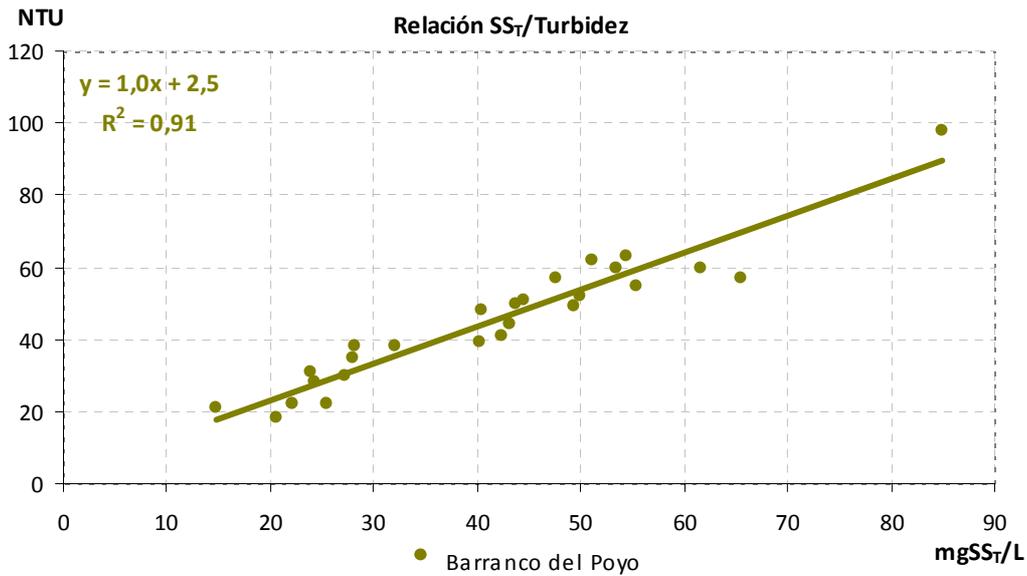
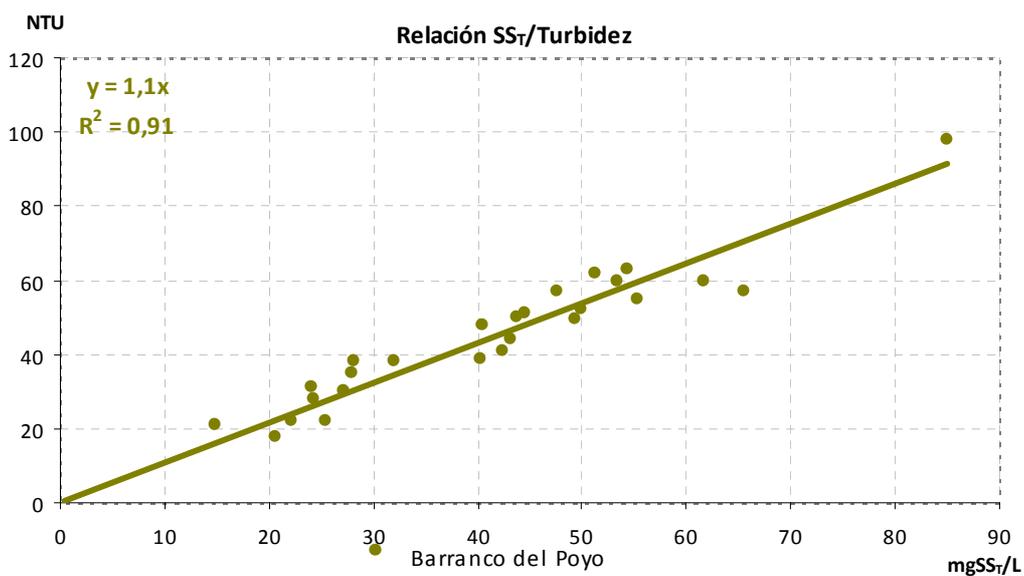


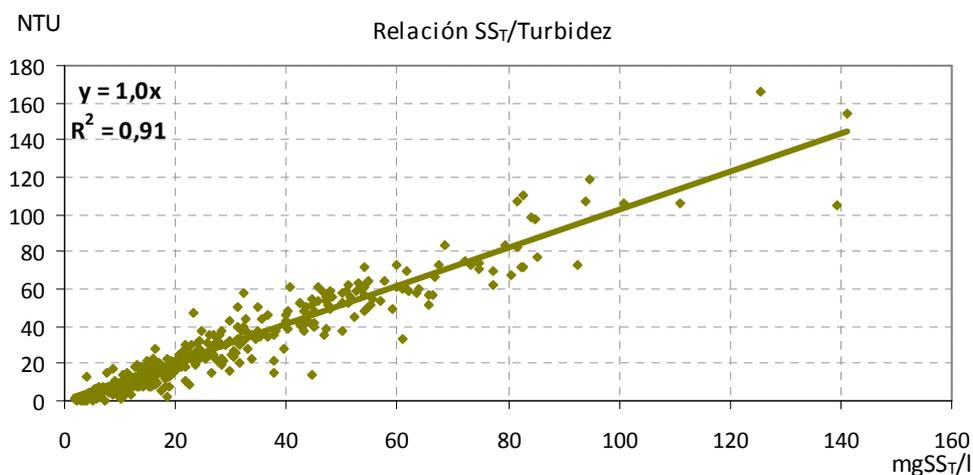
Figura 42: Correlación entre los sólidos suspendidos totales (mg/l) y la turbidez (NTU) medidos en el punto 1.1 (Barranco del Poyo).



**Figura 43: Correlación entre los sólidos suspendidos totales (mg/l) y la turbidez (NTU) medidos en el punto 1.1 (Barranco del Poyo), forzando el origen en  $SS_T=0$ ,  $NTU=0$ .**

Como se puede observar en las figuras anteriores (43 y 45), existe una muy buena correlación entre la concentración de sólidos suspendidos y la turbidez en el punto representado (ver tabla 13 para conocer las correlaciones en los demás puntos).

Si se realiza el ajuste lineal, entre los dos parámetros citados, empleando todos los datos recogidos en todos los puntos, se obtiene, tal y como se puede observar en la figura inferior, una única relación, con un elevado coeficiente de correlación,



**Figura 44: Correlación entre los sólidos suspendidos totales (mg/l) y la turbidez (NTU) obtenidos en todos los puntos de muestreo, forzando el origen en  $SS_T=0$ ,  $NTU=0$ .**

La muy buena correlación obtenida, permite establecer la turbidez como una variable de control de la calidad de las aguas y estimar a partir de ella, de una manera fácil y rápida, la concentración de sólidos suspendidos en el agua.

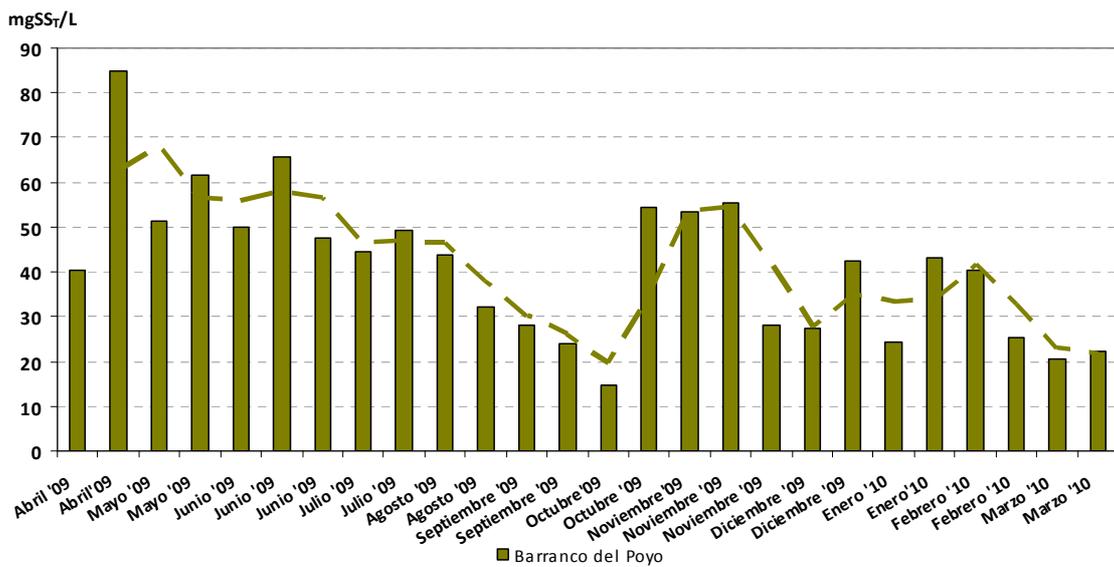
Por tanto, la obtención de una buena correlación entre los sólidos suspendidos y la turbidez permite poner en marcha un sistema de control de la eficacia del sistema de humedales artificiales basado únicamente en la determinación de esta variable, mucho más fácil de medir que otras (clorofila  $a$ , sólidos suspendidos, fósforo total y nitrógeno total).

Tabla 14: Regresiones entre los sólidos suspendidos totales y la turbidez, forzando el origen en  $SS_T=0$ ,  $NTU=0$ .

Punto	NTU/ $SS_T$	$R^2$	Rango de $SS_T$ (mg/l)	Rango de turbidez (NTU)
1.1	1.1	0.9	14.8-84.9	18-98
1.2	1.1	0.9	8.8-94.0	4-107
2	1.0	0.9	8.8-111.2	4-106
3	1.1	1.0	5.6-94.8	2-119
4	0.8	0.8	2.2-92.8	0.5-73
5	0.9	0.9	7.3-92.4	6-83
6	1.1	1.0	1.9-68.8	0.5-84
7	0.9	0.9	5.0-139.2	2-110
8	1.1	0.8	12.3-141.1	7-166
8b	1.1	0.9	18.4-61.6	18-70
15	1.0	0.9	6.4-85.4	5-99
16	1.0	0.8	13.6-100.7	15-106

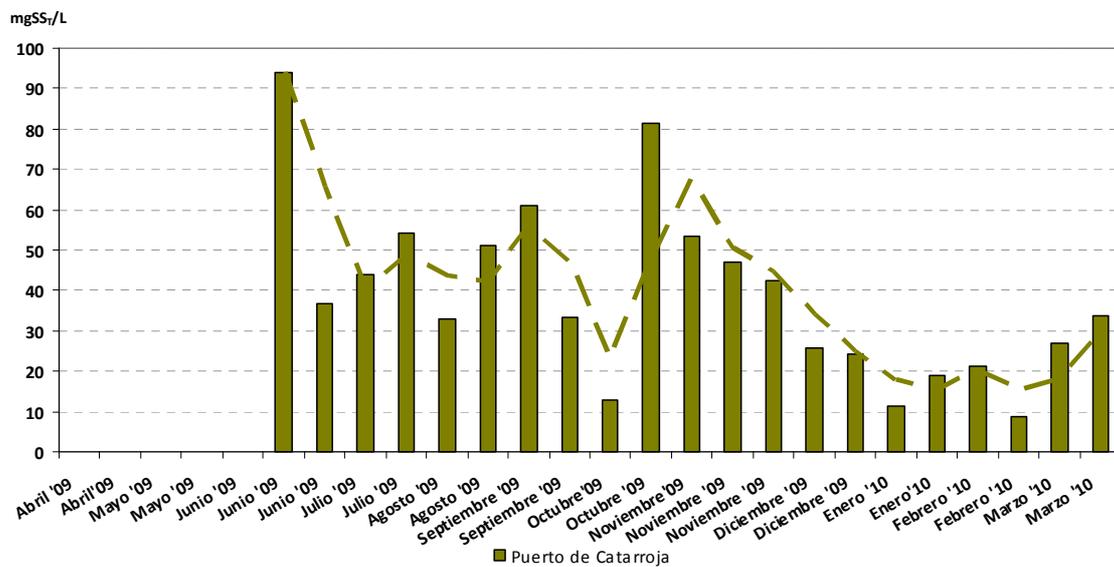
### 7.3.3 ELIMINACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS.

La concentración media en la entrada desde el Barranco del Poyo fue de 41.3 mg SS/l. Esta concentración presentó una alta variabilidad a lo largo del periodo anual de estudio (desviación estándar entorno a un 40% respecto al valor medio). La concentración mínima alcanzada durante este tiempo fue de 14.8 mg SS/l y la máxima de 84.9 mg SS/l.



**Figura 45: Concentraciones de sólidos suspendidos (mg SS/l) en el agua de entrada al sistema por el Barranco del Poyo, desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010. La línea discontinua representa la media móvil con un periodo de 2.**

En el caso de la otra fuente de suministro de agua al sistema (Acequia del Puerto de Catarroja), la concentración media, para el mismo periodo de tiempo, fue de 38.8 mg SS/l. Esta entrada presentó una mayor variabilidad que la anterior, tomando la desviación típica un valor de 22 mg SS/l (57% respecto al valor medio). Los valores en dicho punto oscilaron entre los 8.8 mg SS/l y los 94 mg SS/l.



**Figura 46: Concentraciones medidas (mg SS/L) en el agua de entrada por el Puerto de Catarroja, desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010. Cabe recordar que no entraba agua al humedal desde esta acequia hasta la segunda quincena de junio del 2009. La línea discontinua representa la media móvil con un periodo de 2.**

La concentración media a la entrada de F4, punto 8.1, es muy similar a la de los anteriores, tomado un valor de 40.0 mg SS/L. No obstante, su variabilidad es bastante menor debido a la homogenización que se produce por la mezcla de los caudales procedentes de las dos entradas de agua al sistema.

En las siguientes figuras aparecen las concentraciones medias, para todo el periodo de estudio, y la correspondiente desviación estándar, de cada uno de los puntos de muestreo de calidad de aguas:

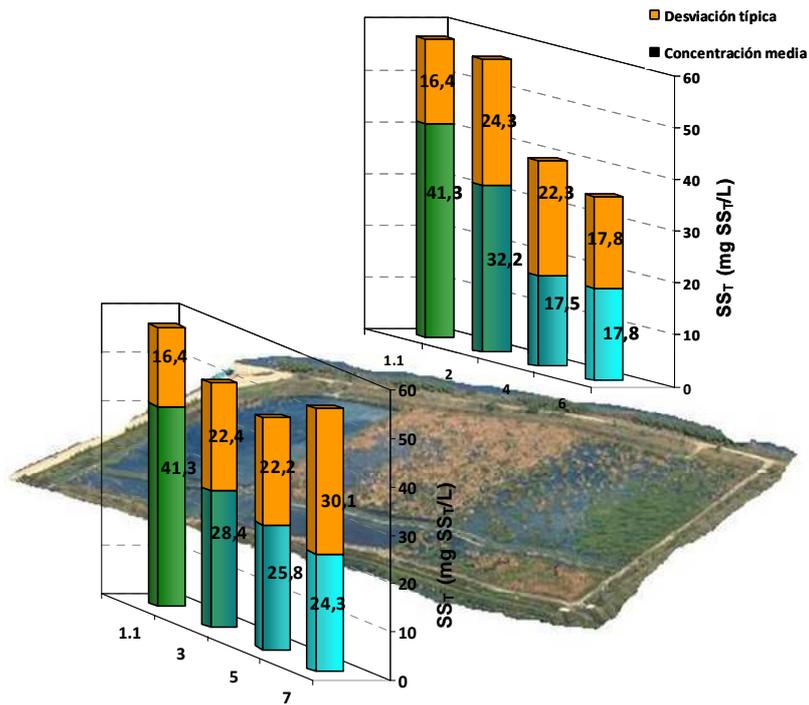
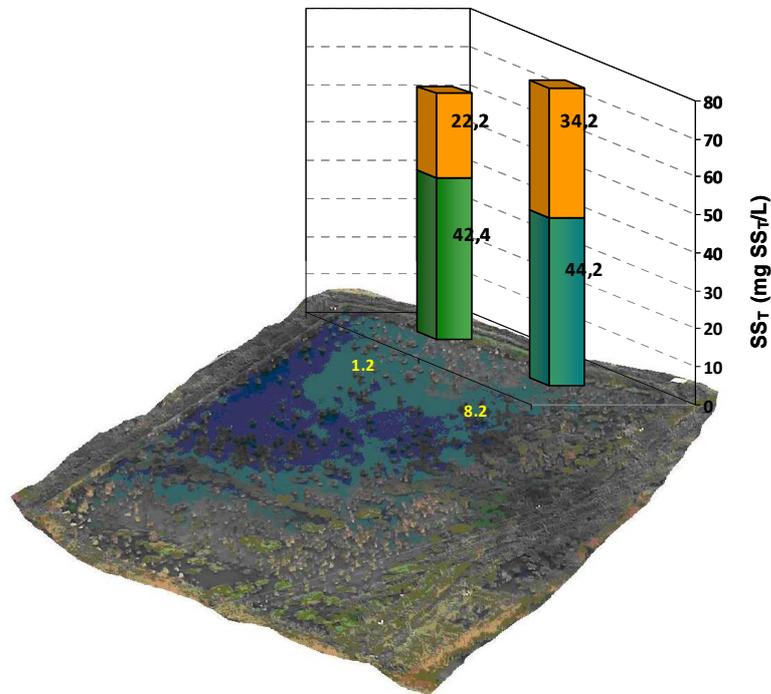


Figura 47: Media (tramo inferior) y desviación típica (tramo superior) de los datos recogidos en los punto de muestreo 1.1, 2, 3, 4, 5, 6, y 7, durante todo el periodo anual (06/04/2009 al 22/03/2010).



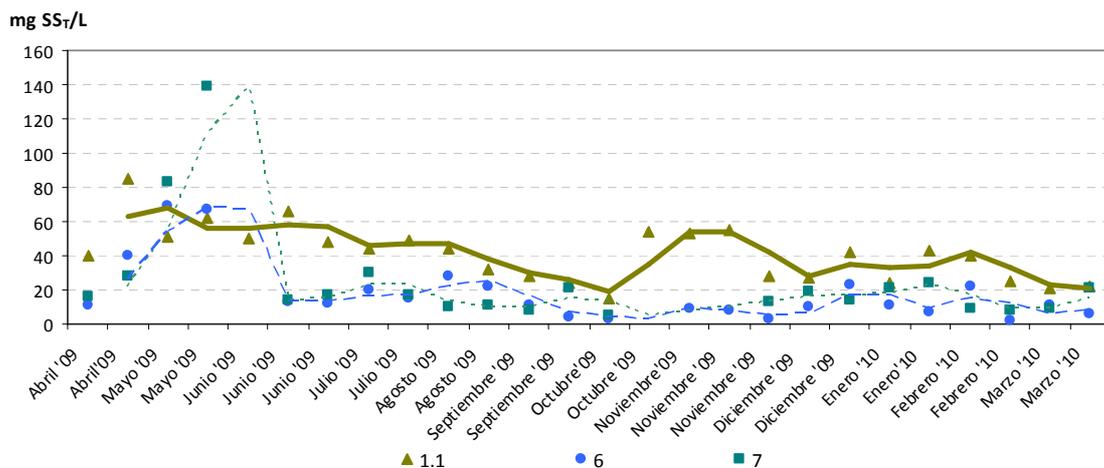
Figur48: Media (tramo inferior) y desviación típica (tramo superior) de los datos recogidos en los punto de muestreo 1.2 y 8.2, durante todo el periodo anual (06/04/2009 al 22/03/2010).

En la figura 47 se observa como el promedio de los valores de concentración de sólidos suspendidos totales para todo el año decrece tanto a lo largo del sistema *FG* como del *fp*, siendo la concentración de salida del primero menor que la del segundo y consiguiendo de este modo, el humedal *FG* una reducción mayor.

Por el contrario, en la figura 48 se aprecia una concentración de salida de sólidos suspendidos por el *F4* mayor que la de entrada por el Puerto de Catarroja. No obstante, el porcentaje de incremento de la concentración es bajo, de un 4%.

A continuación, se va a proceder a realizar un análisis de la evolución temporal, de las concentraciones de entrada y de las de salida de los diferentes humedales.

La evolución temporal de las concentraciones en la entrada por el Barranco del Poyo y a la salida de los dos grupos de celdas en serie es la siguiente:



**Figura 49: Evolución temporal de los sólidos suspendidos en la entrada por el Barranco del Poyo (1.1) y a la salida de las celdas *FG3* (6) y *fp3* (7). Las líneas representan la media móvil con un periodo de 2.**

Como se puede observar en la figura superior, en el primer mes de muestreo (abril del 2009) ya se obtuvieron buenos resultados de funcionamiento de las celdas en serie. Es decir, el sistema estuvo reduciendo la concentración de sólidos suspendidos de la entrada desde el primer instante de su puesta en marcha. No obstante, por esas fechas la densidad de vegetación todavía era muy baja por lo que a finales de abril, con la llegada de importantes poblaciones de aves al Tancat, se produjo una resuspensión de sólidos desde el sedimento, y ello se reflejó en los elevados valores de este parámetro, recogidos durante los meses de

mayo y de junio del 2009 a la salida de los dos humedales (*FG* y *fp*). Estos valores, además, fueron superiores a los de la entrada.

Aunque la presencia de vegetación reduce la resuspensión de sólidos, no la elimina completamente y, por tanto, la presencia de aves en el interior de los humedales, siempre va a desencadenar una resuspensión de los sólidos situados en las capas superiores de los sedimentos. Ello conduce a un incremento de los sólidos suspendidos en la lámina de agua. El efecto de la resuspensión será mayor o menor dependiendo de factores como la densidad de vegetación, el número de aves presentes, el tamaño de las mismas, etc.

A mediados de junio, los valores de sólidos suspendidos recogidos a la salida de *FG3* y *fp3*, fueron de nuevo inferiores a los de la entrada por el Barranco del Poyo. Por tanto, el sistema se había recuperado de la perturbación ocasionada por la presencia de aves en el mismo. También se ha de remarcar, que la densidad de vegetación en los *FG1* y *FG2* era ya importante (ver figura 50 y 51).



**Figura 50: Fotografía frontal del *FG1* el día 06/04/2009 (baja densidad de vegetación) y del día 10/06/2009 (elevada densidad de vegetación).**



**Figura 51: Fotografía frontal del *FG2* el día 06/04/2009 (baja densidad de vegetación) y del día 10/06/2009 (elevada densidad de vegetación).**

A pesar de que el sistema, a partir de junio, estaba reduciendo las concentraciones de sólidos suspendidos que le entraban, el bajo desarrollo de la vegetación en el *FG3* y en el *fp3* impedía una reducción mayor. Además, en algunas ocasiones, en estos sistemas se produjo resuspensión de los sólidos ya sedimentados por acción de diversos factores (principalmente por la presencia de aves y/o de viento).



**Figura 52: Fotografía frontal del *FG3* el día 06/04/2009 (baja densidad de vegetación) y del día 10/06/2009 (baja densidad de vegetación).**

Conforme se fue desarrollando el *FG3* los resultados obtenidos en el punto 6 fueron mejorando, e incluso, cuando se llevó a cabo la cosecha del *FG1* (a principios de noviembre) y únicamente estando por tanto, operativos los *FG2*, *fp2*, *FG3* y *fp3* se obtuvieron valores a la salida del *FG3* inferiores a 10 mg SS/ L (periodo desde noviembre a mediados de diciembre).



**Figura 53: Fotografía frontal del *FG1* el día 02/02/2010 (después de la cosecha de la celda) y fotografía frontal del *FG3* el día 05/11/2009 (elevada densidad de vegetación).**

En resumen, a partir del mes de noviembre, y con el *FG1* y el *fp1* sin cobertura vegetal, en el 64% de los muestreos realizados hasta el día 22 de marzo del 2010, los valores obtenidos a la salida del *FG3* fueron inferiores a 10 mg SS/ l. En el caso de los valores obtenidos a la salida del *fp3*, el 33% de los mismo fueron inferiores a los 10 mg SS/ l.

Queda claro pues, que el aumento en determinadas fechas de la concentración de sólidos a la salida del sistema, coincide en el tiempo con una presencia importante de aves, entre las que se encuentran los Calamones (*Porphyrio porphyrio*). La abundancia de aves en las celdas de tratamiento no sólo es reconocida visualmente, sino que, indirectamente, también es posible hacerse una idea de la misma a través, de la detección de restos de los excrementos de éstas, y que se pueden encontrar tanto en las motas como dentro de las propias celdas.

No obstante, el único problema que ocasionan las aves no es la resuspensión de sólidos ya sedimentados sino que además de ello, determinadas aves como la especie nombrada anteriormente (*Porphyrio porphyrio*) poseen una dieta alimenticia básicamente vegetal, alimentándose por tanto, de tallos, hojas, raíces, flores y semillas de plantas acuáticas y semiacuáticas, como es el caso de la enea (*Typha*) o del grano de arroz. Esta es una de las razones por las que la vegetación no se desarrolló en las celdas *FG1* y *fp1* después de haber sido cosechadas en noviembre del 2009. *Los patos y otras aves causan depredación significativa sobre los materiales vegetales en este tipo de humedales (Kadlec y Wallace, 2009).*

Los resultados que se obtuvieron a la salida del *F4* no fueron tan buenos como los de los humedales anteriores por varias razones. Por una parte, la vegetación tardó un tiempo considerablemente mayor en desarrollarse, como consecuencia de que fue el último sistema en ser plantado, y además, la densidad de la vegetación fue considerablemente menor que en los otros. Por otra parte, se trata de una única celda, independiente del resto y no responde por tanto, al funcionamiento de las 3 celdas en serie.

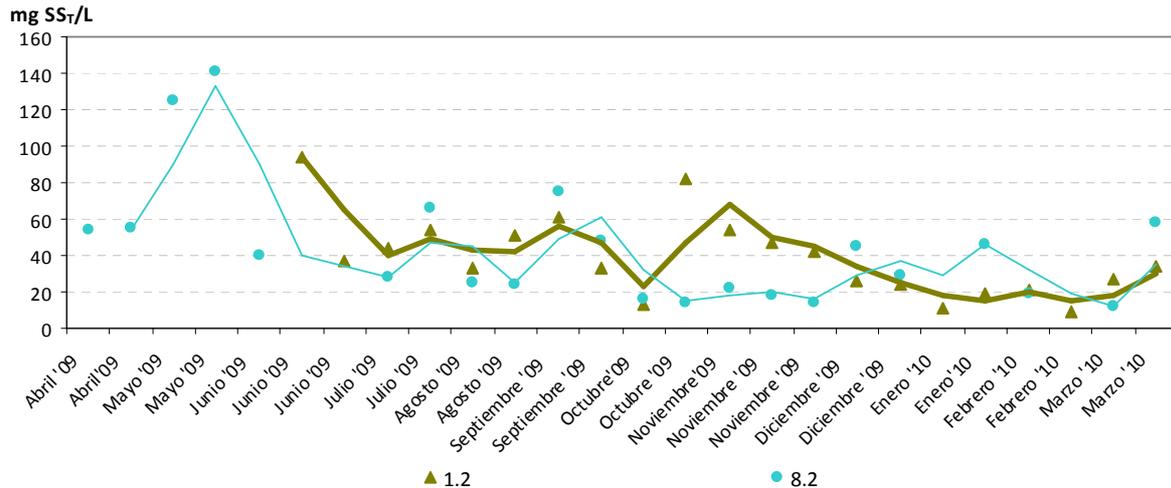


**Figura 54: Fotografía frontal del F4 del día 06/04/2009 (izquierda) y fotografía frontal del F4 el día 10/06/2009 (derecha).**



**Figura 55: Fotografía frontal del F4 del día 02/02/20010 (izquierda) y fotografía lateral del F4 el día 02/02/20010 (derecha).**

La evolución de los resultados obtenidos durante el periodo de estudio, tanto en la entrada por el Puerto de Catarroja como en la salida por el F4, aparece reflejada en la siguiente figura:

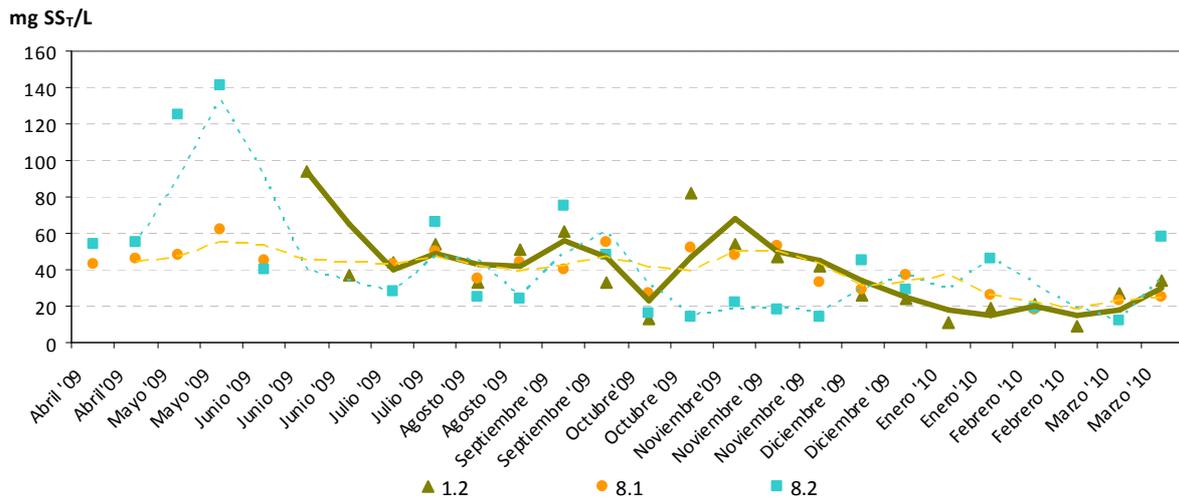


**Figura 56: Evolución temporal de los sólidos suspendidos en la entrada por el Puerto de Catarroja (1.2) y a la salida de F4 (8.2). Las líneas representan la media móvil con un periodo de 2.**

En la figura 48 se observa como el valor medio a la salida de F4 es mayor que el de la entrada al mismo por el Puerto de Catarroja. No obstante, este resultado puede llevar a conclusiones erróneas, pues el humedal sí que consiguió reducir la concentración de la entrada y lo hizo en el 50% de los casos.

No obstante, aunque se toma como valor de entrada la concentración de sólidos suspendidos en el Puerto de Catarroja, debido a que el agua discurre por un canal paralelo al *Ullal* desde que entra al sistema hasta que alcanza el F4, se seleccionó también, como se ha indicado en un apartado anterior, como punto de muestreo la salida de la tubería que alimenta al F4 (punto 8.1). Se recogió muestra de agua de este punto en todos los muestreos de campo que se realizaron. Ello se justifica porque en dicho canal, pueden darse transformaciones tanto físicas, como químicas y/o biológicas.

En la figura siguiente aparece la evolución temporal de los sólidos suspendidos en los puntos 1.2, 8.1 y 8.2,

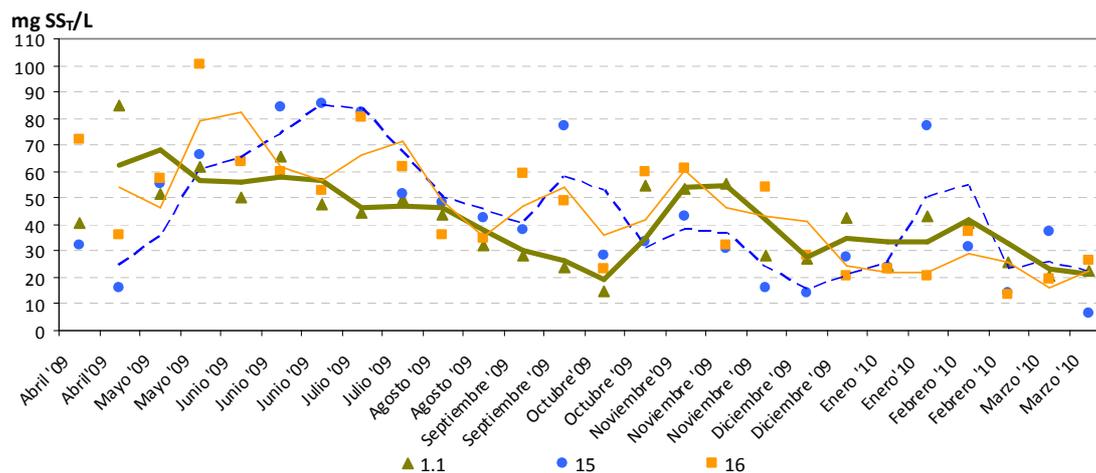


**Figura 57: Evolución temporal de los sólidos suspendidos en la entrada por el Puerto de Catarroja (1.2), entrada al F4 (8.1) y a la salida del F4 (8.2). Las líneas representan la media móvil con un periodo de 2.**

En el 64% de los muestreos, el valor de sólidos suspendidos en el punto 8.1 fue inferior al valor obtenido en el Puerto de Catarroja, lo que manifiesta que durante el transporte del agua por el canal, se dan procesos de sedimentación y/o hidrólisis de la materia en suspensión, haciendo que la concentración de éstos vaya disminuyendo. No obstante, en los muestreos restantes la concentración fue mayor que en la entrada, con lo que no sólo se dan procesos de eliminación de partículas en dicho canal, sino que también, de generación (resuspensión, crecimiento del fitoplancton, etc.), y ello dependerá entre otros factores de la acción del viento, la velocidad del flujo por el canal, el tiempo de residencia hidráulico, etc.

Para finalizar el análisis de la evolución temporal de los sólidos suspendidos durante el primer año, se van a comparar los resultados obtenidos en el punto 15 (salida del Tancat de la Pipa) con las entradas desde el Barranco del Poyo (1.1) y desde la Acequia del Puerto de Catarroja (1.2), y con el punto del lago de l'Albufera en donde se devuelve el agua tratada por el sistema de humedales (punto 16).

En la siguiente figura se muestra la evolución temporal de los valores obtenidos en el Barranco del Poyo y los puntos 15 y 16,



**Figura 58: Evolución temporal de los Sólidos Suspendedos en la entrada por el Barranco del Poyo (1.1), salida del Tancat de la Pipa (15) y zona del lago de vertido del agua tratada (16). Las líneas representan la media móvil con un periodo de 2.**

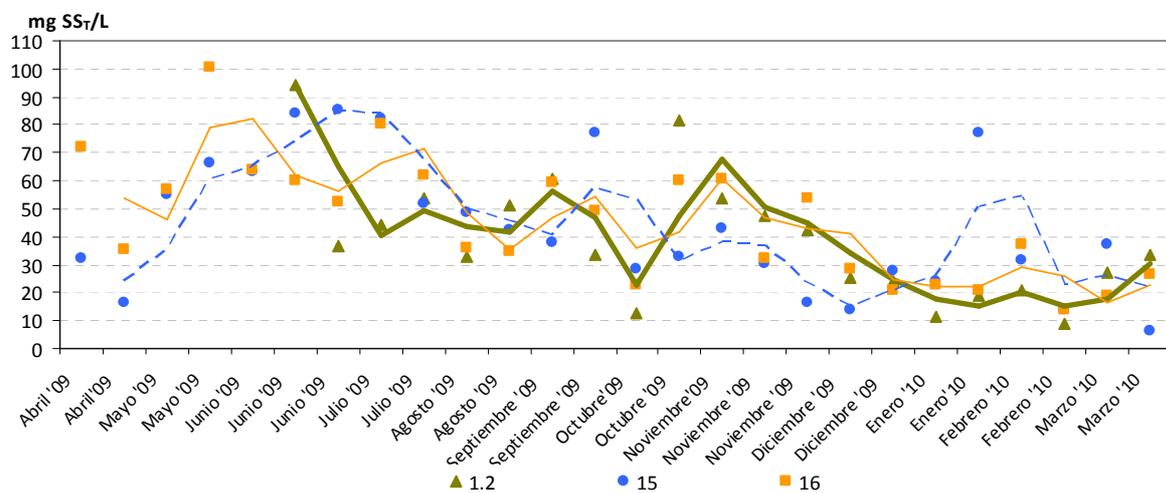
Los resultados del primer año muestran que en el 46% de los casos, la concentración de sólidos suspendidos en el punto 15 fue inferior a la de la entrada (punto 1.1). No obstante, conforme el sistema fue alcanzando un mayor grado de madurez (desarrollo de la vegetación, caudales más elevados a la entrada, etc.) sí que se observa una mejoría de los valores registrados en el punto 15. A partir de mediados de octubre (concretamente del 19/10/2009) en el 83% de los muestreos, 15 fue inferior a 1.1.

Existen varios factores que influyen en que la calidad del agua pueda empeorar, desde que sale de los humedales hasta que por el punto 15 se devuelve al lago de l'Albufera:

- Al punto 15 no llega el agua directamente desde los humedales artificiales sino que lo hace después de atravesar las dos lagunas (la Educativa y la de Reserva). Éstas, aparte de ser productoras de sólidos suspendidos como restos de vegetación y/o fitoplancton, son un hábitat idóneo para las aves, cuya actividad, como ya se ha comentado, origina la resuspensión de sólidos ya sedimentados.
- Además, en el propio canal donde se mezclan las aguas, es probable la generación de sólidos fitoplanctónicos dependiendo del tiempo de residencia del agua en él.
- El último factor, es que a este punto también llega un caudal de agua que entra por fugas desde el Barranco del Poyo y que discurre por una canal perimetral del

Tancat, hasta alcanzar este punto. Estas aguas, igualmente sufrirán durante su trayecto, procesos físicos, químicos y biológicos tanto de eliminación como de generación de sólidos suspendidos. Por último, en este canal perimetral también pueden darse filtraciones desde el lago de l'Albufera y mediante las fugas, acceder al canal donde se encuentra el punto 15.

Finalmente, se da un porcentaje mayor de casos, concretamente un 54%, en que 15 tiene la concentración de sólidos suspendidos menor que 16. Aunque de ello, no se puede deducir que estemos mejorando la calidad del agua del lago, sí que desde el mes de diciembre del 2009, el agua del punto 16 tiene mejor calidad que la que entra desde el Barranco del Poyo.



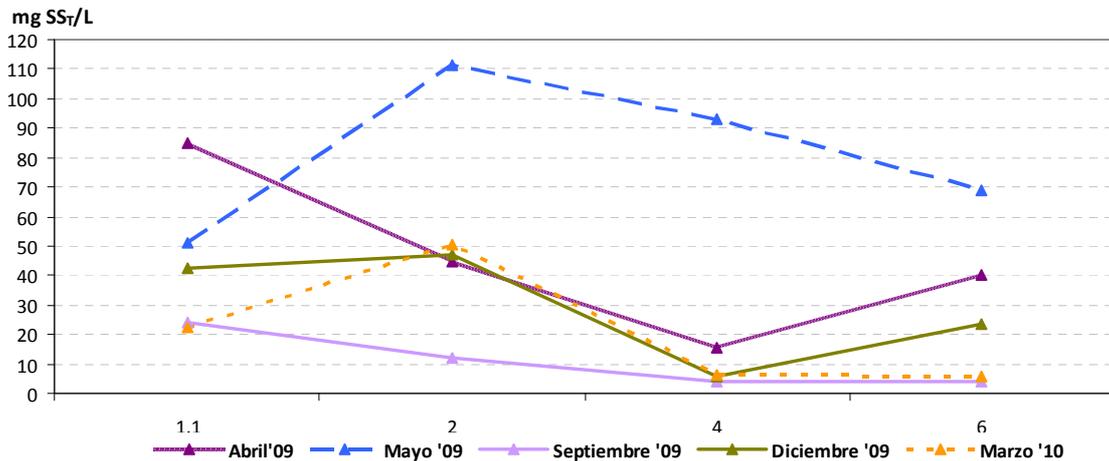
**Figura 59: Evolución temporal de los sólidos suspendidos en la entrada por el Puerto de Catarroja (1.2), salida del Tancat de la Pipa (15) y zona del lago de vertido del agua tratada (16). Las líneas representan la media móvil con un periodo de 2.**

Al igual que ocurría con el Barranco del Poyo, en el 46% de los casos, la calidad del agua del punto 15, en cuanto al parámetro de estudio al que nos referimos en este apartado, es mejor que la del Puerto de Catarroja.

A continuación, después de haber realizado un análisis temporal de los resultados obtenidos en los diferentes humedales, se va a efectuar un análisis espacial centrado en el sistema *FG*.

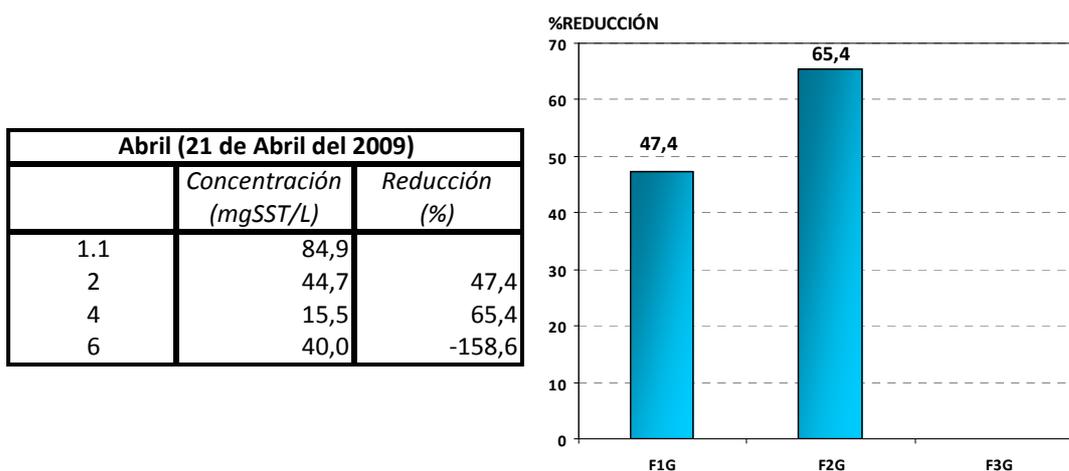
Para analizar más detalladamente el funcionamiento del humedal grande (*FG*), se han seleccionado en la siguiente figura, los resultados obtenidos cinco días distintos. Éstos

representan, las cinco tendencias de evolución de los valores a lo largo de las tres celdas, observadas durante todo el periodo de estudio. Estas tendencias, están relacionadas con diversos factores que se pasan a comentar a continuación. Se debe aclarar que, estas mismas tendencias se observaron en el humedal pequeño (*fp*), por lo que únicamente se va a proceder a comentar el grande.



**Figura 60: Evolución de los sólidos suspendidos a lo largo del sistema FG. Los días seleccionados son: el 21 de abril del 2009, el 04 de mayo del 2009, el 21 de septiembre del 2009, el 28 de diciembre del 2009 y por último, el 22 de marzo del 2010.**

Durante el mes de abril, tal y como se comentó anteriormente, el sistema estuvo eliminando sólidos suspendidos, y ello se reflejó en que la concentración a la salida del FG3 fue inferior a la de la entrada por el Barranco del Poyo. Durante este mes, la reducción media global fue de un 63%. Este porcentaje mejora si solamente se tienen en cuenta las celdas uno y dos grandes (reducción global de las dos celdas del 78%), ya que como se observa en la figura 60, a lo largo del FG3 se produjo una generación de sólidos, que aumentó la concentración de salida del FG2 aproximadamente 2.6 veces. La celda FG3 por tanto, no estaba operativa, y la principal razón de ello, como ya se ha explicado, es la baja cobertura vegetal que tenía en ese momento.

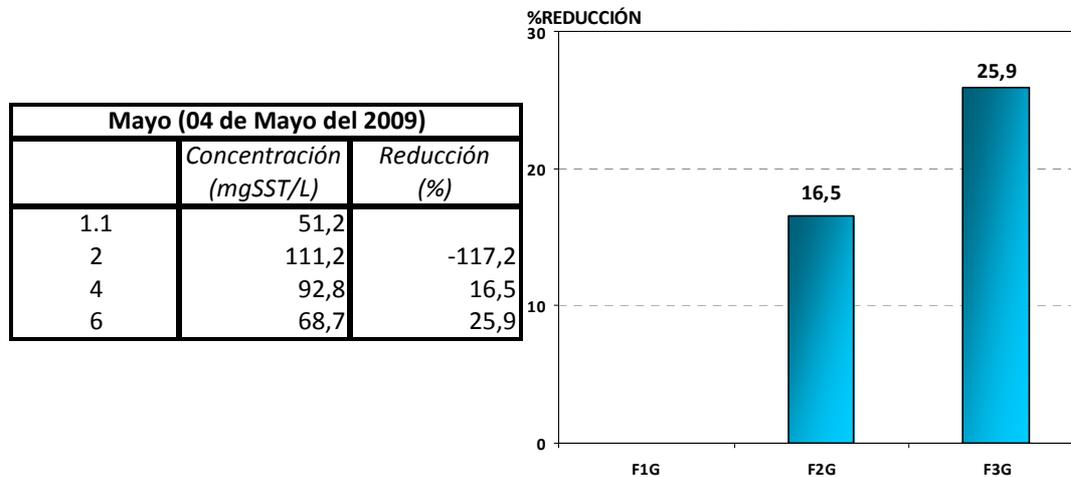


**Figura 61: Evolución de la concentración y reducción de los sólidos suspendidos totales a lo largo del humedal FG y referentes al 21 de abril del 2009.**

A pesar de que en la figura 61, los resultados muestren una eliminación porcentual de *FG2* mayor que la de *FG1*, si se computa todo el periodo comprendido desde 06/04/2009 hasta el 27/07/2009, fecha en que se decidió aumentar el caudal de entrada al sistema de tratamiento, se detecta que la principal reducción de sólidos suspendidos se produjo en el paso del agua a través de la celda uno. La celda dos redujo, pero menos, y la tres, o bien mantuvo los valores de la dos, o los aumentó. Estos resultados podrían significar que a finales de julio del 2009, el humedal artificial todavía estaba funcionando por debajo de sus posibilidades reales. No obstante, existen incertidumbres acerca de que el rendimiento de eliminación de las tres celdas deba ser el mismo, ya que muchos factores, como por ejemplo: la sedimentación en el *FG1* de la materia más fácilmente sedimentable, el grado de cobertura vegetal que se acabe alcanzando en las celdas, la aparición de caminos preferenciales, etc., pueden influir en ello.

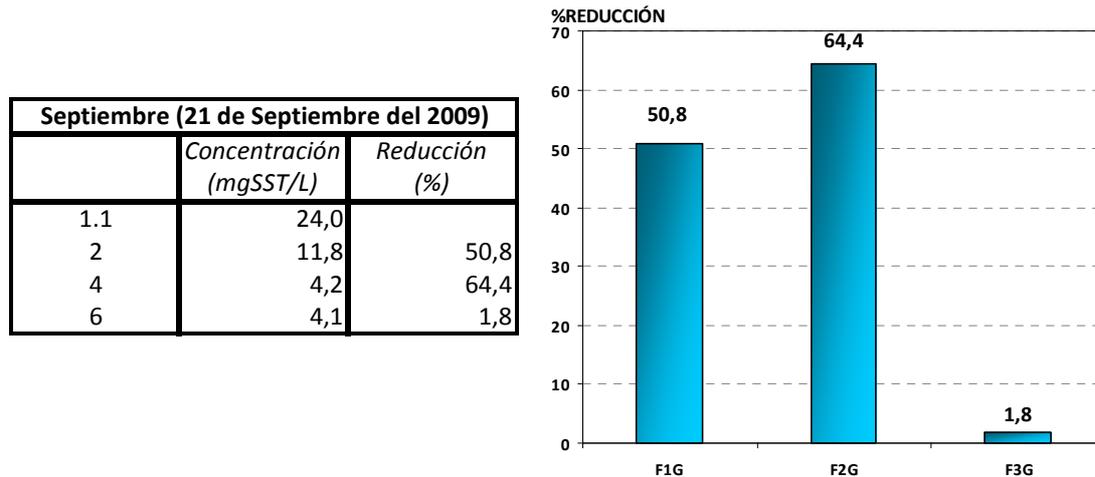
Dentro del periodo comentado, desde el inicio de abril de 2009 hasta finales de julio del 2009, se detectó una tendencia en el mes de mayo que no se correspondía con la del resto del periodo. Si nos fijamos en la figura 60, se observa como se produjo un aumento de la concentración de sólidos desde la entrada a la salida de la celda uno y, a pesar de que las celdas dos y tres consiguieron reducir un 38% la concentración de salida de la uno, no lograron disminuirla hasta niveles por debajo de la entrada. Esta tendencia se asocia a la presencia de aves en los humedales artificiales, que se empezó a detectar a finales de abril y que en mayo ya contaban con tamaños poblacionales importantes dentro del sistema. Como se comentó anteriormente, ello conduce a la resuspensión de sólidos sedimentados,

viéndose reflejado, en la obtención de concentraciones de los mismos a la salida de las celdas, superiores a los de la entrada.



**Figura 62: Evolución de la concentración y reducción de los sólidos suspendidos totales a lo largo del humedal FG y referentes al 04 de mayo del 2009.**

Con el propósito de mejorar el rendimiento del sistema, ya que las concentraciones de sólidos suspendidos a la entrada del humedal estaban bajando, que la vegetación ya había conseguido una densidad aceptable y que los rendimientos obtenidos hasta el momento estaban mejorando, se decidió aumentar, a finales de julio del 2009, el caudal de agua a tratar. Los resultados obtenidos una vez estabilizado el sistema, siguieron la tendencia de los valores representados en la figura 60 correspondientes con un muestreo del mes de septiembre del 2009. Como se ha indicado, y además se observa fácilmente en dicho gráfico, por un lado, los valores a la entrada durante ese periodo eran significativamente más bajos que los del periodo anterior y por otro lado, los rendimientos del *FG1* y *FG2* fueron muy parecidos durante todo el periodo comprendido desde finales de julio del 2009 hasta principios de octubre del 2009 (fecha en que se detuvo la circulación del flujo de agua a través de las celdas uno para proceder a comenzar con las labores de cosechado).



**Figura 63: Evolución de la concentración y reducción de los sólidos suspendidos totales a lo largo del humedal FG y referentes al 21 de septiembre del 2009.**

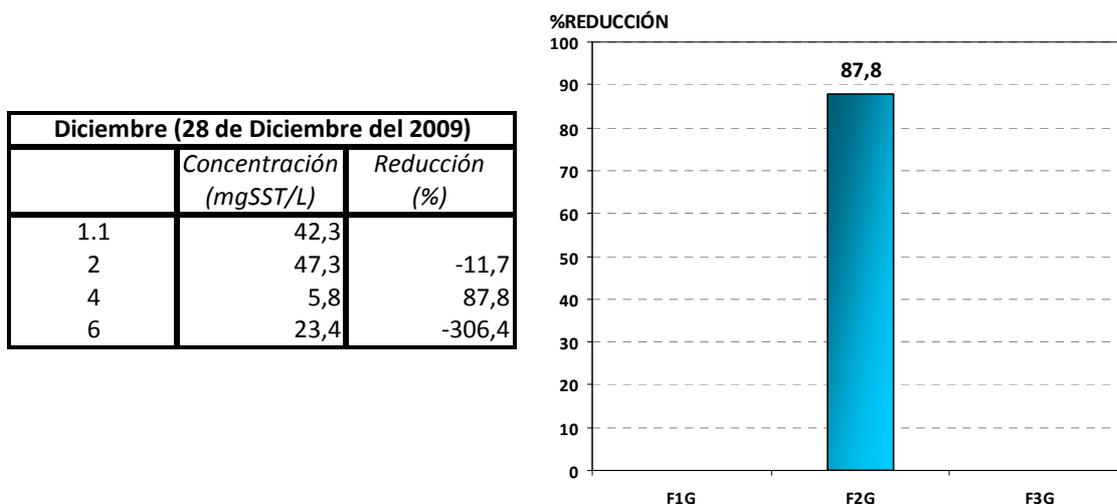
A finales de septiembre de 2009 la celda tres ya empezaba a estar operativa, dado que durante el resto del periodo, la proporción de muestreos en que redujo la concentración de sólidos que le entraba, fue mayor que la proporción de muestreos en que la aumentó. No obstante, se ha de tener en cuenta que probablemente los porcentajes de reducción del FG3 fueron tan bajos como consecuencia de que la concentración de entrada al mismo también lo fue. Por tanto, la celda no pudo reducir más la concentración que le entraba, debido a que los procesos de eliminación de los sólidos, se veían compensados con los de generación de los mismos. Es entonces, cuando se ha alcanzado en el sistema la *concentración base*.

La conclusión fundamental que se extrae de este periodo, es que al aumentar el caudal de agua a tratar, disminuyó el rendimiento del FG1 y aumentó el del FG2, de modo que los dos sistemas presentaron rendimientos similares y elevados, manteniéndose los porcentajes de eliminación globales.

Desde mediados de octubre hasta finales de noviembre del 2009, el agua dejó de circular por el FG1, y entraba directamente al FG2. Ello era necesario para llevar a cabo las labores de siega de las celdas uno (grande y pequeña). Durante este periodo, el FG2 fue el que presentó mayor porcentaje de eliminación de sólidos (un 64%), pero no obstante, el FG3, con una reducción media de un 58%, también contribuyó significativamente a la reducción global (un 85%). Además, en este periodo los valores a la salida fueron inferiores a 10 mg SS<sub>T</sub>/l (valor fijado como objetivo a alcanzar a la salida de los humedales).

Cuando finalizó el cosechado de la celda uno, se restableció la circulación normal del flujo por las celdas, es decir, nuevamente el agua entraba por *FG1*, de ahí al *FG2* y de este último, al *FG3*. La tendencia general de los resultados obtenidos desde entonces se refleja en los referentes al 28 de diciembre del 2009 representados en la figura 60.

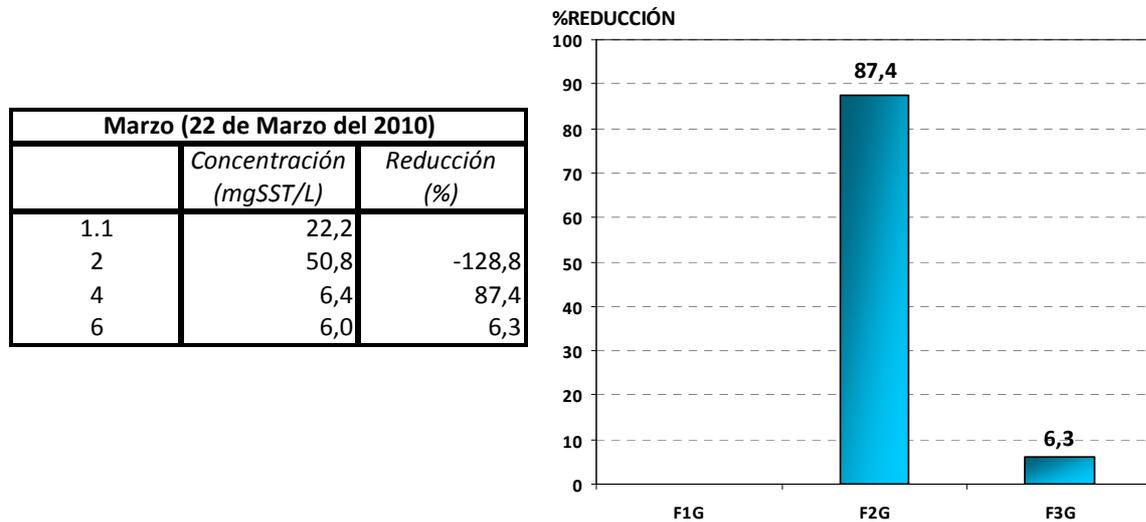
Observamos que el *FG1* prácticamente no redujo nada la concentración de entrada de sólidos suspendidos al mismo, sino que más bien parece que existía una compensación entre los procesos sumidero y los procesos de generación de estos, resultando ello, en una acumulación nula de los mismos. Por el contrario, sí que fue muy importante el papel desempeñado por la celda 2, con una reducción media del 77%. Gracias a la forma de operar (carga hidráulica, tiempo de residencia hidráulico, etc.) de este sistema, se consiguieron concentraciones a la salida del humedal artificial muy buenas, aunque el *FG3* las deterioró ligeramente. La concentración de entrada al *FG3* desde el *FG2* fue tan baja, que parece que la generación dentro de la celda tres fue mayor que la eliminación, como resultado de que dicho sistema no era capaz de reducir más esas concentraciones de entrada.



**Figura 64: Evolución de la concentración y reducción de los sólidos suspendidos totales a lo largo del humedal *FG* y referentes al 28 de diciembre del 2009.**

La última tendencia encontrada, es la que se refleja en la figura 60, el 22 de marzo del 2010. En esta, por una parte se detecta la resuspensión de sólidos que se produjo en el *FG1* como consecuencia de la abundante presencia de aves en él y la nula cobertura vegetal del mismo, y por otra parte, también refleja la tendencia de todo el periodo en cuanto a las restantes celdas, es decir, que *FG2* fue el principal reductor de sólidos suspendidos y que el

FG3 no fue capaz de disminuir más allá las concentraciones de salida del FG2, sino que o bien las mantuvo o bien las aumentó.

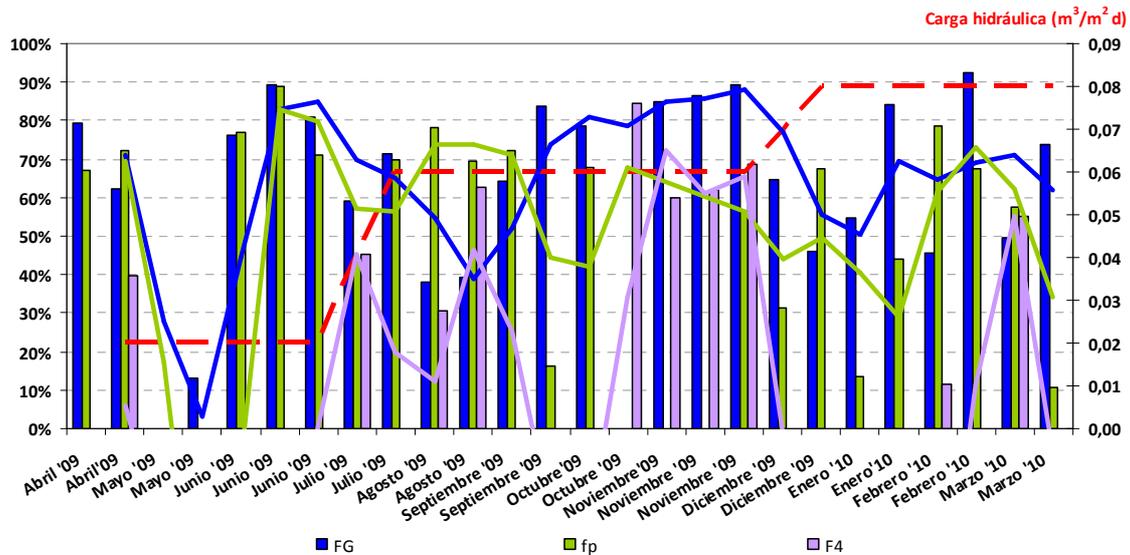


**Figura 65: Evolución de la concentración y reducción de los sólidos suspendidos totales a lo largo del humedal FG y referentes al 22 de marzo del 2010.**

Respecto a los porcentajes de eliminación globales se observa que el humedal FG generalmente tuvo mejores resultados, con un valor del 57%. El porcentaje del sistema *fp* fue de un 42% y el de *F4* fue negativo, de un -4%. Las razones de estas diferencias ya han sido explicadas en líneas anteriores.

Tras el análisis espacial de las concentraciones obtenidas en diferentes periodos, se pasa a realizar una evaluación de los rendimientos obtenidos tanto globalmente por el sistema formado por los tres humedales artificiales, como los obtenidos individualmente por cada uno de estos. Además, también se estudian, los rendimientos obtenidos a nivel de celda.

En las figuras que se presentan a continuación, se muestra la evolución de los rendimientos de eliminación, en Kg/día, del parámetro de estudio y la evolución de la carga hidráulica durante todo el periodo analizado, en los diferentes sistemas:



**Figura 66: Evolución temporal de los rendimientos de eliminación de sólidos suspendidos en las celdas en serie grandes y pequeñas (*FG* y *fp* respectivamente) y de la celda independiente (*F4*). También aparece representada la media de la carga hidráulica. Los rendimientos de eliminación negativos no aparecen reflejados en la figura. Las líneas azul, verde y morada representan la media móvil con un periodo de 2 de los *FG*, *fp* y *F4*, respectivamente.**

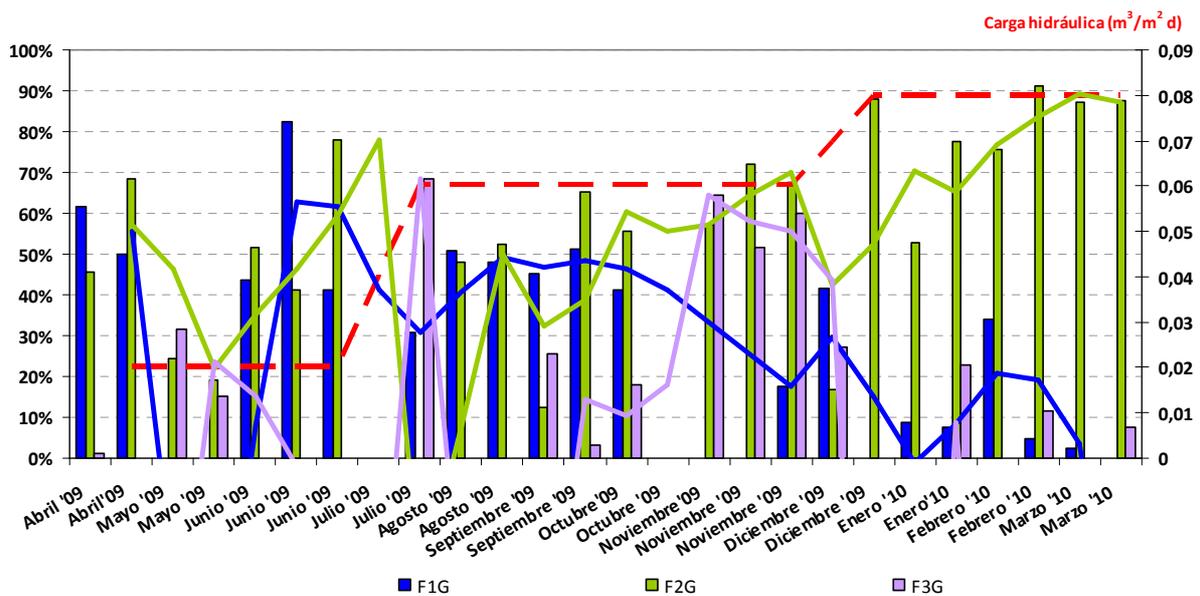
En la figura superior se observa que el humedal *FG* fue el que mejores rendimientos obtuvo, consiguiendo en el 52% de los casos, valores de reducción de la carga de entrada, mayores del 70%. En cambio, el humedal *F4*, solamente presentó rendimientos positivos en el 48% de los casos.

En el gráfico 66, también se aprecia como durante el mes de mayo del 2009, en el que la densidad de aves (individuos/m<sup>2</sup>) fue elevada en el Tancat, los rendimientos de los dos humedales *FG* y *fp*, fueron negativos. Como consecuencia de ello, durante este mes, el humedal artificial en conjunto, fue exportador de sólidos suspendidos al lago de l'Albufera.

En dicha figura, también podemos ver la respuesta del humedal ante los diferentes cambios en la carga hidráulica. Así pues, cuando se aumentó esta última de 0,02 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*día a 0,06 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*día, en el mes de julio del 2009, los rendimientos en los diferentes humedales cayeron, pasando en el sistema *FG* de una eficiencia promedio en el mes de junio del 2009 del 84% a una eficiencia promedio del 39% en el mes de agosto. En septiembre del 2009, empezaron a aumentar los rendimientos de eliminación, consiguiendo un valor promedio de los mismos, desde dicho mes hasta el mes de diciembre (en el que nuevamente se aumentó la carga hidráulica), del 81%. Al aumentar nuevamente la carga hidráulica, pasando de 0,06 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*día a 0,08 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*día volvió a producirse una disminución en el rendimiento del

sistema, alcanzando a finales de diciembre y principios de enero, un valor promedio del 50%. Al igual que en el periodo anterior, el sistema logró recuperar rendimientos elevados, siendo en este caso, el promedio hasta finalizar el año de estudio, de un 64%.

Finalmente, se puede observar que cuando se cosechó el *FG1*, el rendimiento del humedal *FG* fue similar al que tenía anteriormente. Ello fue debido a los rendimientos altos alcanzados en los *FG2* y *FG3* (ver figura 67).



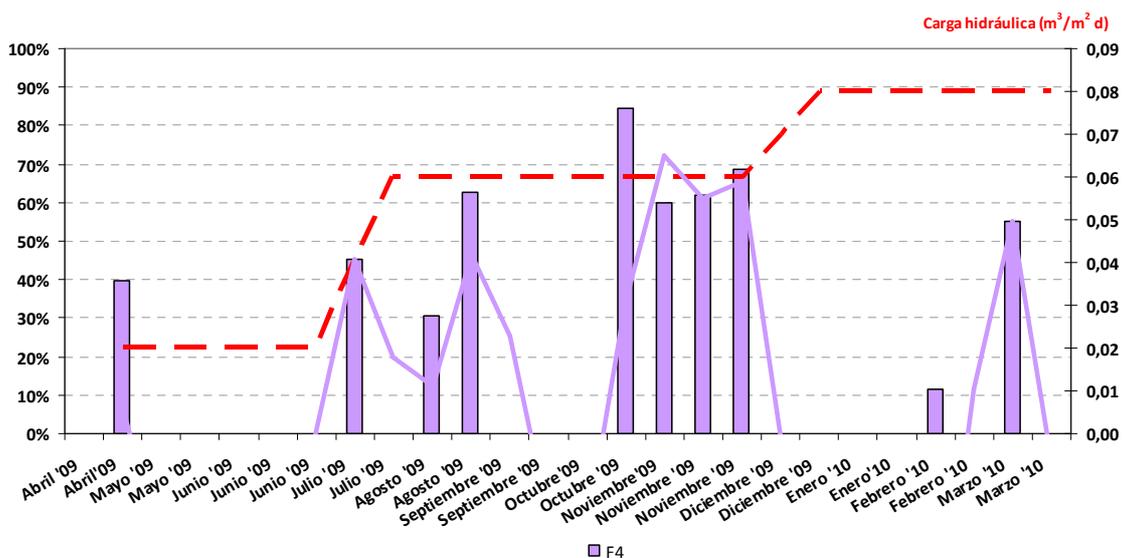
**Figura 67: Evolución temporal de los rendimientos de eliminación de sólidos suspendidos en los filtros en serie grandes. También aparece representada la media de la carga hidráulica. Los rendimientos de eliminación negativos no aparecen reflejados en la figura. Las líneas azul, verde y morada representan la media móvil con un periodo de 2 de los *FG1*, *FG2* y *FG3*, respectivamente**

En el gráfico superior se observa claramente cómo durante los primeros meses, los rendimientos de eliminación del *FG1* estaban generalmente por encima del 40%, y en cambio, a partir de su cosechado, los rendimientos cayeron generalmente por debajo del 20%; llegando incluso a ser la celda, exportadora neta de sólidos.

En cambio, en el *FG2* los rendimientos fueron mejorando con el tiempo, llegando a alcanzarse al final del periodo de estudio, rendimientos entorno del 90%.

El *FG3*, por las razones ya comentadas en este documento, tardó más tiempo en alcanzar rendimientos por encima del 40%. No obstante, durante las fechas en que la circulación del agua por el *FG1* fue suspendida debido al cosechado, el rendimiento del *FG3*





**Figura 69:** Evolución temporal de los rendimientos de eliminación de sólidos suspendidos en el F4. También aparece representada la media de la carga hidráulica. Los rendimientos de eliminación negativos no aparecen reflejados en la figura. La línea azul representa la media móvil con un periodo de 2 del F4.

El funcionamiento del F4, tal y como se observa en la figura superior, fue más inestable. Los mejores resultados se obtuvieron durante el mes de noviembre de 2009. El rendimiento máximo alcanzado por F4 fue del 85%.

Los resultados globales, que corresponden al conjunto de humedales, se han calculado sin contar con la evapotranspiración y contando con ella, para mostrar la sensibilidad del cálculo del rendimiento frente a esta variable. Los resultados obtenidos son los que aparecen en la siguiente tabla:

**Tabla 15:** Rendimientos globales de eliminación de los sólidos suspendidos. Comparación de los resultados calculados teniendo en cuenta la evapotranspiración o no.

	Carga de entrada (Kg/año)	Carga de salida (Kg/año)	Carga eliminada (Kg/año)	% Reducción	Caudal promedio (L/s)
Sin evapotranspiración	65269.3	37923.5	27345.8	42	58.5
Con evapotranspiración	65269.3	35222.5	30046.8	46	58.5

De la diferencia de valores obtenida en cuanto a porcentaje de reducción, se deduce la importancia de tener en cuenta la evapotranspiración, para el cálculo de rendimientos reales de eliminación de cualquiera de las variables objeto de este estudio.

El conjunto de todo el sistema, eliminó el 46% de los sólidos suspendidos que le entraron durante el periodo anual de estudio. En total, se eliminaron 30046.8 Kg de SS<sub>T</sub> durante el año, de los cuales entorno un 40% son sólidos suspendidos volátiles.

Los resultados obtenidos por sectores y contando con la evapotranspiración son los que se muestran en la tabla siguiente,

**Tabla 16: Rendimientos por sectores de eliminación de los sólidos suspendidos.**

	Carga de entrada (Kg/año)	Carga de salida (Kg/año)	Carga eliminada (Kg/año)	% Reducción	% Caudal de entrada	Carga superficial de entrada (g SS/m <sup>2</sup> *d)	Carga Hidráulica media (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *d)
<b>FG</b>	37887	13735	24152.1	64	56	2.1	0.06
<b>fp</b>	9676.9	5104.3	4572.6	47	15	1.8	0.05
<b>F4</b>	25107.3	21667.9	3439.4	14	29	2.7	0.06

Se puede concluir que el sistema *FG* eliminó el 64% de la carga de sólidos suspendidos que le entró, siendo este el mejor rendimiento obtenido de los tres sistemas. El humedal *fp* consiguió una reducción de la carga de sólidos de entrada de un 47%, y el menor rendimiento lo presentó el *F4* con tan solo un 14% de reducción de la carga de entrada.

Los rendimientos obtenidos en función de la carga hidráulica son los siguientes:

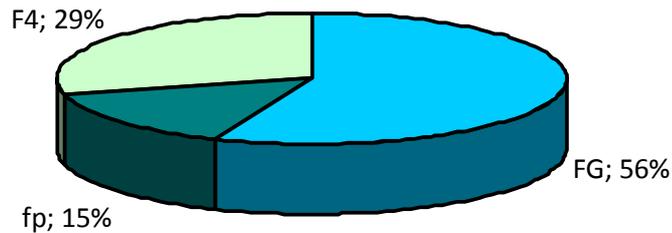
**Tabla 17: Rendimientos obtenidos en eliminación de sólidos suspendidos en función de la carga hidráulica de operación y el humedal considerado.**

Humedales	Carga Hidráulica (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *d)		
	0.02m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *d	0.06m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *d	0.08m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *d
<b><i>FG</i></b>	50%	69%	64%
<b><i>fp</i></b>	21%	61%	50%
<b><i>F4</i></b>	-10%	45%	-19%
<b><i>GLOBAL</i></b>	25%	60%	39%

Según la tabla 17, los mejores rendimientos se obtuvieron, tanto para los humedales individuales, como para el global, cuando el sistema estaba funcionando con una carga hidráulica entorno a 0.06 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d. No obstante, cuando se realiza el cálculo ampliando el periodo de estudio hasta Junio del 2010 (fecha en que nuevamente se modificó la carga

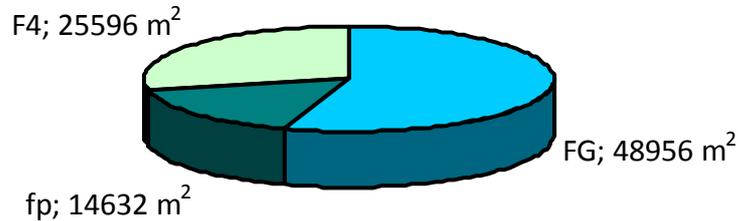
hidráulica) se obtiene el rendimiento global más alto cuando la carga hidráulica de trabajo es de  $0.08 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ .

Tomando por un lado, los valores de distribución del caudal de entrada que se presentan en la siguiente figura:



**Figura 70: Distribución (%) del caudal de entrada al conjunto de humedales.**

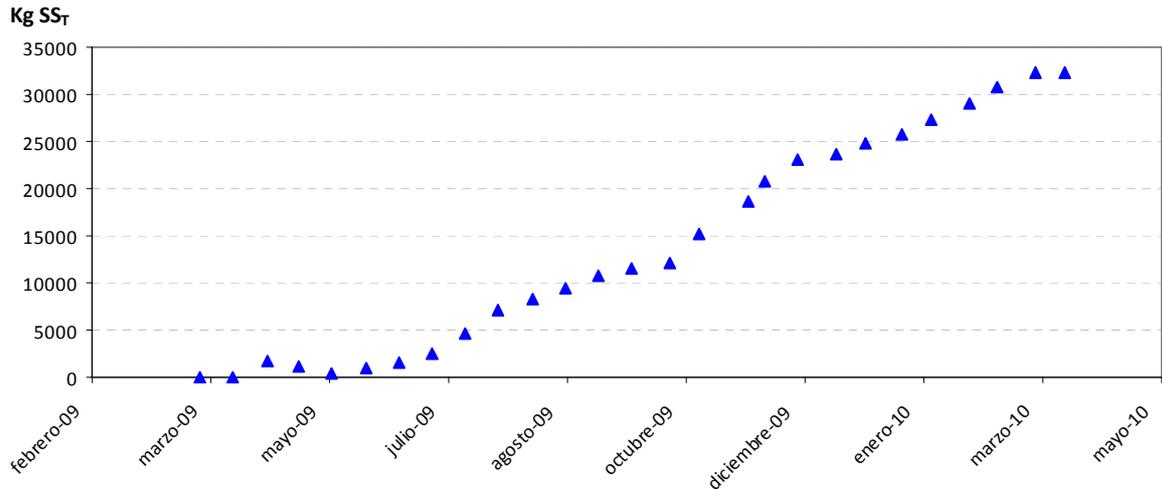
Y por otro lado, los valores de las áreas superficiales de cada humedal:



**Figura 71: Superficie en m<sup>2</sup> de los diferentes sistemas de humedales artificiales.**

Y un valor de profundidad media en todos los humedales de 0,20 m, el tiempo de residencia hidráulico que mejor resultado dio, en cuanto a porcentaje de eliminación de sólidos suspendidos, fue de 3 días para los tres humedales artificiales.

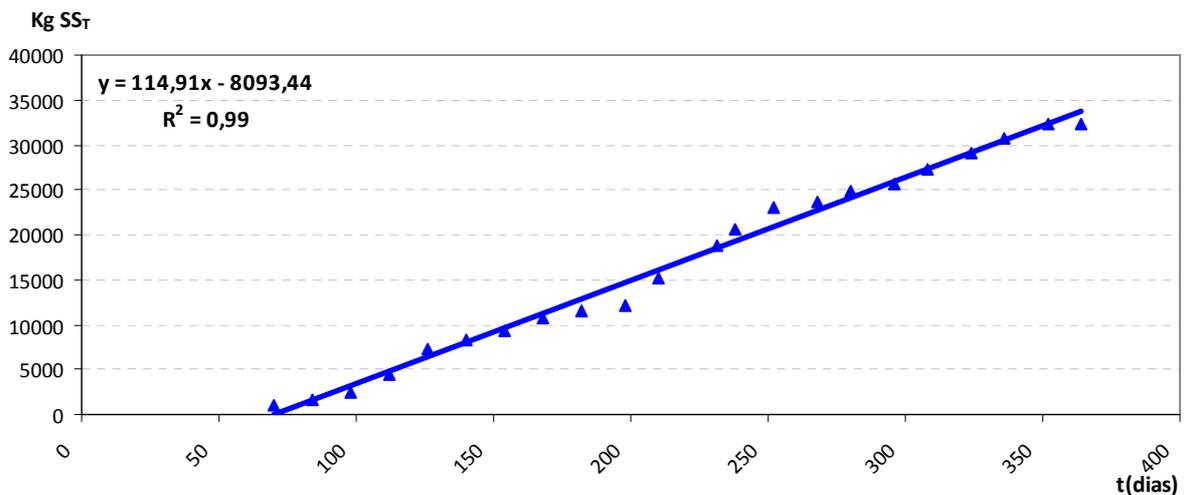
Por último, en la siguiente figura se representa la masa de sólidos suspendidos eliminada acumulada:



**Figura 72: Masa de sólidos suspendidos eliminada acumulada (Kg SS).**

En la figura superior se puede observar como la eliminación de sólidos suspendidos siguió una tendencia lineal a excepción de los primeros meses (abril, mayo y junio) en los que como ya se ha explicado anteriormente, el grado de cobertura vegetal era muy bajo y la presencia de aves muy abundante, propiciando por tanto, la resuspensión de sólidos suspendidos ya sedimentados. En estos primeros meses, el sistema llegó a ser exportador neto de sólidos suspendidos.

La velocidad de eliminación de sólidos suspendidos, a partir de junio del 2009, fue muy constante, y prácticamente independiente de la carga hidráulica aplicada, tomando un valor de 115 kg SS/d.



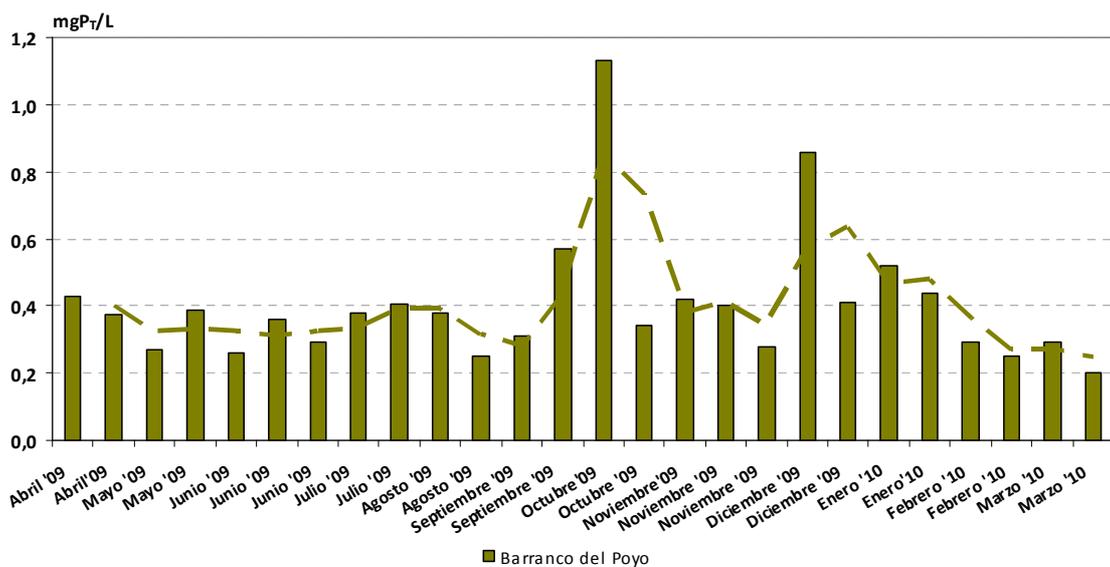
**Figura 73: Masa de sólidos suspendidos eliminada acumulada (Kg SS) a partir del mes de junio del 2009.**

Si se toma el valor promedio de sólidos suspendidos obtenido del Barranco del Poyo durante el año de estudio, es decir, 41.3 mg SS/l, como valor medio de los sólidos suspendidos contenidos en el lago de l'Albufera durante un año, y considerando un volumen de agua en el mismo lago de 21 Hm<sup>3</sup>. Se obtiene, que con el sistema de humedales artificiales, se ha eliminado en un año el 4.1% de los sólidos contenidos en dicho lago.

## 7.4 FÓSFORO TOTAL.

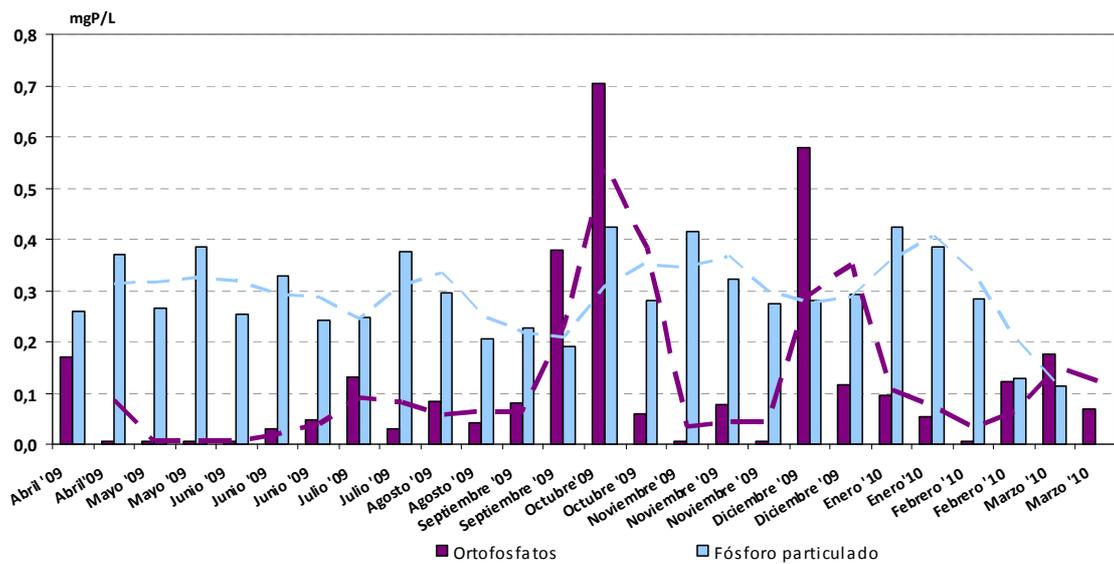
### 7.4.1 ELIMINACIÓN DE FÓSFORO TOTAL.

La concentración media de fósforo total en el flujo de agua de entrada desde el Barranco del Poyo fue de 0.40 mg P/l. Esta concentración fue muy variable a lo largo del periodo anual de estudio, oscilando entre los 0.20 mg P/l y 1.13 mg P/l.



**Figura 74:** Concentraciones de fósforo total (mg P/L) en el agua de entrada al sistema por el Barranco del Poyo, desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010. La línea discontinua representa la media móvil con un periodo de 2.

Prácticamente, todo el fósforo que entró al sistema fue fósforo no soluble, ya que las concentraciones de fósforo inorgánico soluble (medido como ortofosfatos) del agua de entrada fueron mucho más bajas que las de fósforo total, tomando valores mayoritariamente por debajo del límite de detección del método analítico empleado (<0.01 mg P/l). Por tanto, el fósforo que entró estaba principalmente en forma particulada, bien como fósforo orgánico o bien como fósforo inorgánico adsorbido a los sólidos suspendidos.



**Figura 75: Concentraciones de ortofosfatos ( $PO_4^{3-}$ ) y de fósforo particulado, ambas mediadas como mg P/l, en el agua de entrada al sistema por el Barranco del Poyo, desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010. Las líneas discontinuas representan la media móvil con un periodo de 2.**

No obstante, tal y como se detecta en la figura anterior, en momentos muy concretos, las concentraciones de fósforo inorgánico soluble a la entrada del sistema fueron más altas que las de fósforo particulado. Como más adelante se comentará, estos picos de fósforo soluble están asociados a periodos de lluvia.

La concentración media del Puerto de Catarroja, para el mismo periodo de tiempo, fue de 0.38 mg P/l. También presentó una alta variabilidad, oscilando los valores en dicho punto entre los 0.16 mg P/l y los 0.94 mg P/l.

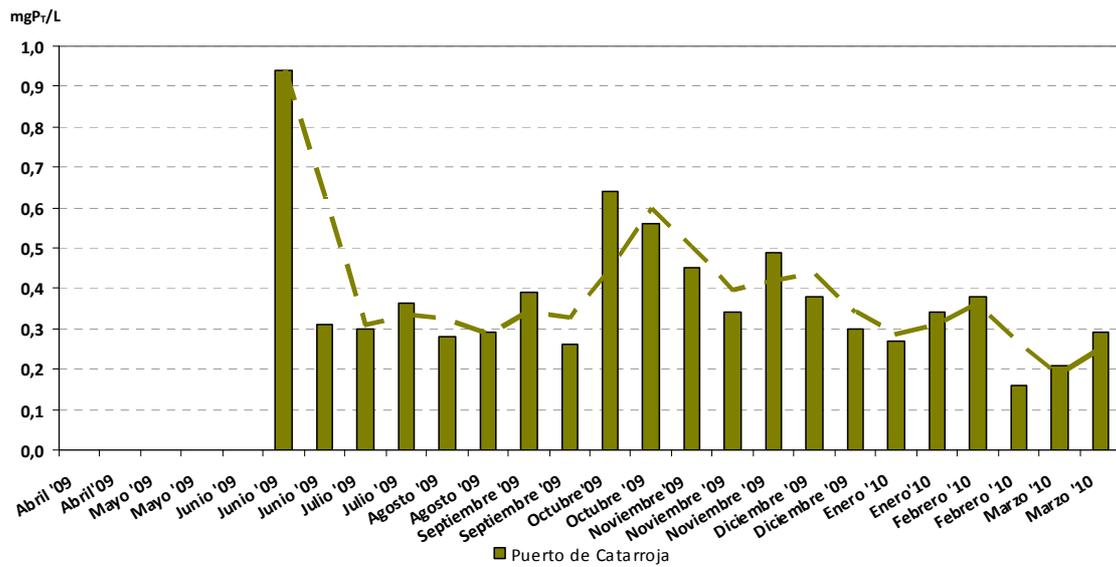
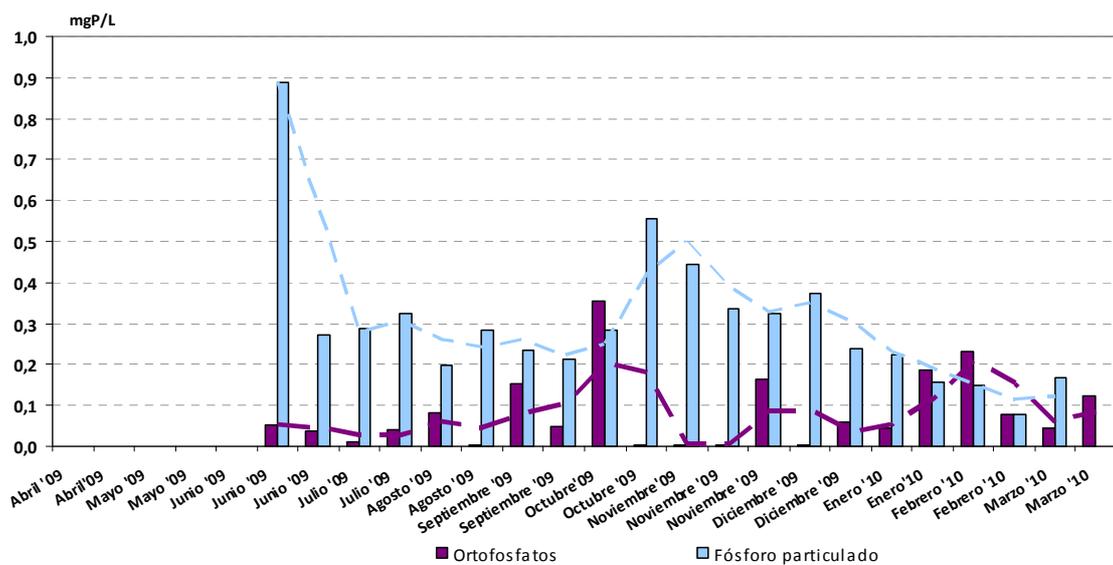


Figura 76: Concentraciones medidas (mg P/L) en el agua de entrada por el Puerto de Catarroja, desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010. Cabe recordar que no entraba agua al humedal desde esta acequia hasta la segunda quincena de junio del 2009. La línea discontinua representa la media móvil con un periodo de 2.

Al igual que ocurre con el agua de entrada por el Barranco del Poyo, la mayor parte del fósforo que entró al sistema estaba en forma de fósforo no soluble, y las concentraciones de fósforo inorgánico soluble (medido como ortofosfatos) del agua de entrada fueron muy bajas, tomando valores mayoritariamente por debajo del límite de detección del método analítico empleado (<0.01 mg P/l).



**Figura 77: Concentraciones de ortofosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) y de fósforo particulado, ambas mediadas como mg P/L, en el agua de entrada al sistema por Puerto de Catarroja, desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010. Las líneas discontinuas representan la media móvil con un periodo de 2.**

La concentración media a la entrada del *F4*, punto 8.1, fue muy similar a la de los anteriores, tomado un valor de 0.31 mg P/l. No obstante, tal y como ocurría con la concentración de sólidos suspendidos en este mismo punto, su variabilidad fue bastante menor (de un 26% respecto al valor medio) debido a la ya comentada mezcla de los caudales procedentes de las dos entradas de agua al sistema.

Aunque las cantidades de fósforo presentes en el lago, dependen en gran medida de la estructura geoquímica de la región, normalmente en aguas superficiales no contaminadas, la concentración de fósforo total está entre 0.01 y 0.05 mg P/l (Wetzel; 1981). En el caso que nos ocupa, en ambas entradas, la concentración media de fósforo total fue bastante más elevada que 0.05 mg P/l, lo cual es razonable ya que se tratan de aguas procedentes del propio lago de l' Albufera, es decir, aguas hipereutróficas. Según los valores límite de clasificación trófica para un sistema natural, extraídos del informe de la OCDE de 1982, las aguas con concentración de fósforo total mayor que 0.10 mg P/l, son hipereutróficas.

En cuanto a la cantidad de fosfatos en el agua de entrada a los humedales, la concentración de media fue de 0.12 mg P/l en el Barranco del Poyo y de 0.08 mg P/l en el Puerto de Catarroja. No obstante, los valores de fósforo inorgánico soluble obtenidos durante todo el periodo de estudio, fueron mayoritariamente menores del límite de detección del método analítico empleado (<0.01 mg P/l). Estos resultados parecen lógicos, pues los fosfatos suelen ser el nutriente limitante en las aguas continentales debido a la escasez del mismo en el medio natural dado que, la mayor parte del fósforo existente se encuentra formando parte de la fase particulada de los organismos, principalmente de las algas. Es por esta razón, por lo que las tasas de productividad biológica de la mayoría de los lagos, actualmente están dominadas principalmente por el ritmo de reciclado del fósforo y en menor medida por las entradas de fósforo externo, ya que estas últimas han perdido importancia debido a la implantación de tratamientos específicos para eliminar fósforo en las depuradoras, la sustitución por compuestos no fosforados en los detergentes, etc.

En las siguientes figuras aparecen las concentraciones medias, para todo el periodo de estudio, y la correspondiente desviación estándar, de cada uno de los puntos de muestreo de calidad de aguas:

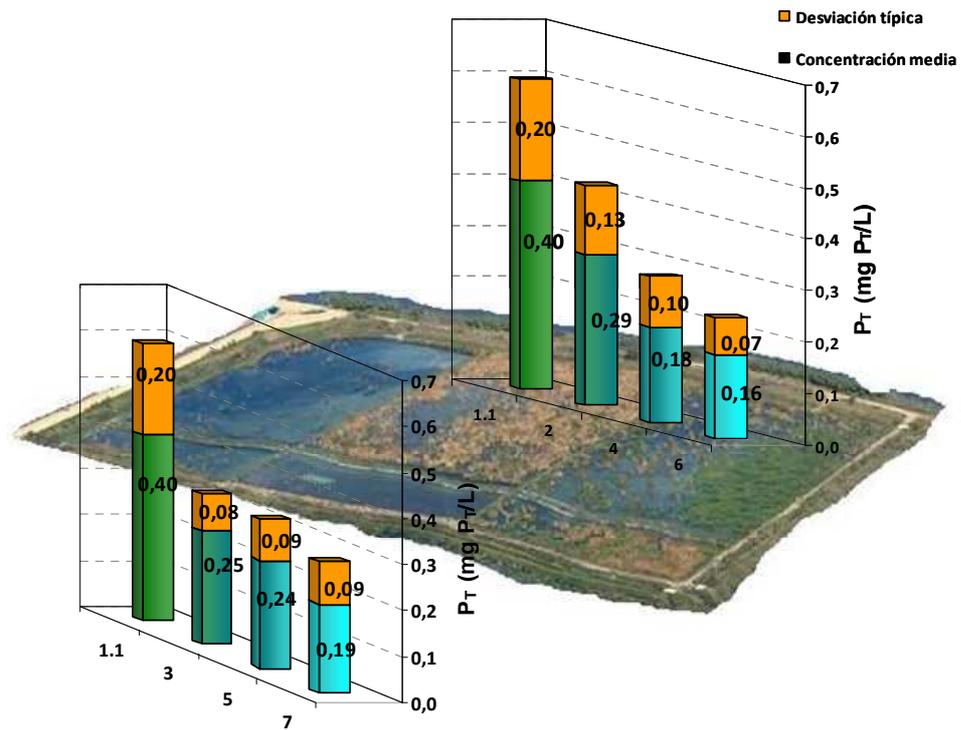


Figura 78: Media (tramo inferior) y desviación típica (tramo superior) de los datos recogidos en los punto de muestreo 1.1, 2, 3, 4, 5, 6, y 7, durante todo el periodo anual (06/04/2009 al 22/03/2010).

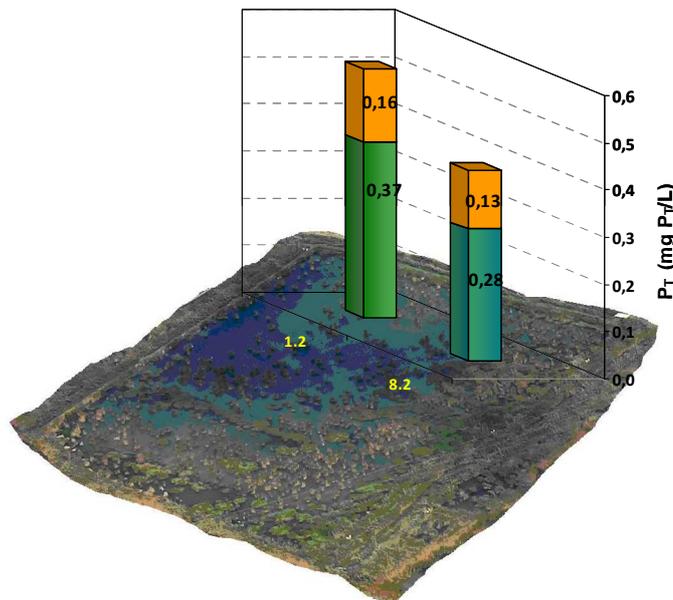
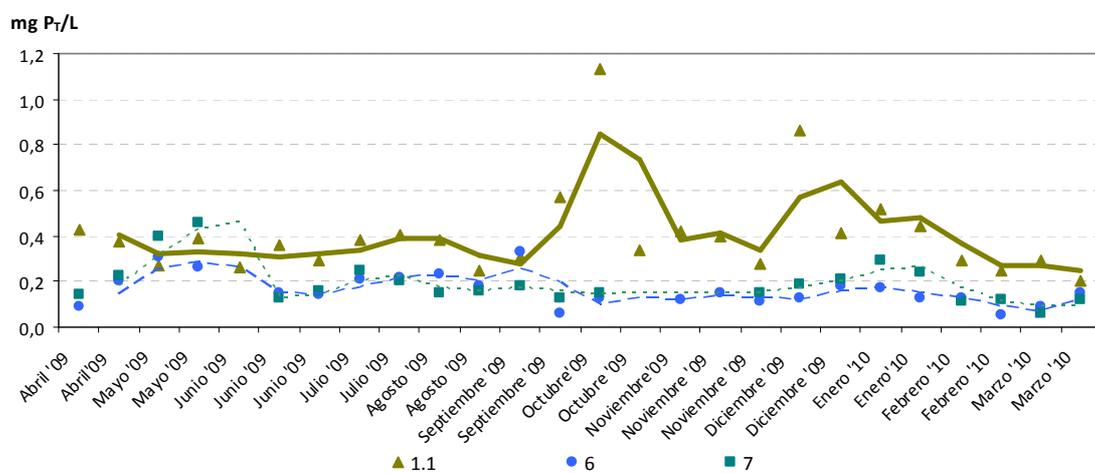


Figura 79: Media (tramo inferior) y desviación típica (tramo superior) de los datos recogidos en los punto de muestreo 1.2 y 8.2, durante todo el periodo anual (06/04/2009 al 22/03/2010).

En las figuras 78 y 79 se observa como el promedio de los valores de concentración de fósforo total para todo el año decreció a lo largo de los tres humedales artificiales, siendo la concentración de salida del sistema *FG* menor que la del *fp* y menor que la del *F4*.

A continuación, se va a proceder a realizar un análisis de la evolución temporal, de las concentraciones de entrada y de las de salida de los diferentes humedales.

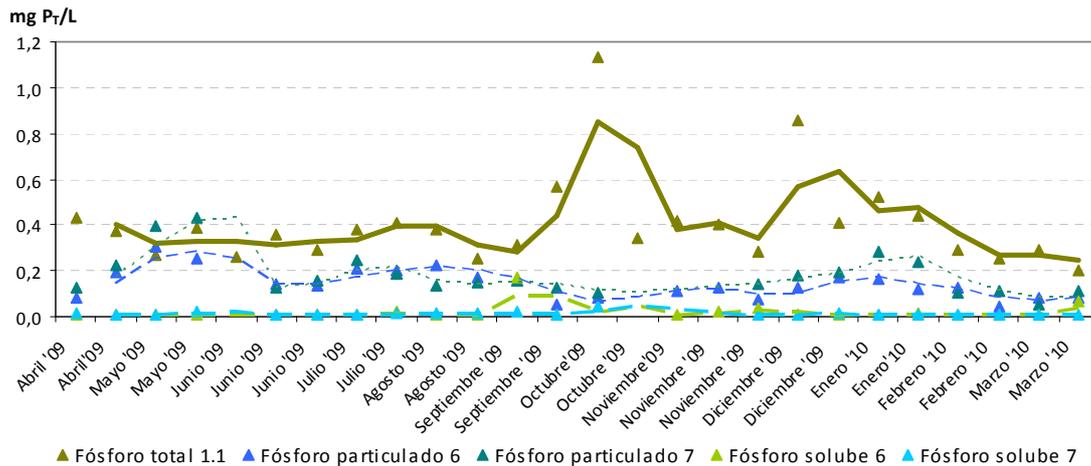
La evolución temporal de las concentraciones en la entrada por el Barranco del Poyo y a la salida de los humedales *FG* y *fp*, fue la siguiente:



**Figura 80:** Evolución temporal del fósforo total en la entrada por el Barranco del Poyo (1.1) y a la salida de las celdas *FG3* (6) y *fp3* (7). Las líneas representan la media móvil con un periodo de 2.

Como se observa en la figura 80, ya en el primer mes de muestreo (abril del 2009), el sistema redujo la concentración de fósforo de la entrada. El promedio de reducción de dicho mes fue de un 63%.

Al igual que ocurrió con los sólidos suspendidos, durante los meses de mayo y de junio del 2009, con la densidad de vegetación todavía baja y con la llegada de importantes poblaciones de aves al Tancat, al producirse una resuspensión de sólidos desde el sedimento, se incrementó la concentración de fósforo a la salida de los humedales *FG* y *fp*; siendo ésta, incluso superior a la de la entrada. Ello se puede ver más claramente en la figura siguiente, donde en los meses citados, se observa que el aumento se produjo en la concentración del fósforo particulado (el que se resuspendió) mientras que, el fósforo inorgánico soluble no aumentó.



**Figura 81: Evolución temporal del fósforo total en la entrada por el Barranco del Poyo (1.1), y del fósforo particulado y del soluble a la salida de las celdas FG3 (6) y fp3 (7). Las líneas representan la media móvil con un periodo de 2.**

Como ya se ha indicado anteriormente, el fósforo particulado incluye el fósforo orgánico contenido en la biomasa fitoplanctónica y el fósforo adsorbido a los sólidos. Al perturbar las aves la capa superior de los sedimentos, se provoca la resuspensión de fitoplancton y de otros tipos de sólidos ya sedimentados, que todavía no se habían degradado biológicamente, resultando ello en un incremento de fósforo orgánico a la salida del sistema.

A partir de junio, los valores de fósforo total a la salida de los humedales *FG* y *fp* fueron de nuevo inferiores a los de la entrada por el Barranco del Poyo. Los dos sistemas, a partir de este mes, siempre (a excepción de una única fecha en el sistema *FG*) dieron rendimientos positivos en cuanto a eliminación de fósforo total.

Además, también se puede observar que conforme el periodo de estudio fue avanzando, la concentración de P<sub>T</sub> a la salida del *FG* fue estabilizándose, siendo siempre, a partir de septiembre de 2009, inferior a 0.2 mg P/l.

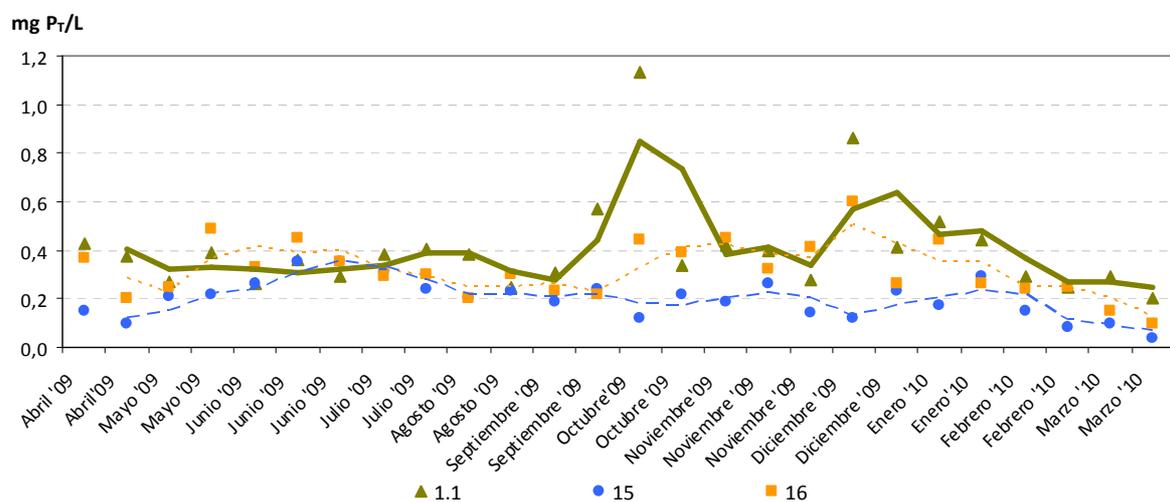
La reducción media durante todo el periodo de estudio del sistema *FG*, fue de un 60%, y si se contabiliza el promedio a partir del mes de junio de 2009, es decir, despreciando los resultados obtenidos en la época de abundancia de aves en el Tancat, el porcentaje de eliminación asciende a un 63%, llegando a conseguirse reducciones de hasta un 90% (septiembre del 2009).



Aún siendo los porcentajes de eliminación bajos, a pesar de las malas condiciones, ya conocidas, en que se encontraba el humedal, el sistema *F4* sí estaba funcionando en cuanto a eliminación de fósforo.

Para finalizar el análisis de la evolución temporal del fósforo total durante el primer año, se van a comparar los resultados obtenidos en el punto 15 (salida del Tancat de la Pipa) con las entradas desde el Barranco del Poyo (1.1) y desde la Acequia del Puerto de Catarroja (1.2), y con el punto del lago de l'Albufera en donde se devuelve el agua tratada (punto 16).

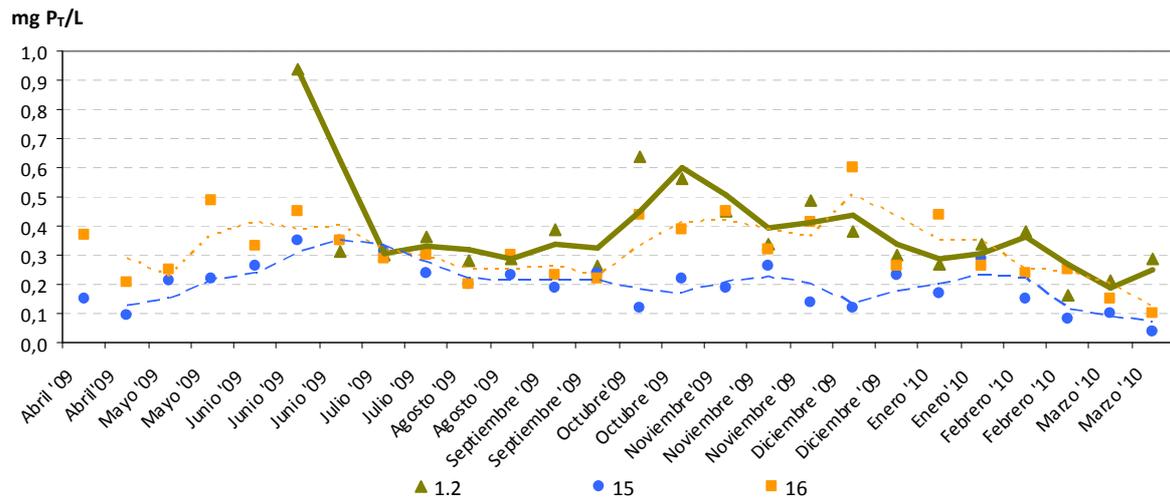
En la siguiente figura aparece la evolución temporal de los valores obtenidos en el Barranco del Poyo, en el punto 15 y en el punto 16:



**Figura 83: Evolución temporal del fósforo total en la entrada por el Barranco del Poyo (1.1), salida del Tancat de la Pipa (15) y zona del lago de vertido del agua tratada (16). Las líneas representan la media móvil con un periodo de 2.**

En todos los datos recogidos, a excepción de un muestreo en el mes de junio del 2009, los valores del agua de salida del Tancat (punto 15) fueron inferiores a los de la entrada por el Barranco del Poyo, consiguiéndose una reducción promedio desde la entrada hasta la salida del enclave de un 52%.

Peores resultados se obtuvieron en cuanto a la calidad del punto 16. Ello se debe a que en dicho punto, el agua que sale del Tancat se mezcla con agua del propio Lago. No obstante, en el 70% de los casos la concentración de fósforo total en este punto fue inferior a la de la entrada por el Barranco del Poyo, lo que indica un cierto nivel de mejora.

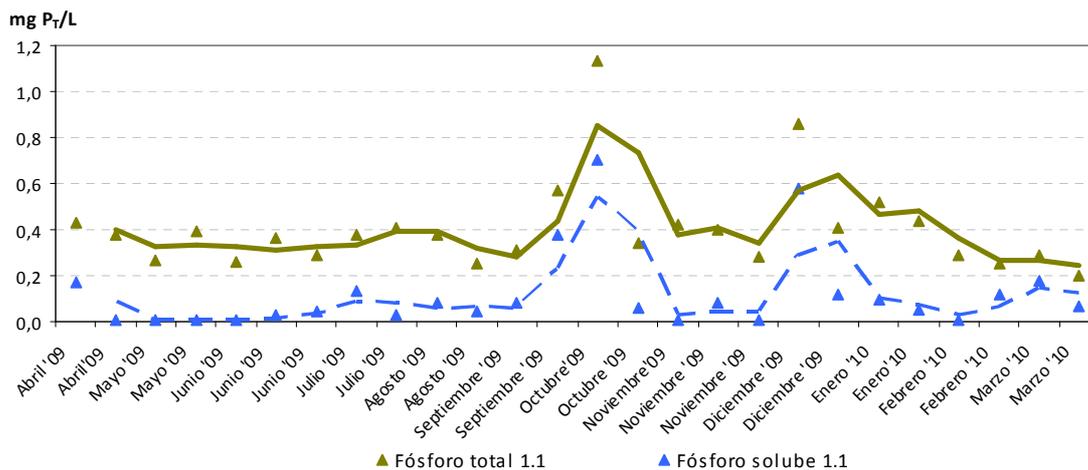


**Figura 84: Evolución temporal del fósforo total en la entrada por el Puerto de Catarroja (1.2), salida del Tancat de la Pipa (15) y zona del lago de vertido del agua tratada (16). Las líneas representan la media móvil con un periodo de 2.**

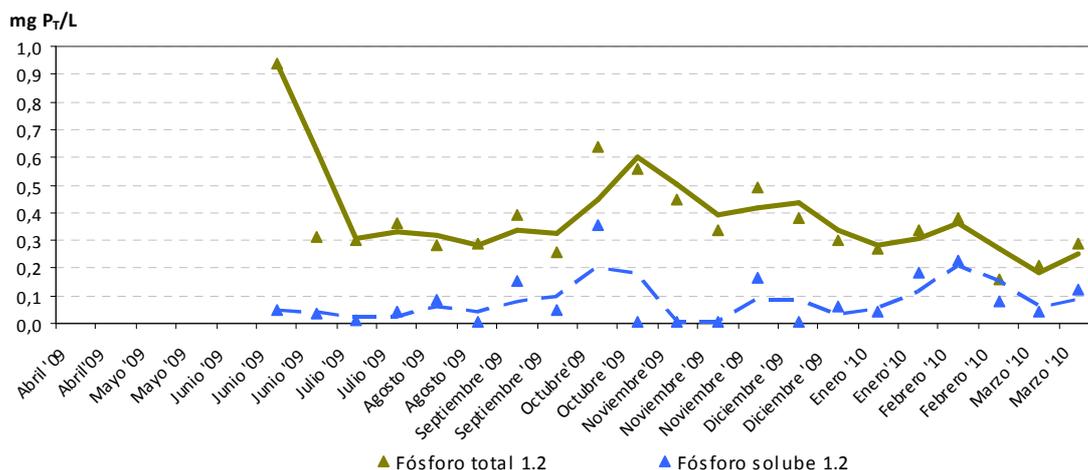
Al igual que ocurría con el Barranco del Poyo, prácticamente en todos los casos, la calidad del agua del punto 15 fue mejor que la de la entrada por el Puerto de Catarroja. La reducción media conseguida desde esta entrada hasta la salida del Tancat fue de un 42%.

Los valores obtenidos en el punto 16, fueron en el 69% de los casos, menores que los recogidos en el Puerto de Catarroja.

Con respecto a la evolución temporal de los valores obtenidos de fósforo soluble, como se indicó anteriormente, la concentración de estos en las dos entradas al sistema fue muy baja. En el Barranco del Poyo, los valores de la misma se sitúan entre 0.01 mg P/l (límite de detección) y 0.71 mg P/l, siendo el valor promedio de 0.12 mg P/l. Valores muy similares se recogieron en el Puerto de Catarroja, oscilando estos entre 0.01 mg P/l y 0.36 mg P/l, con un promedio de 0.08 mg P/l. Como se indicó al inicio del presente apartado, se detectaron en momentos puntuales, picos en la concentración de fosfatos que coinciden en el tiempo con episodios de lluvia.



**Figura 85: Evolución temporal del fósforo total y del fósforo soluble en la entrada por el Barranco del Poyo (1.1). Las líneas discontinuas la media móvil con un periodo de 2.**



**Figura 86: Evolución temporal del fósforo total y del fósforo soluble en la entrada por el Puerto de Catarroja (1.2). Las líneas discontinuas representan la media móvil con un periodo de 2.**

En las dos entradas se observan claramente, picos puntuales en la concentración de fosfatos, que coinciden con los picos que presenta también la concentración de fósforo total en esas aguas. En la siguiente tabla se indican las fechas y los valores de fósforo total y fosfatos correspondientes a dichos picos, así como valores de otros parámetros relacionados para el caso del Barranco del Poyo:

Tabla 18: Resultados de diversos parámetros en las fechas de picos de P total y fosfatos.

Fecha	P total (mg/l)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/l)	Clorofila <i>a</i> (µg/l)	Tª (°C)	%Sat. OD	Conductividad (µS/cm)
7/Oct/09	1.13	0.71	12.33	24	4	837
16/Dic/09	0.86	0.58	22.42	8.1	36	1219

En el gráfico que sigue, aparece representada la precipitación recogida, durante todo el periodo de estudio, por la estación meteorológica de Picassent. En él, se puede apreciar cómo en los días anteriores a los muestreos indicados en la tabla superior, se registraron precipitaciones importantes. Concretamente los días:

1. **28/Septiembre/2009** → Precipitación total de 125.80mm.
2. **14/Diciembre/2009** → Precipitación total de 42.60mm.

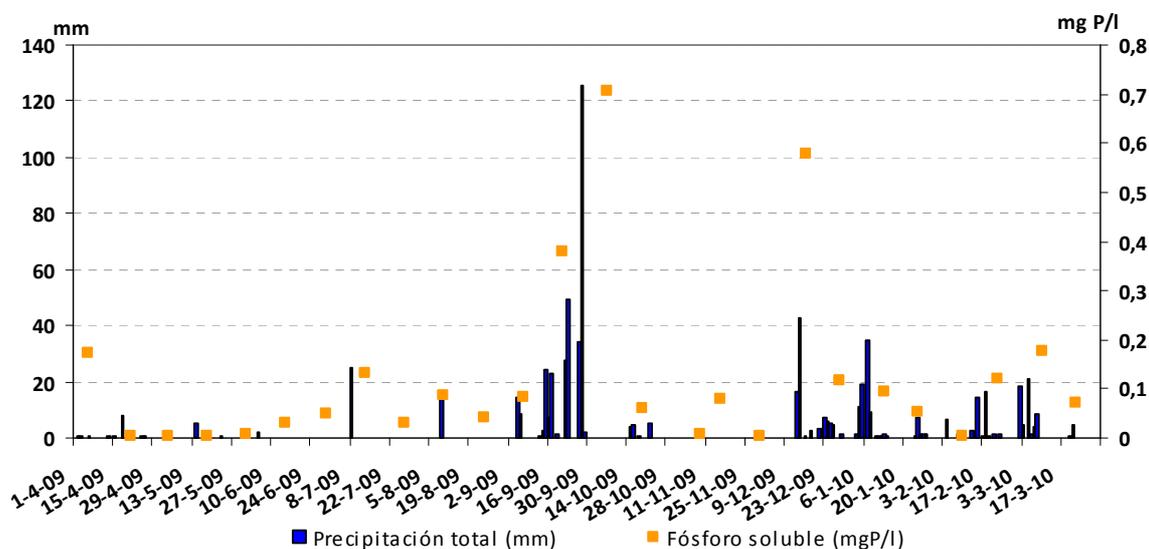
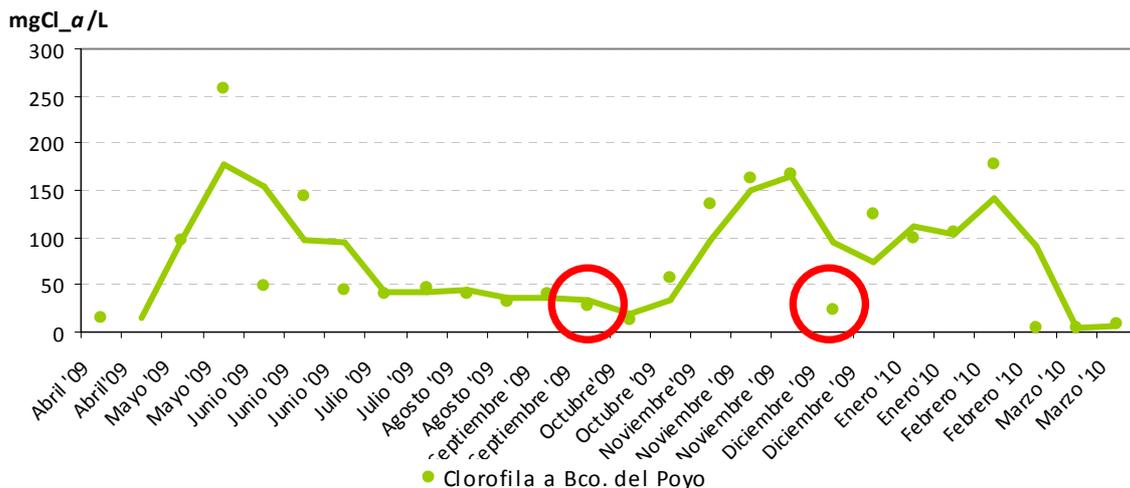


Figura 87: Precipitación registrada en la estación meteorológica de Picassent (Fuente: IVIA) y valores de fósforo inorgánico soluble recogidos en el Barranco del Poyo.

Los picos observados parecen ser resultado del efecto de lavado ejercido por la escorrentía superficial generada en los episodios de lluvia (lavado de las superficies agrícolas y urbanas y de la paja del arroz no recogida). Se debe aclarar, que el hecho de no recoger la

paja de arroz en estos últimos años, ha introducido una mayor incertidumbre en los aportes de fósforo, que habría que estudiar en un futuro con detenimiento.

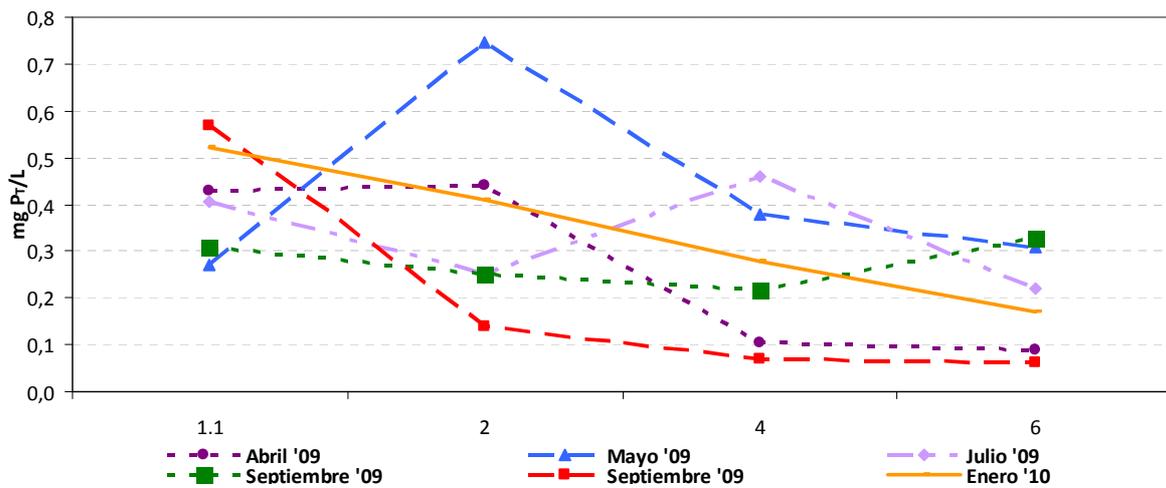
Además, hay que contar también, con la cantidad de fosfatos liberada desde los sedimentos, más importante cuanto menor es la concentración de oxígeno disuelto. Los fosfatos que se aporten, en un momento en el que el fitoplancton no sea capaz de asimilarlo (por ejemplo, bajas temperaturas o alta renovación del agua en el Barranco del Poyo) estarán disponibles para que posteriormente se desarrolle de nuevo una elevada población fitoplanctónica, allí mismo, o aguas abajo (interior del Lago). Por último, otro factor que influyó en la aparición de esos picos de fosfatos en las aguas del Barranco del Poyo, fue que en esos momentos había muy poco fitoplancton, como para consumir esos fosfatos y por tanto, atenuar esos picos en la concentración de dicho nutriente. Esta afirmación se corrobora con las mediciones, que se pueden observar en la figura siguiente, de concentración de  $Cl_a$  obtenidas en el Barranco del Poyo,



**Figura 88: Evolución temporal de la clorofila  $a$  en la entrada por el Barranco del Poyo (1.1). La línea representa la media móvil con un periodo de 2.**

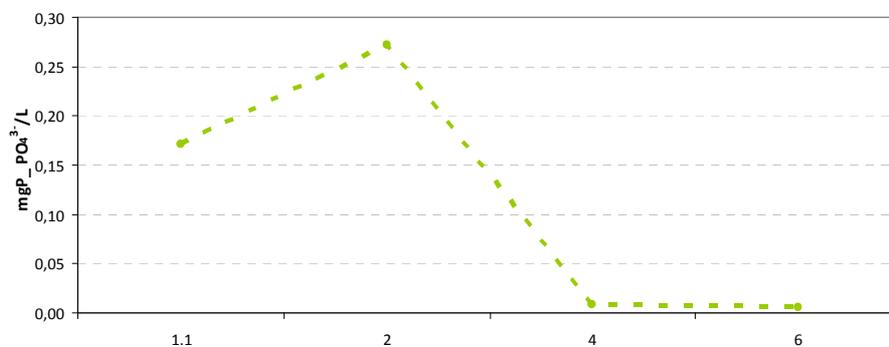
A continuación, después de haber realizado un análisis temporal de los resultados obtenidos en los diferentes humedales, se va a efectuar un análisis espacial centrado en el sistema *FG*.

Tal y como se ha realizado con los sólidos suspendidos, para analizar más detalladamente el funcionamiento del sistema *FG*, se ha seleccionado en la siguiente figura, los resultados obtenidos seis días distintos que representan, las seis tendencias de evolución de los valores a lo largo de las tres celdas, observadas durante todo el periodo de estudio.



**Figura 89: Evolución del fósforo total lo largo de las tres celdas grandes en serie. Los días seleccionados son: el 06 de abril del 2009, el 04 de mayo del 2009, el 27 de julio del 2009, el 07 de septiembre del 2009 (línea discontinua verde), el 21 de septiembre del 2009 (línea discontinua roja), y por último, el 01 de enero del 2010.**

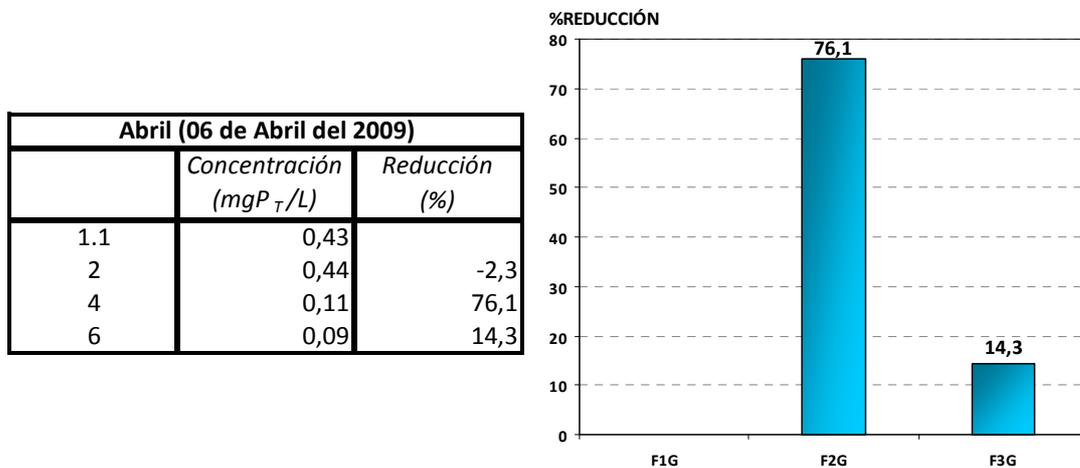
Durante el mes de abril, el sistema tuvo un comportamiento peculiar en cuanto al fósforo total. Aparentemente, la concentración de fósforo total no se veía alterada a su paso por la celda uno, lo cual no parece muy lógico, ya que, como hemos observado en ese mes para el caso de los sólidos suspendidos, estos disminuían su concentración, principalmente debido al proceso de sedimentación. Es por ello que, al menos una parte del fósforo que se encontraba en forma particulada debería haber sedimentado y probablemente fuera así. La explicación de esta evolución, la encontramos si estudiamos el comportamiento de los fosfatos en ese mes,



**Figura 90: Evolución de la concentración de fosfatos a lo largo de las tres celdas grandes en serie el día 06 de abril del 2009.**

En la figura 90, se observa como la concentración de fósforo inorgánico soluble, aumentó durante el mes de abril, a lo largo de su recorrido por el *FG1*. Este aumento se debió a la rápida hidrólisis y posterior mineralización del fósforo asociado a los sólidos suspendidos que acababan de sedimentar. El resultado global que se obtuvo, es que en el *FG1*, el fósforo total permaneció constante, mientras que en el *FG2* disminuyó y en el *FG3*, de nuevo, permaneció invariable.

Gracias a la elevada eliminación de fósforo total que se produjo en la celda dos, durante ese mes la reducción media global fue de un 63%.



**Figura 91: Evolución de la concentración y reducción del fósforo total a lo largo de los *FG* y referentes al 06 de abril del 2009.**

Como ya se ha comentado anteriormente, en el mes de mayo una elevada población de aves se estableció en el Tancat y en sus alrededores, ocasionando una perturbación de la parte superficial de los sedimentos. Dicha perturbación, desencadenó en un incremento en la concentración de los sólidos suspendidos de determinadas celdas.

El efecto comentado en el párrafo anterior, también se vio reflejado en la evolución del fósforo total, con el mismo patrón, que el sucedido para el caso de los sólidos suspendidos totales. Es decir, la concentración de fósforo total se vio incrementada a lo largo del *FG1*, mientras que los *FG2* y *FG3* consiguieron reducir ese incremento, permitiendo al menos, una concentración a la salida del sistema no mucho más elevada que la de la entrada.

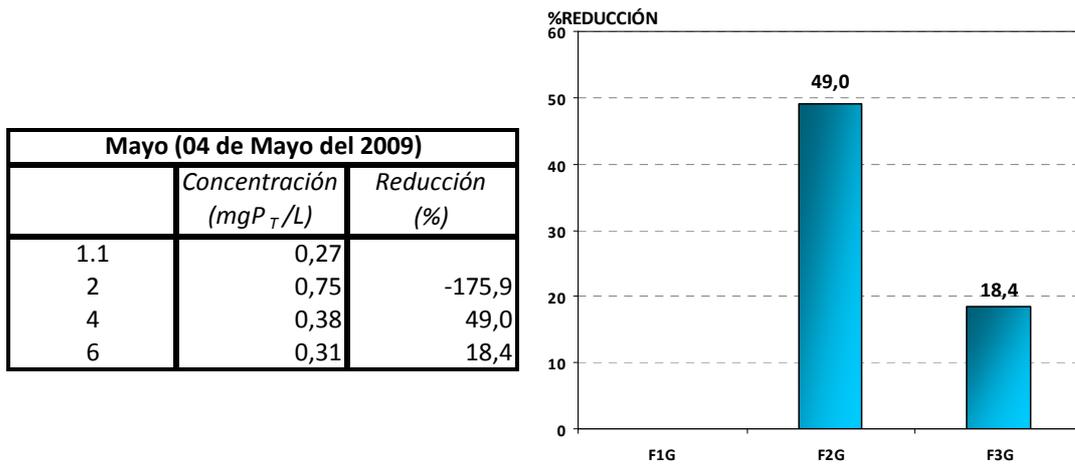


Figura 92: Evolución de la concentración y reducción del fósforo total a lo largo de los FG y referentes al 04 de mayo del 2009.

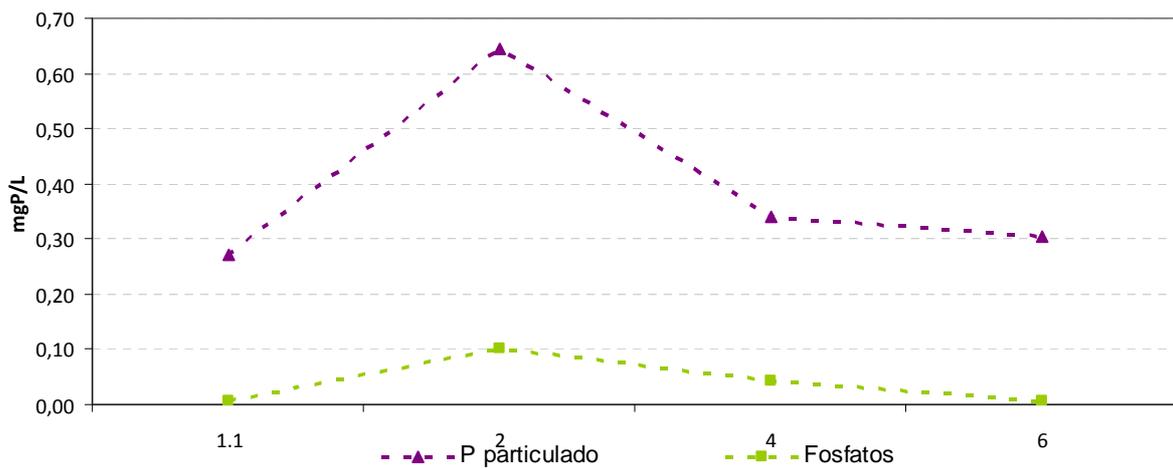


Figura 93: Evolución de la concentración del fósforo particulado y de los fosfatos a lo largo del sistema FG y referentes al 04 de mayo del 2009.

En la figura superior se aprecia un aumento importante de la concentración de fósforo particulado, como consecuencia de esa resuspensión. Pero también de fósforo inorgánico, ya que, se produce un aumento del sustrato a hidrolizar y mineralizar.

El porcentaje medio de eliminación del sistema FG, desde el inicio de los muestreos de campo (06/04/2009) hasta el aumento del caudal a 80 l/s (27/07/2009), fue de un 43%.

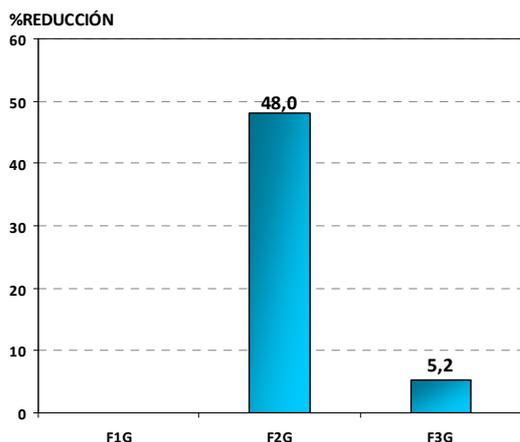


Figura 94: Reducción del fósforo total a lo largo de las celdas grandes en el periodo que abarca desde el 06/04/2009 hasta el 13/07/2009 (ambos inclusive).

Como se observa en la figura 94, el porcentaje medio de eliminación del *FG1* fue negativo. Esto puede llevar a conclusiones erróneas, ya que la elevada generación de fósforo total que se produce en el mes de mayo como consecuencia de la presencia de aves, distorsiona los resultados. No obstante, sí que es real que el *FG1* funcionó durante este periodo y para el caso del fósforo total, bastante peor que las otras dos celdas; siendo *FG2*, el que mejor funcionó, con un rendimiento medio de eliminación de un 48%.

Como se indicó en el apartado anterior, con el propósito de mejorar el rendimiento del sistema, se decidió aumentar a finales de julio del 2009, el caudal de agua a tratar. Este aumento de la carga hidráulica de entrada, condujo a un incremento en los porcentajes de eliminación de fósforo total en el *FG1*, tal y como se refleja en las tendencias referentes al mes de julio del 2009 y septiembre del 2009, en el gráfico 89.

Julio (27 de Julio del 2009)		
	Concentración (mgP <sub>T</sub> /L)	Reducción (%)
1.1	0,41	
2	0,25	38,5
4	0,46	-84,0
6	0,22	52,2

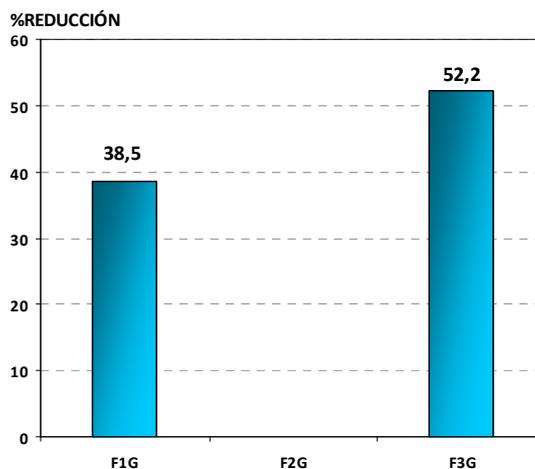


Figura 95: Evolución de la concentración y reducción del fósforo total a lo largo del sistema *FG* y referentes al 27 de julio del 2009.

En la figura anterior aparece representado el porcentaje de eliminación que consiguió la celda uno el 27 de julio del 2009. Dicho valor se aproxima al 40%. No obstante, el *FG2* provocó un incremento en la concentración de este parámetro que el *F3G* fue capaz de reducir a más de la mitad, resultando a la salida del sistema una reducción de la concentración de entrada de casi un 50%.

Durante el periodo comprendido desde que se aumentó el caudal de entrada al sistema hasta que se detuvo la circulación por el *FG1* para proceder a su cosechado (principios de octubre del 2009), dicha celda trabajó más o menos estable, con un porcentaje medio de eliminación de un 57%. En cambio, los *FG2* y *FG3*, tuvieron un funcionamiento más variable, con muestreos donde se incrementaba la concentración en el *FG2* (por ejemplo el 27 de julio del 2009), otros donde aumentaba en el *FG3* (el 07 de septiembre del 2009) u otros en los que se mantenía constante a lo largo del *FG2*. El porcentaje de reducción medio durante este periodo en el *FG2* fue de un 4% y en el *FG3* de un 8%.

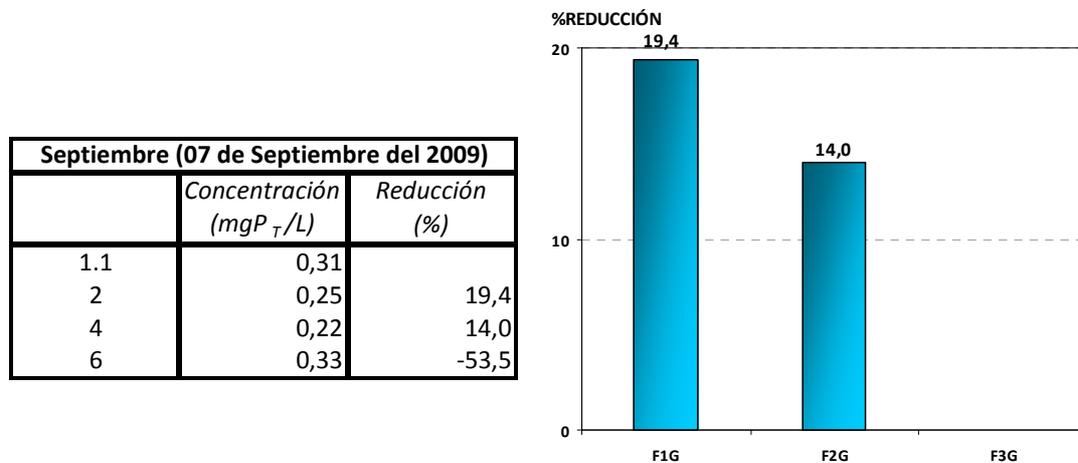


Figura 96: Evolución de la concentración y reducción del fósforo total a lo largo del sistema *FG* y referentes al 07 de septiembre del 2009.

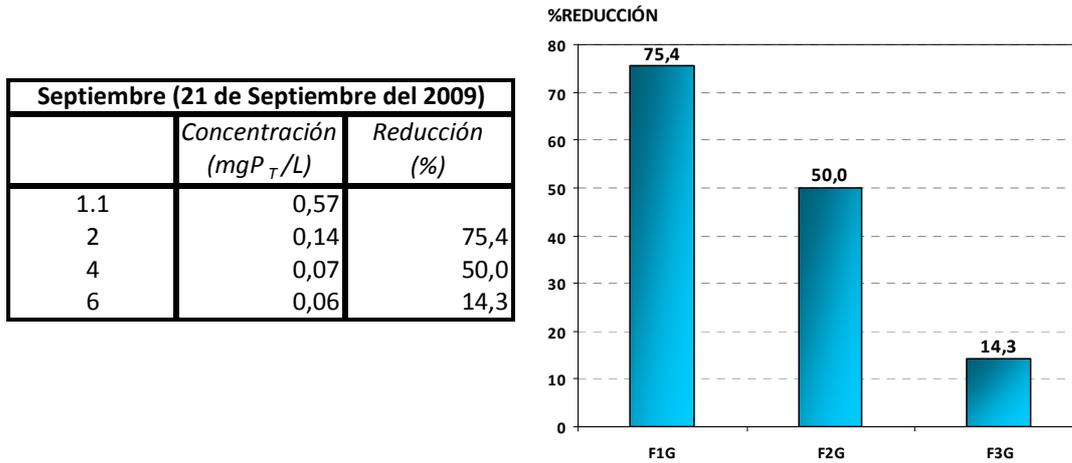


Figura 97: Evolución de la concentración y reducción del fósforo total a lo largo del sistema *FG* y referentes al 21 de septiembre del 2009.

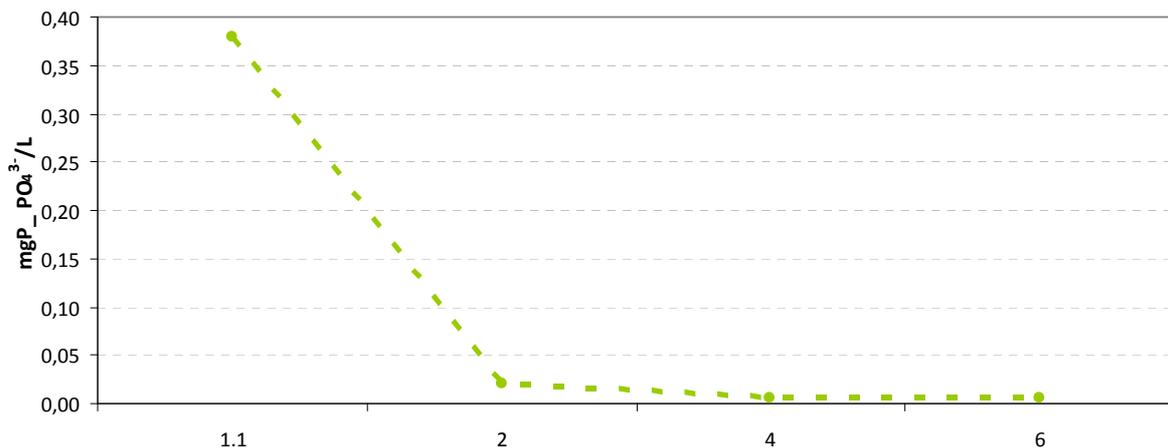
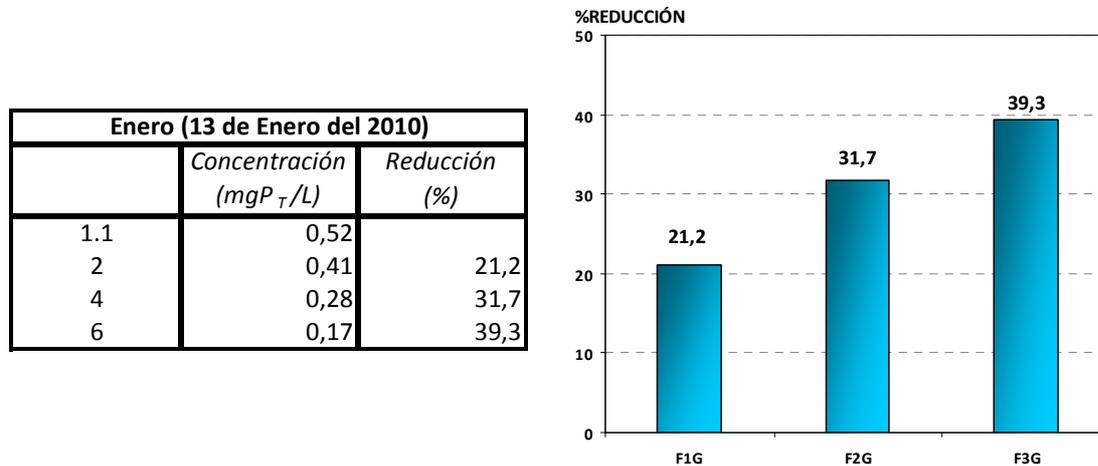


Figura 98: Evolución de la concentración de fosfatos a lo largo del humedal *FG* el día 21 de septiembre del 2009.

En la figura superior vemos que el comportamiento de los fosfatos, en este periodo, fue similar al del fósforo total, de modo que la primera celda ya consiguió eliminar también fósforo soluble. En cambio, el rendimiento de eliminación de las otras dos celdas (*FG2* y *FG3*), al igual que para el caso del P<sub>T</sub>, fue bastante inferior al de la celda *FG1*. Así pues, el porcentaje de eliminación de fosfatos en este periodo y en el *FG1* fue de un 89%, mientras que en *FG2* fue de -45% y en *FG3* de -22%.

Tras el periodo de siega del *FG1* y el restablecimiento normal de la circulación del flujo de agua a tratar por el sistema, la eliminación de fósforo total se mantuvo de forma más o

menos regular a lo largo del humedal artificial, siendo en todos los casos el rendimiento global de eliminación positivo. Un ejemplo del buen funcionamiento que tenía el sistema lo vemos en la evolución de la concentración de  $P_T$  a lo largo de las tres celdas en serie el 13 de enero del 2010:



**Figura 99: Evolución de la concentración y reducción del fósforo total a lo largo de las celdas grandes y referentes al 13 de enero del 2010.**

El rendimiento medio global de eliminación de fósforo total durante este último periodo fue de un 68%; siendo el del *FG1* de un 33%, el del *FG2* de un 45% y el del *FG3* de un 12%.

Con respecto a los porcentajes globales de eliminación, al igual que ocurría con los sólidos suspendidos, el humedal *FG* es el que mejores resultados proporcionó, con un valor del 60%. El sistema *fp*, alcanzó un valor del 52%, y el *F4* de un 25%. Las razones de estas diferencias ya han sido explicadas en el apartado referido a los sólidos suspendidos.

Tras el análisis espacial de las concentraciones obtenidas en diferentes periodos, se pasa a realizar una evaluación de los rendimientos de eliminación con cargas obtenidos tanto globalmente por el sistema formado por los tres humedales artificiales, como los obtenidos individualmente por cada uno de estos. Además, también se estudian, los rendimientos obtenidos a nivel de celda. Los resultados aparecen en las figuras que se presentan a continuación:



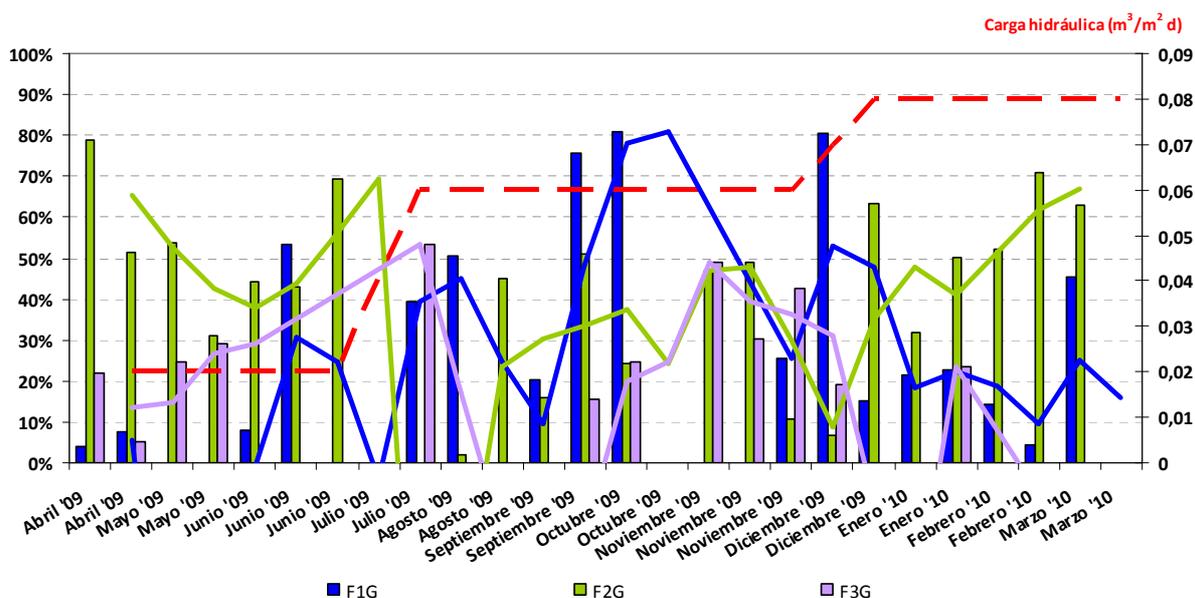
estabilizarse, los rendimientos aumentaron por encima de los obtenidos con el valor anterior de carga hidráulica.

Si se tiene en cuenta el conjunto de todo el sistema, el mejor rendimiento medio de eliminación, se alcanzó con la carga hidráulica más alta con la que se trabajó, es decir, con  $0.08 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$ . Si en cambio, se analizan los tres sistemas por separado, vemos que el *FG* obtuvo mejores rendimientos con esta misma carga hidráulica, pero los rendimientos de los sistemas *fp* y *F4* disminuyeron al aumentar la carga hidráulica por encima de  $0.06 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$ .

**Tabla 19: Rendimientos obtenidos en eliminación de fósforo total en función de la carga hidráulica de operación y el humedal considerado.**

Humedales	Carga Hidráulica ( $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$ )		
	$0.02\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$	$0.06\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$	$0.08\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$
<b>FG</b>	53%	60%	70%
<b>fp</b>	33%	65%	60%
<b>F4</b>	6%	44%	37%
<b>GLOBAL</b>	33%	57%	60%

En la siguiente ilustración, aparecen por un lado, la evolución de los rendimientos de eliminación de cada una de las tres celdas grandes, y por otro parte, la variación de la carga hidráulica en función, también, del tiempo:



**Figura 101: Evolución temporal de los rendimientos de eliminación del fósforo total en las celdas en serie grandes. También aparece representada la media de la carga hidráulica. Los rendimientos de eliminación negativos no aparecen reflejados en la figura. Las líneas azul, verde y morada representan la media móvil con un periodo de 2 de las *FG1*, *FG2* y *FG3*, respectivamente**

En la figura 101, se observa que durante los primeros meses, el rendimiento de la primera celda fue muy bajo. Ello concuerda con lo comentado anteriormente con respecto a la evolución de los datos obtenidos a lo largo de las tres celdas durante los meses de abril y mayo del 2009. Por un lado, en abril, la concentración de fósforo total no varió en la celda uno, es decir, se mantuvo constante. La posible explicación de ello es que el fósforo particulado que fue eliminado por sedimentación se compensó con el aumento de la concentración de fosfatos en la columna de agua procedente de la rápida hidrólisis y mineralización de aquello que acababa de sedimentar. Por otro lado, en el mes de mayo, los rendimientos en esta celda fueron negativos, debido al efecto de resuspensión de las aves.

En dicha figura también se observa el efecto del cosechado del *FG1* en esta misma celda y en la tercera. Al entrar el agua directamente a la celda dos, el rendimiento de esta tercera celda se incrementó, alcanzando a principios de noviembre, un rendimiento de casi un 50%.

A partir de diciembre de 2009, la celda que mejores rendimientos proporcionó fue la segunda.

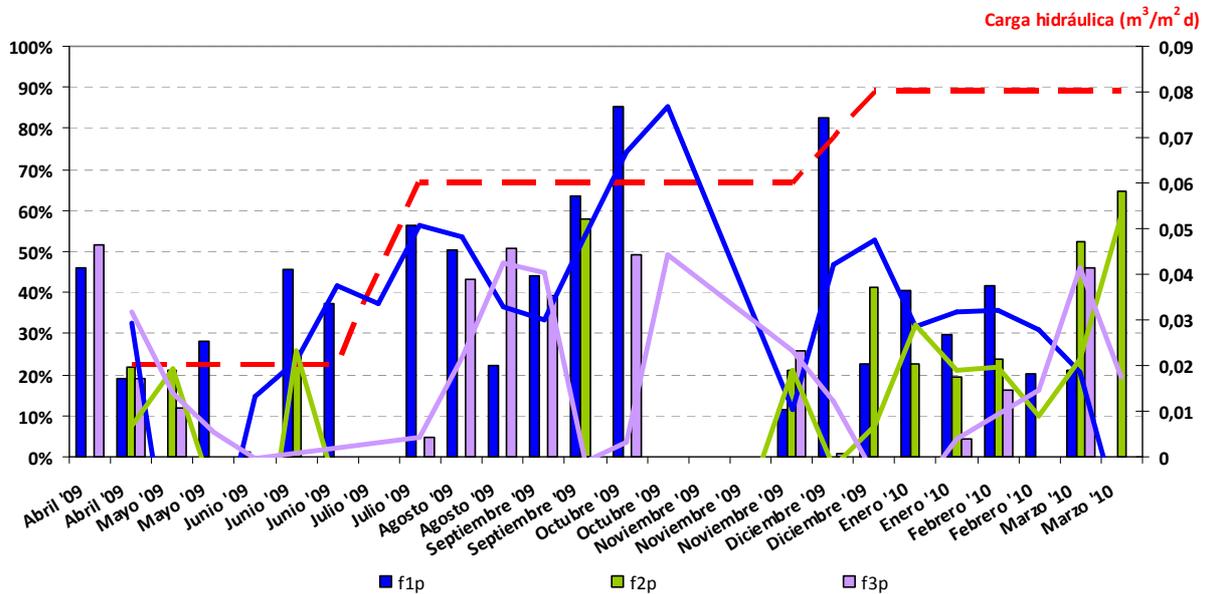
Los rendimientos globales de eliminación de las tres celdas grandes dispuestas en serie son los siguientes:

**Tabla 20: Rendimientos obtenidos en eliminación de fósforo total en las tres celdas grandes.**

Celda	Rendimiento
<i>FG1</i>	36%
<i>FG2</i>	31%
<i>FG3</i>	11%

Los mejores resultados los proporcionó la celda *FG1*, con un rendimiento global del 36%, mientras que, rendimiento más bajo se dio en la celda tres con un valor de eliminación de la carga de entrada del 11%.

En la siguiente figura aparece la evolución de los rendimientos de eliminación de cada una de las tres celdas pequeñas, y la variación de la carga hidráulica en el periodo de estudio:



**Figura 102:** Evolución temporal de los rendimientos de eliminación del fósforo total en las celdas en serie pequeñas. También aparece representada la media de la carga hidráulica. Los rendimientos de eliminación negativos no aparecen reflejados en la figura. La línea azul, la verde y la morada representan la media móvil con un periodo de 2 de los *f1p*, *f2p* y *f3p*, respectivamente

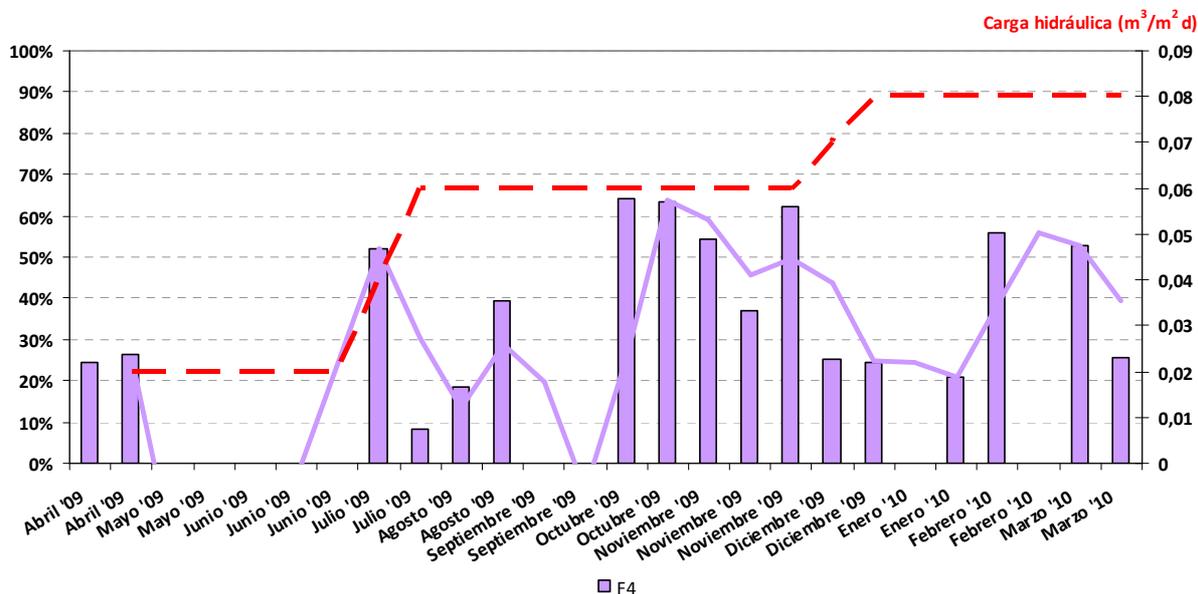
Los rendimientos globales de eliminación de las tres celdas pequeñas dispuestas en serie son los siguientes:

**Tabla 21:** Rendimientos obtenidos en eliminación de fósforo total en las tres celdas pequeñas.

Celda	Rendimiento
<i>fp1</i>	27%
<i>fp2</i>	10%
<i>fp3</i>	17%

Al igual que ocurre con el humedal *FG*, el mejor rendimiento lo brindó la celda uno. No obstante, después del cosechado, los rendimientos de la citada celda disminuyeron, a excepción, de un muestreo en el mes de diciembre del 2009.

Finalmente, la evolución de los rendimientos proporcionados por el humedal F4 y la evolución de la carga hidráulica media, para todo el periodo de estudio, aparecen en la figura que se presenta a continuación,



**Figura 103: Evolución temporal de los rendimientos de eliminación del fósforo total en la celda 4. También aparece representada la media de la carga hidráulica. Los rendimientos de eliminación negativos no aparecen reflejados en la figura. La línea azul representa la media móvil con un periodo de 2 del F4.**

Como se puede observar en la figura superior, los mejores resultados se obtuvieron con la carga hidráulica correspondiente a un valor de  $0.06\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$ .

Los resultados globales, que corresponden a todo el sistema de humedales artificiales, se han calculado contando con la evapotranspiración. Estos son los que aparecen en la siguiente tabla:

**Tabla 22: Rendimientos globales de eliminación del fósforo total.**

	Carga de entrada (Kg/año)	Carga de salida (Kg/año)	Carga eliminada (Kg/año)	% Reducción	Caudal promedio (L/s)
Con evapotranspiración	775.9	350.2	425.6	56	58.5

El conjunto de todo el sistema, eliminó el 56% del fósforo total que le entró durante el periodo anual estudiado. En total se eliminaron 426 Kg de  $P_T$  en todo el año.

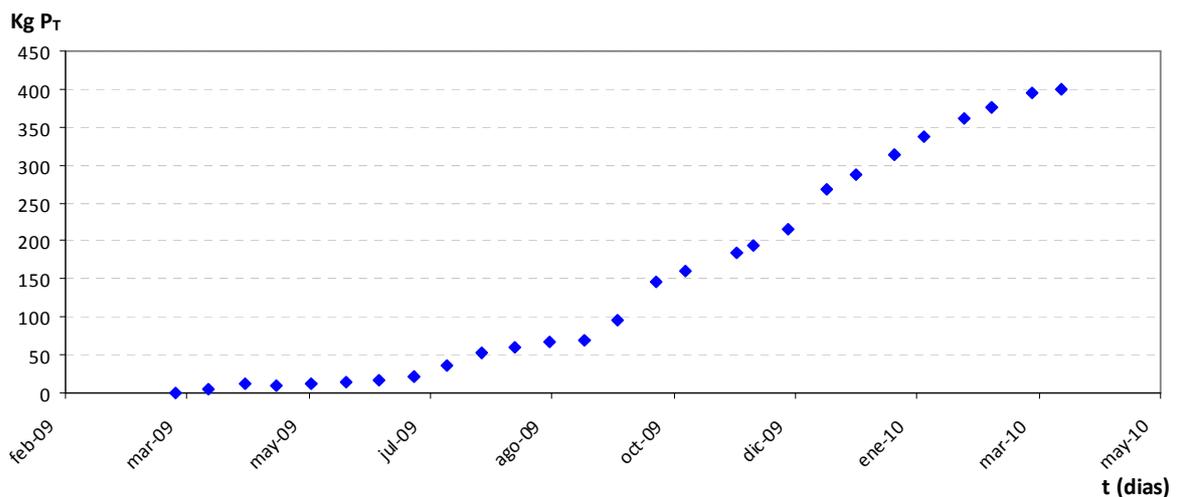
Los resultados obtenidos por sectores y contando con la evapotranspiración son los que se muestran en la tabla de a continuación,

**Tabla 23: Rendimientos por sectores de eliminación del fósforo total.**

	Carga de entrada (Kg/año)	Carga de salida (Kg/año)	Carga eliminada (Kg/año)	% Reducción	% Caudal de entrada	Carga superficial de entrada (g P/m <sup>2</sup> *d)	Carga Hidráulica media (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *d)
<b>Filtros Grandes</b>	427.1	153.3	273.6	64	56	0.024	0.06
<b>Filtros Pequeños</b>	116.8	47.5	69.4	59	15	0.022	0.05
<b>Filtro 4</b>	233.6	149.6	84	36	29	0.025	0.06

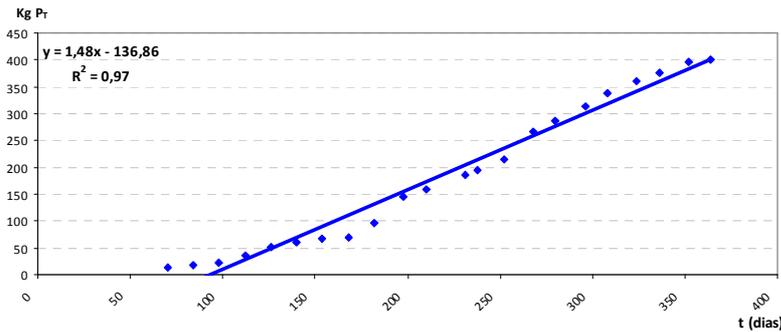
Se puede concluir que el sistema de celdas grandes en serie eliminó el 64% de la carga de fósforo total que le entró, siendo éste el mejor rendimiento obtenido de los tres sistemas. Las celdas pequeñas consiguieron una reducción de la carga de fósforo de entrada de un 59%, y el menor rendimiento lo presentó el sistema *F4* con tan solo un 36% de reducción de la carga de entrada.

Por último, en la siguiente figura se representa la masa de fósforo total eliminada acumulada:



**Figura 104: Masa de fósforo total eliminada acumulada (Kg P).**

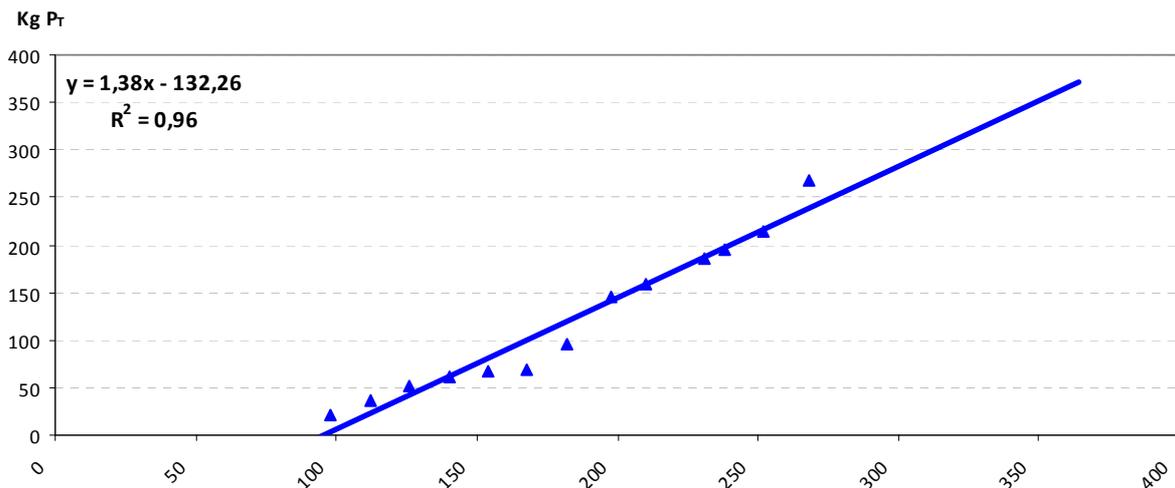
En la figura superior se puede observar como la eliminación de fósforo total, al igual que los sólidos suspendidos, sigue una tendencia lineal a excepción de los primeros meses (abril, mayo y junio) en los que como ya se ha explicado anteriormente, el grado de cobertura vegetal era muy bajo y la presencia de aves muy abundante, propiciado por tanto, la resuspensión de la fase particulada ya sedimentada. En el mes de mayo, el sistema llegó a ser exportador de fósforo.



Tomando los datos a partir del muestreo del 01/06/2009, la velocidad de eliminación de fósforo total que se obtiene es de 1,48 Kg P/d.

**Figura 105: Ajuste lineal al fósforo acumulado eliminado (Kg P).**

Para comprobar si la velocidad de eliminación de fósforo se mantuvo más o menos constante al aumentar la carga hidráulica, se ha obtenido dicha velocidad para las fechas en las que la carga hidráulica fue de  $0,06 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$  y para las fechas en que la carga hidráulica fue de  $0,08 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ . Los resultados obtenidos aparecen en la figura y en la tabla siguiente:



**Figura 106: Ajuste lineal al fósforo acumulado eliminado (Kg P) en las fechas en que la carga hidráulica era de  $0,06 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ .**

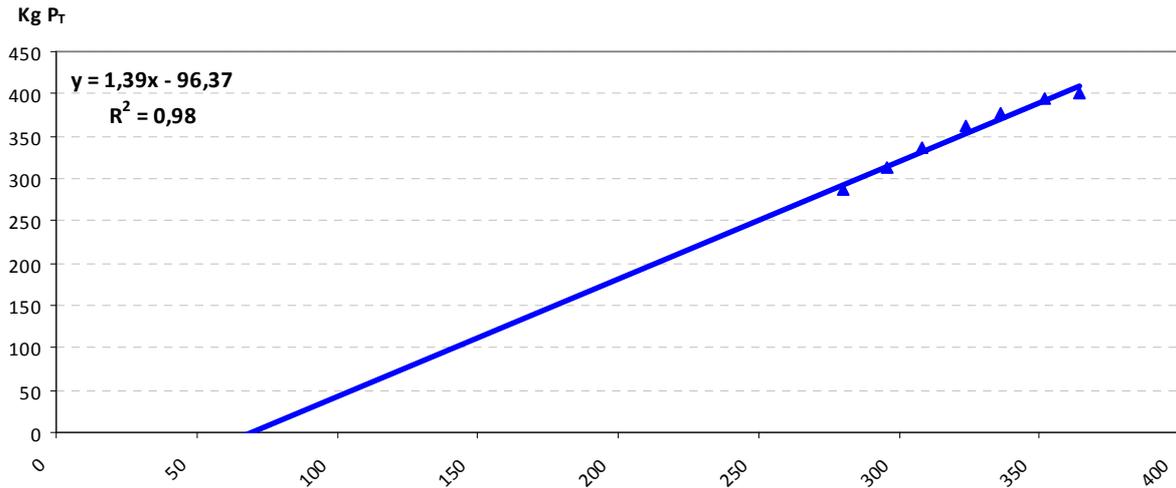


Figura 107: Ajuste lineal al fósforo acumulado eliminado (Kg P) en las fechas en que la carga hidráulica era de  $0.08 m^3/m^2 \cdot d$ .

Tabla 24: Velocidades de eliminación del fósforo total obtenidas con distintas cargas hidráulicas.

Carga hidráulica ( $m^3/m^2 \cdot d$ )	Velocidad de eliminación (Kg P/d)
0.06	1.38
0.08	1.39

De los resultados obtenidos, se puede concluir que la velocidad de eliminación de fósforo total, prácticamente no varió al aumentar la carga hidráulica.

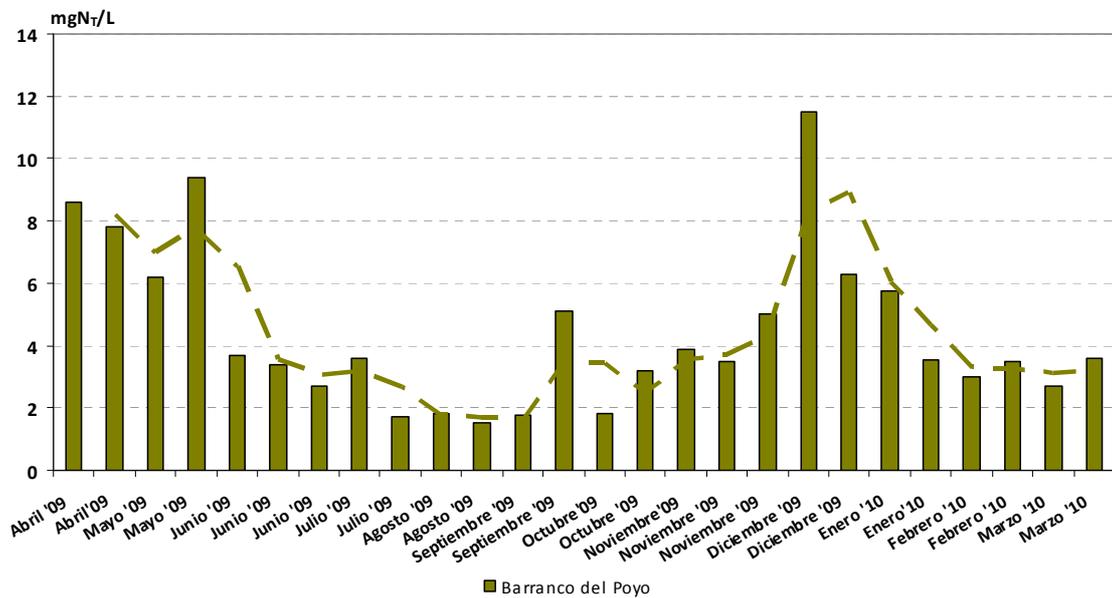
Si se toma el valor promedio de fósforo total obtenido del Barranco del Poyo durante el año de estudio, es decir,  $0.4 mg P/l$ , como valor medio del fósforo total contenido en el lago de l'Albufera durante un año, y considerando un volumen de agua en el mismo lago de  $21 Hm^3$ ; se obtiene, que con el sistema de humedales artificiales se ha eliminado en un año, el 5.1% del fósforo total de dicho lago.

## 7.5 NITRÓGENO TOTAL.

### 7.5.1 ELIMINACIÓN DE NITRÓGENO TOTAL.

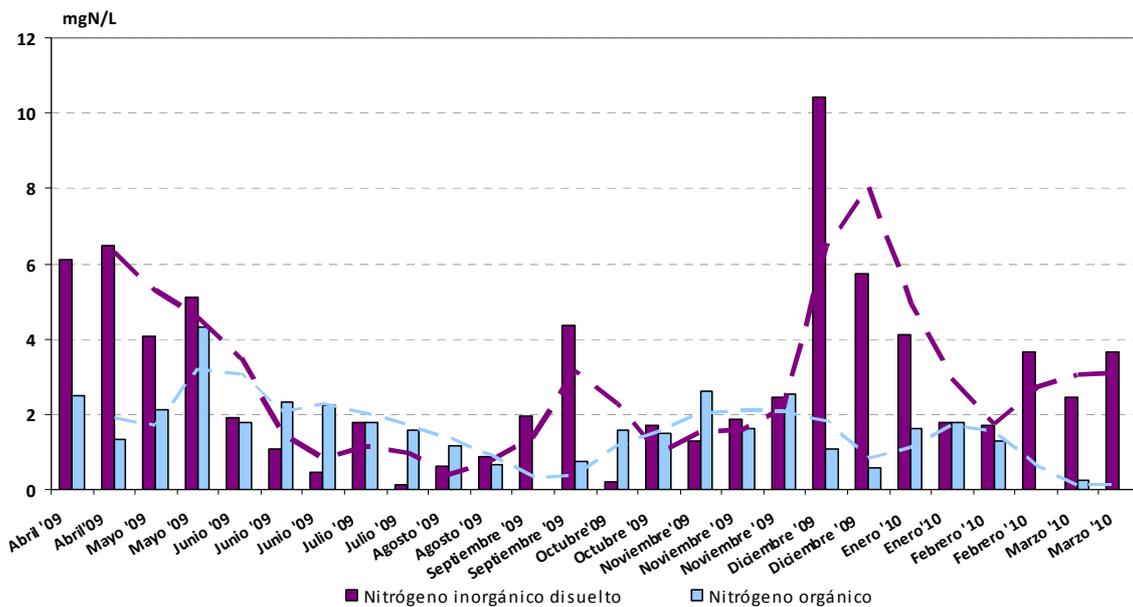
La concentración media de nitrógeno total en el agua de entrada al sistema de tratamiento desde el Barranco del Poyo fue de  $4.4 mg N/l$ . Esta concentración fue muy

variable a lo largo del periodo anual de estudio (desviación estándar entorno a un 58% del valor medio). Los valores oscilaron entre los 1.5 mg N/l y 11.5 mg N/l.



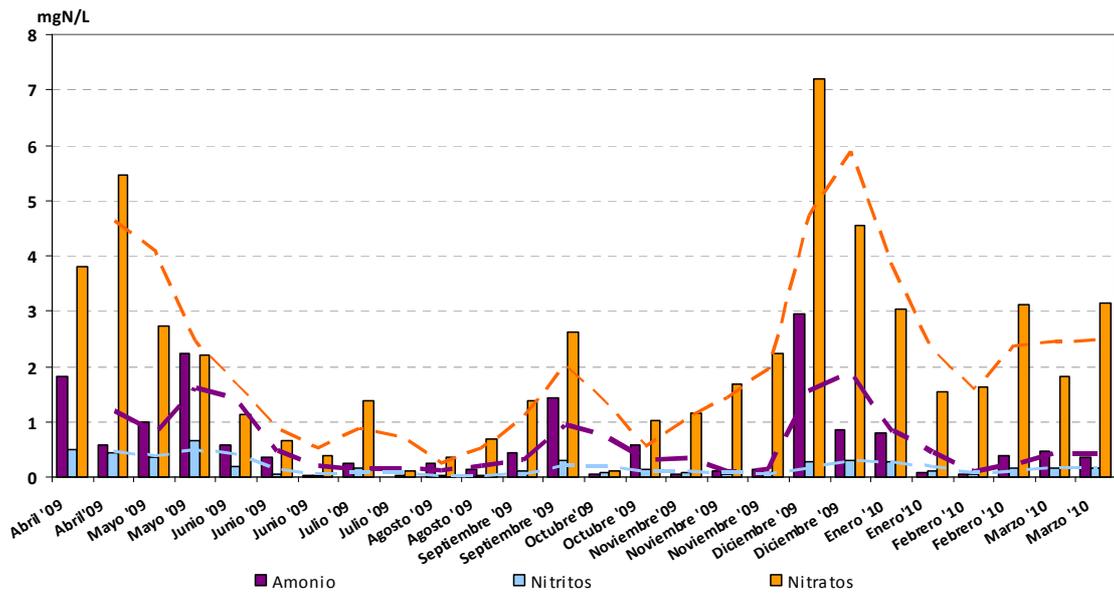
**Figura 108: Concentraciones de nitrógeno total (mg N/l) en el agua de entrada al sistema por el Barranco del Poyo, desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010. La línea discontinua representa la media móvil con un periodo de 2.**

Como se pueda observar en la figura siguiente, al contrario de lo ocurrido con el fósforo, en el caso del nitrógeno, prácticamente todo el que entró, lo hizo como nitrógeno inorgánico disuelto (NID), es decir, como amonio, nitratos y nitritos.



**Figura 109: Concentraciones de nitrógeno inorgánico disuelto (suma de las concentraciones de amonio, nitritos y nitratos) y de nitrógeno orgánico, ambas medidas como mg N/l, en el agua de entrada al sistema por el Barranco del Poyo, desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010. Las líneas representan la media móvil con un periodo de 2.**

Además, dentro de las formas inorgánicas, mayoritariamente entró como nitratos, mientras que la entrada de nitritos es casi nula.



**Figura 110: Concentraciones medidas de amonio, nitrito y nitrato, medidas como mg N/l, en el agua de entrada por el Barranco del Poyo, desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010. Las líneas representan la media móvil con un periodo de 2.**

Es importante señalar que la concentración de amonio superó en un 27% de los muestreos, el umbral máximo, establecido en La Instrucción de Planificación Hidrológica (2008), para establecer el límite del buen estado de algunos indicadores físico químicos de los ríos. Éste es: Amonio < 1 mg NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/l. En la figura siguiente se puede observar los días que se sobrepasó dicho umbral:

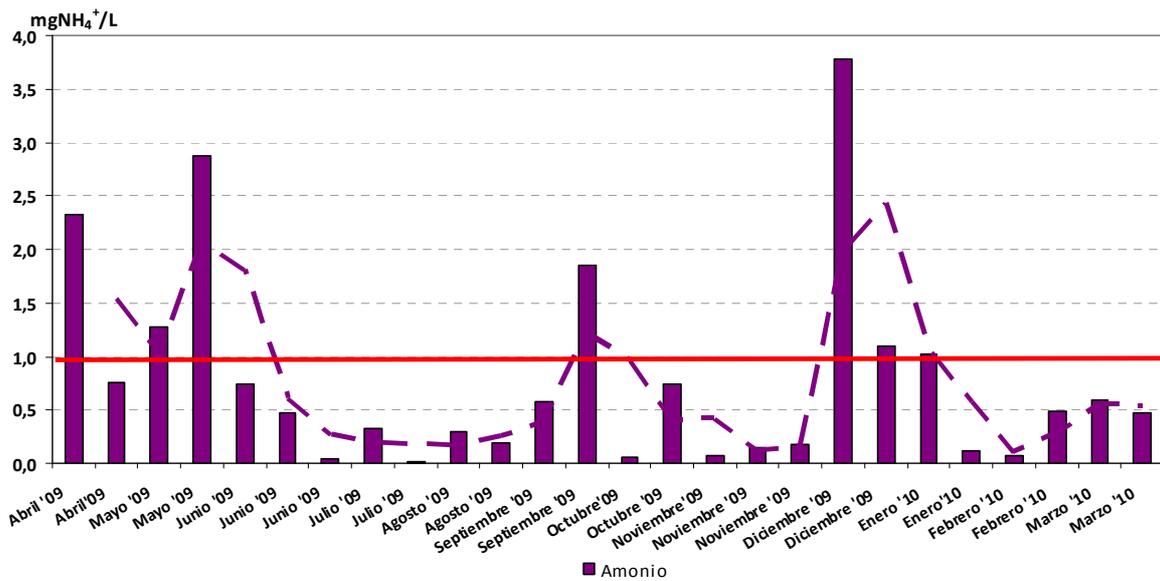


Figura 111: Concentraciones medidas de amonio, como mg NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/l, en el agua de entrada por el Barranco del Poyo, desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010. La línea discontinua representa la media móvil con un periodo de 2. La línea roja marca el umbral máximo fijado por la Instrucción de Planificación Hidrológica (2008).

La concentración media del Puerto de Catarroja, para el mismo periodo de tiempo, fue de 3.8 mg N/l. También presentó una alta variabilidad (desviación típica de un 56% respecto al valor medio), oscilando los valores en dicho punto entre los 1.9 mg N/l y los 10.4 mg N/l.

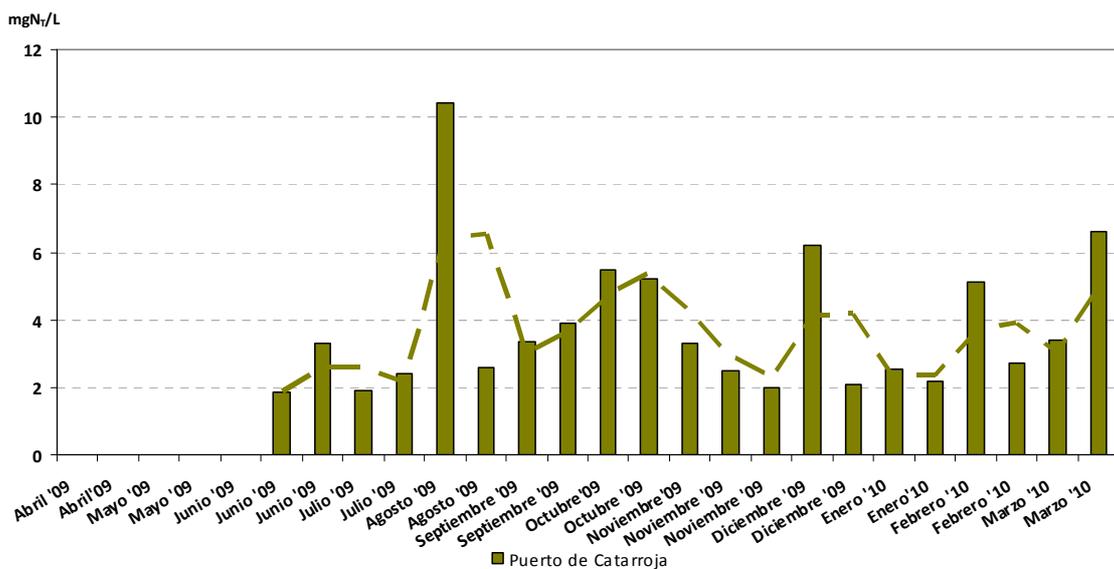
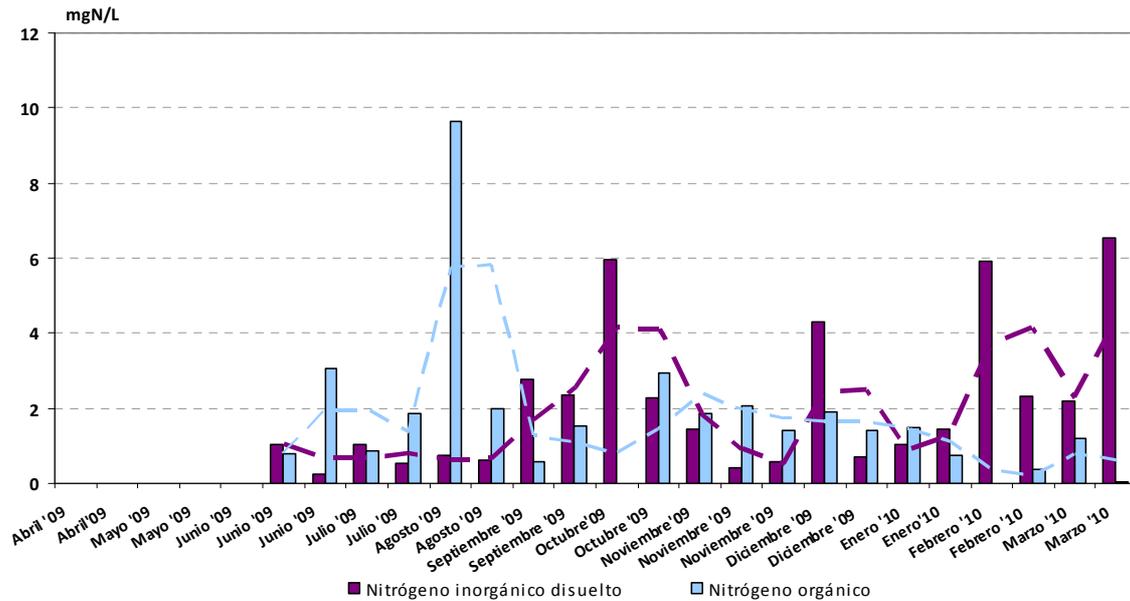


Figura 112: Concentraciones medidas de nitrógeno total (mg N/l) en el agua de entrada por el Puerto de Catarroja, desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010. Cabe recordar que no entraba agua al humedal desde

esta acequia hasta la segunda quincena de Junio del 2009. La línea discontinua representa la media móvil con un periodo de 2.

A diferencia del Barranco del Poyo, la mayor parte del nitrógeno que entró al sistema desde el Puerto de Catarroja no estaba en forma de nitrógeno inorgánico soluble. Más bien, tal y como se puede observar en la figura siguiente, el promedio en estas aguas de la fracción soluble y de la particulada fue prácticamente el mismo.



**Figura 113: Concentraciones medidas de nitrógeno soluble y de nitrógeno orgánico, medidas como mg N/L, en el agua de entrada por el Barranco del Poyo, desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010. Las líneas representan la media móvil con un periodo de 2.**

Al igual que en el caso del Barranco del Poyo, la principal forma en la que se encontraba el NID fue en forma de nitratos.

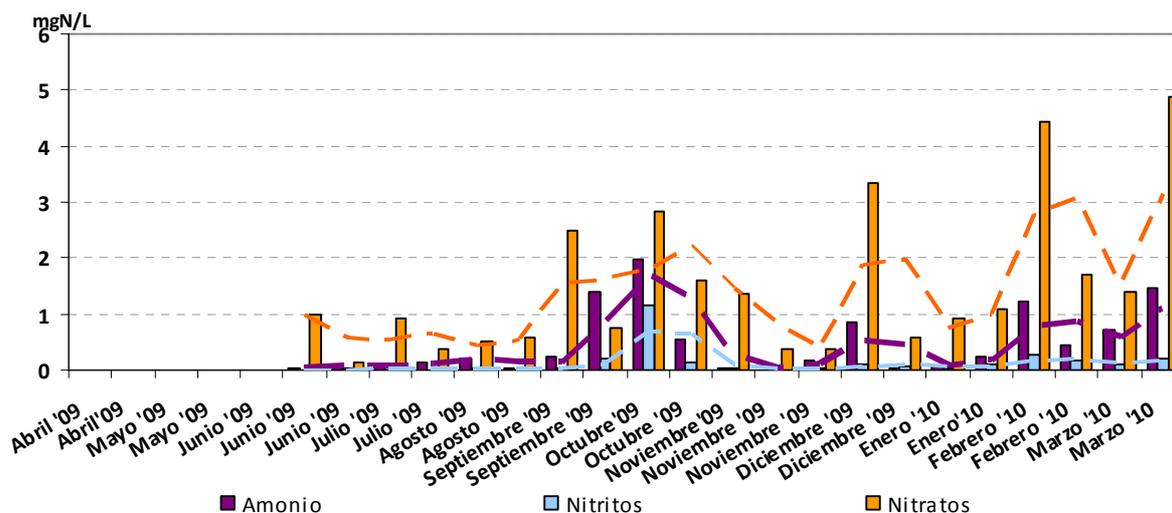


Figura 114: Concentraciones medidas de amonio, nitrito y nitrato, medidas como mg N/l, en el agua de entrada por el Puerto de Catarroja, desde el 15/06/2009 hasta el 22/03/2010.

Al igual que en el Barranco del Poyo, la concentración de amonio en el agua de la acequia del Puerto de Catarroja, también superó en alguna ocasión, el umbral máximo, establecido en La Instrucción de Planificación Hidrológica (2008), concretamente en el 24% de los muestreos. En la figura siguiente se puede observar los días que se sobrepasó dicho umbral:

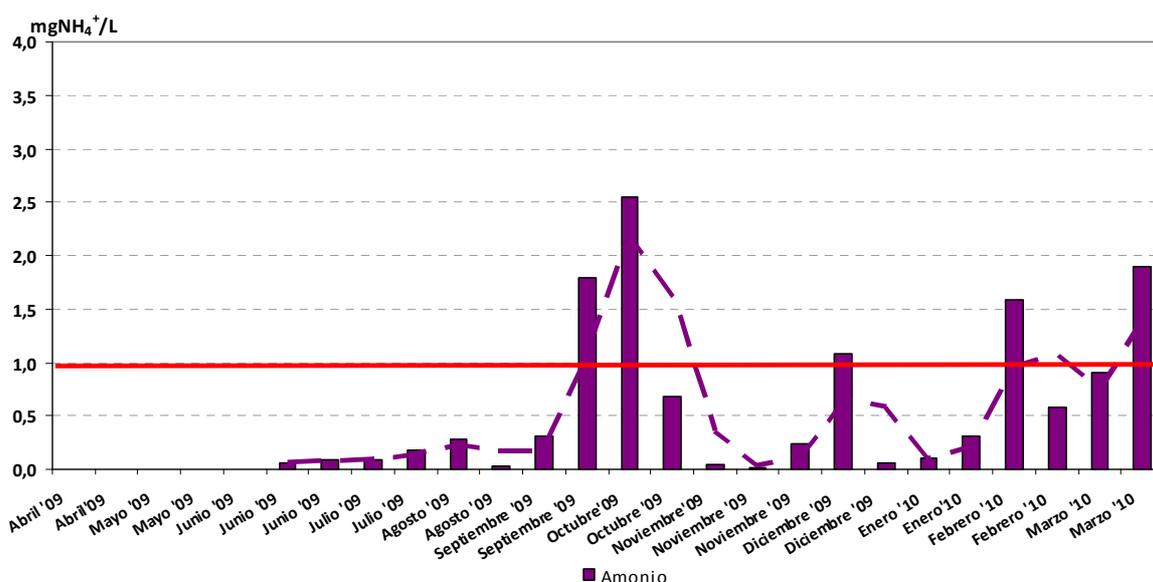


Figura 115: Concentraciones medidas de amonio, como mg NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/l, en el agua de entrada por el Puerto de Catarroja, desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010. La línea discontinua representa la media móvil con un

periodo de 2. La línea roja marca el umbral máximo fijado por la Instrucción de Planificación Hidrológica (2008).

Con respecto a la concentración media a la entrada del F4, punto 8.1, por un lado fue muy similar a la de los anteriores, tomado un valor de 3.9 mg N/l, y por otro lado, tal y como ocurría con la concentración de sólidos suspendidos y de fósforo total en este mismo punto, su variabilidad fue menor (de un 42% respecto al valor medio).

En las siguientes figuras aparecen las concentraciones medias, para todo el periodo de estudio, y la correspondiente desviación estándar, de cada uno de los puntos de muestreo de calidad de aguas:

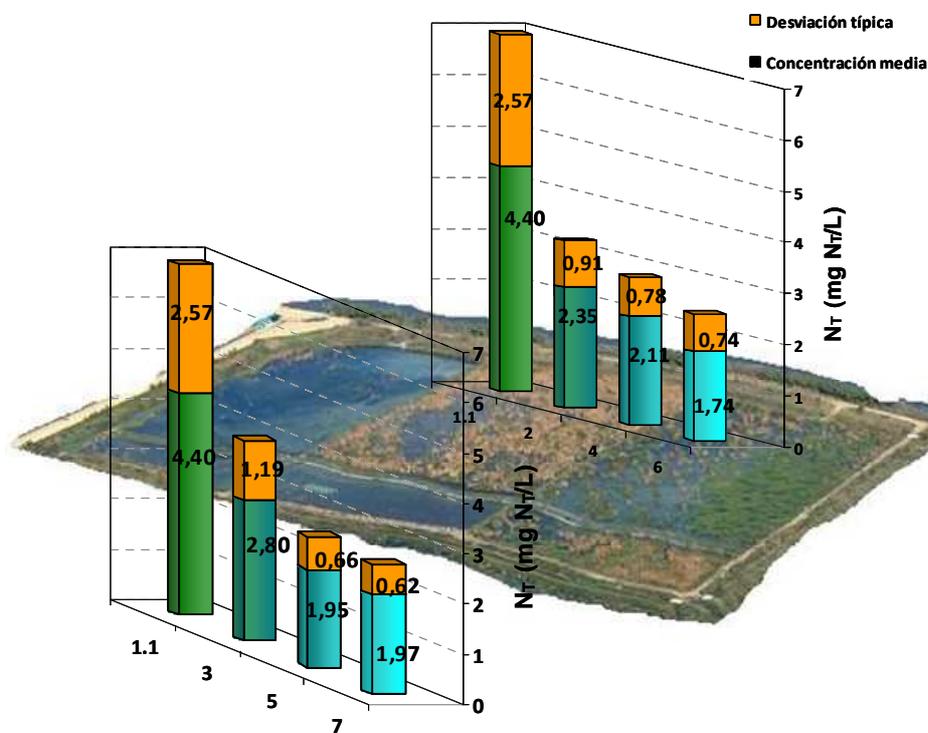
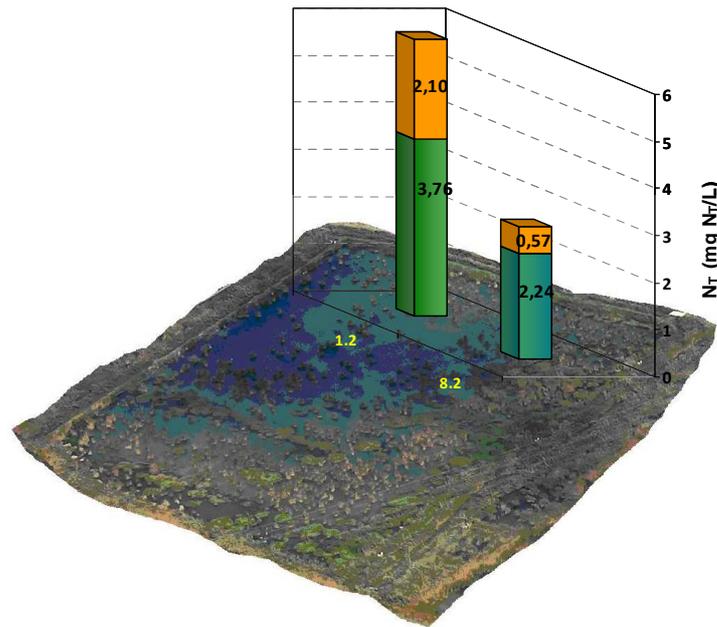


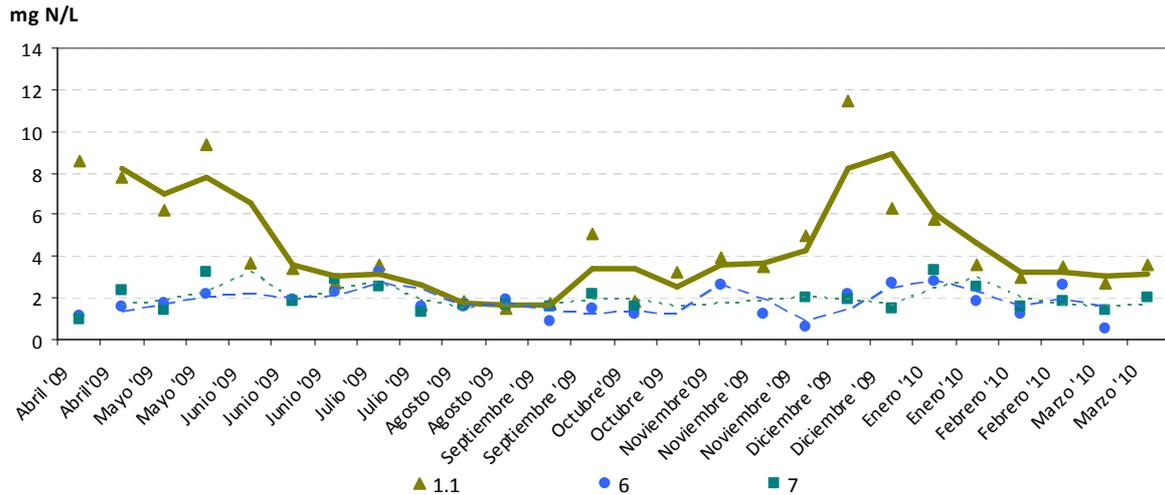
Figura 116: Media (tramo inferior) y desviación típica (tramo superior) de los datos recogidos en los punto de muestreo 1.1, 2, 3, 4, 5, 6, y 7, durante todo el periodo anual (06/04/2009 al 22/03/2010).



**Figura 117: Media (tramo inferior) y desviación típica (tramo superior) de los datos recogidos en los puntos de muestreo 1.2 y 8.2, durante todo el periodo anual (06/04/2009 al 22/03/2010).**

En las figuras 116 y 117 se puede observar cómo el promedio de los valores de concentración de nitrógeno total, para todo el periodo de estudio, decreció a lo largo de los humedales artificiales *FG* y *F4*. En cambio, aunque la concentración media a lo largo del sistema *fp* se redujo desde la entrada hasta la salida del humedal, en la tercera celda se aumentó ligeramente la concentración de nitrógeno total media que le entró. La concentración de salida del humedal *FG* fue menor que la del *fp* y menor que la del *F4*.

La evolución temporal de las concentraciones en la entrada por el Barranco del Poyo y a la salida de los sistemas *FG* y *fp* fue la siguiente:



**Figura 118: Evolución temporal del nitrógeno total en la entrada por el Barranco del Poyo (1.1) y a la salida de las celdas F3G (6) y f3p (7). Las líneas representan la media móvil con un periodo de 2.**

Como se observa en la figura 118, ya en el primer mes de muestreo (abril del 2009), tanto el sistema *FG* como el *fp* redujeron la concentración de nitrógeno de la entrada. El promedio de reducción del *FG* en dicho mes fue de un 84% y del *fp* de un 80%.

Al igual que ocurrió con los sólidos suspendidos y con el fósforo total, durante los meses de mayo y de junio del 2009, por los motivos ya comentados, al producirse una resuspensión de sólidos desde el sedimento, disminuyó el porcentaje de eliminación (a un 75% en mayo y a un 36% en junio). No obstante, en el caso del  $N_T$ , durante estos meses las concentraciones a la salida de estos dos humedales nunca fueron superiores a los de la entrada.

Durante los meses de junio del 2009 a septiembre del 2009, la concentración de nitrógeno total a la entrada del sistema fue disminuyendo y con ello los porcentajes de reducción. Este descenso se puede observar más claramente en la siguiente figura:

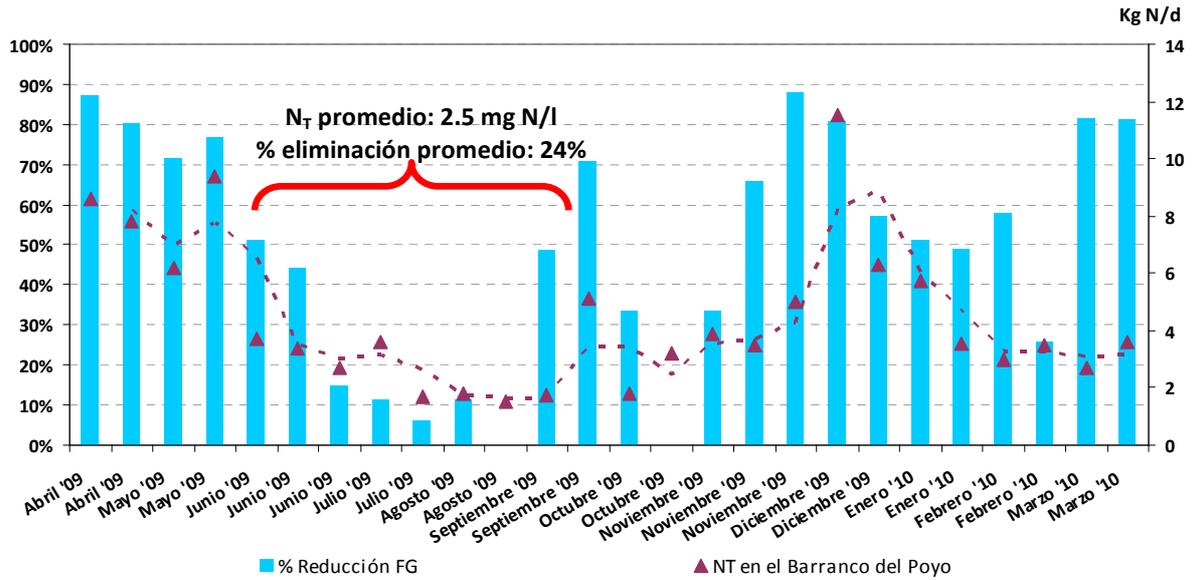


Figura 119: Evolución temporal del nitrógeno total (mg N/l) en la entrada por el Barranco del Poyo (1.1) y los porcentajes de eliminación del sistema FG. La línea representa la media móvil con un periodo de 2.

Si en lugar de concentración de nitrógeno total (mg N/l) en la entrada, se representa la carga (kg/d), vemos que la tendencia es la misma:

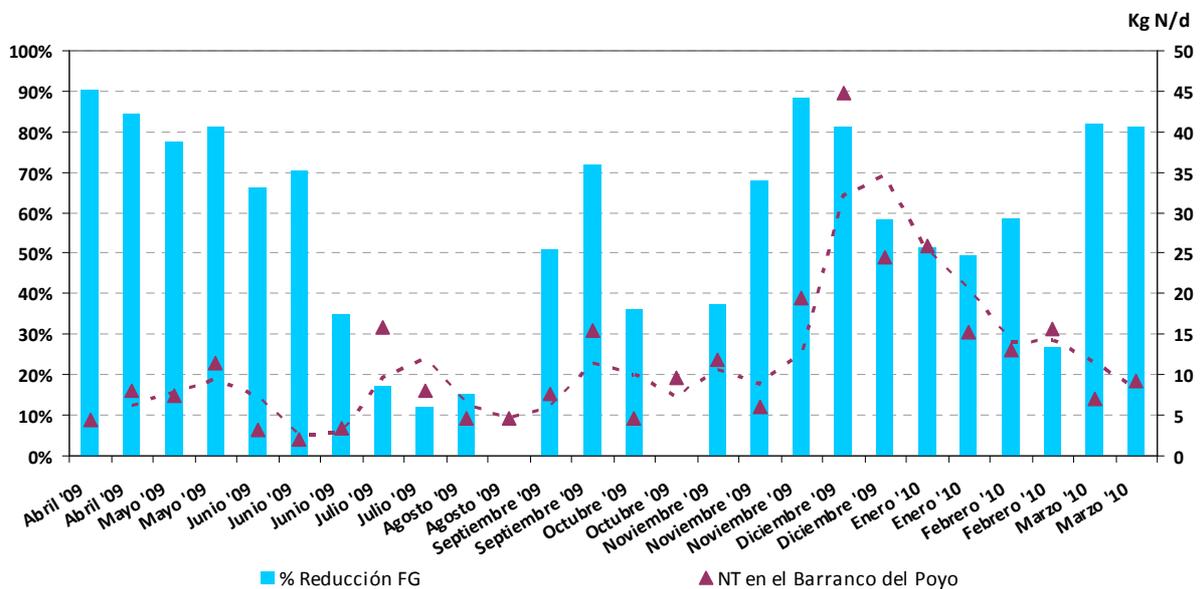


Figura 120: Evolución temporal del nitrógeno total (Kg N/d) en la entrada por el Barranco del Poyo (1.1) y los rendimientos de eliminación del sistema FG. La línea representa la media móvil con un periodo de 2.

En la figura 120 se observa que los rendimientos de eliminación del humedal *FG* responden a la carga de entrada, de modo que, cuando esta última decrece, también lo hacen los rendimientos obtenidos, y viceversa.

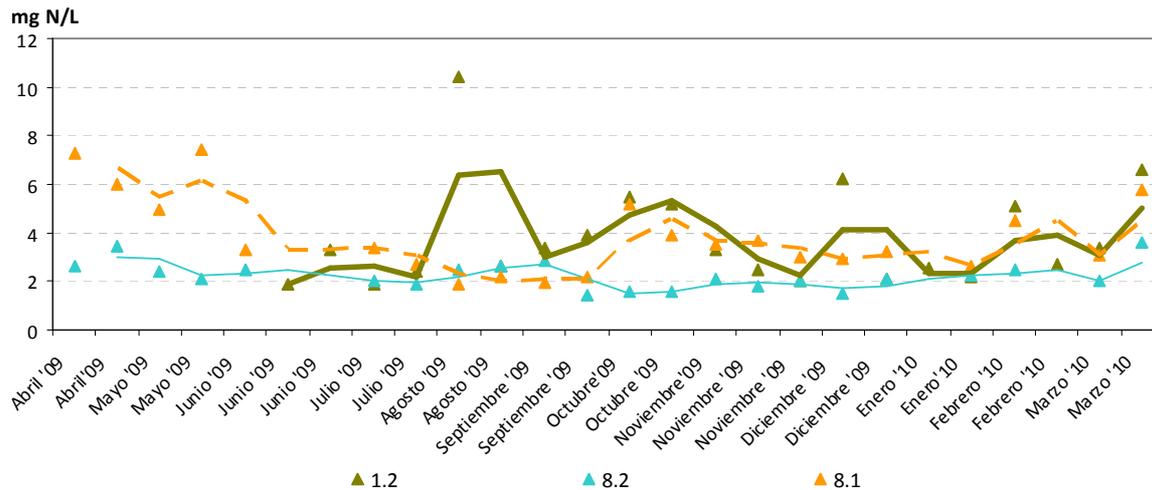
En general, las concentraciones a la salida de los humedales *FG* y *fp* son menores a 3 mg N/l (en el 96% de los muestreos en el punto 6 y en el 83% en el punto 7). En el punto 6, se logra alcanzar en un 17% de los casos, concentraciones inferiores a 1 mg N/l. En cambio, en el sistema *fp*, en ningún caso se lograron concentraciones inferiores a dicho valor. En la tabla inferior aparecen reflejados los valores nombrados.

**Tabla 25: Porcentaje de muestreos en que la concentración en los puntos 6 y 7 es inferior a 3 mg N/l, 2.5 mg N/l, 2 mg N/l, 1.5 mg N/l y a 1 mg N/l.**

Concentración NT (mg N/l)		
	Punto 6	Punto 7
<3 mg N/l	96%	83%
<2.5 mg N/l	79%	71%
<2 mg N/l	67%	67%
<1.5 mg N/l	33%	17%
<1 mg N/l	17%	0%

Además, la variabilidad de la concentración a la salida (42% respecto al valor medio en el punto 6 y un 32% en el punto 7), es inferior a la de la entrada (58% respecto al valor medio), proporcionando al lago de l' Albufera un suministro de agua con concentraciones más estables de  $N_T$ .

La evolución de las concentraciones obtenidas durante el periodo de estudio, en la entrada por el Puerto de Catarroja y en los puntos 8.1 y 8.2, aparece en la siguiente figura:



**Figura 121: Evolución temporal del nitrógeno total en la entrada por el Puerto de Catarroja (1.2), entrada al F4 (8.1) y a la salida del mismo (8.2). Las líneas representan la media móvil con un periodo de 2.**

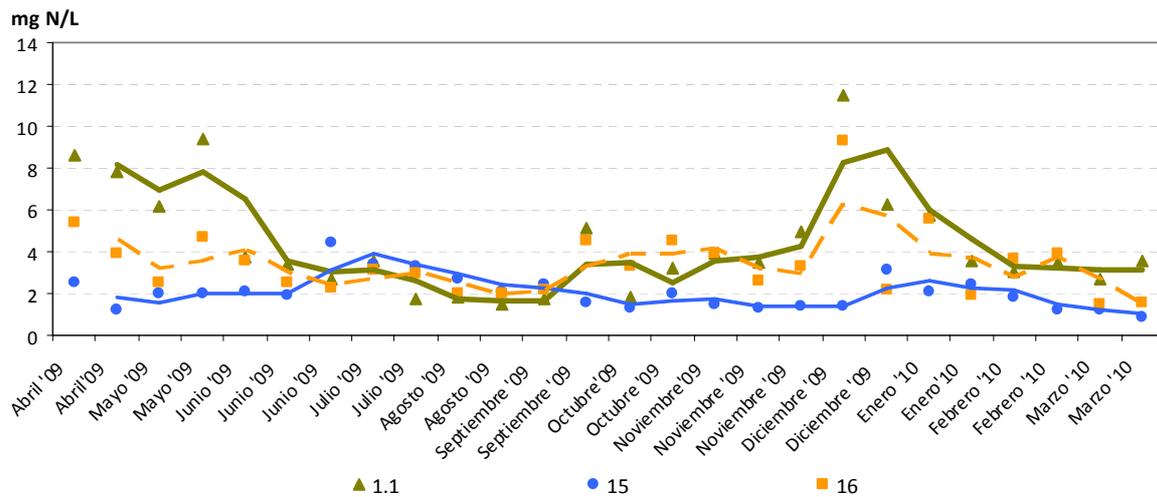
La reducción media conseguida en todo el periodo de estudio, desde la entrada por el Puerto de Catarroja, hasta la salida por el F4 es de un 40%. Al igual que en los otros dos humedales, el amplio rango de variación de nitrógeno total a la entrada (56% respecto a la concentración media) se reduce al pasar por el F4 (25% respecto a la concentración media).

Si al igual que para los parámetros anteriores, se calcula el porcentaje promedio de eliminación con los valores obtenidos a partir del mes de octubre del 2009, ya que el desarrollo de la biomasa vegetal en este humedal fue más lenta que en los humedales anteriores, se obtiene un valor de 45%.

Aunque los porcentajes de eliminación obtenidos en el sistema F4 no son tan buenos como en los otros dos humedales, solamente en dos ocasiones la concentración del parámetro de estudio fue a la salida del sistema mas alta que a la entrada. Es decir, solamente en el 9% de los casos, F4 fue exportador de nitrógeno total.

Para finalizar el análisis de la evolución temporal del nitrógeno total durante el primer año, se van a comparar los resultados obtenidos en el punto 15 (salida del Tancat de la Pipa) con las entradas desde el Barranco del Poyo (1.1) y desde la Acequia del Puerto de Catarroja (1.2), y con el punto del lago de l'Albufera en donde se devuelve el agua tratada (punto 16).

En la siguiente figura aparece la evolución temporal de los valores obtenidos en el Barranco del Poyo, en el punto 15 y en punto 16:

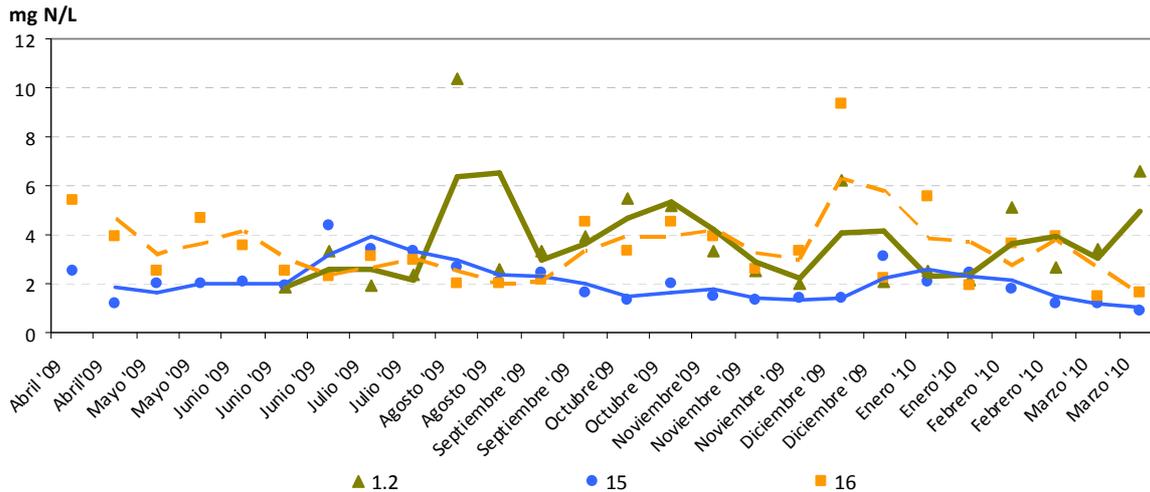


**Figura 122: Evolución temporal del nitrógeno total en la entrada por el Barranco del Poyo (1.1), salida del Tancat de la Pipa (15) y zona del lago de vertido del agua tratada (16). Las líneas representan la media móvil con un periodo de 2.**

A excepción del periodo comprendido entre mediados de junio del 2009 y principios de septiembre del mismo año, la concentración de nitrógeno total en el agua de salida del Tancat (punto 15) fue siempre inferior a la de la entrada por el Barranco del Poyo, consiguiéndose una reducción promedio desde la entrada hasta la salida del enclave de un 71% desde el inicio del estudio hasta finales de junio y de un 62% desde finales de septiembre del 2009 hasta el último muestreo.

Aunque, la calidad del punto 15 no se mantuvo en el punto 16, si que en el 69% de los muestreos, el nitrógeno total contenido en este último punto fue inferior al obtenido en el Barranco del Poyo.

En la figura que se presenta a continuación, aparecen los valores del punto 15 y del 16, y los del Puerto de Catarroja,



**Figura 123: Evolución temporal del nitrógeno total en la entrada por el Puerto de Catarroja (1.2), salida del Tancat de la Pipa (15) y zona del lago de vertido del agua tratada (16). Las líneas representan la media móvil con un periodo de 2.**

En cuanto al Puerto de Catarroja, a excepción del 29% de los datos obtenidos (prácticamente todos correspondientes al periodo de puesta en marcha del humedal), la calidad del agua del punto 15 fue mejor que la correspondiente al Puerto de Catarroja. La reducción media conseguida desde esta entrada hasta la salida del Tancat en el periodo comprendido entre agosto del 2009 hasta el último muestreo fue de un 55%.

Los valores obtenidos en el punto 16, fueron en el 48% de los casos, menores que los recogidos en el Puerto de Catarroja.

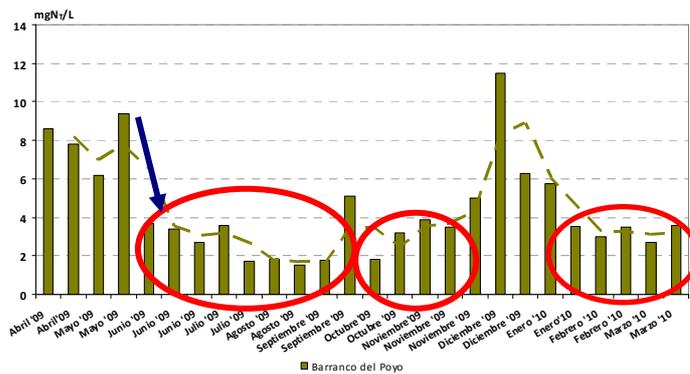
Seguidamente, después de haber realizado un análisis temporal de los resultados obtenidos en los diferentes humedales, se va a efectuar un análisis espacial centrado en el sistema *FG*.

A diferencia de lo observado con los sólidos suspendidos totales y con el fósforo total, en el caso de la evolución de los valores de nitrógeno total a lo largo de las tres celdas, no se identifican tendencias significativamente diferentes, asociadas a cambios en parámetros operacionales, como la carga hidráulica o a perturbaciones externas al funcionamiento del humedal, como puede ser, la elevada presencia de aves en las celdas de tratamiento.

Así pues, la tendencia normal, en lo que respecta a la evolución de la concentración de nitrógeno total a lo largo del humedal *FG*, fue la reducción de la concentración de  $N_T$  en la celda *FG1* y un comportamiento más heterogéneo en las otras dos celdas:

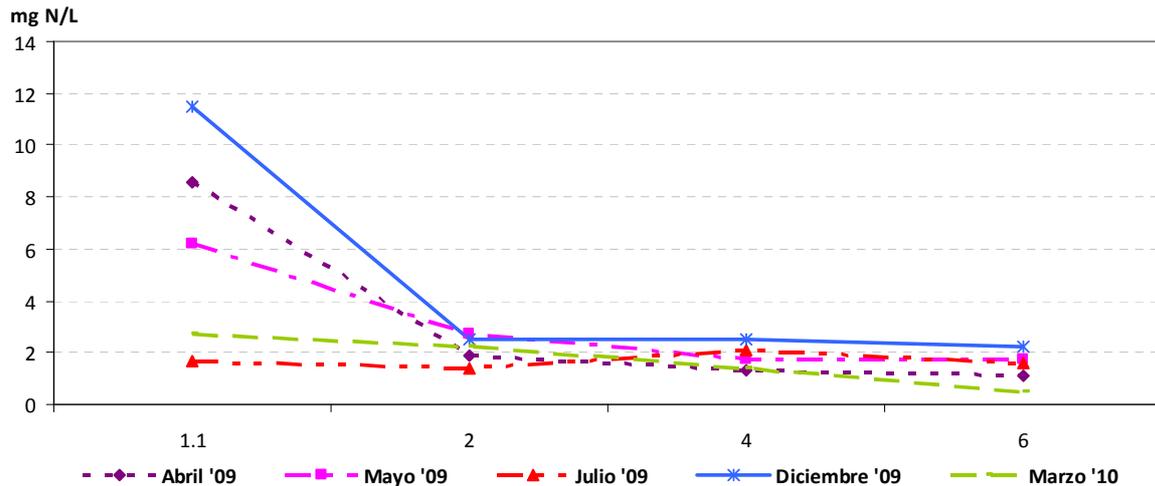
- *FG1*: Redujo en el 91% de los casos y generó en el 9%.
- *FG2*: Redujo en el 64% de los casos, generó en el 32% y mantuvo la concentración constante a su paso en el 4% de los mismos.
- *FG3*: Redujo en el 71% de los casos, generó en el 25% y mantuvo la concentración constante a su paso en el 4% de los mismos.

Solamente se observa un cambio claro de tendencia, cuando a partir del mes de junio empezaron a descender las concentraciones de nitrógeno total a la entrada del humedal *FG*, provenientes del Barranco del Poyo. En la figura siguiente se señalan los periodos de tiempo en que las concentraciones de  $N_T$  en la entrada fueron menores de 4 mg N/l.



**Figura 124: Concentraciones de nitrógeno total (mg N/L) en el agua de entrada al sistema por el Barranco del Poyo, desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010. La línea discontinua representa la media móvil con un periodo de 2.**

Para corroborar la afirmación anterior, en la figura que se presenta a continuación aparece la concentración medida en los diferentes puntos de muestreo del sistema *FG* en momentos determinados, en los que, sí se observaron cambios en los parámetros estudiados anteriormente.



**Figura 125: Evolución del nitrógeno total lo largo de las tres celdas grandes en serie. Los días seleccionados son: el 06 de abril del 2009, el 04 de mayo del 2009, el 27 de julio del 2009, el 16 de diciembre del 2009, y por último, el 10 de marzo del 2010.**

La tendencia correspondiente al 06 de abril del 2009, representa la evolución de los valores de concentración del  $N_T$  a lo largo del humedal durante los primeros meses, en los que la cobertura vegetal en las celdas todavía era baja, sobretodo en la *FG3*. Durante el mes de abril, el comportamiento observado para el nitrógeno total fue muy similar al de los sólidos suspendidos. Con el paso del agua a través de las celdas *FG1* y *FG2* se reducía la concentración de nitrógeno total, no obstante, a diferencia de los sólidos suspendidos, la celda *FG3* sí redujo, en ese mes, la concentración de  $N_T$  que le entraba. Por último, el porcentaje de eliminación que se obtuvo en la primera celda siempre fue mayor que el que se obtuvo en la segunda celda.

En la figura 126 se representan dichos porcentajes para el nitrógeno total y en las tablas 26 y 27, aparecen los porcentajes de eliminación, de los diferentes componentes de nitrógeno inorgánico disuelto y del nitrógeno orgánico en las celdas en serie del humedal *FG*:

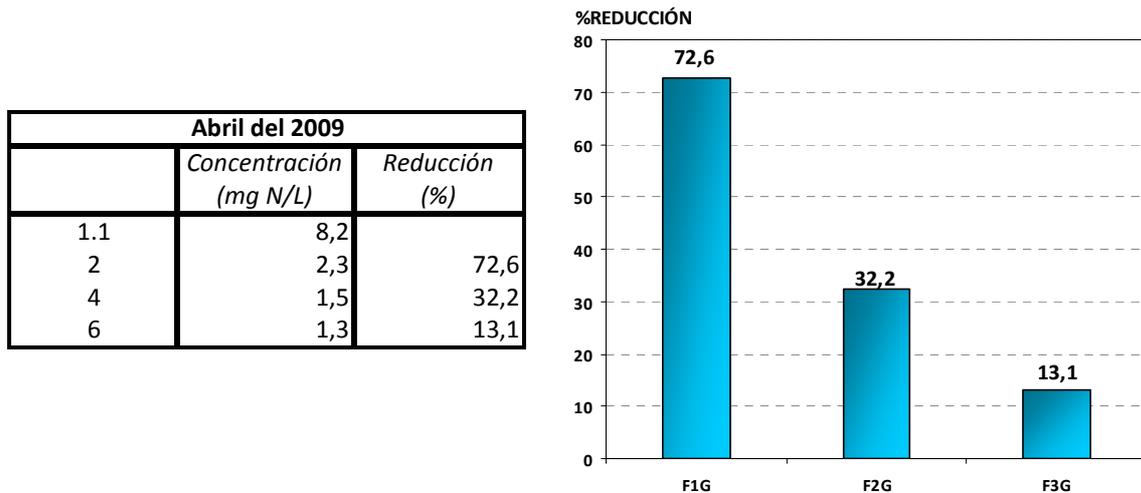


Figura 126: Evolución de la concentración promedio y reducción del nitrógeno total a lo largo de los FG y referentes al mes de abril del 2009.

Tabla 26: Porcentajes medios de eliminación del amonio, nitratos y nitritos en el mes de abril.

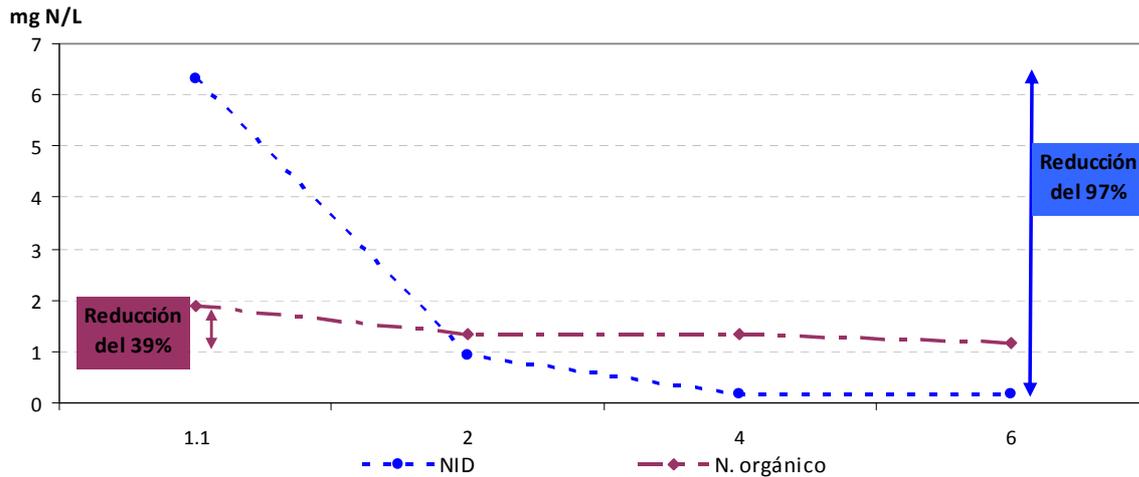
Nitrógeno soluble inorgánico	FG1	FG2	FG3	Global
%Reducción Amonio	77%	57%	75%	97%
%Reducción Nitratos	90%	91%	-200%	97%
%Reducción Nitritos	63%	94%	-80%	96%

Tabla 27: Porcentajes medios de eliminación del nitrógeno orgánico en el mes de abril.

	FG1	FG2	FG3	Global
% Reducción N.orgánico	30%	-1%	15%	39%

En las figuras anteriores se observa por un lado, que la celda *FG1* presentó un porcentaje bastante mayor de eliminación que las otras dos celdas y por otro lado, que prácticamente todo el nitrógeno inorgánico contenido en el agua de entrada al humedal, se eliminó durante su paso por el sistema *FG*, mientras que, la reducción de nitrógeno orgánico fue baja (del 39%).

A raíz de estos resultados, se puede afirmar que durante este primer mes, el sistema fue capaz de eliminar nitrógeno (con un porcentaje promedio de reducción global del 84%), y además que, el nitrógeno eliminado, fundamentalmente fue inorgánico.



**Figura 127: Evolución de la concentración de NID (mg N/l) y de nitrógeno orgánico (mg N/l) a lo largo del humedal FG.**

En resumen se puede decir, al igual que ya se ha comentado en el apartado de los sólidos suspendidos, que durante este periodo, el sistema todavía estaba funcionando por debajo de sus posibilidades, ya que, *FG1* tenía un porcentaje de eliminación bastante superior a *FG2* y a *FG3*. No obstante, no es posible asegurar que el porcentaje de eliminación de las tres celdas tenga que ser el mismo, dado que, probablemente la primera celda tenga mayor rendimiento debido a que en ésta se produzca la degradación de la fracción más fácilmente biodegradable o bioasimilable: nitratos y nitritos (procesos de nitrificación-desnitrificación y asimilación por parte de las macrófitas). Esta afirmación también podría explicar el rápido desarrollo de la vegetación de la primera celda en comparación con el de las otras dos.

A continuación, se procede a describir los resultados obtenidos en el mes de mayo del 2009. Se ha elegido este mes ya que la importante población de aves en el "Tancat" provocó la resuspensión de sólidos ya sedimentados y la consecuente generación de los mismos dentro de la primera celda que hasta ese momento, presentaba altos porcentajes de reducción. Este mismo efecto se detectó en el fósforo total, es decir, su concentración se incrementó al paso por *FG1*.

Para estudiar el comportamiento del nitrógeno total frente a esta perturbación, se han obtenido para el 04 de mayo del 2009, los porcentajes de eliminación de las diferentes celdas del humedal *FG*, y son los que aparecen en la siguiente figura:

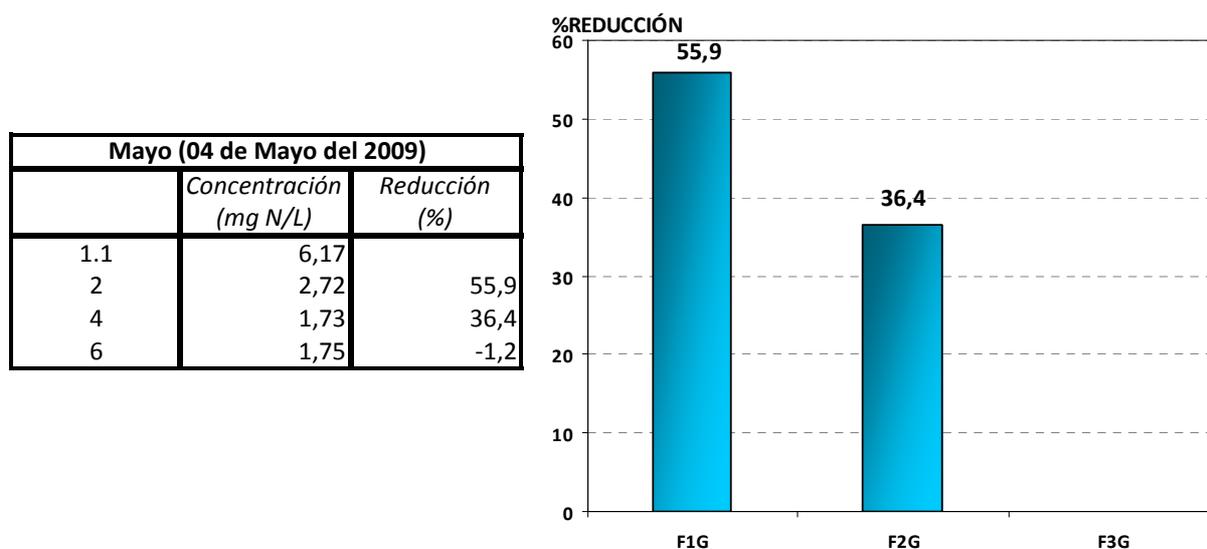


Figura 128: Evolución de la concentración y reducción del nitrógeno total a lo largo de los FG y referentes al 04 de mayo del 2009.

Claramente se observa como el nitrógeno total no se comporta del mismo modo que los parámetros estudiados anteriormente, es decir, no se produce una generación del mismo en la celda *FG1* como consecuencia de la resuspensión de sólidos ya sedimentados. No obstante, sí que se produce una ligera disminución en este día, del porcentaje de reducción en dicha celda y como se aprecia en las tablas 28 y 29, principalmente es debido a una reducción en la eliminación del nitrógeno orgánico respecto a la obtenida en el mes de abril.

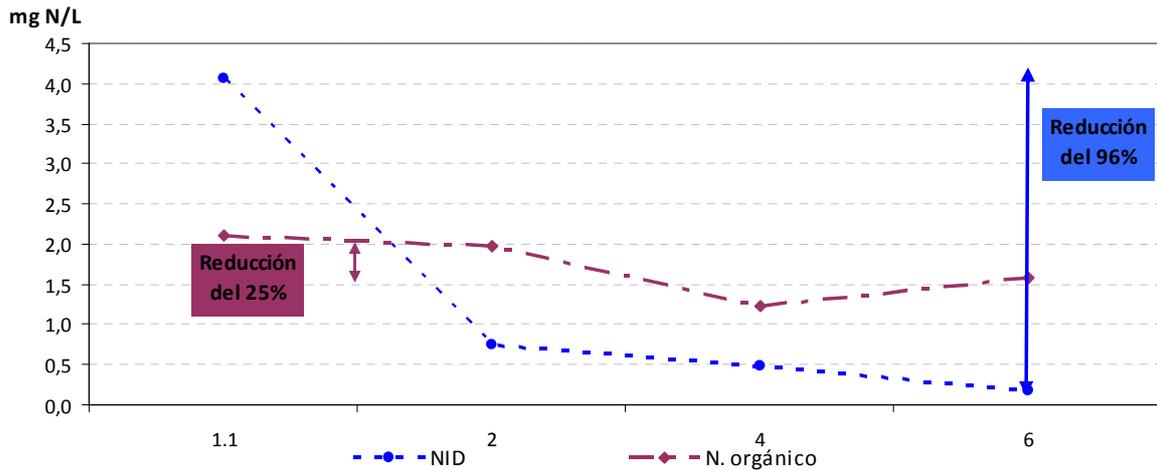
Tabla 28: Porcentajes medios de eliminación del amonio, nitratos y nitritos el 04 de mayo del 2009.

Nitrógeno soluble inorgánico	<i>FG1</i>	<i>FG2</i>	<i>FG3</i>	Global
%Reducción Amonio	80%	-83%	84%	94%
%Reducción Nitratos	84%	74%	9%	96%
%Reducción Nitritos	66%	81%	45%	97%

Tabla 29: Porcentajes medios de eliminación del nitrógeno orgánico el 04 de mayo del 2009.

	<i>FG1</i>	<i>FG2</i>	<i>FG3</i>	Global
% Reducción N.orgánico	6%	37%	-28%	25%

La representación de los valores obtenidos ese día a lo largo del humedal *FG* es la siguiente,

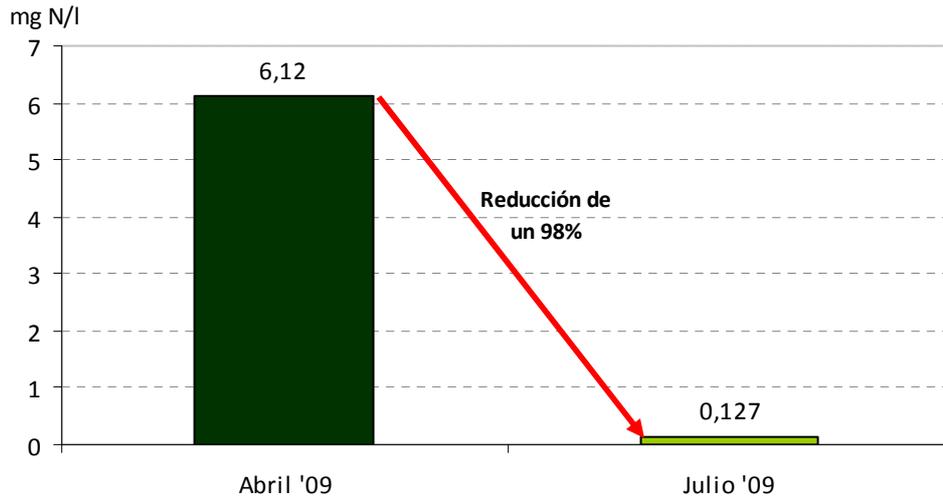


**Figura 129: Evolución de la concentración de NID (mg N/l) y de nitrógeno orgánico (mg N/l) a lo largo del humedal FG el 04 de mayo del 2009.**

Como se puede apreciar en la figura anterior, la generación de nitrógeno total en la celda tres fue debida a una producción en la misma de nitrógeno orgánico. El nitrógeno inorgánico, en cambio, fue eliminado en las tres celdas, consiguiéndose una reducción global del 96%.

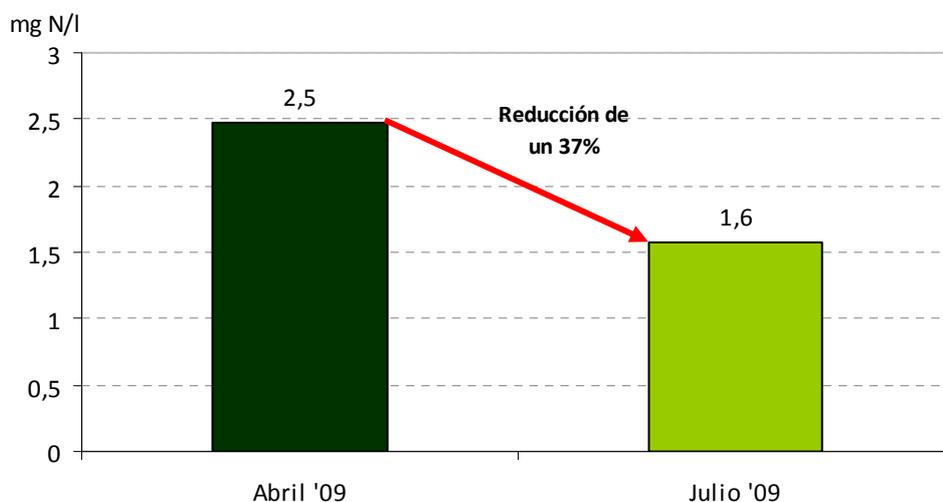
La siguiente tendencia que se ha decidido analizar corresponde al mes de julio del 2009 ya que, como se ha comentado en apartados anteriores, a principios del mismo se decidió incrementar el caudal de agua a tratar. Además, cabe recordar, que a partir de junio del 2009, la concentración de nitrógeno total en el agua de entrada al humedal FG desde el Barranco del Poyo, disminuyó considerablemente. La bajada en la concentración de este componente, principalmente se debió, a una reducción importante en el contenido de nitrógeno inorgánico disuelto en esa agua.

Con el fin de apreciar la magnitud de tal reducción, en la figura 130 se representan conjuntamente la concentración de NID en la entrada por el Barranco del Poyo el día 06 de abril del 2009 y el 27 de julio del 2009:



**Figura 130:** Concentración de NID (mg N/l) en la entrada por el Barranco del Poyo referente a los días: 06 de abril del 2009 y 27 de julio del 2009.

Sin embargo, esta reducción en la concentración de entrada no fue tan elevada en el caso del nitrógeno orgánico, tal y como podemos apreciar en la figura siguiente,



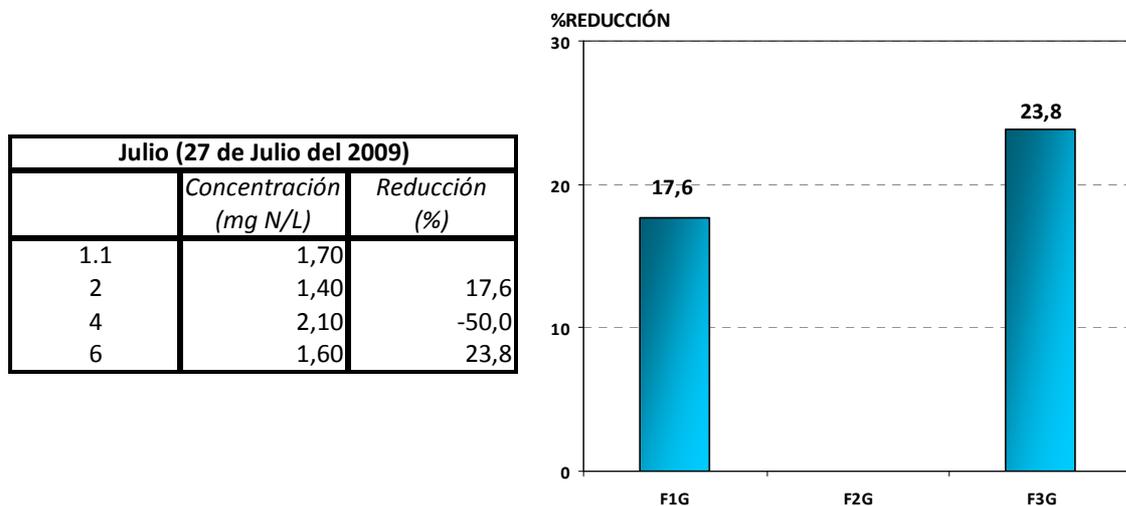
**Figura 131:** Concentración de nitrógeno orgánico (mg N/l) en la entrada por el Barranco del Poyo referente a los días: 06 de abril del 2009 y 27 de julio del 2009.

Por tanto, queda demostrado que el componente del nitrógeno total, cuya concentración más notablemente se redujo en el agua de entrada fue el inorgánico disuelto.

A diferencia del nitrógeno total, el incremento de la carga hidráulica no coincidió temporalmente con un periodo de bajas concentraciones de sólidos suspendidos y de

fósforo total en el agua de entrada al sistema desde el Barranco del Poyo. No obstante, este cambio sí que afectó a los porcentajes de eliminación de estos dos últimos parámetros. En el caso de los sólidos suspendidos, conllevó a que el porcentaje de eliminación de los sólidos suspendidos en la celda *FG1* disminuyera y que en la *FG2* aumentara, resultando ambas en valores de los mismos elevados y similares. En cuanto al fósforo total, el aumento de la carga hidráulica de entrada condujo a un incremento en los porcentajes de eliminación del mismo en la *FG1*.

Para estudiar el comportamiento del nitrógeno total frente a este aumento en la carga hidráulica de entrada, se han obtenido los porcentajes de eliminación conseguidos el 27 de julio del 2009 y son los que se muestran a continuación,



**Figura 132: Evolución de la concentración y reducción del nitrógeno total a lo largo de los *FG* y referentes al 27 de julio del 2009.**

Como se puede observar en la figura superior, en contra de lo sucedido en el caso de los sólidos suspendidos y con el fósforo total, el incremento de la carga hidráulica de entrada, no llevó a una mejoría en el porcentaje de eliminación, si no que por el contrario, éste se redujo considerablemente.

En las tablas 30 y 31, aparecen los porcentajes de eliminación, de los diferentes componentes de nitrógeno inorgánico disuelto y del nitrógeno orgánico en las celdas en serie del humedal *FG*:

Tabla 30: Porcentajes medios de eliminación del amonio, nitratos y nitritos el 27 de julio del 2009.

Nitrógeno soluble inorgánico	FG1	FG2	FG3	Global
%Reducción Amonio	58%	0%	-200%	-25%
%Reducción Nitratos	-280%	36%	-43%	-247%
%Reducción Nitritos	13%	5%	-79%	-47%

Tabla 31: Porcentajes medios de eliminación del nitrógeno orgánico el 27 de julio del 2009.

	FG1	FG2	FG3	Global
% Reducción N.orgánico	36%	-84%	34%	23%

Como se observa en las tablas 30 y 31 y en la figura que aparece a continuación, por un lado, el sistema no consiguió eliminar NID, a diferencia de lo sucedido hasta ese momento, en el que los porcentajes de eliminación de este componente eran muy cercanos al 100%. Por el otro lado, aunque el porcentaje de eliminación de nitrógeno orgánico fue bajo (del 23%), no hubo cambios significativos con respecto al periodo anterior.

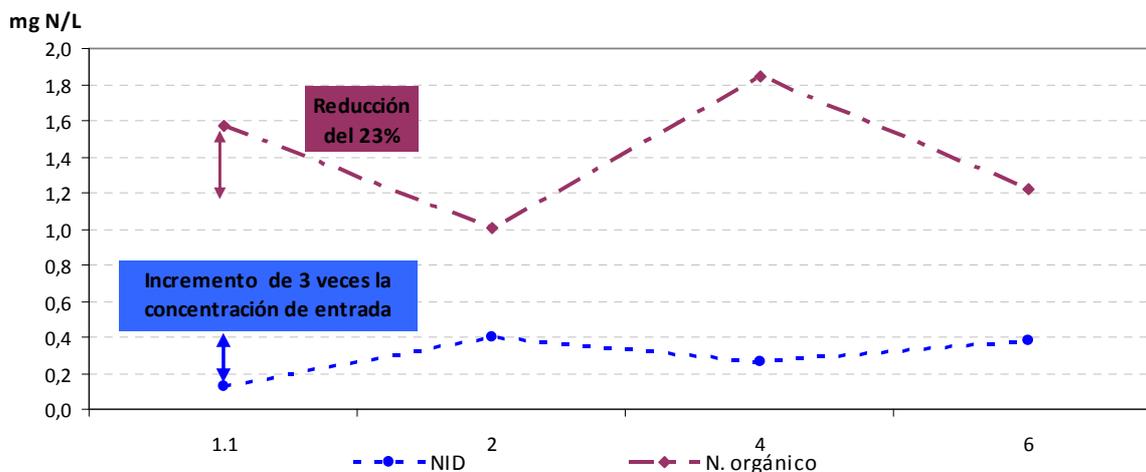
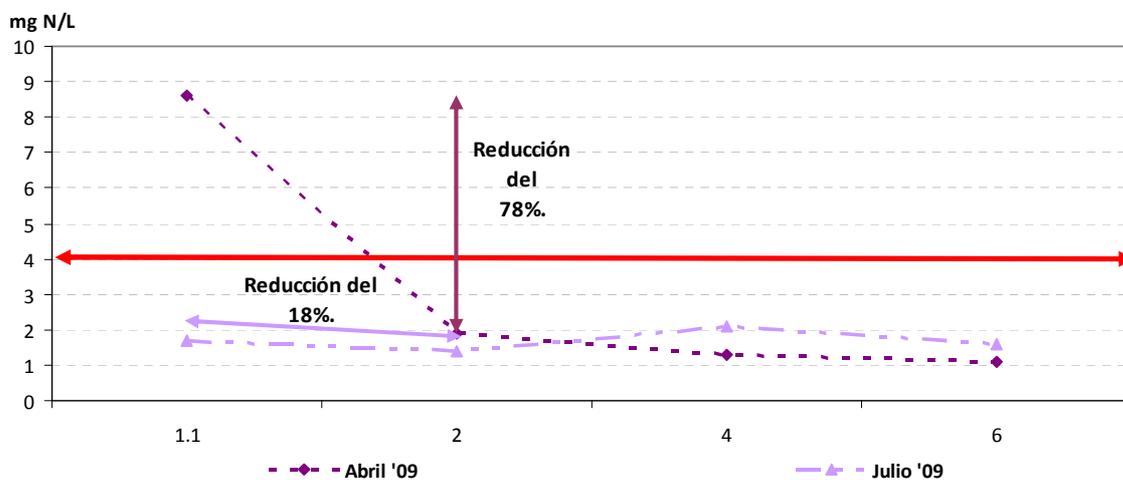


Figura 133: Evolución de la concentración de NID (mg N/l) y de nitrógeno orgánico (mg N/l) a lo largo del humedal FG.

De lo anterior se puede deducir que, la importante bajada en la concentración de NID en el agua de entrada al sistema, fue la causa de los bajos porcentajes de eliminación de nitrógeno total obtenidos durante el periodo de tiempo en que las concentraciones del mismo en la entrada fueron bajas. Ello es debido a que prácticamente todo el nitrógeno que se elimina en el sistema es NID.

Por tanto, podemos concluir que el grado de eliminación del nitrógeno total no responde a variaciones en la carga hidráulica, sino que responde a la concentración del mismo en el agua de entrada al sistema, de modo que, cuando esta última fue elevada, también lo fue el porcentaje de eliminación y viceversa.

Así pues, en la eliminación del nitrógeno total se observan dos comportamientos distintos en función de si la concentración de entrada al sistema es mayor o menor. Se ha visto, en la evolución temporal de los porcentajes de eliminación obtenidos, que el valor de 4 mg N/l marca la diferencia de comportamiento. Un ejemplo de ello puede ser representado por las tendencias obtenidas el 06 de abril del 2009 y el 27 de julio del 2009.

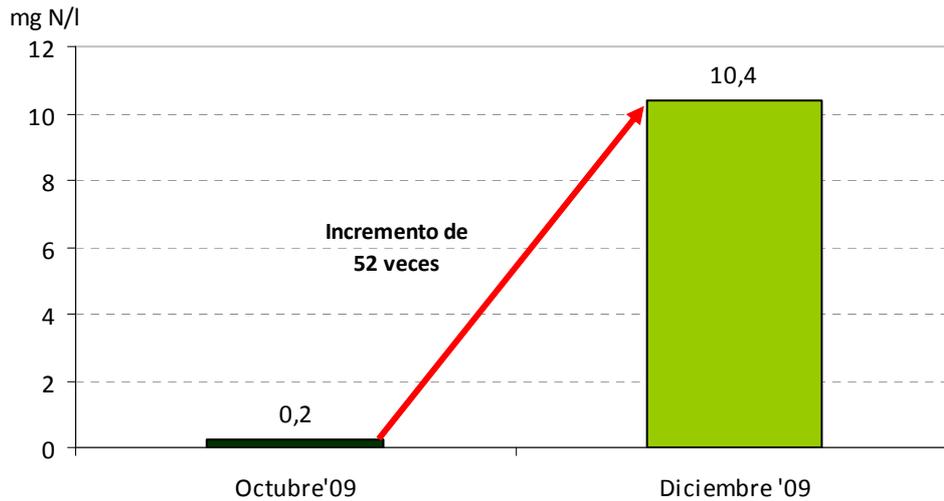


**Figura 134: Evolución del nitrógeno total a lo largo de las tres celdas grandes en serie. Los días seleccionados son: el 06 de abril del 2009 y el 27 de julio del 2009.**

Claramente se aprecia que el 06 de abril del 2009 (en el que la concentración en la entrada al sistema fue más alta que 4 mg N/l), la celda *FG1* alcanzó un elevado porcentaje de reducción (del 78%), siendo el promedio de los meses de abril y mayo del 69%. Por el contrario, el periodo en que las concentraciones a la entrada fueron inferiores a 4 mg N/l, la eliminación producida en esa misma celda fue muy baja, concretamente de un 18% el 27 de julio del 2009, siendo el promedio de eliminación del periodo comprendido desde junio hasta mediados de septiembre del 30%.

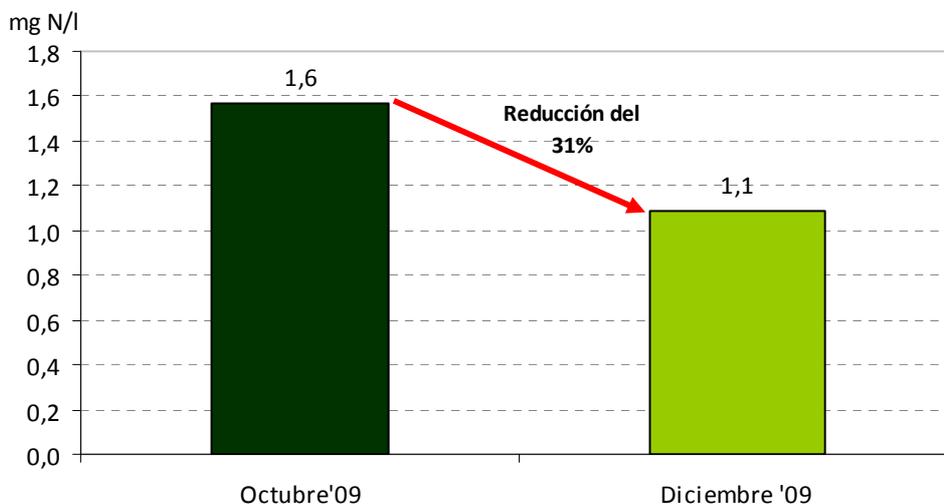
La reducción global de nitrógeno total del humedal, también disminuyó significativamente. En el periodo comprendido entre abril del 2009 y mayo del mismo año, fue del 79%, y disminuyó hasta un 24 % en el periodo comprendido desde junio hasta mediados de septiembre del 2009.

A partir de finales de noviembre del 2009 y hasta mediados del 2010, la concentración de nitrógeno total a la entrada del sistema procedente del Barranco del Poyo, volvió a ser mayor de 4 mg N/l. Para apreciar el incremento que en la concentración de NID se dio en este periodo, se compara en la siguiente figura los valores de éste en el agua del Barranco del Poyo los días 07 de octubre del 2009 y 16 de diciembre del 2009,



**Figura 135: Concentración de NID (mg N/l) en la entrada por el Barranco del Poyo referente a los días: 07 de octubre del 2009 y 16 diciembre del 2009.**

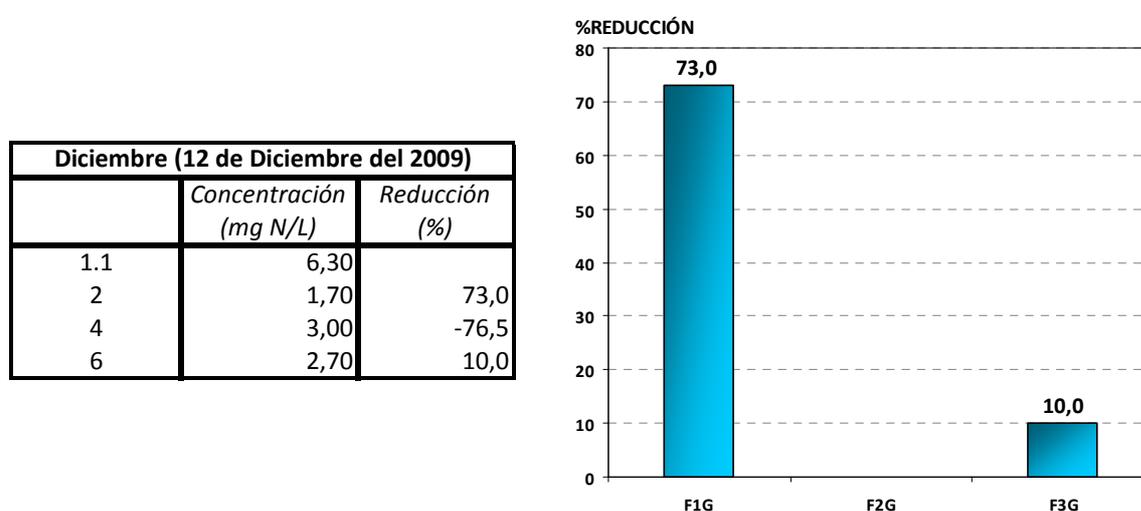
Sin embargo, este incremento en la concentración de entrada no se reprodujo en el caso del nitrógeno orgánico, tal y como podemos apreciar en la figura siguiente,



**Figura 136: Concentración de nitrógeno orgánico (mg N/l) en la entrada por el Barranco del Poyo referente a los días: 07 de octubre del 2009 y 16 diciembre del 2009.**

De las figuras superiores se deduce, que el componente principal que provocó que nuevamente la concentración de nitrógeno total en la entrada fuera elevada fue el NID (mg N/l).

Un ejemplo del grado de eliminación que se alcanzó en este periodo de tiempo se puede ver en la figura 137 donde se representan los porcentajes de eliminación obtenidos el 12 de Diciembre del 2009.



**Figura 137: Evolución de la concentración y reducción del nitrógeno total a lo largo de los FG y referentes al 12 de Diciembre del 2009.**

Como se observa, los porcentajes de eliminación de la celda *FG1*, volvieron a ser elevados, y también el porcentaje global de eliminación (del 71% en el periodo comprendido desde finales de noviembre hasta mediados de enero del 2010).

En las tablas 32 y 33, aparecen los porcentajes de eliminación, de los diferentes componentes de nitrógeno inorgánico disuelto y del nitrógeno orgánico en las celdas en serie del humedal *FG*:

**Tabla 32: Porcentajes medios de eliminación del amonio, nitratos y nitritos del 30 de noviembre del 2009 al 13 de enero del 2010.**

Nitrógeno soluble inorgánico	FG1	FG2	FG3	Global
%Reducción Amonio	80%	-106%	82%	93%
%Reducción Nitratos	64%	3%	40%	79%
%Reducción Nitritos	57%	-4%	20%	65%

Tabla 33: Porcentajes medios de eliminación del nitrógeno orgánico del 30 de noviembre del 2009 al 13 de enero del 2010.

	FG1	FG2	FG3	Global
% Reducción N.orgánico	15%	30%	-16%	31%

El sistema volvió a presentar altos porcentajes de eliminación en los diferentes componentes del nitrógeno inorgánico disuelto y en el contenido en NID global. En cambio, aunque el porcentaje de eliminación de nitrógeno orgánico mejoró ligeramente, no hubo cambios significativos con respecto al periodo anterior.

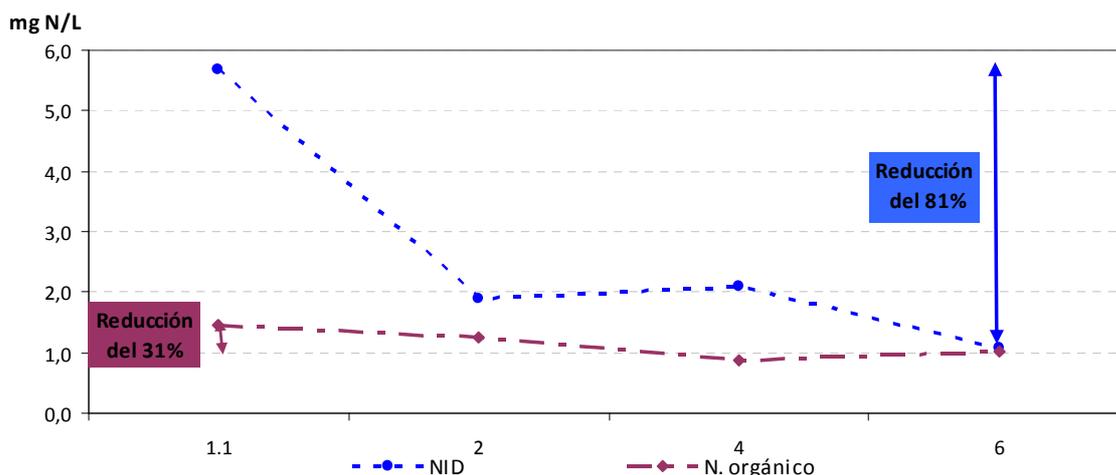


Figura 138: Evolución de la concentración de NID (mg N/l) y de nitrógeno orgánico (mg N/l) a lo largo del humedal FG.

Con respecto a los porcentajes globales de eliminación de todo el periodo de estudio, al igual que ocurría con los sólidos suspendidos y con el fósforo total, el humedal FG es el que mejores resultados proporcionó, con un valor del 60%. El sistema fp, alcanzó un valor del 55%, y el F4 de un 49%. Las razones de estas diferencias son las mismas que las que justifican las diferencias en los porcentajes de eliminación en los diferentes humedales para el caso de los sólidos suspendidos y que quedan comentadas en el apartado referido a estos.

Finalmente, al igual que lo observado con el fósforo total, se produjeron picos en la concentración de nitrógeno total (fundamentalmente debidos a elevadas concentraciones

de nitrógeno inorgánico disuelto) en el agua procedente del Barranco del Poyo, después de los dos eventos de lluvia importantes señalados en el apartado referido al primero. De nuevo, estos picos son resultado del efecto de lavado ejercido por la escorrentía superficial generada. En la figura siguiente se señalan estos dos picos de concentración para el caso del nitrógeno total,

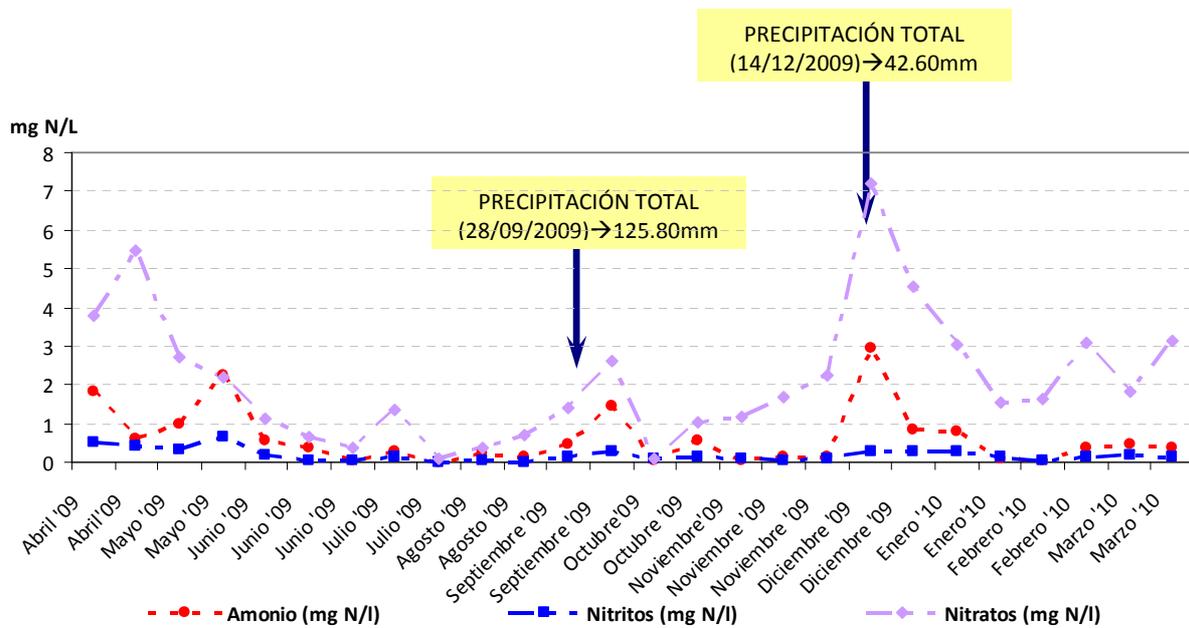


Figura 139: Evolución temporal del amonio, nitrato, nitrito en el Barranco del Poyo (1.1) durante todo el periodo de estudio.

En la siguiente figura se observa dicha concordancia de picos en las concentraciones de  $P_T$  y del  $N_T$ :

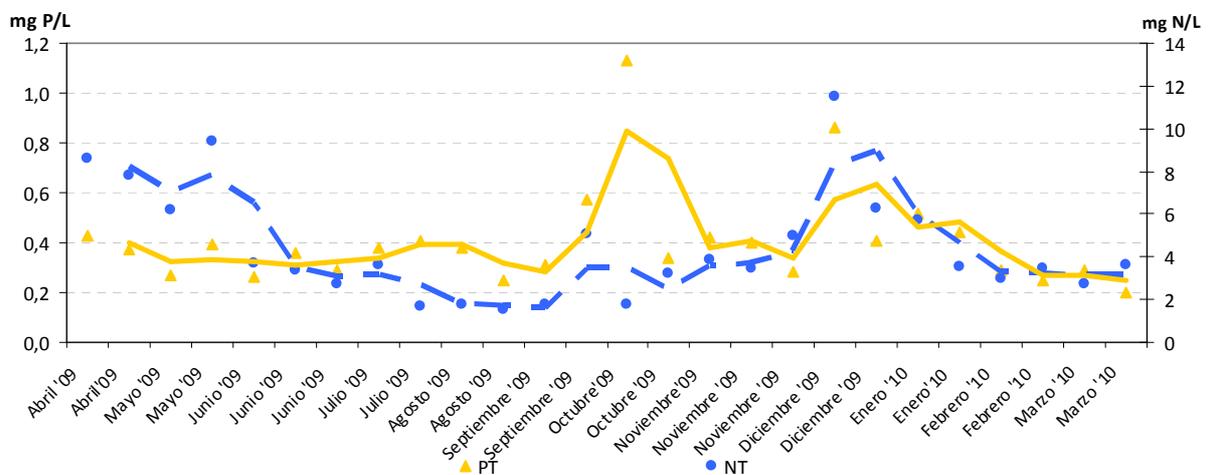
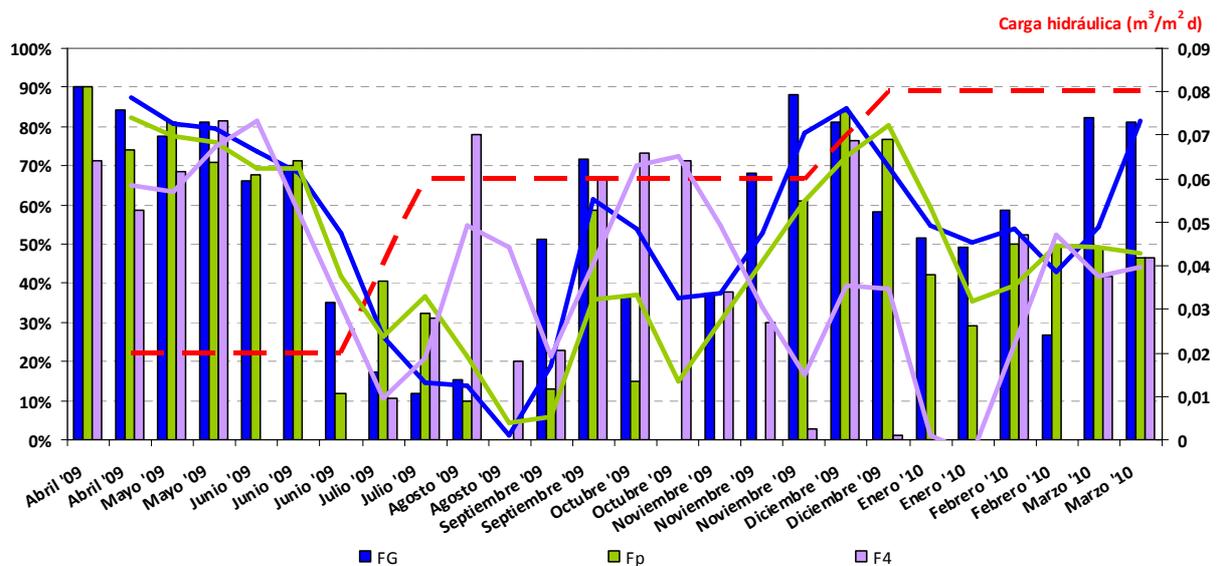


Figura 140: Evolución temporal del  $P_T$  y del  $N_T$  en la entrada por el Barranco del Poyo (1.1).

Tras el análisis espacial de las concentraciones obtenidas en diferentes periodos, se pasa a realizar una evaluación de los rendimientos de eliminación con cargas obtenidos tanto globalmente por el sistema formado por los tres humedales artificiales, como los obtenidos individualmente por cada uno de estos. Además, también se estudian, los rendimientos obtenidos a nivel de celda. Los resultados aparecen en las figuras que se presentan a continuación:



**Figura 141: Evolución temporal de los rendimientos de eliminación del nitrógeno total en las celdas en serie grandes y pequeñas (*FG* y *fp* respectivamente) y de la celda independiente (*F4*). También aparece representada la media de la carga hidráulica. Los rendimientos de eliminación negativos no aparecen reflejados en la figura. Las líneas azul, verde y morada representan la media móvil con un periodo de 2 de los *FG*, *fp* y *F4*, respectivamente.**

En la figura superior se observa que el humedal *FG* fue el que mejores rendimientos obtuvo, consiguiendo en el 40% de los casos, valores de reducción de la carga de entrada, mayores del 70% y en el 64% de los casos valores por encima del 50%.

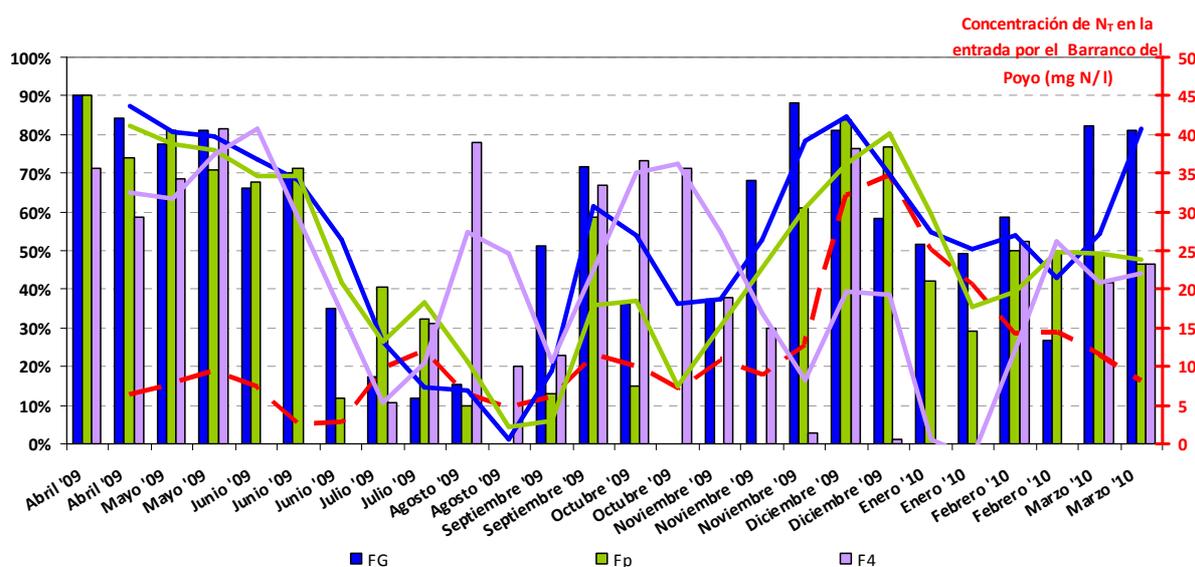
A diferencia de lo observado en el caso de los sólidos suspendidos y del fósforo total, la elevada presencia de aves en el Tancat en el mes de mayo del 2009, no se tradujo en una generación o bajada importante de los rendimientos de eliminación de nitrógeno total en los humedales artificiales. Tampoco la cosecha de las celdas uno de los humedales *FG* y *fp* provocó una bajada de los mismos. Además, el incremento de la carga hidráulica, tampoco condujo a un incremento en los rendimientos.

Como se recoge en la tabla inferior, los rendimientos más altos en los tres sistemas, se dieron en el periodo en que se trabajó con una carga hidráulica de  $0,02 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$ .

**Tabla 34: Rendimientos obtenidos en eliminación de nitrógeno total en función de la carga hidráulica de operación y el humedal considerado.**

Humedales	Carga Hidráulica ( $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$ )		
	$0.02\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$	$0.06\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$	$0.08\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$
<b>FG</b>	76%	47%	62%
<b>fp</b>	71%	40%	60%
<b>F4</b>	68%	44%	43%
<b>GLOBAL</b>	72%	48%	57%

No obstante, al igual que anteriormente con los porcentajes de eliminación, los rendimientos de los tres sistemas, toman un valor mayor o menor en función de la concentración de nitrógeno total en la entrada a los mismos. Por tanto, tal y como se puede observar en la figura siguiente, cuando la concentración en la entrada fue elevada, también lo fueron los rendimientos y cuando fue baja, los rendimientos también fueron bajos. La tendencia de los rendimientos de los sistemas *FG* y *fp*, representada mediante la media móvil, sigue un patrón muy similar a la evolución de la concentración en la entrada por el Barranco del Poyo durante todo el periodo de estudio.



**Figura 142: Evolución temporal de los rendimientos de eliminación del nitrógeno total en las celdas en serie grandes y pequeñas (*FG* y *fp* respectivamente) y de la celda independiente (*F4*). También aparece representada la concentración de  $\text{N}_T$  en la entrada por el Barranco del Poyo (mg/l). Los rendimientos de**



Tabla 35 : Rendimientos obtenidos en eliminación de nitrógeno total en las tres celdas grandes.

Celda	Rendimiento
<b>FG1</b>	44%
<b>FG2</b>	11%
<b>FG3</b>	21%
<b>GLOBAL</b>	59%

En la figura 143 y en la tabla 35, se observa como el rendimiento más alto se obtuvo en la celda *FG1*, lo cual es lógico ya que la concentración de nitrógeno total a su entrada, fue más elevada que la de entrada a las celdas dos y tres donde, el agua entró previo tratamiento en una celda anterior y por lo tanto, con las concentraciones de  $N_T$  reducidas.

A continuación, se presenta la evolución de los rendimientos de eliminación de cada una de las tres celdas pequeñas y la concentración de nitrógeno total (mg N/l) en la entrada por el Barranco del Poyo, en función del tiempo:

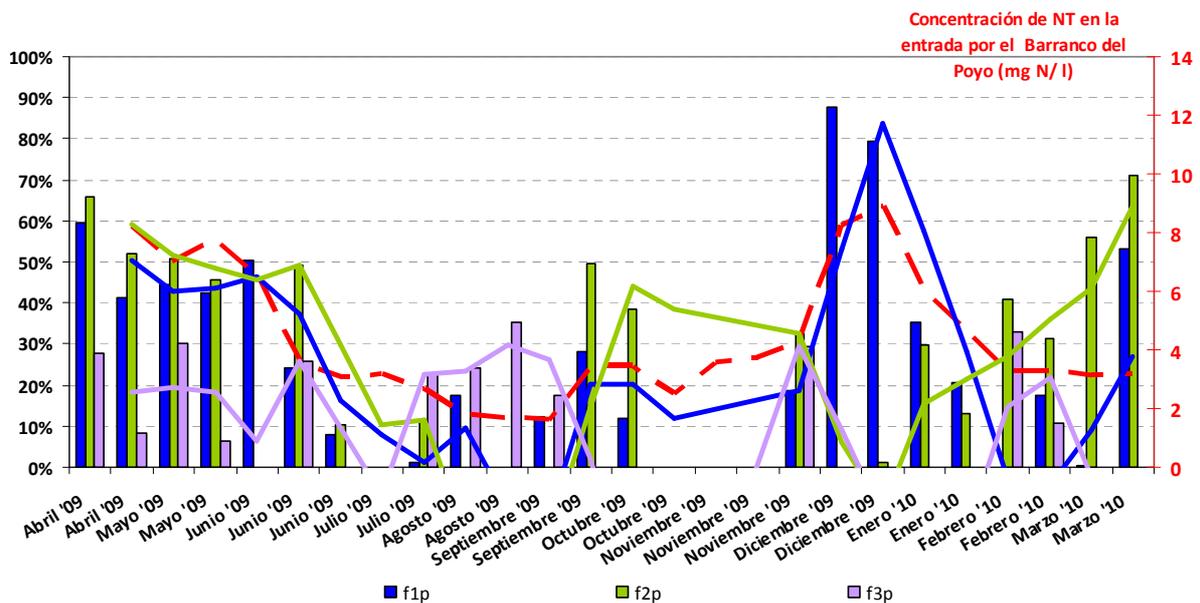


Figura 144: Evolución temporal de los rendimientos de eliminación del nitrógeno total en las celdas en serie pequeñas. También aparece representada la concentración de nitrógeno total en la entrada por el Barranco de Poyo. Los rendimientos de eliminación negativos no aparecen reflejados en la figura. La línea azul, la verde y la morada representan la media móvil con un periodo de 2 de los *f1p*, *f2p* y *f3p*, respectivamente.

Al igual que en el sistema de celdas grandes en serie, la tendencia de los rendimientos de la celda *fp1*, reproduce el patrón seguido por la concentración de nitrógeno total en la

entrada de esa misma celda. Las tendencias de los rendimientos obtenidos en las otras dos celdas no reproducen tan detalladamente ese patrón.

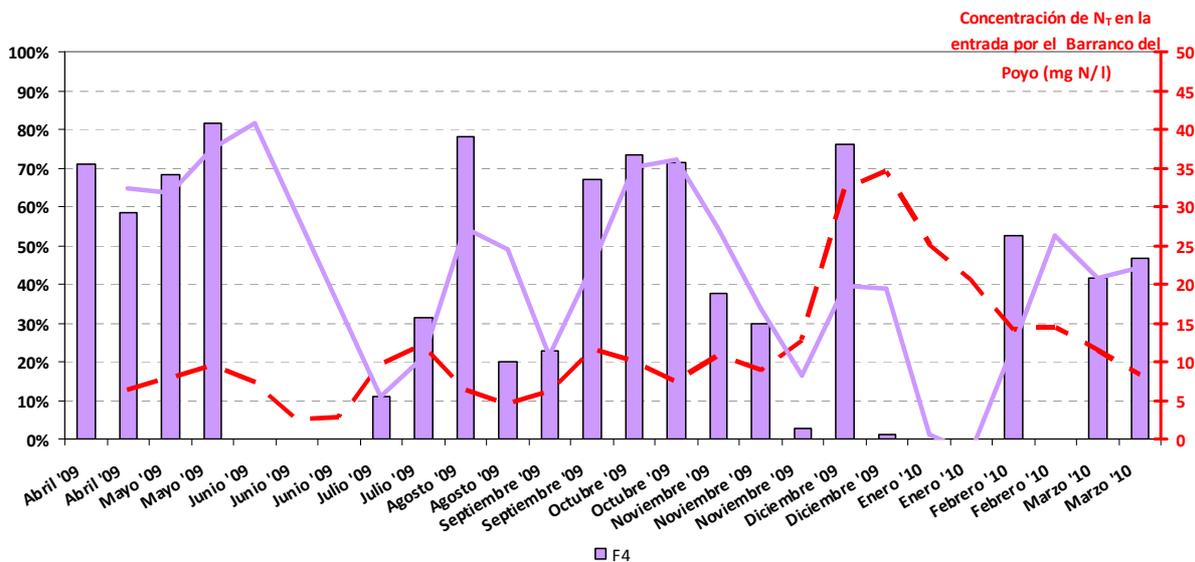
Los rendimientos globales de eliminación de las tres celdas pequeñas dispuestas en serie fueron los siguientes:

**Tabla 36: Rendimientos obtenidos en eliminación de nitrógeno total en las tres celdas pequeñas.**

Celda	Rendimiento
<b>Fp1</b>	36%
<b>Fp2</b>	27%
<b>Fp3</b>	3%
<b>GLOBAL</b>	57%

Al igual que ocurre con el humedal FG, el mejor rendimiento lo brindó la celda uno, por el mismo motivo que el explicado para dicho humedal.

Finalmente, se representa en la figura inferior, la evolución de los rendimientos obtenidos en el humedal F4 y la concentración a la entrada del mismo por el Puerto de Catarroja:



**Figura 145: Evolución temporal de los rendimientos de eliminación del nitrógeno total en la celda 4. También aparece representada la concentración (mg N/l) a la entrada de dicho Humedal proveniente del Puerto de Catarroja excepto en el periodo comprendido entre abril y mediados de junio del 2009, en que la concentración representadas es la que procede del Barranco del Poyo. Los rendimientos de eliminación**

negativos no aparecen reflejados en la figura. La línea azul representa la media móvil con un periodo de 2 del **F4**.

Como ocurría con los otros dos humedales, la tendencia de los rendimientos obtenidos, sigue el patrón que genera la evolución de la concentración de nitrógeno total en el agua de entrada al humedal artificial.

Los resultados globales, que corresponden a todo el sistema de humedales artificiales, se han calculado contando con la evapotranspiración. Estos son los que aparecen en la siguiente tabla:

**Tabla 37: Rendimientos globales de eliminación del nitrógeno total.**

	Carga de entrada (Kg/año)	Carga de salida (Kg/año)	Carga eliminada (Kg/año)	% Reducción	Caudal promedio (L/s)
Con evapotranspiración	8274,9	3695,8	4579,2	56	58.5

El conjunto de todo el sistema, eliminó el 56% del nitrógeno total que le entró durante el periodo anual estudiado. En total se eliminaron 4579,2 Kg de N<sub>T</sub> en todo el año.

Los resultados obtenidos por sectores y contando con la evapotranspiración son los que se muestran en la tabla de a continuación,

**Tabla 38: Rendimientos por sectores de eliminación del nitrógeno total.**

	Carga de entrada (Kg/año)	Carga de salida (Kg/año)	Carga eliminada (Kg/año)	% Reducción	% Caudal de entrada	Carga superficial de entrada (g N/m <sup>2</sup> *d)	Carga Hidráulica media (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *d)
Filtros Grandes	4286.4	1754	2532.4	59	56	0.240	0.06
Filtros Pequeños	1219.1	523.4	695.7	57	15	0.228	0.05
Filtro 4	2769.5	1418.4	1351.1	49	29	0.296	0.06

Resumiendo, el sistema de celdas grandes en serie eliminó el 59% de la carga de nitrógeno total que le entró, siendo este el mejor rendimiento obtenido de los tres sistemas. Las celdas pequeñas consiguieron una reducción de la carga de nitrógeno de entrada de un

57%, y el menor rendimiento lo presentó el sistema F4 con un 49% de reducción de la carga de entrada.

Por último, en la siguiente figura se representa la masa de nitrógeno total eliminada acumulada:

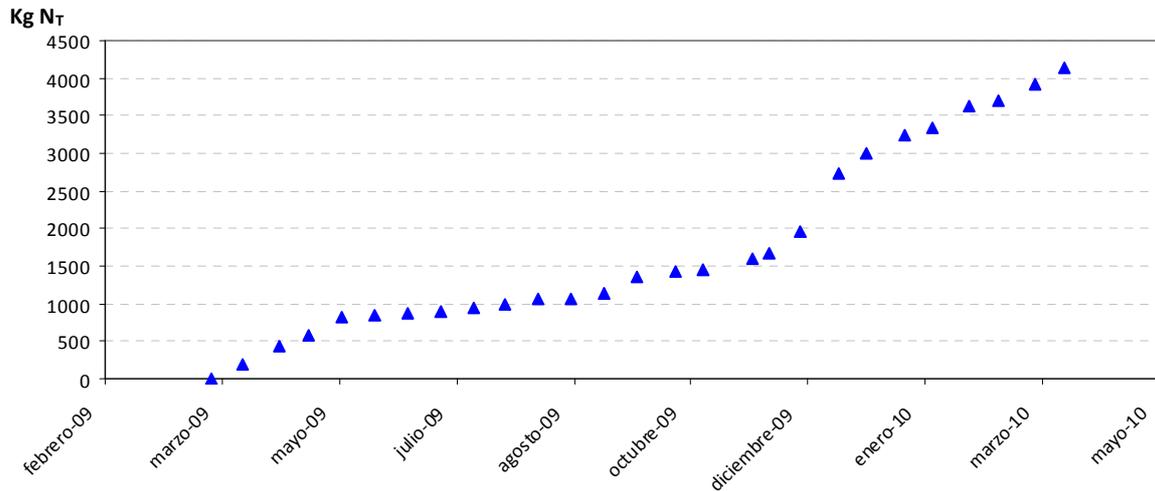
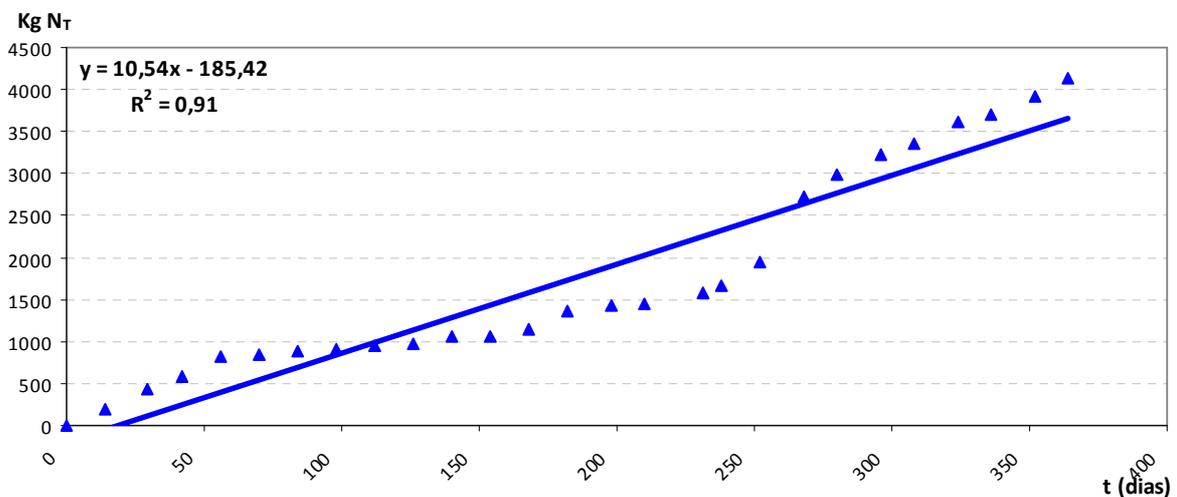


Figura 146: Masa de nitrógeno total eliminada acumulada (Kg).

En la figura superior se puede observar como a diferencia de la eliminación de fósforo total y de sólidos suspendidos, el nitrógeno total sigue una tendencia lineal desde los primeros meses (abril, mayo y junio) a pesar de que en ellos el grado de cobertura vegetal era muy bajo y la presencia de aves muy abundante, propiciando por tanto, la resuspensión de la fase particulada ya sedimentada.



**Figura 147: Ajuste lineal al nitrógeno total acumulado eliminado (Kg N).**

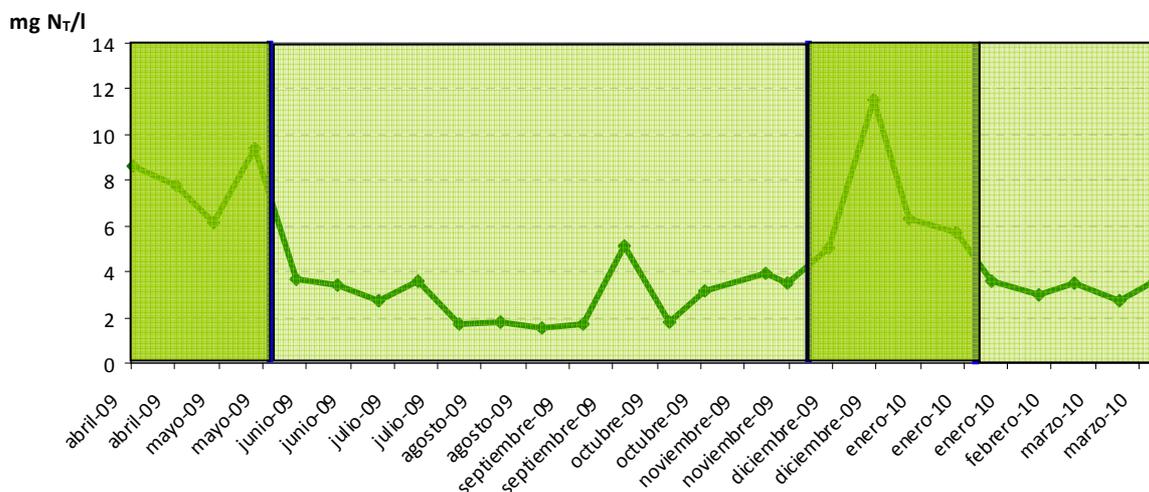
Del ajuste lineal a todos los valores obtenidos de nitrógeno total acumulado eliminado se obtiene que la velocidad de eliminación de dicho componente fue de 10,54 Kg N/d.

No obstante, si se observa la tendencia resultante de representar los kilogramos de  $N_T$  eliminados acumulados en función del tiempo (figura 146), se detecta como durante el periodo en el que las concentraciones de dicho compuesto fueron bajas en la entrada al sistema, se produce un cambio de pendiente, siendo esta menor que la del periodo anterior (donde cabe recordar que las concentraciones a la entrada eran significativamente más elevadas).

Con el objetivo de estudiar la variación de la velocidad de eliminación del nitrógeno total en función de la concentración de dicho componente en el agua de entrada al sistema, se ha dividido el periodo de estudio en cuatro tramos: dos de ellos son periodos de tiempo con concentraciones a la entrada mayores de 4 mg N/l y los otros dos lo son con concentraciones menores de 4 mg N/l. Estos cuatro tramos son los siguientes:

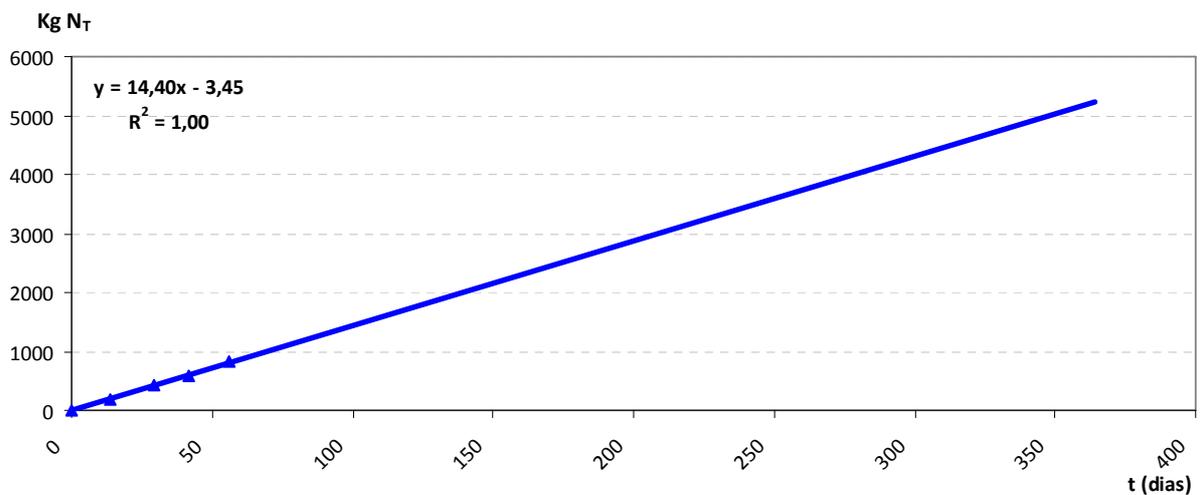
- I. Abril 2009-Mayo 2009.
- II. Junio 2009-Mediados de Noviembre 2009.
- III. Mediados de Noviembre 2009- Mediados de Enero 2010.
- IV. Mediados de Enero 2010-Marzo 2010.

En la siguiente figura aparecen remarcados estos 4 periodos de tiempo:

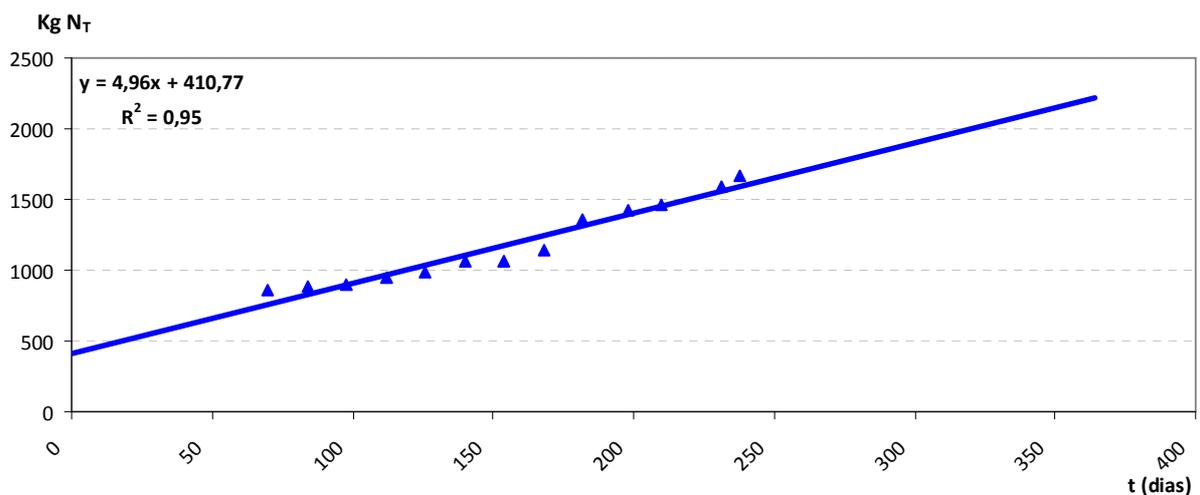


**Figura 148: Concentraciones de nitrógeno total (mg N/L) en el agua de entrada al sistema por el Barranco del Poyo, desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010. Los tramos remarcados con un tono de verde más oscuro representan los periodos de tiempo con concentraciones de nitrógeno total (mg N/L) mayores que 4 mg N/l y los tramos remarcados con un tono de verde más claro representan los periodos de tiempo con concentraciones de nitrógeno total (mg N/L) menores que 4 mg N/l.**

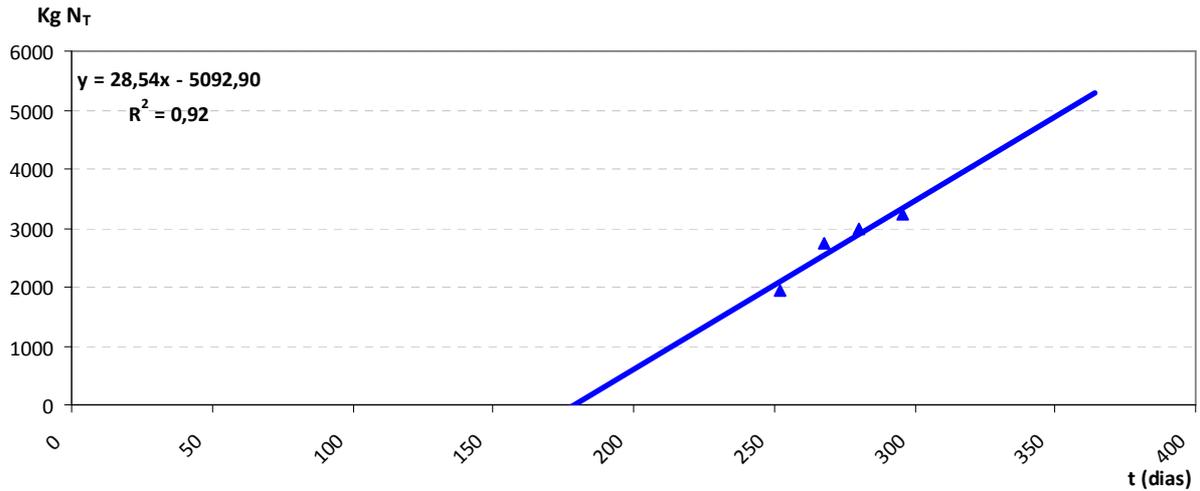
Los resultados obtenidos en cada tramo, del ajuste lineal a los valores obtenidos de nitrógeno total acumulado eliminado en cada tramo, son los que aparecen en las siguientes figuras:



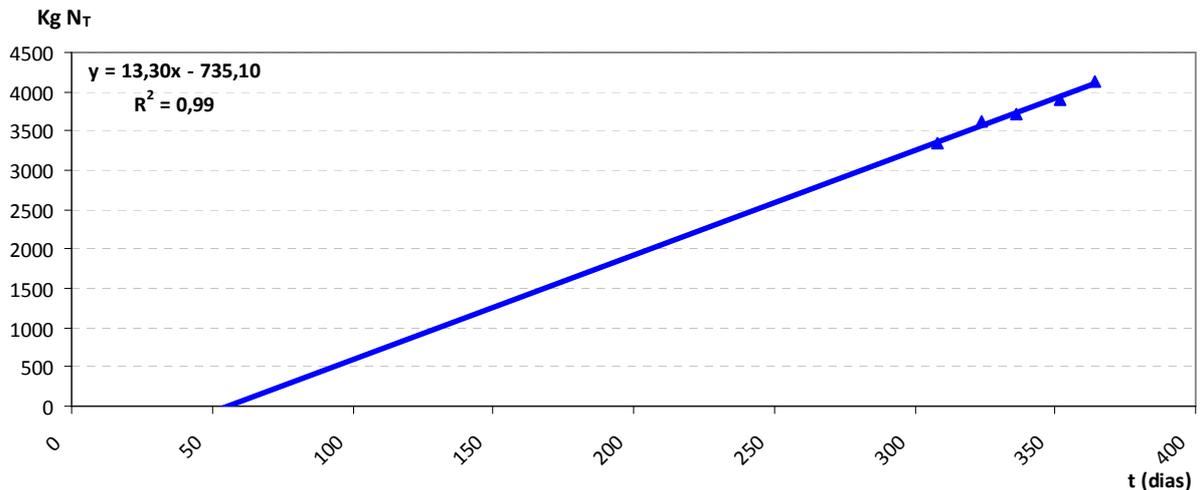
**Figura 149: Ajuste lineal al nitrógeno total acumulado eliminado (Kg N) en el tramo I.**



**Figura 150: Ajuste lineal al nitrógeno total acumulado eliminado (Kg N) en el tramo II.**



**Figura 151: Ajuste lineal al nitrógeno total acumulado eliminado (Kg N) en el tramo III.**



**Figura 152: Ajuste lineal al nitrógeno total acumulado eliminado (Kg N) en el tramo IV.**

En las figuras anteriores, se observa claramente el cambio de pendiente que se experimenta al pasar de un tramo determinado a su consecutivo, debido al aumento o disminución, según sea el caso, de la concentración de nitrógeno total en el agua de entrada al sistema. De modo que, la pendiente obtenida es mayor (por tanto, mayor es la velocidad de eliminación) en los periodos de tiempo en que la concentración de N<sub>T</sub> en la entrada al sistema es mayor que 4 mg N/l y menor (también menor velocidad de eliminación del mismo) en los periodos de tiempo en que dicha concentración es menor que 4 mg N/l.

La tabla 39 recoge las velocidades de eliminación de nitrógeno total en los diferentes tramos:

Tabla 39: Concentraciones medias y velocidades de eliminación del nitrógeno total en los cuatro tramos.

TRAMOS	CONCENTRACIONES PROMEDIO EN EL BARRANCO DEL POYO (mg N/L)	VELOCIDADES DE ELIMINACIÓN
I.	8.0	14.40 Kg N/ d
II.	2.9	4.96 Kg N/ d
III.	7.1	28.54 Kg N/ d
IV.	3.3	13.30 Kg N/ d

Nuevamente en la tabla queda demostrado que las mayores velocidades de eliminación se dan en los periodos con concentraciones de  $N_T$  en la entrada mayores que 4 mg N/l.

En base al conocimiento de una relación existente entre la velocidad de eliminación del  $N_T$  y la concentración del mismo a la entrada del sistema desde el Barranco del Poyo, se ha procedido a obtener la ecuación que representa dicha relación. El resultado es el que aparece en la figura siguiente:

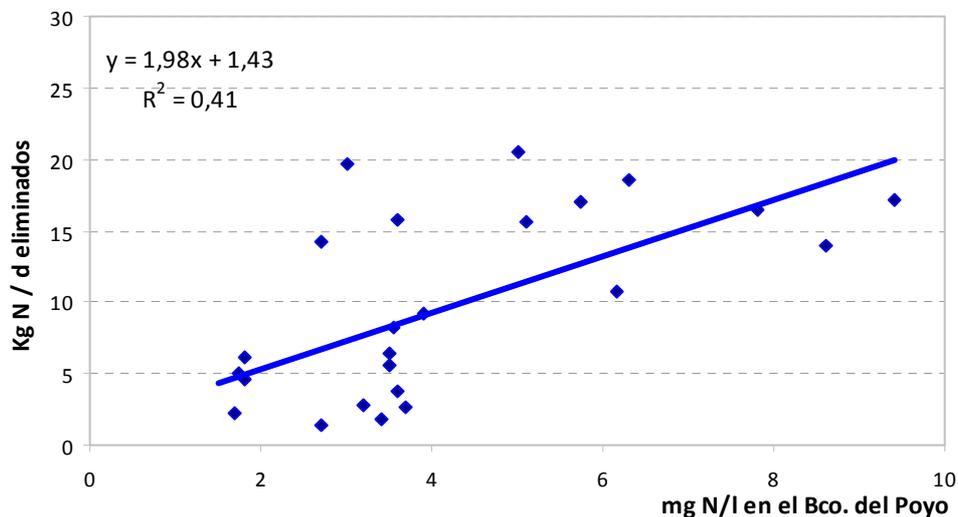


Figura 153: Relación entre la velocidad de eliminación del nitrógeno total (Kg N/d) y la concentración de entrada de  $N_T$  desde el Barranco del Poyo.

Como se puede comprobar en la figura 153, existe una buena correlación entre la concentración de entrada de nitrógeno total y la velocidad con que se eliminará dicha

concentración. De este modo, conociendo la concentración en la entrada, podemos hacernos una idea de la velocidad de eliminación con que trabajará el humedal.

Para terminar con este apartado referido al nitrógeno total, se ha calculado el porcentaje de nitrógeno eliminado de las aguas del lago.

Si se toma el valor promedio de nitrógeno total obtenido del Barranco del Poyo durante el año de estudio, es decir, 4.4 mg N/l, como valor medio del nitrógeno total contenido en el lago de l'Albufera durante un año, y considerando un volumen de agua en el mismo lago de 21 Hm<sup>3</sup>; se obtiene, que con el sistema de humedales artificiales se ha eliminado en un año el 5 % del nitrógeno total de dicho lago.

## **7.6 FITOPLANCTON.**

Una de las finalidades de tratar las aguas del propio lago mediante el empleo del sistema de humedales artificiales, es conseguir reducir los contenidos de fitoplancton en las mismas.

Con el fin de estudiar el efecto que el sistema de tratamiento ejerce sobre la biomasa de fitoplancton presente en las aguas de entrada al sistema, se elige como parámetro de estudio la concentración de Clorofila *a* (Cl *a*), que es un pigmento presente en las plantas y en las algas, fundamental para llevar a cabo la fotosíntesis.

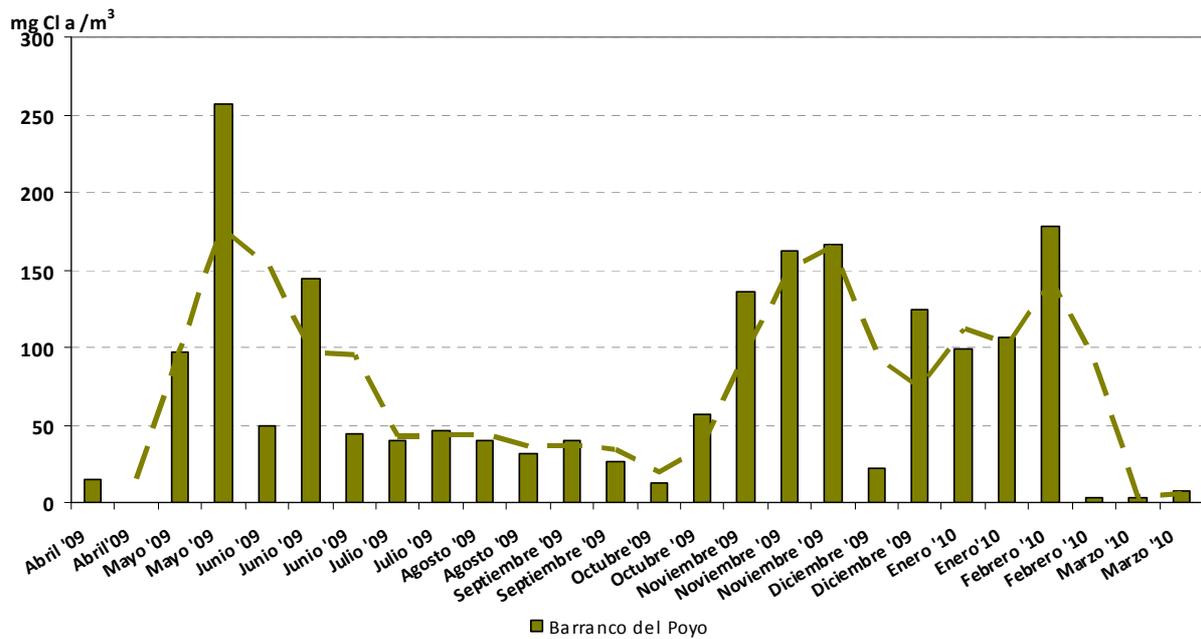
La medición de la Cl *a* permite obtener una estimación de la concentración de fitoplancton en las aguas de estudio.

### **7.6.1 ELIMINACIÓN DE CLOROFILA *a*.**

La concentración de Clorofila *a* en la entrada desde el Barranco del Poyo se situó entre 252 µg/l y 3 µg/l, siendo el valor medio de 76 µg/l. Estos valores son muy similares a los que presentó el agua de entrada desde la acequia del Puerto de Catarroja, cuyo rango varió entre 232 µg/l y 4 µg/l, siendo su valor medio de 65 µg/l. En las dos aguas de entrada al sistema de humedales, existió una alta variabilidad (desviación estándar entorno a un 90% del valor medio) en los valores de Cl *a*. Además, el valor medio de la concentración de Cl *a* a la entrada del humedal *F4* (es decir, punto 8.1), fue muy similar al correspondiente al Puerto

de Catarroja, aunque su variabilidad fue significativamente menor, debido a la posible homogenización que se produce como resultado de una mezcla de los caudales de entrada al sistema.

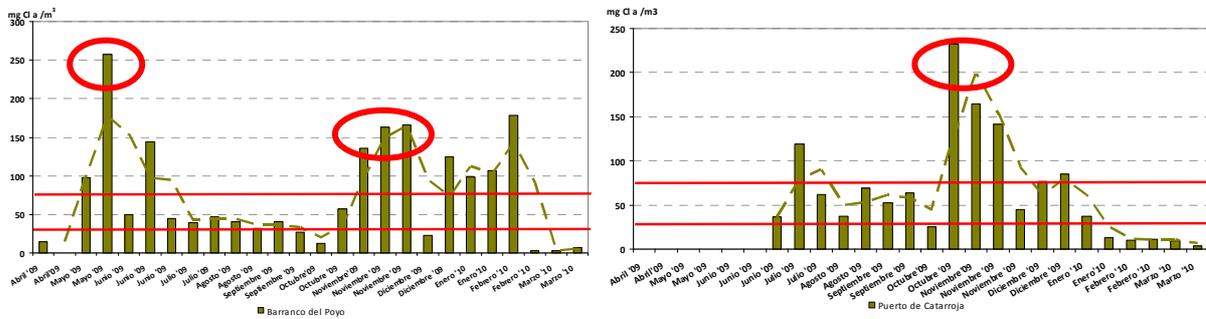
A continuación, se representa la evolución de la concentración de  $Cl a$  contenida en el agua de entrada al sistema por el Barranco del Poyo (figura 154) y por el Puerto de Catarroja (figura 155) y la de entrada al sistema *F4* (figura 156):



**Figura 154:** Concentraciones de nitrógeno total ( $mg Cl a / m^3$ ) en el agua de entrada al sistema por el Barranco del Poyo, desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010. La línea discontinua representa la media móvil con un periodo de 2.



1982, establece que un lago es hipereutrófico si su concentración media de Clorofila  $a$  es superior  $25 \text{ mg Cl } a/\text{m}^3$  y la concentración máxima superior a  $75 \text{ mg Cl } a/\text{m}^3$ . En base a estos valores, nuevamente se confirma el estado de hipereutrofia de las aguas de entrada a los humedales artificiales del Tancat de la Pipa.



**Figura 157: Concentraciones medidas ( $\mu\text{g Cl } a /\text{L}$ ) en el Barranco del Poyo y en el Puerto de Catarroja. La línea discontinua representa la media móvil con un periodo de 2. Las líneas rojas representan la concentración de Clorofila  $a$  de  $25 \text{ mg Cl } a/\text{m}^3$  y la concentración a  $75 \text{ mg Cl } a/\text{m}^3$ .**

No obstante, aunque los valores medios de Cl  $a$  en las dos entradas fueron superiores a  $25 \text{ mg Cl } a/\text{m}^3$ , existe una alta variabilidad dentro del periodo anual. Los máximos se dieron en primavera y en otoño, y los valores más bajos en verano e invierno.

En las siguientes figuras aparecen las concentraciones medias, para todo el periodo de estudio, y la correspondiente desviación estándar, de cada uno de los puntos de muestreo de calidad de aguas:

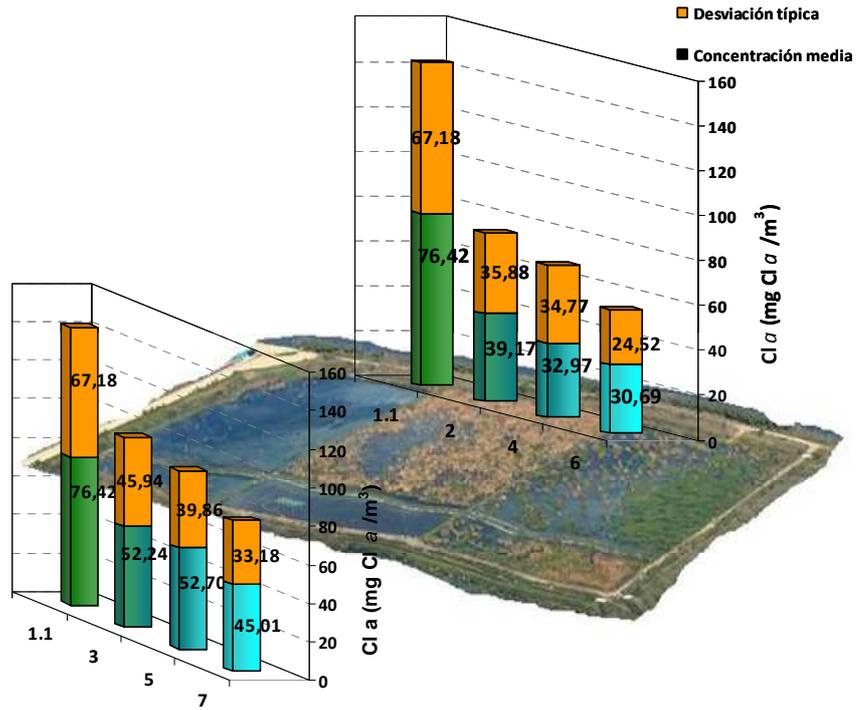


Figura 158: Media (tramo inferior) y desviación típica (tramo superior) de los datos recogidos en los punto de muestreo 1.1, 2, 3, 4, 5, 6, y 7, durante todo el periodo anual (06/04/2009 al 22/03/2010).

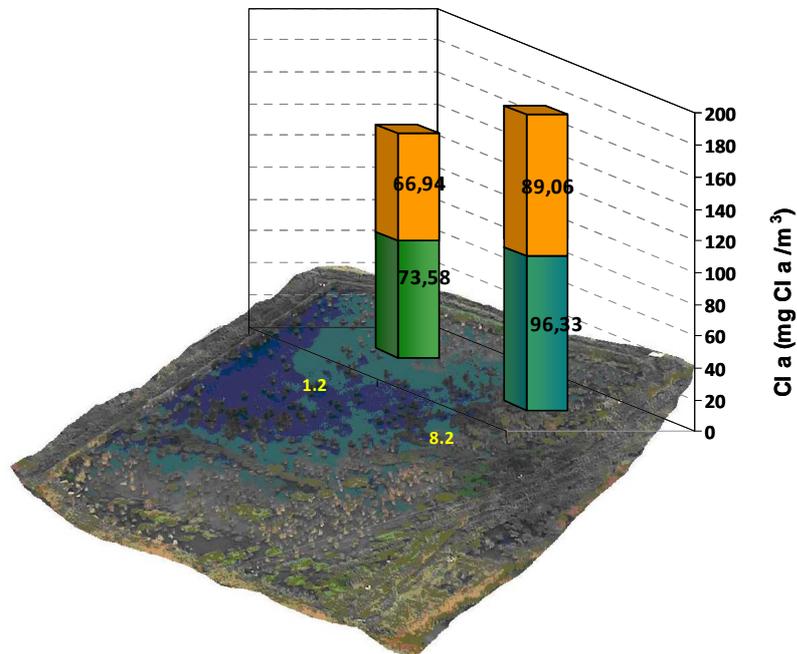


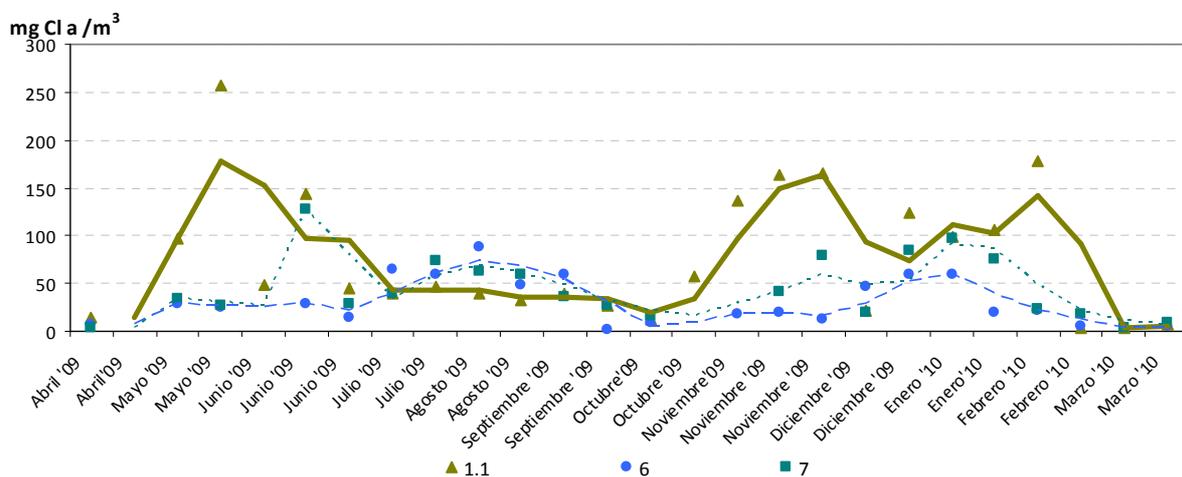
Figura 159: Media (tramo inferior) y desviación típica (tramo superior) de los datos recogidos en los punto de muestreo 1.2 y 8.2, durante todo el periodo anual (06/04/2009 al 22/03/2010).

En la figura 158 se observa que el promedio de los valores de concentración de clorofila  $a$  para todo el año decrece a lo largo de los sistemas  $FG$  y  $fp$ , siendo la concentración de salida del sistema  $FG$  menor que la del  $fp$  y por tanto, la reducción global conseguida en el primer sistema mayor que la conseguida en el segundo.

Sin embargo, en la figura 159 se aprecia como la concentración promedio de  $Cl a$  en el  $F4$  no se reduce desde la entrada al mismo hasta la salida, sino que aumenta. Por tanto, se puede decir que el humedal  $F4$  en el promedio de todo el periodo de estudio, se comportó como exportador de  $Cl a$  (medida indirecta, como se ha indicado, del fitoplancton presente en las aguas).

Además, en la figura 158 también se puede detectar como la variabilidad de concentración de  $Cl a$  en la entrada a los humedales  $FG$  y  $fp$ , va disminuyendo conforme se avanza de una celda de tratamiento a la siguiente. No obstante, se sigue manteniendo una variabilidad alta. Por el contrario, en el humedal  $F4$  la variabilidad de la concentración de  $Cl a$  en su entrada se ve incrementada a la salida del mismo.

La evolución temporal de las concentraciones en la entrada por el Barranco del Poyo y a la salida de los humedales  $FG$  y  $fp$ , fue la siguiente:



**Figura 160: Evolución temporal de la clorofila  $a$  en la entrada por el Barranco del Poyo (1.1) y a la salida de las celdas  $F3G$  (6) y  $f3p$  (7). Las líneas representan la media móvil con un periodo de 2.**

Como se observa en la figura 160, desde el mes de abril hasta junio del 2009 los humedales  $FG$  y  $fp$  estuvieron reduciendo la concentración de clorofila  $a$  desde la entrada

hasta la salida de los mismos. El promedio de reducción durante esos meses en el sistema *FG* fue de un 79% y en el *fp* de un 56%.

Al igual que ocurrió con los sólidos suspendidos y el fósforo total, durante los meses de mayo y de junio del 2009, con la densidad de vegetación todavía baja y con la llegada de importantes poblaciones de aves al Tancat, al generarse una resuspensión de sólidos desde el sedimento, se incrementó la concentración de clorofila  $a$  a la salida de los humedales *FG* y *fp*; no obstante, nunca llegaron a ser superiores a los de la entrada, por ello, los porcentajes de eliminación desde la entrada hasta la salida durante todo el periodo fueron positivos.

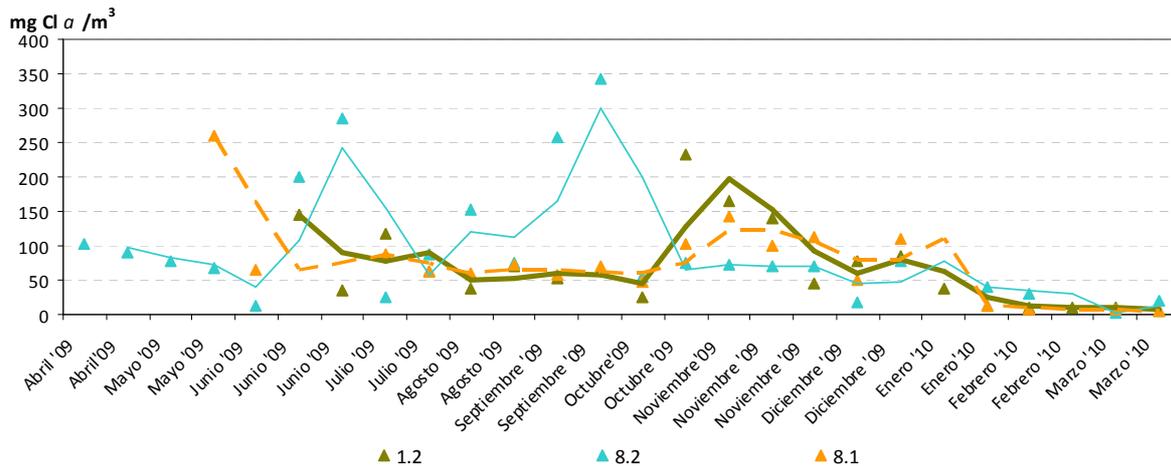
A partir de julio y hasta mediados de octubre del 2009, la concentración de  $Cl\ a$  en el agua de entrada desde el Barranco del Poyo descendió. Ello se tradujo, en una incapacidad de ambos humedales por disminuir todavía más esa concentración de entrada y por el contrario, se produjo un incremento de la concentración a la salida de los dos sistemas. El porcentaje medio de eliminación en este periodo de *FG* fue de -39% (es decir, un incremento promedio de la concentración de entrada de 1,4 veces) y de *fp* de -33% (incremento de 1.33 veces).

Desde mediados de octubre hasta mediados de febrero de 2010 (salvo alguna excepción), la concentración de  $Cl\ a$  en el agua del Barranco del Poyo volvió a ser elevada. Ello afectó a los porcentajes de eliminación que de nuevo aumentaron. El porcentaje medio de eliminación en este periodo de *FG* fue de 72% y de *fp* de un 49%.

A mediados de febrero y hasta marzo del 2010 (último mes de estudio), las concentraciones de  $Cl\ a$  en el agua del Barranco del Poyo volvieron a ser bajas. Esta vez, la razón de esa bajada importante en el contenido de fitoplancton en esta agua fue consecuencia de los aportes extraordinarios de aguas de buena calidad excedentes del río Turia a través de la Acequia de Favara que desemboca en el Barranco del Poyo.

Además de todo lo anterior, del gráfico 160 también se puede extraer que el 78% de los días en los que se realizaron mediciones de  $Cl\ a$ , los valores resultantes del punto 7 fueron superiores a los que se obtuvieron en el punto 6. Ello responde al peor funcionamiento del humedal *fp* con respecto al *FG*, asociado a diversos factores como la menor densidad de vegetación y la existencia de caminos preferenciales.

Los resultados que se obtuvieron a la salida de *F4* fueron peores que los de los humedales anteriores. Las razones de ello ya han sido comentadas en el apartado referido a los sólidos suspendidos (desarrollo más lento de la vegetación, densidad significativamente más baja, elevados tiempos de residencia, etc.). La evolución de los resultados obtenidos durante el periodo de estudio, tanto en la entrada por la acequia del Puerto de Catarroja, como en la entrada y salida del *F4*, aparecen reflejadas en la siguiente figura:



**Figura 161: Evolución temporal de la clorofila *a* en la entrada por el Puerto de Catarroja (1.2), entrada al *F4* (8.1) y a la salida del mismo (8.2). Las líneas representan la media móvil con un periodo de 2.**

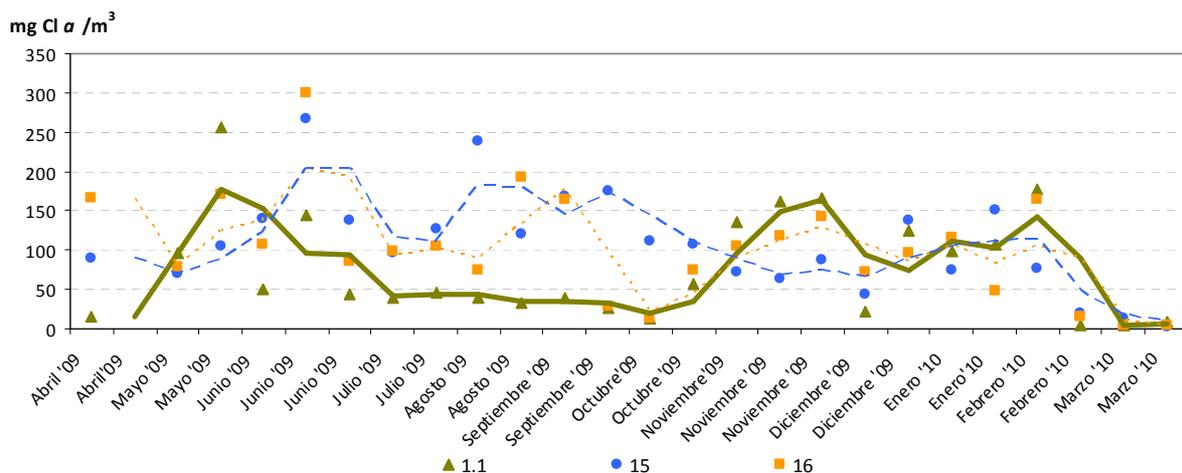
El *F4* solo consiguió porcentajes de eliminación positivos en el 37% de los casos. En los restantes (63%), este humedal fue exportador de clorofila *a*. Además, este sistema presenta el mismo comportamiento, frente a la concentración de entrada de clorofila *a*, que los humedales *FG* y *fp*, de modo que, cuando dicha concentración fue elevada, también los fueron los porcentajes de reducción, mientras que, cuando fue baja, estos últimos fueron bajos, llegando incluso a ser el sistema exportador de *Cl a*.

En promedio de todo el periodo de estudio desde que se abrió el paso de entrada de agua al sistema desde la acequia del Puerto de Catarroja (a partir de mediados de junio del 2009) hasta marzo del 2009, el humedal *F4* incrementó 1.5 veces la concentración de *Cl a* en el agua. Por tanto, el porcentaje medio de eliminación fue negativo.

No obstante, en el periodo en que las concentraciones de *Cl a* en la entrada fueron elevadas, mediados de octubre-mediados de noviembre del 2009, el porcentaje medio de eliminación fue de un 60%.

Para finalizar el análisis de la evolución temporal de la  $Cl a$  durante el primer año, se van a comparar los resultados obtenidos en el punto 15 (salida del Tancat de la Pipa) con las entradas desde el Barranco del Poyo (1.1) y desde la Acequia del Puerto de Catarroja (1.2), y con el punto del lago de l'Albufera en donde se devuelve el agua tratada (punto 16).

En la siguiente figura aparece la evolución temporal de los valores obtenidos en el Barranco del Poyo, en el punto 15 y en el punto 16:



**Figura 162: Evolución temporal de la clorofila  $a$  en la entrada por el Barranco del Poyo (1.1), salida del Tancat de la Pipa (15) y zona del lago de vertido del agua tratada (16). Las líneas representan la media móvil con un periodo de 2.**

Aunque solamente en el 32% de los casos, el punto 15 presentó una concentración de  $Cl a$  menor que la del punto 1.1, si que se observa una mejoría a lo largo del periodo de estudio, en cuanto a la calidad del punto 15. De hecho, se observa en la figura 162, como a partir de noviembre del 2009, las concentraciones de este parámetro en el punto 15 fueron más estables y generalmente, por debajo del valor en el punto 1.1 o similar a este.

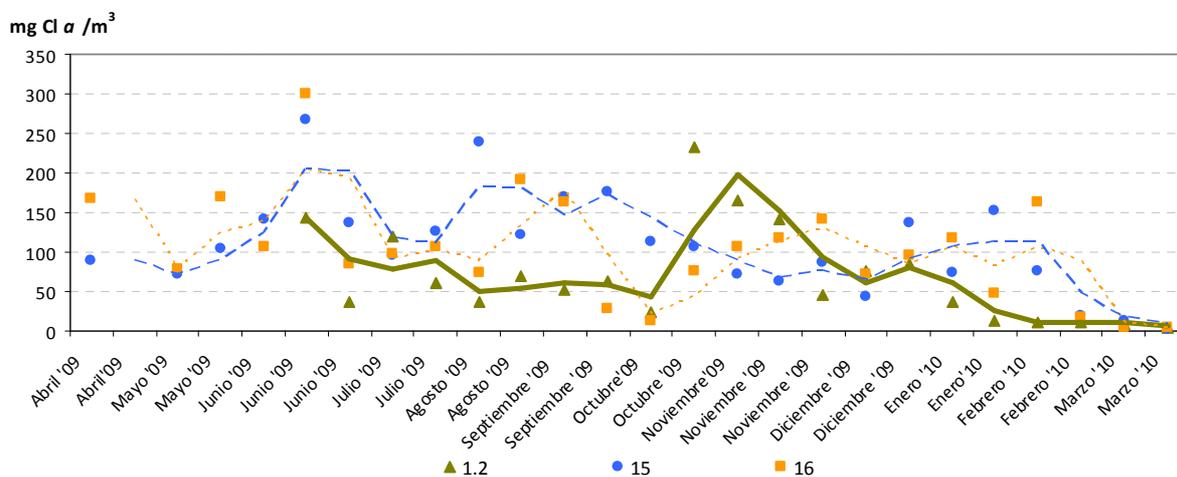
Cabe recordar, que como ya se recalcó en el apartado referido a los sólidos suspendidos, existen varios factores que influyen en que la calidad del agua pueda empeorar, desde que sale de los humedales hasta que por el punto 15 se devuelve al lago de l'Albufera:

- Al punto 15 no llega el agua directamente desde los humedales artificiales sino que lo hace después de atravesar las dos lagunas (la Educativa y la de Reserva). Éstas, aparte de ser productoras de sólidos suspendidos como restos de

vegetación y/o fitoplancton, son un hábitat idóneo para las aves, cuya actividad, como ya se ha comentado, origina la resuspensión de sólidos ya sedimentados, los cuales pueden contener cantidades considerables de  $Cl a$ .

- Además, en el propio canal donde se mezclan las aguas, es probable la generación de sólidos fitoplanctónicos dependiendo del tiempo de residencia del agua en él.
- El último factor, es que a este punto también llega un caudal de agua que entra por fugas desde el Barranco del Poyo y que discurre por una canal perimetral del Tancat, hasta alcanzar este punto. Estas aguas, igualmente sufrirán durante su trayecto, procesos físicos, químicos y biológicos tanto de eliminación como de generación de sólidos suspendidos. Por último, en este canal perimetral también pueden darse filtraciones desde el lago de l'Albufera y mediante las fugas, acceder al canal donde se encuentra el punto 15.

En cuanto a la calidad del punto 16, en lo que respecta a la concentración de  $Cl a$ , en el 36% de los casos, fue mejor que la obtenida en el Barranco del Poyo.



**Figura 163: Evolución temporal del clorofila  $a$  en la entrada por el Puerto de Catarroja (1.2), salida del Tancat de la Pipa (15) y zona del lago de vertido del agua tratada (16). Las líneas representan la media móvil con un periodo de 2.**

Los resultados obtenidos durante el primer año (es decir, durante la Puesta en Marcha del humedal) muestran que en el 29% de los casos, la calidad del agua del punto 15 fue

mejor que la de la entrada por el Puerto de Catarroja y los valores obtenidos en el punto 16, fueron en el 43% de los casos, menores que los recogidos en dicha entrada.

Seguidamente, después de haber realizado un análisis temporal de los resultados obtenidos en los diferentes humedales, se va a efectuar un análisis espacial centrado en el sistema *FG*.

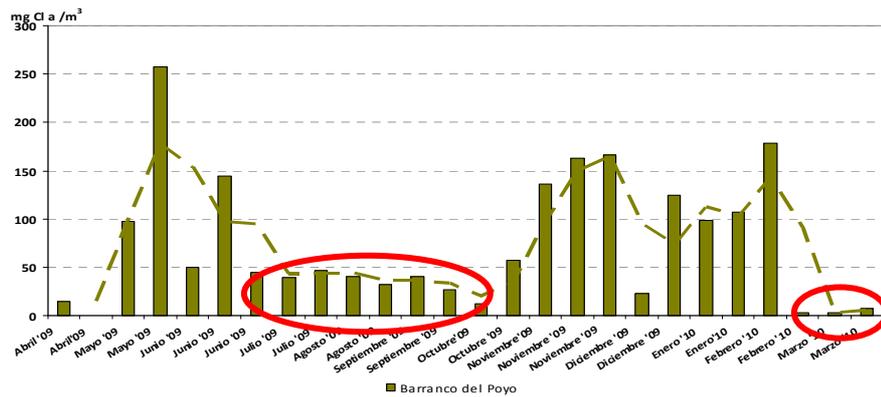
A diferencia de lo observado con los sólidos suspendidos totales y con el fósforo total, y al igual que para el nitrógeno total, en la representación de los valores de clorofila *a* a lo largo de las tres celdas en serie del humedal *FG*, no se identifican tendencias diferentes que se encuentren asociadas, o bien, a cambios en parámetros operacionales, como la carga hidráulica o a perturbaciones externas al funcionamiento del humedal, como puede ser, la elevada presencia de aves en las celdas de tratamiento.

Por tanto, existe una tendencia general, en lo que respecta a la evolución de la concentración de clorofila *a* a lo largo del humedal *FG*, que es de eliminación en las dos primeras celdas y de un comportamiento de la última celda más arbitrario (generó clorofila *a* más veces que eliminó).

- *FG1*: Redujo en el 86% de los casos y generó en 14%.
- *FG2*: Redujo en el 87% de los casos y generó en el 13%.
- *FG3*: Redujo en el 36% de los casos y generó en el 64%.

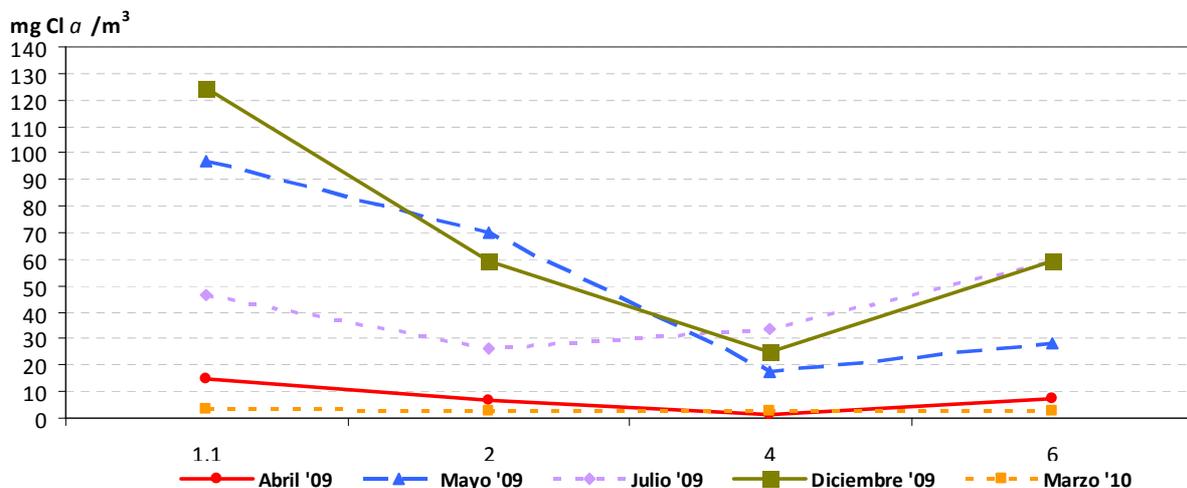
De igual manera que en el caso del nitrógeno total, solamente se observa un cambio claro de tendencia, cuando en el mes de junio del 2009, empezaron a descender las concentraciones de clorofila *a* en la entrada del humedal *FG*, provenientes del Barranco del Poyo.

En la figura siguiente se señalan los periodos de tiempo en que las concentraciones de *Cl a* en la entrada fueron menores de  $50 \text{ mg Cl } a/\text{m}^3$ ,



**Figura 164:** Concentraciones de clorofila *a* (mg Cl *a*/m<sup>3</sup>) en el agua de entrada al sistema por el Barranco del Poyo, desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010. La línea discontinua representa la media móvil con un periodo de 2. Los óvalos rojos representan las concentraciones menores de 50 mg Cl *a*/m<sup>3</sup>.

Para corroborar la afirmación anterior, y siguiendo el esquema presentado en el caso del nitrógeno total, en la figura que se presenta a continuación aparece la concentración medida en los diferentes puntos de muestreo del sistema *FG* en momentos determinados, en los que, sí se observaron cambios en los sólidos suspendidos y en el fósforo total,

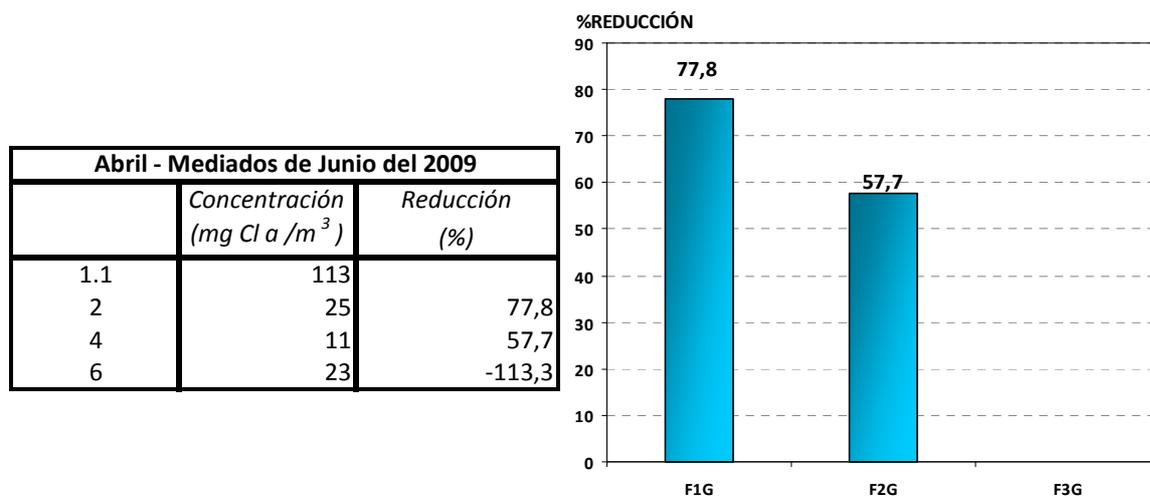


**Figura 165:** Evolución de la clorofila *a* a lo largo de las tres celdas grandes en serie. Los días seleccionados son: el 06 de abril del 2009, el 04 de mayo del 2009, el 27 de julio del 2009, el 27 de diciembre del 2009, y por último, el 10 de marzo del 2010.

La tendencia correspondiente al 06 de abril del 2009, representa la evolución de los valores de concentración de clorofila *a* a lo largo del humedal durante los primeros meses, en los que la cobertura vegetal en las celdas todavía era baja, sobretodo en la *FG3*. Durante el mes de abril, el comportamiento observado para la clorofila *a* fue muy similar al de los

sólidos suspendidos y al del nitrógeno total. Con el paso del agua a través de las celdas *FG1* y *FG2* se reducía la concentración de clorofila  $a$ , no obstante, a diferencia del nitrógeno total y análogamente al comportamiento observado en los sólidos suspendidos, la celda *FG3* no fue capaz de reducir, en ese mes, la concentración de clorofila  $a$  que le entraba.

En la figura 166 se representan los porcentajes medios de eliminación de clorofila  $a$ , durante el periodo comprendido desde abril hasta mediados de junio del 2009, en las celdas en serie del humedal *FG*:



**Figura 166: Evolución de la concentración promedio y reducción de la clorofila  $a$  a lo largo de los *FG* y referentes al periodo comprendido desde Abril del 2009 hasta el 15 de Junio del 2009, inclusive.**

En la figura anterior se observa que la celda *FG1* presentó un porcentaje mayor de eliminación que la celda dos (*FG2*), consiguiendo un promedio de eliminación del 77% y que la celda tres (*FG3*) durante ese periodo no eliminó clorofila  $a$  sino que, en todos los muestreos, incrementó la concentración que le entraba procedente de la celda dos.

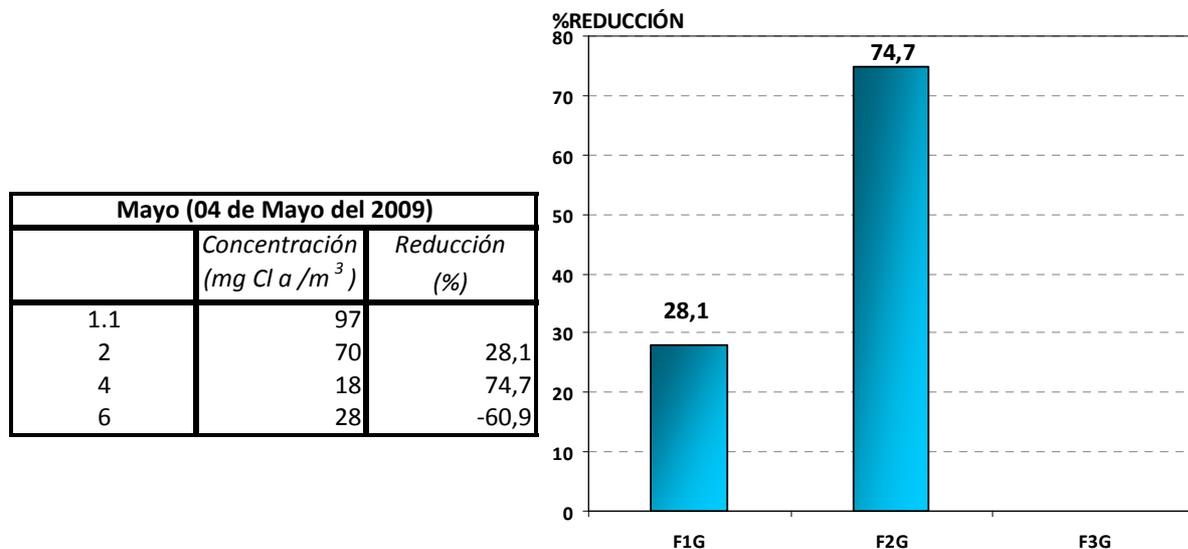
El porcentaje global medio de eliminación del humedal, en este periodo, fue de un 80%. No obstante, si solamente se consideran las dos primeras celdas, ya que la tercera no estaba funcionando, por razones ya comentadas en apartados anteriores, el porcentaje de eliminación que se alcanzó fue de un 91%.

Nuevamente se puede concluir, al igual que ya se ha comentado en los apartados anteriores, que durante este periodo, el sistema todavía estaba funcionando por debajo de sus posibilidades, ya que, *FG1* tenía un porcentaje de eliminación significativamente superior a *FG2* y a *FG3*. No obstante, es importante aclarar, que como ya se ha comentado en

apartados anteriores, existe alguna incertidumbre con respecto a que el porcentaje de eliminación de las tres celdas tenga que ser el mismo y los factores que pueden influir en ello.

A continuación, se procede a describir los resultados obtenidos en el mes de mayo del 2009. Se ha elegido este mes ya que la importante población de aves en el Tancat provocó la resuspensión de sólidos ya sedimentados y la consecuente generación de los mismos dentro de la primera celda que hasta ese momento, presentaba altos porcentajes de eliminación. Este mismo efecto se detectó en el fósforo total, es decir, su concentración se incrementó al paso por *FG1*. Sin embargo, este comportamiento no se reprodujo en el caso del nitrógeno total.

Para estudiar el comportamiento de la clorofila *a* frente a esta perturbación, se han obtenido para el 04 de mayo del 2009, los porcentajes de eliminación de las diferentes celdas del humedal *FG*, y son los que aparecen en la siguiente figura:



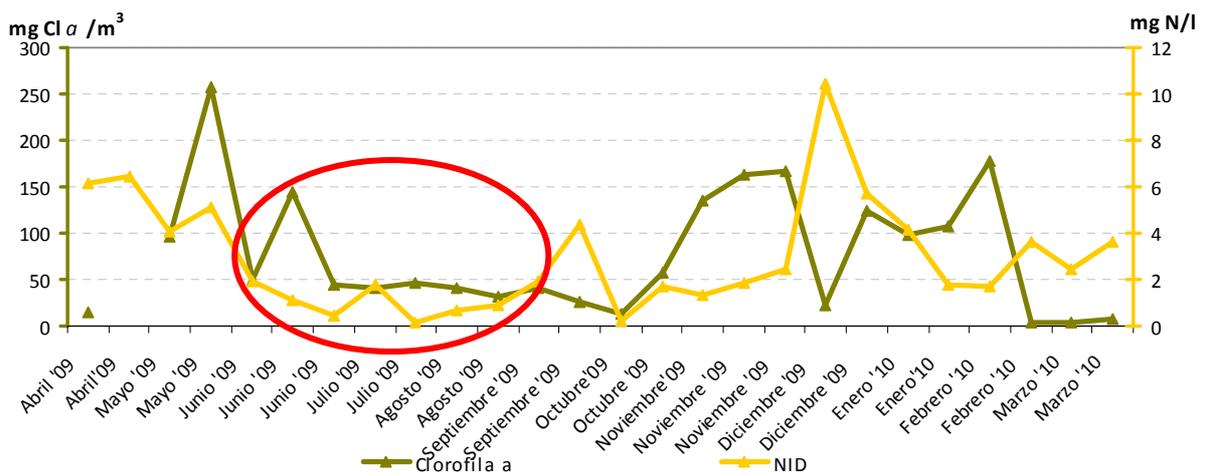
**Figura 167:** Evolución de la concentración y reducción la clorofila *a* a lo largo de los *FG* y referentes al 04 de mayo del 2009.

Claramente se observa como la clorofila *a* no se comporta del mismo modo que los sólidos suspendidos y el fósforo total, es decir, no se produce una generación de la misma en la celda *FG1* como consecuencia de la resuspensión de sedimentos, que por otro lado, podrían contener cantidades considerables de Cl *a* todavía activa. No obstante, sí que se

produce, al igual que ocurría con el nitrógeno total, una disminución en este día, del porcentaje de reducción en dicha celda.

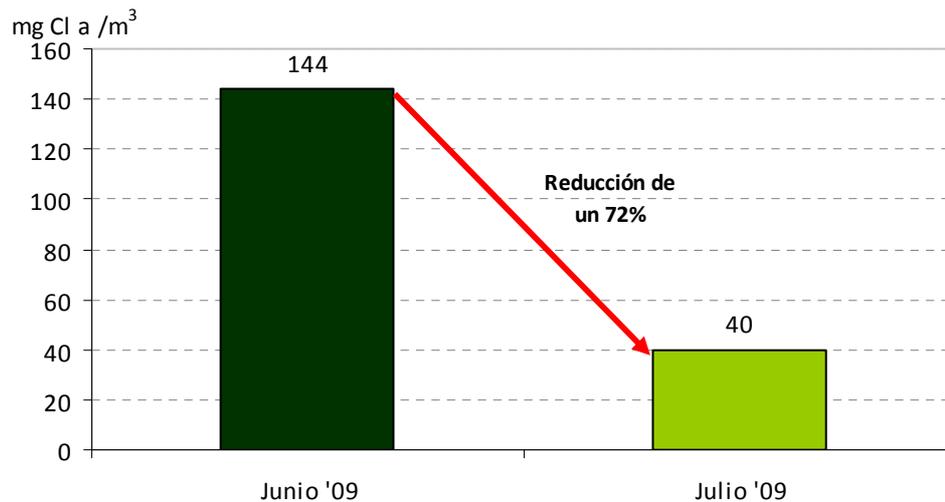
Para mejorar el rendimiento del sistema, se decidió aumentar, a principios de julio del 2009, el caudal de agua a tratar. Para analizar el efecto que sobre la eliminación de fitoplancton tuvo ese incremento en la carga hidráulica de entrada, se ha elegido la fecha del 27 de julio del 2009.

Además, cabe recordar, que a partir de finales de junio del 2009 y hasta mediados de octubre del mismo año, la concentración de clorofila  $a$  en el agua de entrada al humedal FG desde el Barranco del Poyo, disminuyó considerablemente, siendo el promedio de todo el periodo de  $35 \text{ mg Cl } a/\text{m}^3$  (menor que  $50 \text{ mg Cl } a/\text{m}^3$ ). Esta bajada en la concentración coincide temporalmente, como se aprecia en la figura 168, con la disminución de la concentración de nitrógeno, especialmente del inorgánico disuelto,



**Figura 168: Evolución de la concentración de clorofila  $a$  ( $\text{mg Cl } a/\text{m}^3$ ) y de nitrógeno inorgánico disuelto, NID, ( $\text{mg N/l}$ ) en el Barranco del Poyo durante todo el periodo de estudio.**

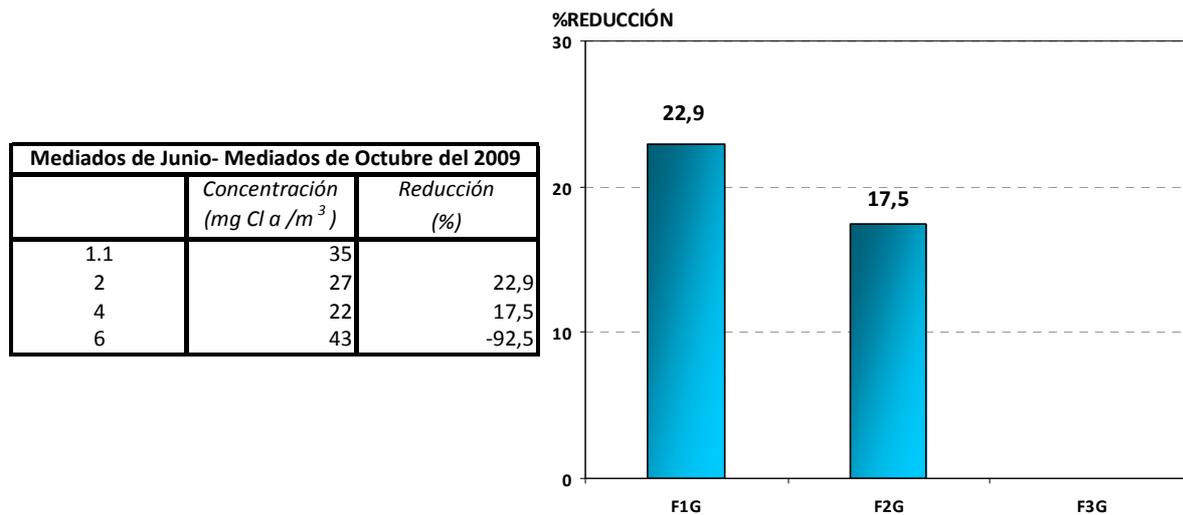
Como se ha realizado para el caso del nitrógeno total, con el fin de apreciar la magnitud de tal reducción, en la figura 169 se representan conjuntamente la concentración de clorofila  $a$  en la entrada por el Barranco del Poyo el día 01 de junio del 2009 y el 13 de julio del 2009:



**Figura 169: Concentración de clorofila  $a$  (mg Cl  $a/m^3$ ) en la entrada por el Barranco del Poyo referente a los días: 01 de junio del 2009 y 13 de julio del 2009.**

A diferencia del nitrógeno total y de la clorofila  $a$ , el incremento de la carga hidráulica no coincidió temporalmente con un periodo de bajas concentraciones de sólidos suspendidos y de fósforo total en el agua de entrada al sistema desde el Barranco del Poyo. No obstante, este cambio sí que afectó a los porcentajes de eliminación de estos dos últimos parámetros. En el caso de los sólidos suspendidos, conllevó a que el porcentaje de eliminación de los mismos en la celda *FG1* disminuyera y a que en la *FG2* aumentara, resultando ambas en valores de los mismos elevados y similares. En cuanto al fósforo total, el aumento de la carga hidráulica de entrada condujo a un incremento en los porcentajes de eliminación del mismo en la *FG1*. Sin embargo, la eliminación de nitrógeno total no respondió al incremento de caudal, sino que, su respuesta se vio marcada por las bajas concentraciones del mismo en el agua de entrada, que como se ha visto, coincidieron temporalmente con el aumento de la carga hidráulica.

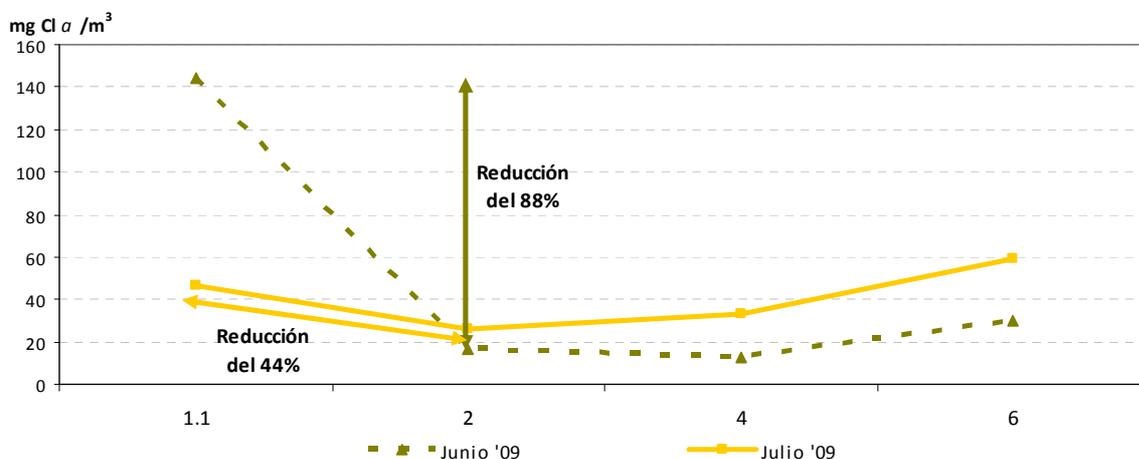
Para estudiar el comportamiento de la eliminación de la clorofila  $a$  frente a este aumento de caudal y a la bajada de la concentración de entrada de la misma desde el Barranco del Poyo, en la figura siguiente se representan los porcentajes medios de eliminación de dicho parámetro, durante el periodo comprendido desde mediados de junio del 2009 hasta mediados de octubre del 2009, en las celdas en serie del humedal *FG*:



**Figura 170: Evolución de la concentración y reducción de la clorofila *a* a lo largo de los FG y referentes al periodo comprendido desde mediados de junio del 2009 hasta mediados de octubre del 2009**

Como se puede observar en la figura superior, en contra de lo sucedido en el caso de los sólidos suspendidos y en el del fósforo total y del mismo modo que para el nitrógeno total, el incremento de la carga hidráulica de entrada, no llevó a una mejoría en el porcentaje de eliminación, si no que por el contrario, éste se redujo considerablemente. El porcentaje de eliminación de la celda *FG1* cayó de un 78% en el periodo anterior a un 23% en este periodo y el de la celda *FG2* de un 58% a un 18%. La celda *FG3* continuó siendo exportadora de clorofila *a* (salvo alguna excepción).

Así pues, en la eliminación de clorofila *a* se observan dos comportamientos distintos en función de si la concentración de entrada al sistema es mayor o menor. Estos dos comportamientos se pueden observar en la figura siguiente,

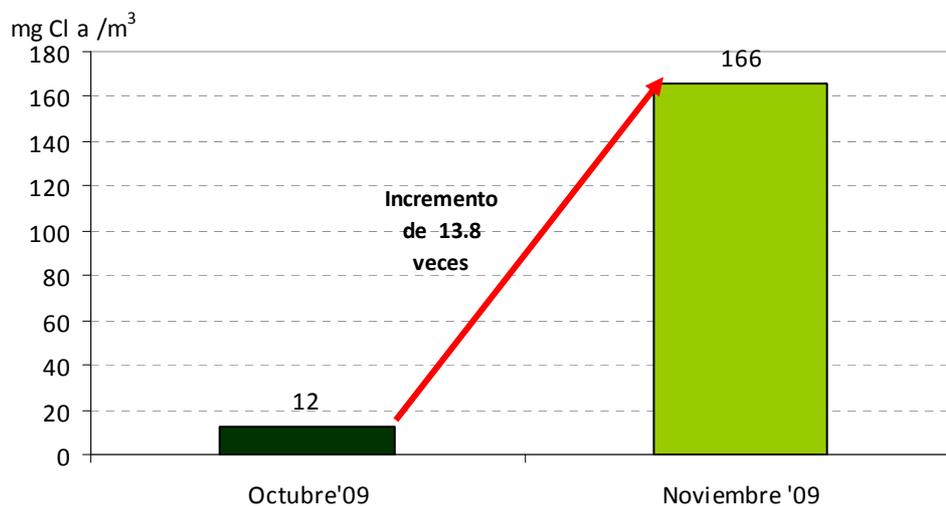


**Figura 171: Evolución de la clorofila  $a$  a lo largo de las tres celdas grandes en serie. Los días seleccionados son: el 15 de junio del 2009 y el 27 de julio del 2009.**

Claramente se aprecia que el 15 de junio del 2009 (en el que la concentración en la entrada al sistema fue más alta que  $50 \text{ mg Cl } a/\text{m}^3$ ), la celda *FG1* alcanzó un elevado porcentaje de reducción (del 88%). Por el contrario, el 27 de julio del 2009 en que la concentración a la entrada fue inferior a  $50 \text{ mg Cl } a/\text{m}^3$ , la reducción de esa misma celda descendió a la mitad (a un 44%).

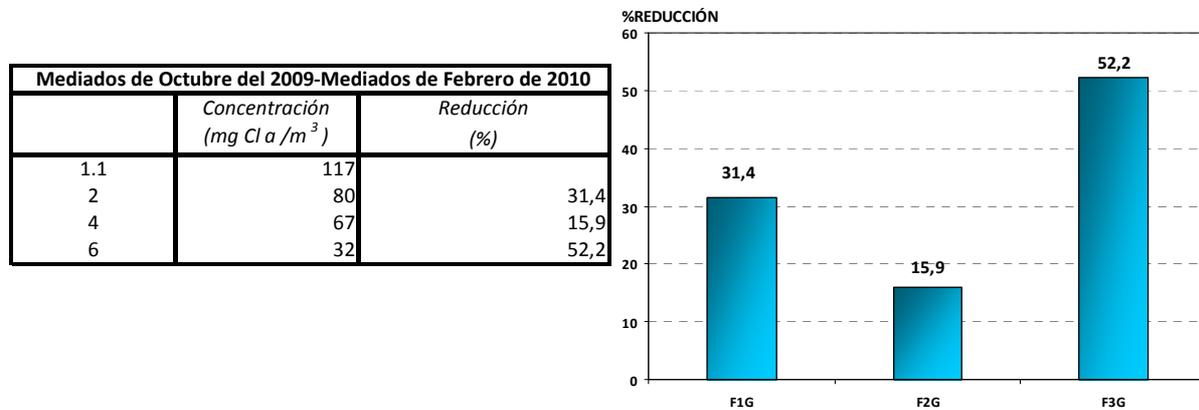
La reducción global de la clorofila  $a$ , también disminuyó significativamente. En el periodo comprendido entre abril del 2009 y mediados de junio del mismo año, fue del 80%, mientras que, en el periodo comprendido desde mediados de junio hasta mediados de octubre del 2009, el sistema *FG* fue exportador de  $\text{Cl } a$ , con un incremento promedio de 1,2 veces la concentración en la entrada.

A partir de mediados de octubre del 2009 y hasta mediados de febrero del 2010, la concentración de  $\text{Cl } a$  en la entrada del sistema procedente del Barranco del Poyo, volvió a ser mayor de  $50 \text{ mg Cl } a/\text{m}^3$ . Para apreciar el incremento que en la concentración de clorofila  $a$  se dio en este periodo, se compara en la siguiente figura los valores de ésta en el agua del Barranco del Poyo los días 07 de octubre del 2009 y 30 de noviembre del 2009,



**Figura 172: Concentración de clorofila  $a$  ( $\text{mg Cl } a/\text{m}^3$ ) en la entrada por el Barranco del Poyo referente a los días: 07 de octubre del 2009 y 30 de noviembre del 2009.**

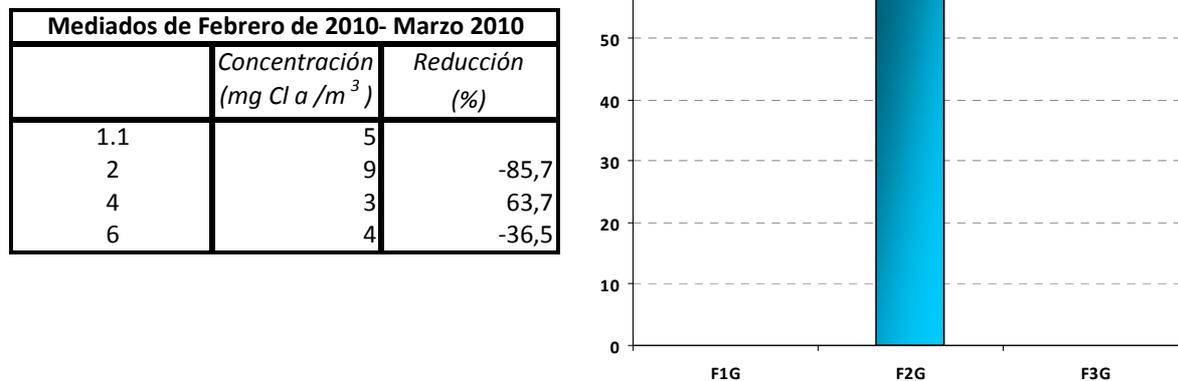
El grado de eliminación que se alcanzó en este periodo de tiempo se puede ver en la figura 173 donde se representa el porcentaje de eliminación medio obtenido desde mediados de octubre del 2009 hasta mediados de febrero del 2010,



**Figura 173: Evolución de la concentración y reducción de la clorofila  $\alpha$  a lo largo de los FG y referentes al periodo comprendido desde mediados de octubre del 2009 y hasta mediados de febrero del 2010.**

Como se observa, los porcentajes de eliminación de la celda *FG1*, volvieron a aumentar, y también el porcentaje global de eliminación, alcanzando un valor del 72%. Además, la celda *FG3* eliminó clorofila  $\alpha$ , con un porcentaje medio del 52% (superior al de las otras dos celdas). En este periodo, la cobertura vegetal de la celda *FG3* ya era considerablemente mayor que en periodos anteriores.

El último periodo en analizar, es el comprendido entre mediados de febrero del 2010 y marzo del mismo año. Durante este tiempo, las concentraciones a la entrada de Cl  $\alpha$  por el Barranco del Poyo, disminuyeron de manera drástica probablemente como consecuencia de los aportes de agua de excelente calidad desde el Turia. Este descenso provocó que nuevamente descendieran los porcentajes de eliminación. Los resultados para dicho periodo son los que se muestran en la figura siguiente:

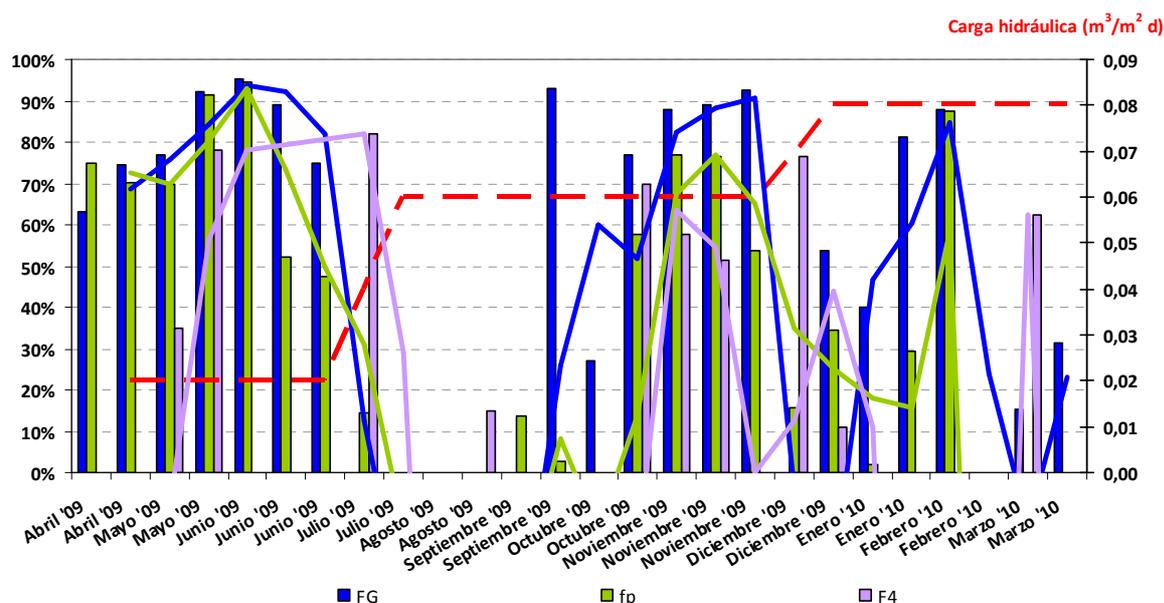


**Figura 174: Evolución de la concentración y reducción de la clorofila  $\alpha$  a lo largo de los FG y referentes al periodo comprendido desde mediados de febrero del 2010 hasta marzo del 2010.**

Como se aprecia, las celdas *FG1* y *FG3* se convirtieron en exportadoras de clorofila  $\alpha$ . Únicamente la segunda celda, fue capaz de reducir la concentración de Cl  $\alpha$  que le entraba, y probablemente fue así, gracias al incremento que se producía de ésta en la celda anterior. El porcentaje medio global de eliminación en este periodo fue tan solo de un 8%.

Con respecto a los porcentajes globales de eliminación de todo el periodo de estudio, al igual que ocurría con los sólidos suspendidos, con el fósforo total y con el nitrógeno total, el humedal *FG* fue el que mejores resultados proporcionó, con un valor del 62%. El sistema *fp*, alcanzó un valor del 46%, y el *F4* no consiguió alcanzar un porcentaje de eliminación positivo, sino que globalmente incrementó la concentración del agua que le entró 1.3 veces. Las razones de estas diferencias son las mismas que las que justifican las diferencias en los porcentajes de eliminación en los diferentes humedales para el caso de los sólidos suspendidos y que quedan comentadas en el apartado referido a estos.

Tras el análisis espacial de las concentraciones obtenidas en diferentes periodos, se pasa a realizar una evaluación de los rendimientos de eliminación con cargas obtenidos tanto globalmente por el sistema formado por los tres humedales artificiales, como los obtenidos individualmente por cada uno de estos. Además, también se estudian, los rendimientos obtenidos a nivel de celda. Los resultados aparecen en las figuras que se presentan a continuación:



**Figura 175: Evolución temporal de los rendimientos de eliminación de la clorofila *a* en las celdas en serie grandes y pequeñas (*FG* y *fp* respectivamente) y de la celda independiente (*F4*). También aparece representada la media de la carga hidráulica. Los rendimientos de eliminación negativos no aparecen reflejados en la figura. Las líneas azul, verde y morada representan la media móvil con un periodo de 2 de los *FG*, *fp* y *F4*, respectivamente.**

En la figura superior se observa que el humedal *FG* fue el que mejores rendimientos obtuvo, consiguiendo en el 54% de los casos, valores de reducción de la carga de entrada, mayores del 60% y en el 38% de los casos valores por encima del 80%.

A diferencia de lo observado en el caso de los sólidos suspendidos y del fósforo total, y del mismo modo que ocurría con el nitrógeno total, la elevada presencia de aves en el Tancat en el mes de mayo del 2009, no se tradujo en una generación o bajada importante de los rendimientos de eliminación de la clorofila *a* en los humedales artificiales. Tampoco la cosecha de las celdas uno de los humedales *FG* y *fp* provocó una bajada de los mismos. Además, y también análogamente al caso del nitrógeno total, el incremento de la carga hidráulica no se tradujo en un aumento de los rendimientos.

Tal y como se refleja en la siguiente tabla, los rendimientos más altos en los sistemas *FG* y *fp*, se dieron en el periodo en que se trabajó con una carga hidráulica de  $0.02 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ , coincidiendo de nuevo con los resultados obtenidos para el nitrógeno total. Sin embargo, el mejor rendimiento medio en el humedal *F4* se alcanzó con la carga hidráulica de  $0.06 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ .

**Tabla 40: Rendimientos obtenidos en eliminación de clorofila  $a$  en función de la carga hidráulica de operación y el humedal considerado.**

Humedales	Carga Hidráulica ( $m^3/m^2*d$ )		
	$0.02m^3/m^2*d$	$0.06m^3/m^2*d$	$0.08m^3/m^2*d$
<b><i>FG</i></b>	86%	45%	61%
<b><i>fp</i></b>	78%	39%	39%
<b><i>F4</i></b>	-1% (incremento de 1.01 veces)	12%	-1% (incremento de 1.01 veces)
<b><i>GLOBAL</i></b>	61%	33%	47%

No obstante, al igual que anteriormente con los porcentajes de eliminación, y del mismo modo que ocurría con el nitrógeno total, los rendimientos de los tres sistemas, toman un valor mayor o menor en función de la concentración de clorofila  $a$  en la entrada a los mismos, y por tanto, no se aprecia su respuesta frente a un incremento del caudal de agua a tratar, ya que coincide con un periodo de bajas concentraciones de Cl  $a$  en el agua.

Por tanto, tal y como se puede observar en la figura siguiente, cuando la concentración en la entrada fue elevada, también lo fueron los rendimientos y cuando fue baja, los rendimientos fueron bajos. La tendencia de los rendimientos de los sistemas *FG*, *fp* y *F4*, representada mediante la media móvil, sigue un patrón muy similar a la evolución de la concentración en la entrada por el Barranco del Poyo durante todo el periodo de estudio.

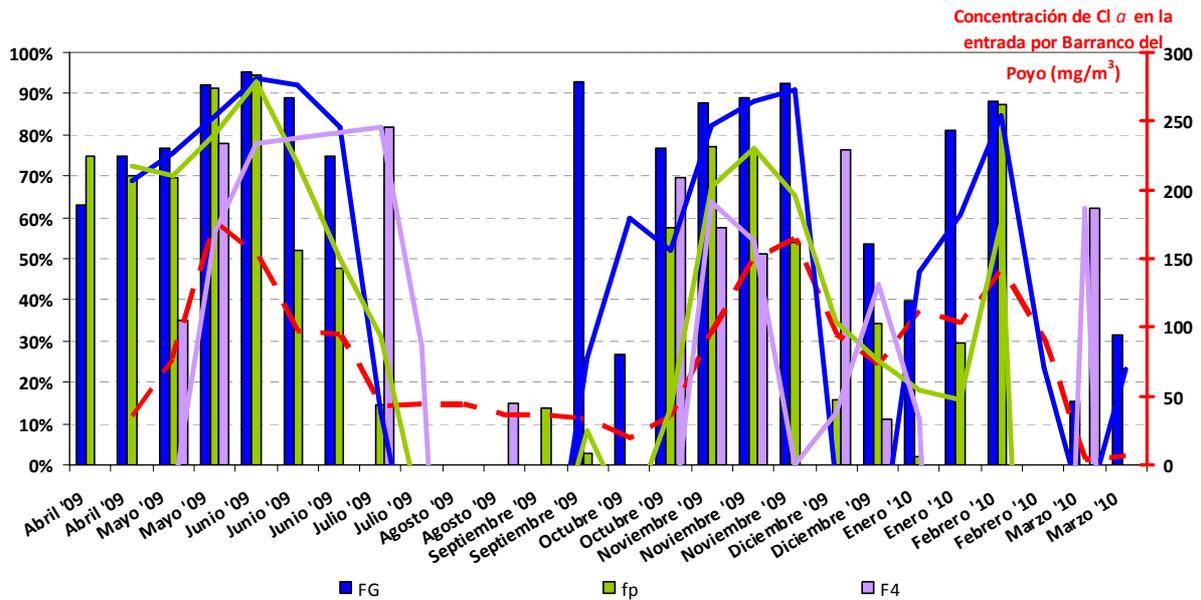
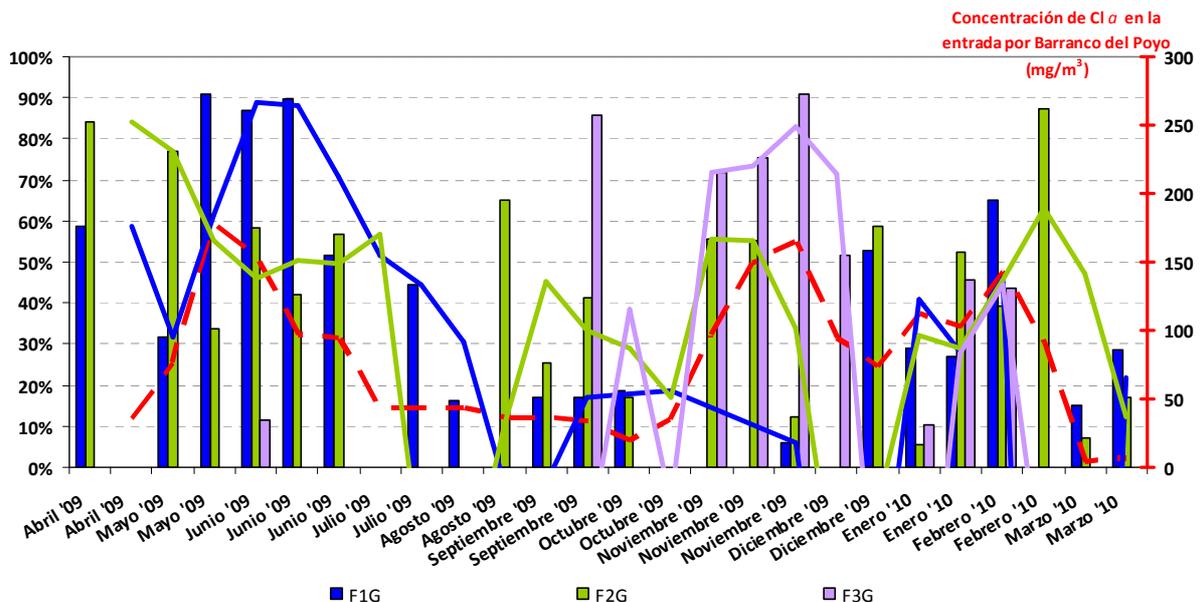


Figura 176: Evolución temporal de los rendimientos de eliminación de la clorofila *a* en las celdas en serie grandes y pequeñas (*FG* y *fp* respectivamente) y de la celda independiente (*F4*). También aparece representada la concentración de clorofila *a* en la entrada por el Barranco del Poyo ( $\text{mg Cl } a/\text{m}^3$ ). Los rendimientos de eliminación negativos no aparecen reflejados en la figura. Las líneas azul, verde y morada representan la media móvil con un periodo de 2 de los *FG*, *fp* y *F4*, respectivamente.

En la siguiente ilustración, aparecen por un lado, la evolución de los rendimientos de eliminación de cada una de las tres celdas grandes, y por otra parte, la concentración ( $\text{mg Cl } a/\text{m}^3$ ) de clorofila *a* en la entrada por el Barranco del Poyo, en función del tiempo:



**Figura 177:** Evolución temporal de los rendimientos de eliminación de la clorofila *a* en las celdas en serie grandes. También aparece representada la concentración de clorofila *a* (mg Cl *a*/m<sup>3</sup>) en la entrada por el Barranco de Poyo. Los rendimientos de eliminación negativos no aparecen reflejados en la figura. Las líneas azul, verde y morada representan la media móvil con un periodo de 2 de las *F1G*, *F2G* y *F3G*, respectivamente

Como se observa en la figura superior, la tendencia de los rendimientos obtenidos en la celda *FG1* sigue el mismo patrón que la evolución de la concentración de clorofila *a* en la entrada a esta misma celda. Las tendencias de los rendimientos proporcionados por las celdas *FG2* y *FG3* son similares a la del sistema *FG1* y a la evolución del clorofila *a* en la entrada. Además se observa, que en el periodo que la celda *FG1* estuvo inactiva y el flujo entraba directamente por la celda *FG2* (noviembre 2009), la tendencia de los rendimientos de esta segunda celda es prácticamente igual al patrón seguido por las concentraciones en la entrada.

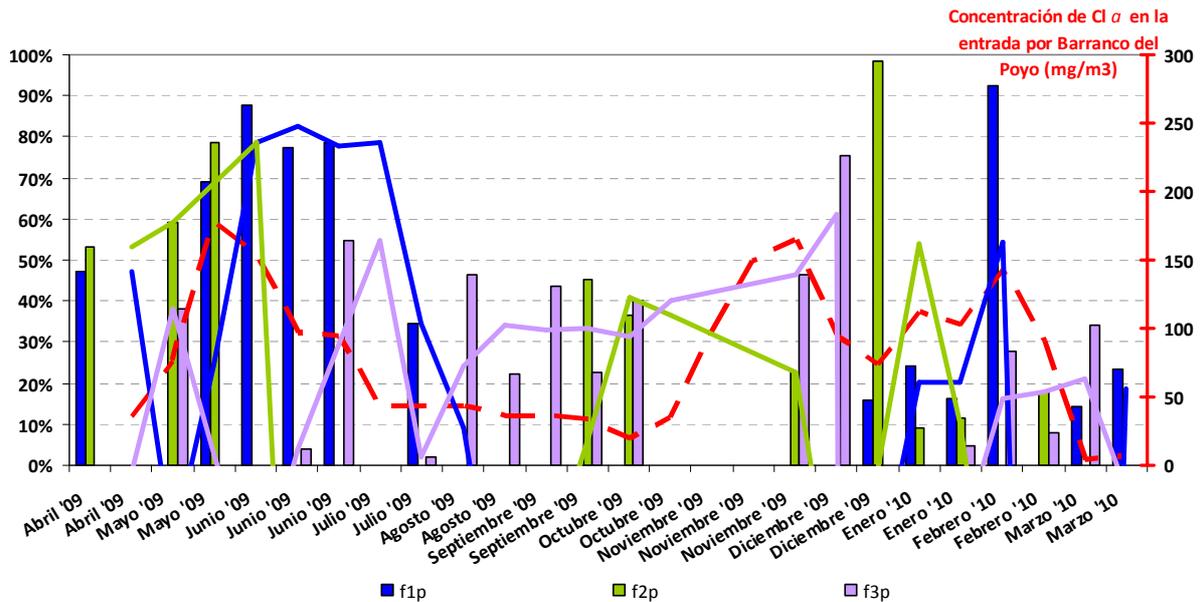
Los rendimientos globales de eliminación de las tres celdas grandes dispuestas en serie fueron los siguientes:

**Tabla 41 :** Rendimientos obtenidos en eliminación de clorofila *a* en las tres celdas grandes.

Celda	Rendimiento
<i>FG1</i>	36%
<i>FG2</i>	28%
<i>FG3</i>	18%
<b>GLOBAL</b>	58%

En la figura 177 y en la tabla 41, se observa como el rendimiento más alto se obtuvo en la celda *FG1*, lo cual es lógico ya que, tal y como ocurría con el nitrógeno total, la concentración a su entrada, fue más elevada que la de la entrada a las celdas dos y tres donde, el agua entra previo tratamiento en una celda anterior y por lo tanto, con las concentraciones de clorofila *a* reducidas.

A continuación se presentan la evolución de los rendimientos de eliminación de cada una de las tres celdas pequeñas y la concentración de clorofila *a* (mg Cl *a*/m<sup>3</sup>) en la entrada por el Barranco del Poyo, en función del tiempo:



**Figura 178:** Evolución temporal de los rendimientos de eliminación de la clorofila *a* en las celdas en serie pequeñas. También aparece representada la concentración de clorofila *a* ( $\text{mg Cl } a/\text{m}^3$ ) en la entrada por el Barranco de Poyo. Los rendimientos de eliminación negativos no aparecen reflejados en la figura. La línea azul, la verde y la morada representan la media móvil con un periodo de 2 de los *f1p*, *f2p* y *f3p*, respectivamente.

Al igual que en el sistema de celdas grandes en serie, la tendencia de los rendimientos de la celda *fp1*, reproduce el patrón seguido por la concentración de clorofila *a* en la entrada de esa misma celda. Excepto, en el periodo en que la circulación del agua estuvo parada en esta celda, y el agua procedente del Barranco del Poyo entraba directamente a la celda dos. Las tendencias de los rendimientos obtenidos en las otras dos celdas reproducen también de forma similar ese patrón.

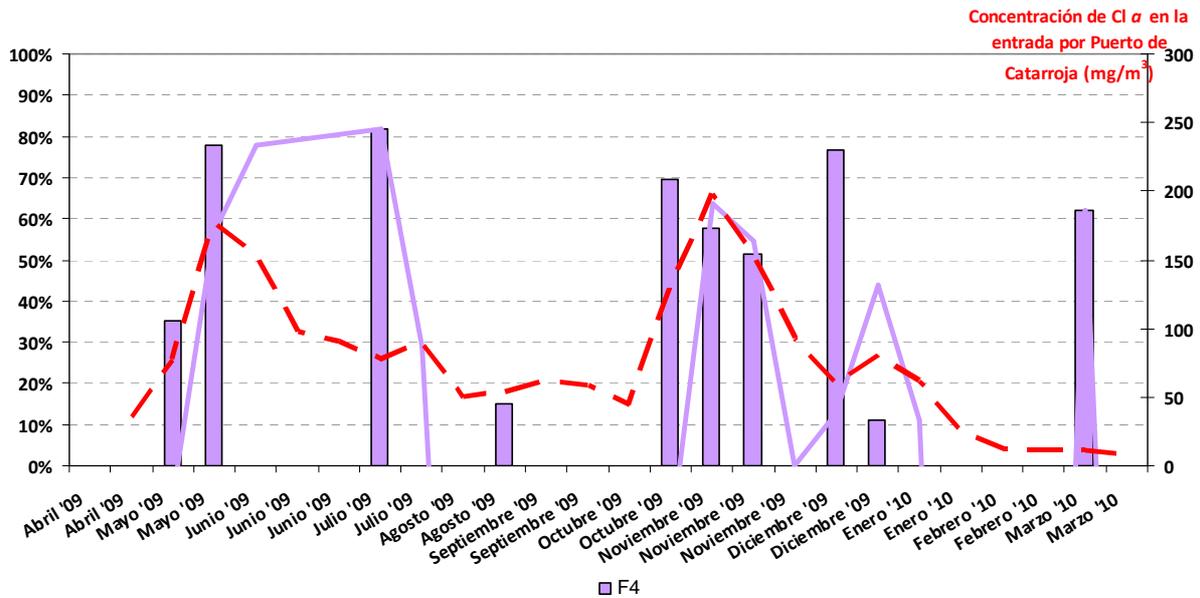
Los rendimientos globales de eliminación de las tres celdas pequeñas dispuestas en serie fueron los siguientes:

**Tabla 42:** Rendimientos obtenidos en eliminación de la clorofila *a* en las tres celdas pequeñas.

Celda	Rendimiento
<i>Fp1</i>	22%
<i>Fp2</i>	2%
<i>Fp3</i>	21%
<b>GLOBAL</b>	46%

Al igual que ocurre con el humedal *FG*, el mejor rendimiento lo brindó la celda uno, por el mismo motivo que el explicado para dicho humedal.

Finalmente, se representa en la figura siguiente, la evolución de los rendimientos obtenidos en el humedal *F4* y la concentración a la entrada del mismo por el Puerto de Catarroja:



**Figura 179:** Evolución temporal de los rendimientos de eliminación de la clorofila *a* en la celda 4. También aparece representada la concentración ( $\text{mg Cl } a/\text{m}^3$ ) a la entrada de dicho humedal proveniente del Puerto de Catarroja, excepto en el periodo comprendido entre abril y mediados de junio del 2009, en que la concentración representadas es la que procede del Barranco del Poyo. Los rendimientos de eliminación negativos no aparecen reflejados en la figura. La línea azul representa la media móvil con un periodo de 2 del *F4*.

Como ocurría en los otros dos humedales, la tendencia de los rendimientos obtenidos, sigue el patrón que genera la evolución de la concentración de clorofila *a* en el agua de entrada al humedal.

Los resultados globales, que corresponden a todo el sistema de humedales artificiales, se han calculado contando con la evapotranspiración. Estos son los que aparecen en la siguiente tabla:

**Tabla 43: Rendimientos globales de eliminación de la clorofila  $\alpha$ .**

	Carga de entrada (Kg/año)	Carga de salida (Kg/año)	Carga eliminada (Kg/año)	% Reducción	Caudal promedio (L/s)
Con evapotranspiración	130.66	75.87	54.79	42	58.5

El conjunto de todo el sistema, eliminó el 42% de la clorofila  $\alpha$  que le entró durante el periodo anual estudiado. En total se eliminaron 55 Kg de clorofila  $\alpha$  en todo el año.

Los resultados obtenidos por sectores y contando con la evapotranspiración son los que se muestran en la tabla siguiente,

**Tabla 44: Rendimientos por sectores de eliminación de la clorofila  $\alpha$ .**

	Carga de entrada (Kg/año)	Carga de salida (Kg/año)	Carga eliminada (Kg/año)	% Reducción	% Caudal de entrada	Carga superficial de entrada (g Cl $\alpha$ /m <sup>2</sup> *d)	Carga Hidráulica media (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *d)
Filtros Grandes	75.26	32.31	42.95	57	56	0.0042	0.06
Filtros Pequeños	20.38	11.10	9.28	46	15	0.0038	0.05
Filtro 4	43.36	40.19	3.17	7	29	0.0046	0.06

Resumiendo, el sistema de celdas grandes en serie eliminó el 57% de la carga de clorofila  $\alpha$  que le entró, siendo este el mejor rendimiento obtenido de los tres sistemas. Las celdas pequeñas consiguieron una reducción de la carga de clorofila  $\alpha$  de entrada de un 46%. El menor rendimiento lo presentó el sistema *F4* con tan solo un 7% de reducción de la carga de entrada.

Por último, en la siguiente figura se representa la masa de clorofila  $\alpha$  eliminada acumulada:

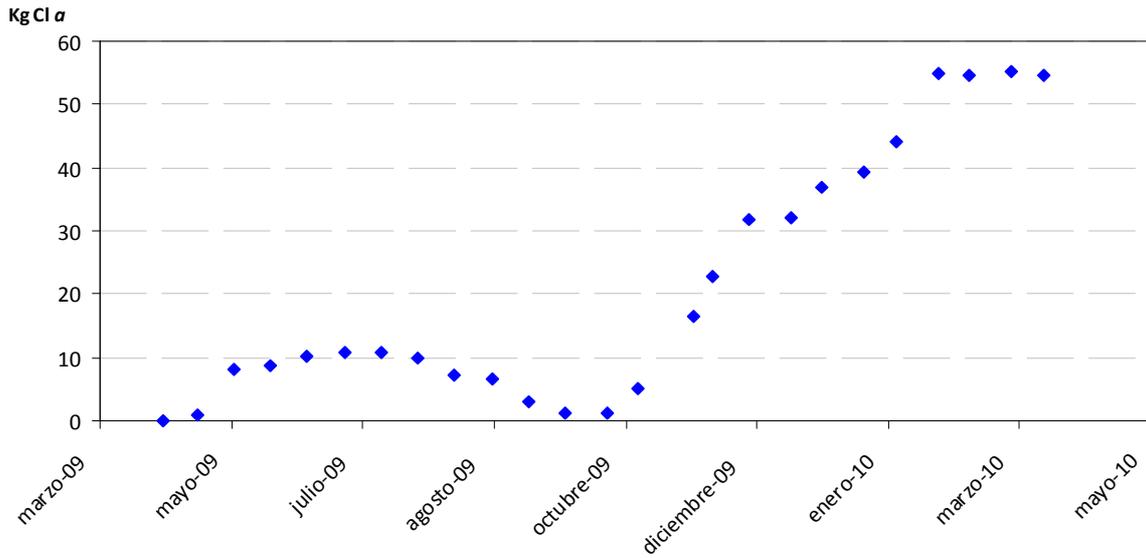


Figura 180: Masa de clorofila  $\alpha$  eliminada acumulada (Kg Cl  $\alpha$ ).

En la figura superior se puede observar como el sistema no empezó a eliminar clorofila  $\alpha$  hasta el mes de mayo y además, la tendencia de los datos no es lineal, si no que a la vista de la figura parecen darse diferentes velocidades de eliminación, al igual que se observó con el nitrógeno total.

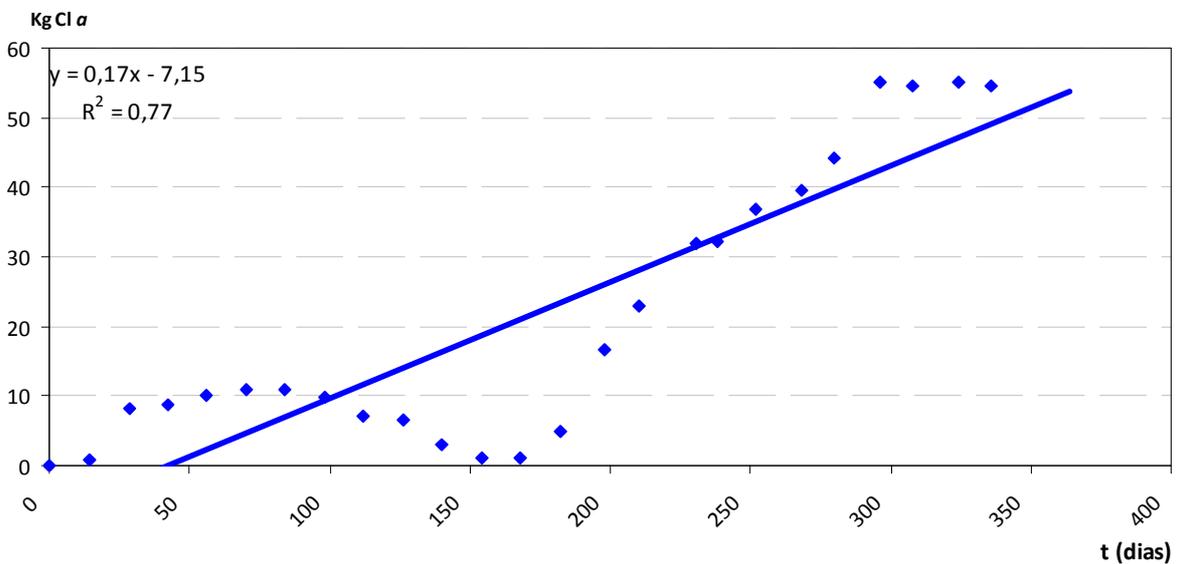


Figura 181: Ajuste lineal a la clorofila  $\alpha$  acumulada eliminada (Kg Cl  $\alpha$ ).

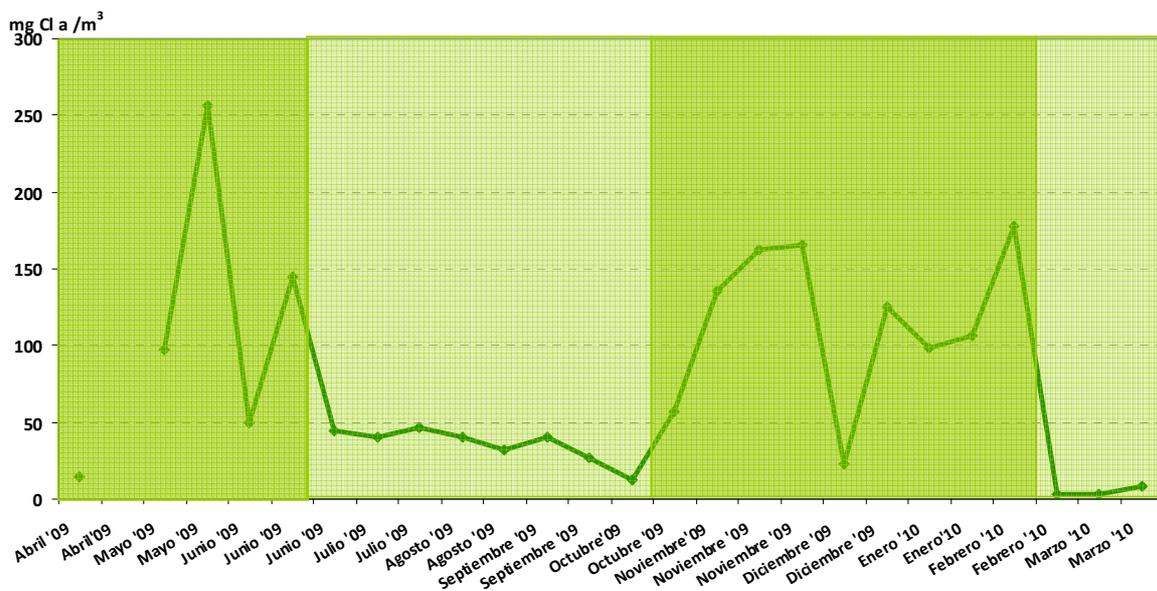
Del ajuste lineal a todos los valores obtenidos de la clorofila  $\alpha$  acumulada eliminada se obtiene que la velocidad de eliminación de dicho componente fue de 0.17 Kg Cl  $\alpha$ /d.

No obstante, como se ha indicado, si se observa la tendencia resultante de representar los kilogramos de clorofila *a* eliminados acumulados en función del tiempo (figura 180), se detecta como durante el periodo en el que las concentraciones de dicho compuesto fueron bajas en la entrada al sistema, se produce un cambio de pendiente, siendo esta menor que la del periodo anterior (donde cabe recordar que las concentraciones a la entrada eran significativamente más elevadas).

Con el objetivo de estudiar la variación de la velocidad de eliminación de la clorofila *a* en función de la concentración de dicho componente en el agua de entrada al sistema, se ha dividido el periodo de estudio en cuatro tramos: dos de ellos son periodos de tiempo con concentraciones a la entrada mayores de 50 mg Cl *a*/m<sup>3</sup> (con la excepciones del 06 de abril del 2009, del 01 de junio del 2009 y del 16 de diciembre del 2009) los otros dos lo son con concentraciones menores de 50 mg Cl *a*/m<sup>3</sup>. Estos cuatro tramos son los siguientes:

- I. Abril 2009- Medios de Junio del 2009.
- II. Medios de Junio del 2009-Medios de Octubre del 2009.
- III. Medios de Octubre del 2009- Medios de Febrero del 2010.
- IV. Medios de Febrero del 2010-Marzo 2010.

En la siguiente figura aparecen remarcados estos 4 periodos de tiempo:



**Figura 182:** Concentraciones de clorofila *a* (mg Cl *a*/m<sup>3</sup>) en el agua de entrada al sistema por el Barranco del Poyo, desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010. Los tramos remarcados con un tono de verde más oscuro

representan los periodos de tiempo con concentraciones de clorofila  $a$  ( $\text{mg Cl } a/\text{m}^3$ ) mayores que  $50 \text{ mg Cl } a/\text{m}^3$  y los tramos remarcados con un tono de verde más claro representan los periodos de tiempo con concentraciones de clorofila  $a$  ( $\text{mg Cl } a/\text{m}^3$ ) menores que  $50 \text{ mg Cl } a/\text{m}^3$ .

Los resultados obtenidos en cada tramo, del ajuste lineal a los valores obtenidos de clorofila  $a$  acumulada eliminada en cada uno, son los que aparecen en las siguientes figuras:

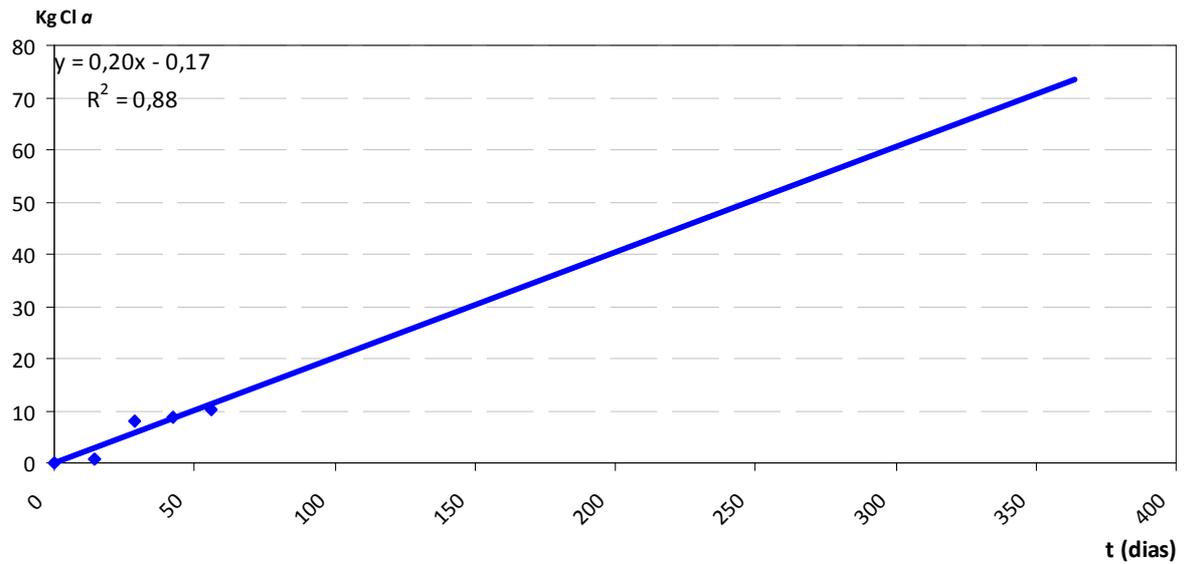


Figura 183: Ajuste lineal a la clorofila  $a$  acumulada eliminada ( $\text{Kg Cl } a$ ) en el tramo I.

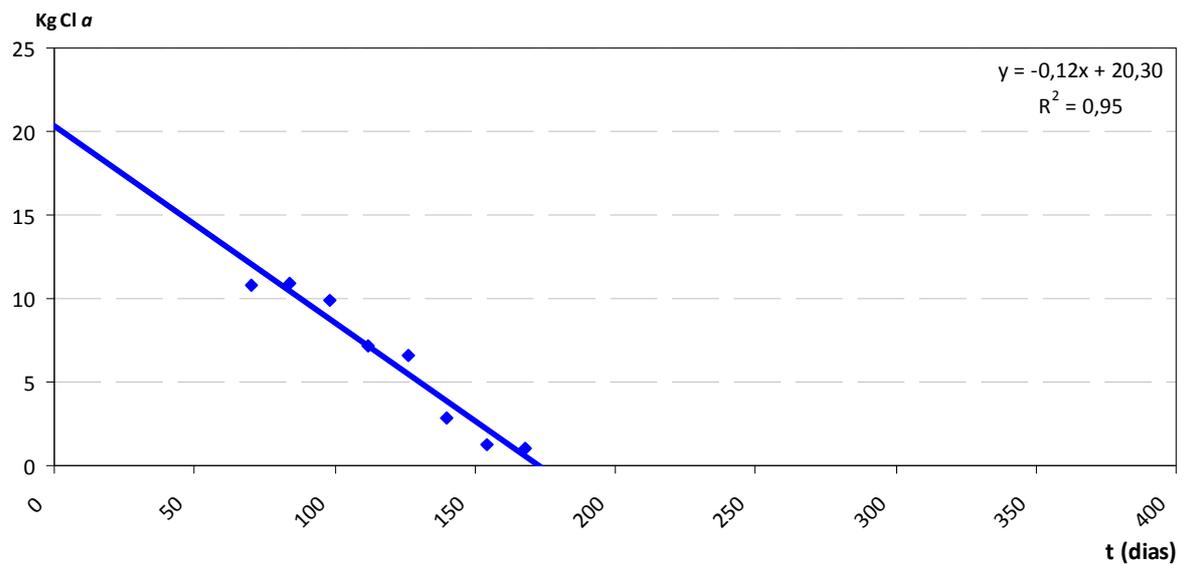


Figura 184: Ajuste lineal a la clorofila  $a$  acumulada eliminada ( $\text{Kg Cl } a$ ) en el tramo II.

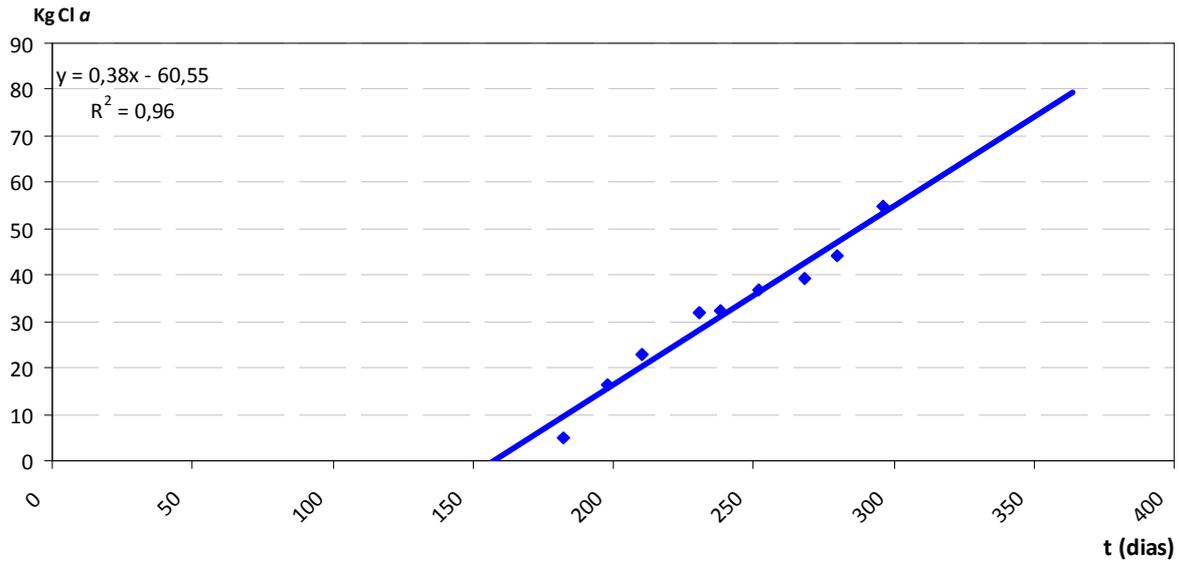


Figura 185: Ajuste lineal a la clorofila  $a$  acumulada eliminada (Kg Cl  $a$ ) en el tramo III.

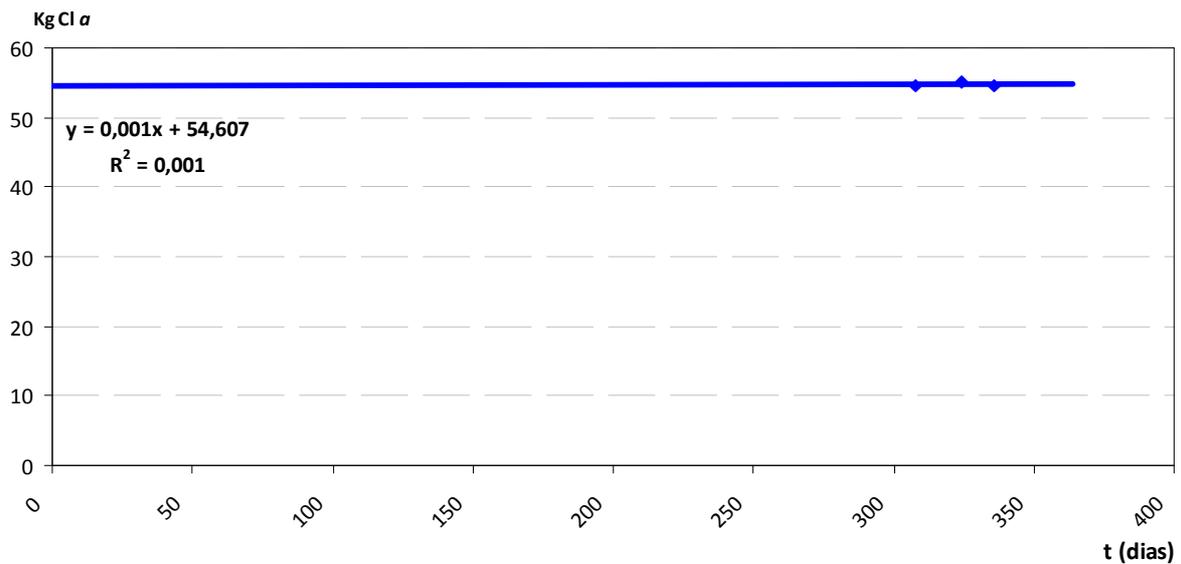


Figura 186: Ajuste lineal a la clorofila  $a$  acumulada eliminada (Kg Cl  $a$ ) en el tramo IV.

En las figuras anteriores, se observa claramente el cambio de pendiente que se experimenta al pasar de un tramo determinado a su consecutivo, debido al aumento o disminución, según sea el caso, de la concentración de clorofila  $a$  de entrada al sistema. De modo que, la pendiente obtenida es mayor (por tanto, mayor es la velocidad de eliminación) en los periodos de tiempo en que la concentración de clorofila  $a$  en la entrada al sistema fue mayor que  $50 \text{ mg Cl } a/\text{m}^3$  y menor (también menor velocidad de eliminación del mismo) en los periodos de tiempo en que dicha concentración fue menor que  $50 \text{ mg Cl } a/\text{m}^3$ .

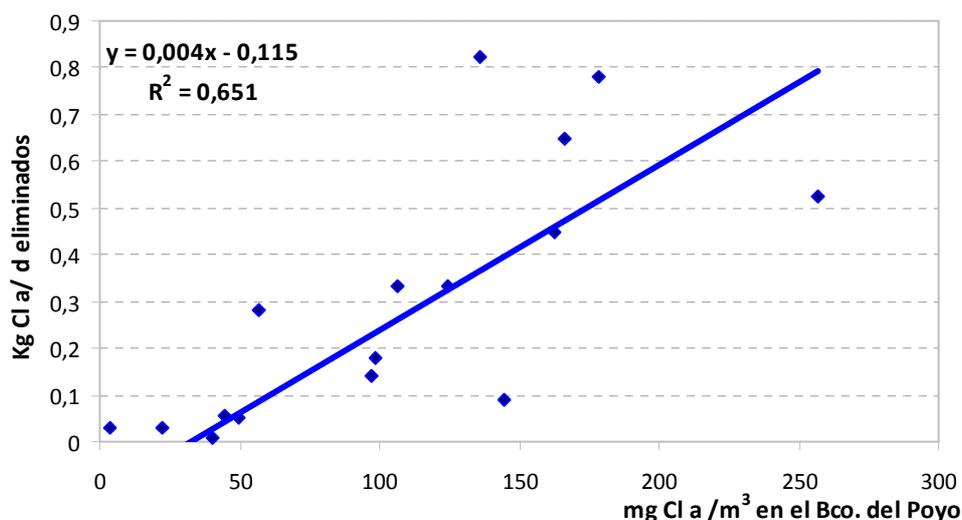
Además se observa como en el tramo II, donde la concentración media a la entrada en ese periodo fue de  $35 \text{ mg Cl a/m}^3$ , el sistema fue exportador de Clorofila  $a$ , ya que la pendiente obtenida es negativa. Sin embargo, en el último tramo donde la concentración media a la entrada fue de  $5 \text{ mg Cl a/m}^3$ , el sistema no eliminó pero tampoco generó, resultando un balance de materia nulo.

La tabla 45 recoge las velocidades de eliminación de nitrógeno total en los diferentes tramos:

**Tabla 45: Concentraciones medias y velocidades de eliminación de la clorofila  $a$  en los cuatro tramos.**

TRAMOS	CONCENTRACIONES PROMEDIO EN EL BARRANCO DEL POYO ( $\text{mg Cl a/m}^3$ )	VELOCIDADES DE ELIMINACIÓN
I.	113	0.20 Kg Cl a/ d
II.	35	-0.12 Kg Cl a/ d
III.	117	0.38 Kg Cl a/ d
IV.	5	0.001 Kg Cl a/ d

En base al conocimiento de una relación existente entre la velocidad de eliminación de la clorofila  $a$  y la concentración de la misma a la entrada del sistema desde el Barranco del Poyo, se ha procedido a obtener la ecuación que representa dicha relación. El resultado es el que aparece en la figura siguiente:



**Figura 187: Relación entre la velocidad de eliminación de la clorofila  $a$  (Kg Cl  $a$ /d) y la concentración de entrada de Cl  $a$  desde el Barranco del Poyo.**

Como se puede comprobar en la figura 187, existe una buena correlación entre la concentración de entrada de Cl  $a$  y la velocidad con que se eliminará dicha concentración. De este modo, conociendo la concentración en la entrada, podemos hacernos una idea de la velocidad de eliminación con que trabajará el humedal.

Si se toma el valor promedio de clorofila  $a$  obtenido del Barranco del Poyo durante el año de estudio, es decir, 76 mg Cl  $a$ /m<sup>3</sup>, como valor medio de la clorofila  $a$  contenida en el lago de l'Albufera durante un año, y considerando un volumen de agua en el mismo lago de 21 Hm<sup>3</sup>; se obtiene, que con el sistema de humedales artificiales se ha eliminado en un año el 5% de la clorofila  $a$  de dicho lago.

## **7.7 OXÍGENO DISUELTO.**

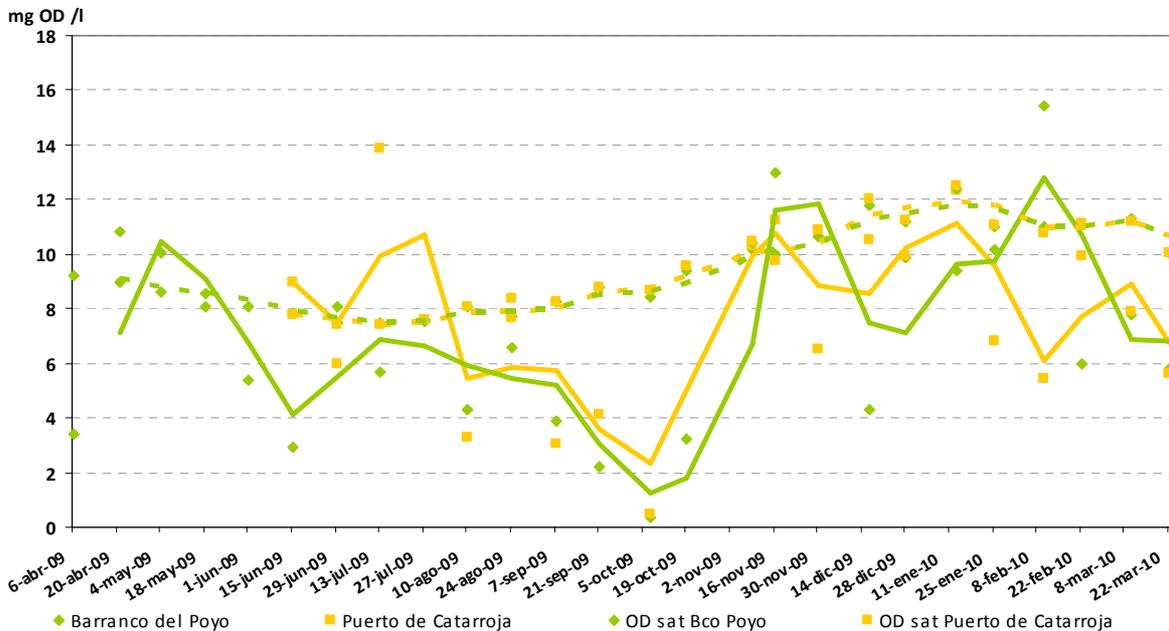
El oxígeno disuelto es de interés en los humedales artificiales por dos razones principalmente: es un factor importante en los mecanismos de eliminación de algunos contaminantes y es un parámetro regulado en las descargas a aguas superficiales (Kadlec y Wallace, 2009). El oxígeno disuelto (OD) es necesario para la nitrificación y la descomposición aeróbica de la materia orgánica y además, es crítico para la supervivencia de peces y otros organismos acuáticos.

El oxígeno disuelto en el agua, varía con la temperatura, las sales disueltas y la actividad biológica (Kadlec y Wallace, 2009).

La concentración de oxígeno disuelto en el agua de entrada, dado el nivel de hipereutrofia de la misma, es de esperar que pueda variar ampliamente, desde valores cercanos a 0 mg O/l hasta valores muy por encima de la saturación, tanto a escala semanal como a escala horaria.

En este estudio, no se van a evaluar los cambios a escala horaria, pues no se disponen de mediciones para ello, pero sí se puede exponer la variación anual de la concentración y el comportamiento del mismo dentro de los humedales.

Así pues en la figura siguiente se muestra la evolución de la concentración de oxígeno disuelto en el agua de entrada por el Barranco del Poyo y por el Puerto de Catarroja a lo largo de todo el periodo de estudio,



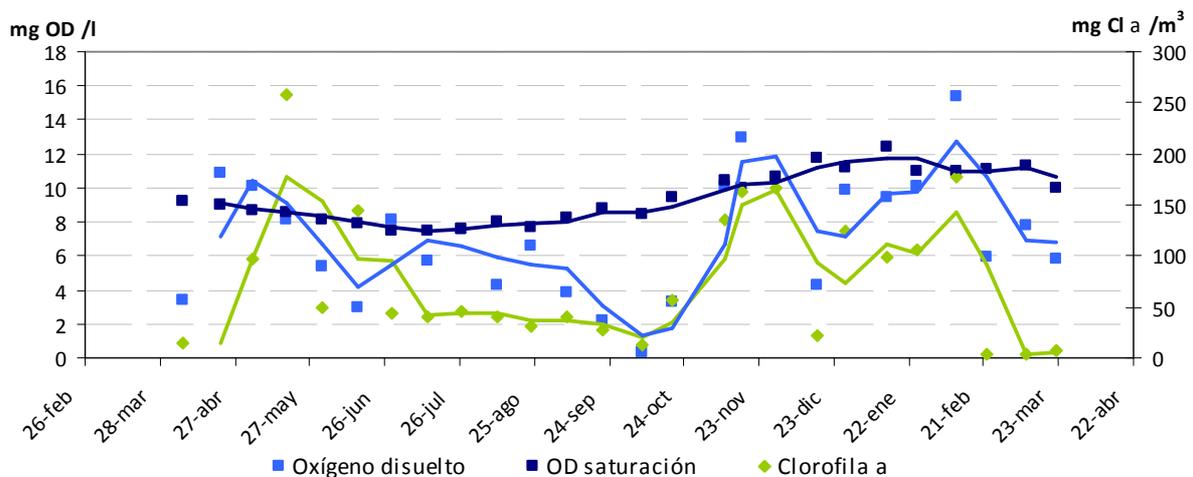
**Figura 188:** Concentraciones de oxígeno disuelto (mg O/L) y de la concentración de saturación en el agua de entrada al sistema por el Barranco del Poyo y por el Puerto de Catarroja, desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010. Las líneas discontinuas representan la media móvil con un periodo de 2.

Como se observa en la figura 188, la variabilidad temporal es muy alta en las dos entradas. La concentración del parámetro de estudio en el Barranco del Poyo, osciló entre 0.34 mg O/l y 15.40 mg O/l y entre 0.49 mg O/l y 13.85 mg O/l en el Puerto de Catarroja. Las concentraciones medias en todo el periodo de estudio fueron de 7.12 mg O/l y 7.71 mg O/l, respectivamente.

Esta variabilidad todavía sería mayor si se pudiera observar a escala horaria. En estas aguas, altamente eutrofizadas, la máxima concentración de oxígeno suele darse poco antes de la puesta del sol, mientras que la mínima se produce poco después de amanecer. Como se ha indicado, este fenómeno no se puede ver en el presente estudio puesto que la medición de dicha concentración, en el caso de los puntos, 1.1 y 1.2, suele ser entre las 11:30 y las 12:00 de la mañana. Dependiendo del grado de eutrofización que exista, los valores medidos pueden aumentar más o menos a partir de dicho momento.

En cuanto a la evolución de la concentración de oxígeno disuelto a escala quincenal, en la figura 188 se observa como en ambas entradas la concentración mínima se dio a principios de octubre del 2009 (concretamente el 07 de octubre), coincidiendo con el fin de la estación estival.

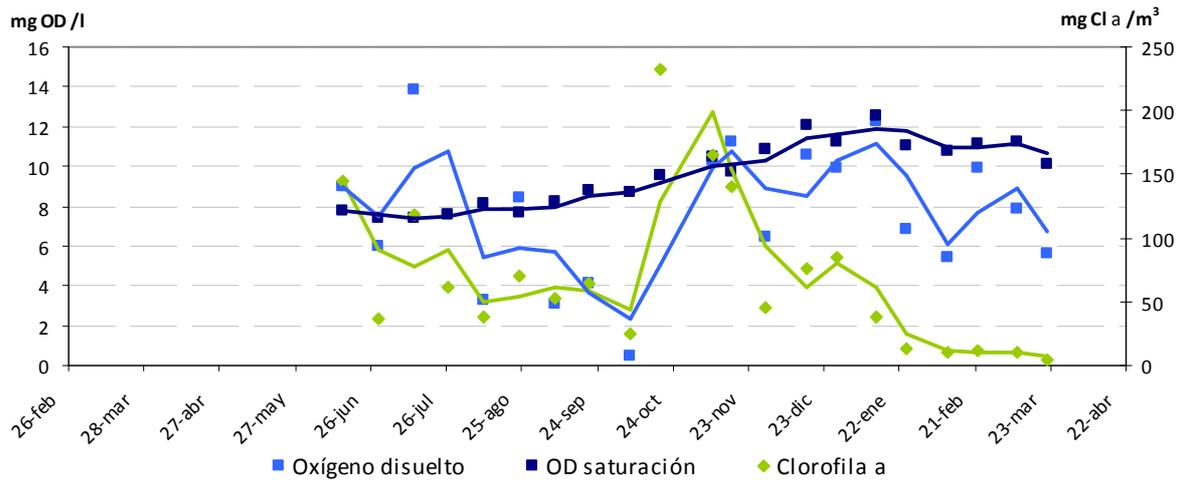
En la figura siguiente se representa por un lado la concentración de oxígeno medida *in situ* los días de muestreo de calidad de aguas y por otro lado, la concentración de clorofila *a* medida en esos mismos puntos y en el mismo instante.



**Figura 189: Concentraciones de oxígeno disuelto (mg O/L) y de Clorofila *a* (mg Cl *a*/m³) en el agua de entrada al sistema por el Barranco del Poyo, desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010. Las líneas representan la media móvil con un periodo de 2.**

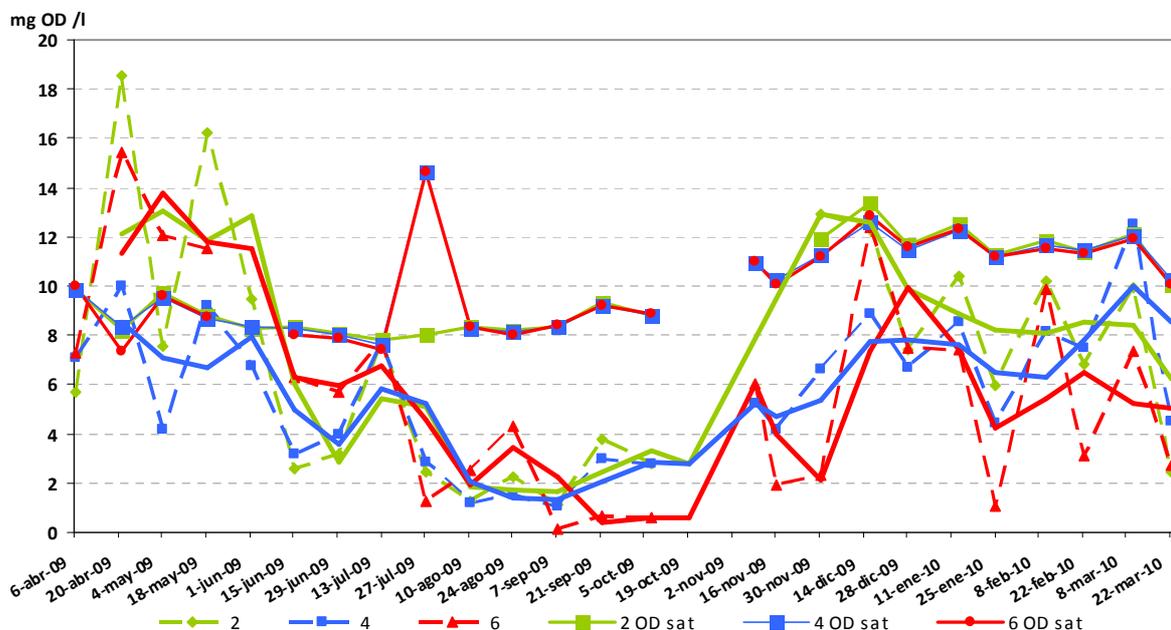
Se detecta claramente como los picos en concentración de oxígeno disuelto coinciden con picos en la concentración de clorofila *a*. Por el contrario, las bajadas bruscas en el contenido de esta última, también coinciden con disminuciones bruscas en la concentración de oxígeno disuelto. Por tanto, se puede afirmar la relación existente en esta agua, entre la concentración de oxígeno disuelto medida en un momento determinado y el contenido de biomasa fitoplanctónica que se halla en ese mismo instante.

La misma relación entre el contenido en clorofila *a* y la concentración de oxígeno disuelto se puede apreciar en el agua procedente del Puerto de Catarroja,



**Figura 190:** Concentraciones de oxígeno disuelto (mg O/L) y de Clorofila *a* (mg Cl *a*/m<sup>3</sup>) en el agua de entrada al sistema por el Puerto de Catarroja, desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010. Las líneas representan la media móvil con un periodo de 2.

La evolución del oxígeno disuelto dentro de los humedales artificiales sigue un patrón bastante regular. En la figura que se presenta a continuación, se observa como existe una clara tendencia, en las tres celdas del humedal *FG*, a la disminución en verano y a la recuperación en invierno.



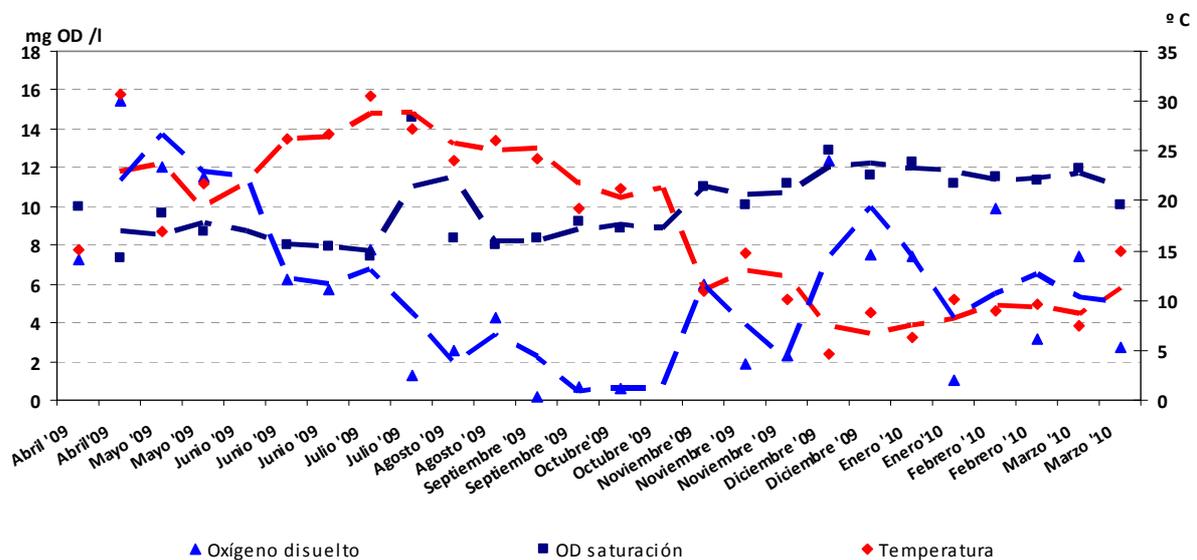
**Figura 191:** Concentraciones de oxígeno disuelto (mg O/L) y de saturación en los puntos 2,4 y 6, desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010. Las líneas verde, azul y rojo representan las medias móviles con un periodo de 2.

Las concentraciones más bajas (inferiores a 4 mg O/l) se dieron desde finales de julio hasta mediados de octubre del 2009, en las tres celdas. Además, a la salida del humedal (punto 6) durante el mes de septiembre del 2009 y hasta mediados de octubre del mismo año, el oxígeno disuelto presentó valores inferiores a 1 mg O/l.

Coveney, 2002, encontró que el OD en el efluente de su humedal varió inversamente con la temperatura, y lo justificó debido al probable efecto combinado de la baja solubilidad del oxígeno y a la mayor demanda bioquímica de oxígeno en el humedal debido a las altas temperaturas. Además, a finales de verano detectaron que el oxígeno cayó a niveles de 0.5 mg O/l, no obstante, nunca fue indetectable durante periodos de tiempo prolongados.

Otros autores, también informan que el oxígeno disuelto en el efluente de su sistema permaneció bajo.

En la figura siguiente se representa la evolución de la concentración de oxígeno y la temperatura en el efluente de salida de la celda F3G,



**Figura 192:** Concentración de oxígeno disuelto (mg O/L) y temperatura (°C) en el punto 6, desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010. Las líneas representan las medias móviles con un periodo de 2.

En nuestro caso, como es lógico, también la evolución del oxígeno disuelto en el efluente fue inversa a la de la temperatura, y por tanto, la concentración medida de dicho parámetro varió estacionalmente. Los valores oscilaron entre 0.14 mg O/l y 15.43 mg O/l.

El control del oxígeno disuelto en el humedal es de vital importancia, ya que determinados procesos biológicos que resultan en la eliminación de nutrientes y materia orgánica del agua sometida a tratamiento, dependen de su contenido. Un ejemplo es la nitrificación (necesaria para la eliminación de nitrógeno), aunque ésta pueda ocurrir a bajas concentraciones de oxígeno disuelto, en la bibliografía se cita que la velocidad de dicho proceso es considerablemente menor que si el mismo proceso se da a concentraciones de oxígeno disuelto mayores de 2 mg O/l. Algunos autores citan que el principal problema de eliminación de nitrógeno en los humedales artificiales es la disponibilidad de oxígeno para la nitrificación.

La disponibilidad de oxígeno también influye en la eliminación de fósforo en los humedales artificiales, ya que, bajo condiciones aerobias, la oxidación de Fe (II) a Fe (III) mejora la precipitación química del fósforo (Kadlec y Knight, 1996).

La eliminación biológica de fósforo también fue relacionada con la disponibilidad de oxígeno disuelto. En la bibliografía se pueden encontrar ejemplos de sistemas en los que la eliminación biológica de fósforo mejoró si el sistema era bien aireado.

Vymazal, 2008, informó que la degradación aerobia fue el proceso predominante responsable de la eliminación de DQO. Por tanto, es necesaria la disponibilidad de oxígeno dentro del humedal.

No obstante, es importante también la existencia de zonas anóxicas para que la eliminación de nitrógeno se de completamente (proceso de desnitrificación).

Finalmente, en las figuras que se exponen a continuación, se pueden observar los valores medios y la desviación típica, obtenidos en cada punto de muestreo, durante todo el periodo de estudio,

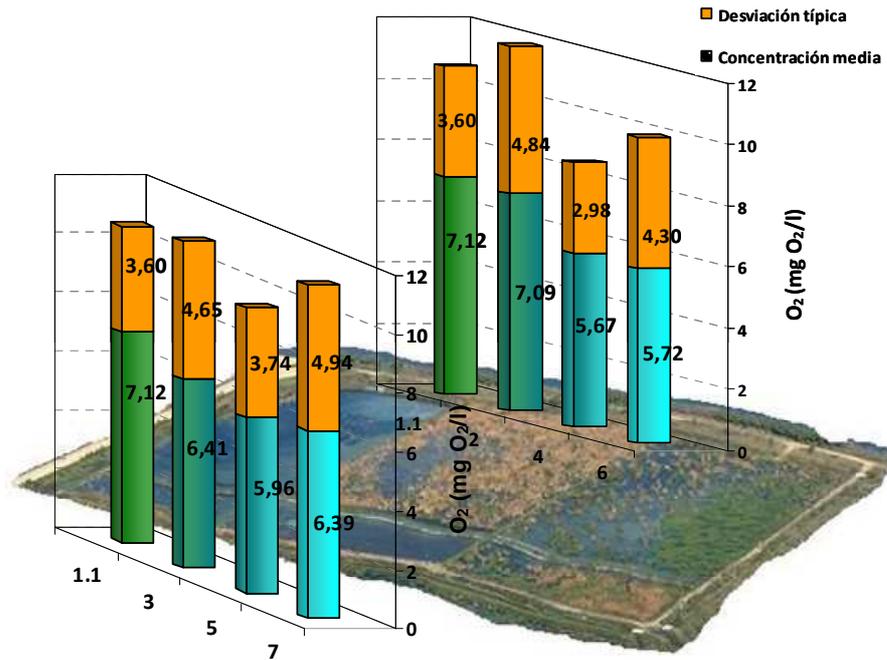


Figura 193: Media (tramo inferior) y desviación típica (tramo superior) de los datos recogidos en los punto de muestreo 1.1, 2, 3, 4, 5, 6, y 7, durante todo el periodo anual (06/04/2009 al 22/03/2010).

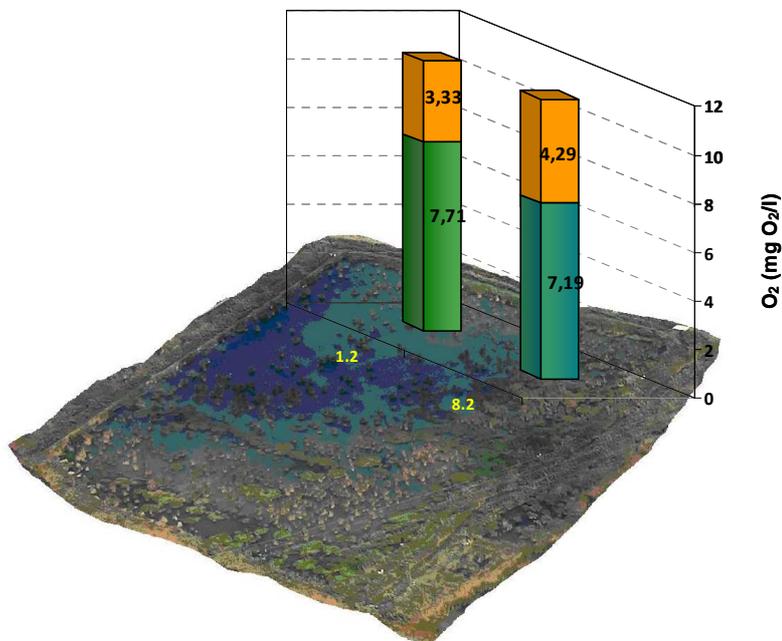


Figura 194: Media (tramo inferior) y desviación típica (tramo superior) de los datos recogidos en los punto de muestreo 1.2 y 8.2, durante todo el periodo anual (06/04/2009 al 22/03/2010).

En la figura 193, se observa como la concentración media de oxígeno disuelto disminuyó desde la entrada por el Barranco del Poyo, hasta la salida por la celda *FG2*, como consecuencia del consumo de este en los procesos biológicos, físicos y químicos que en el humedal tienen lugar. En cambio, en la celda *FG3*, que como se ha dicho en varias ocasiones, su vegetación se desarrolló más tardíamente, la concentración media de oxígeno se recuperó y aumentó ligeramente. Este hecho coincide con que hasta octubre del 2009, esta celda fue exportadora de clorofila *a*.

Además, también se observa como la mayor bajada de oxígeno se dio en la celda dos (*FG2*), probablemente debido a que el tiempo de residencia necesario para que se produzca la degradación biológica de la materia orgánica y la nitrificación, no es suficiente con el paso del agua a través de la primera celda, y es necesario el paso por la segunda celda para que se alcance dicho tiempo.

El comportamiento del humedal *fp* fue el mismo que el del *FG*, como se puede apreciar en la figura 193.

En el humedal *F4*, la concentración media decreció desde la entrada hasta la salida, pero lo hizo muy ligeramente. Recordando, esta celda fue la que, generalmente, peores resultados de eliminación para los diferentes parámetros dio, ya que, como se explicó también, su plantación fue más tardía y su densidad significativamente menor que la de las otras celdas.

## **7.8 TEMPERATURA.**

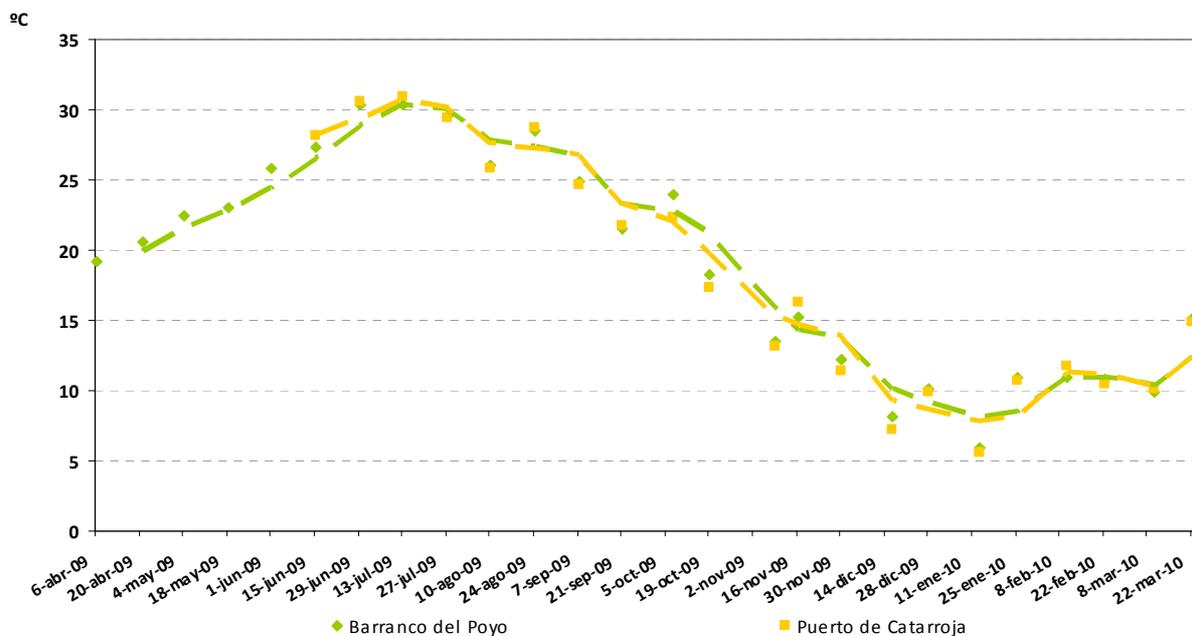
La temperatura es otro de los parámetros físicos medidos *in situ* en los diferentes puntos de muestreo de los tres humedales.

Es muy importante, ya que en los sistemas biológicos, la reducción de la concentración de nutrientes depende de la temperatura. En los humedales artificiales, la eliminación de nutrientes, tales como el nitrógeno o el fósforo, principalmente es debida a la actividad biótica, por tanto, la influencia de la temperatura es vital, cuando se evalúa la efectividad de un humedal artificial.

Así pues, en la bibliografía aparece que, la eficiencia de tratamiento de un humedal artificial, decrece a bajas temperaturas, y esto es debido principalmente, a una reducción de la actividad biológica.

Álvarez y Bécares, informaron que la vegetación mantuvo una mayor inercia térmica respecto las fuertes heladas nocturnas que se registraron, lo que supuso valores más bajos en el momento de muestreo (medio día) en la zona vegetada que en la parte sin vegetación, aspecto que confirma la importante inercia térmica de la vegetación.

En la figura siguiente se muestra la evolución de la temperatura en el agua de entrada por el Barranco del Poyo y por el Puerto de Catarroja a lo largo de todo el periodo de estudio,



**Figura 195: Temperatura (°C) en el agua de entrada al sistema por el Barranco del Poyo y por el Puerto de Catarroja, desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010. Las líneas discontinuas representan la media móvil con un periodo de 2.**

La temperatura medida en el Barranco del Poyo y en el Puerto de Catarroja fue prácticamente la misma. Los valores en el primero oscilaron entre 30.4 °C y 6.0 °C, siendo el promedio de todo el periodo de 19.0 °C, y en el segundo variaron entre 30.9 °C y 5.6 °C, con un promedio de 18.2 °C.

En la bibliografía se recoge que la temperatura óptima para la eliminación de nutrientes es a 30 °C. En nuestro caso, esta temperatura se alcanza o se está muy próxima a ella en los meses de junio, julio y agosto, coincidiendo también con concentraciones más bajas de oxígeno disuelto.

La evolución de la temperatura dentro de los humedales artificiales sigue un patrón bastante regular, al igual que ocurría con el oxígeno disuelto. En la figura que se presenta a continuación, se observa como existe una clara tendencia, en las tres celdas del humedal FG, al aumento en verano y a la disminución en invierno, de forma inversa al comportamiento del OD.

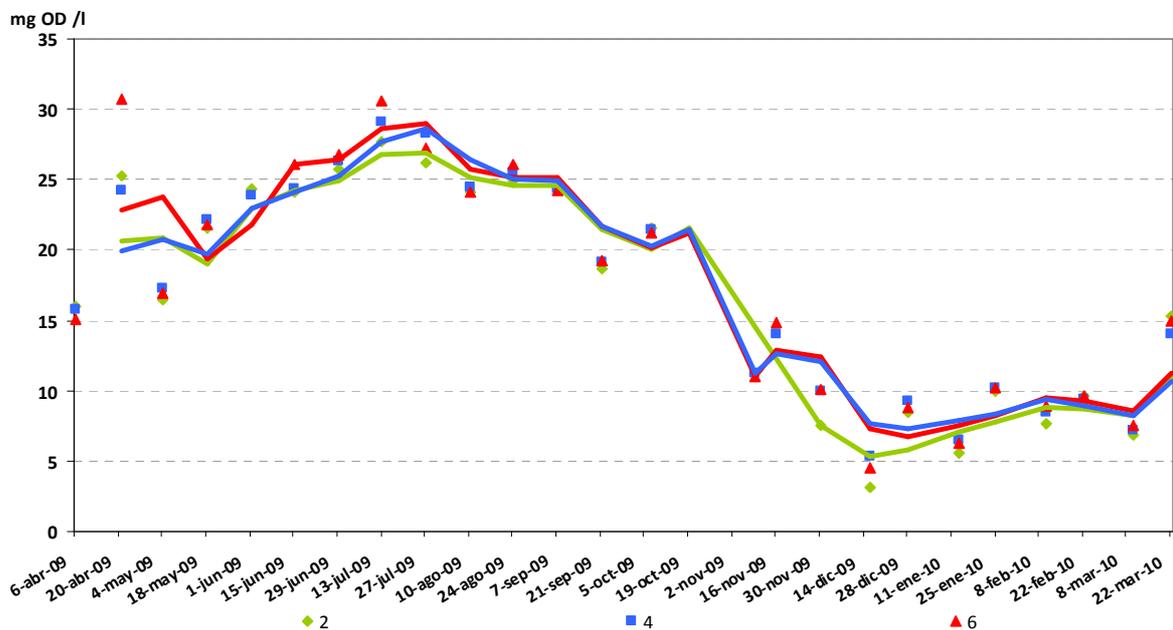


Figura 196: Temperatura (°C) en los puntos 2,4 y 6, desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010. Las líneas verde, azul y rojo representan las medias móviles con un periodo de 2.

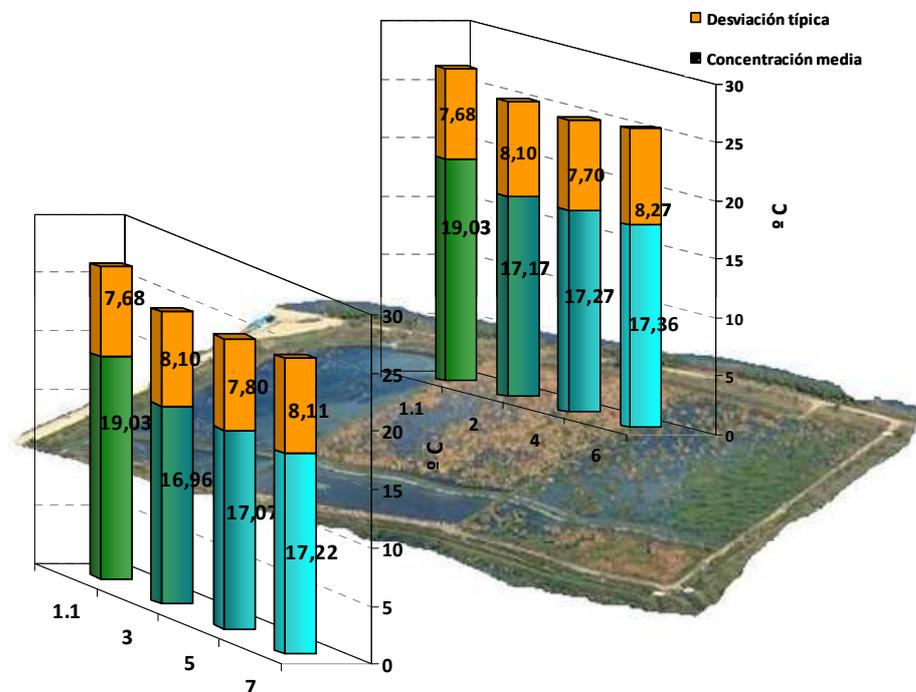
En la siguiente tabla se comparan las temperaturas promedio y los valores máximos y mínimos alcanzados dentro y fuera del humedal,

Tabla 46: Temperatura medida en los puntos 1.1, 2, 4 y 6 desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010

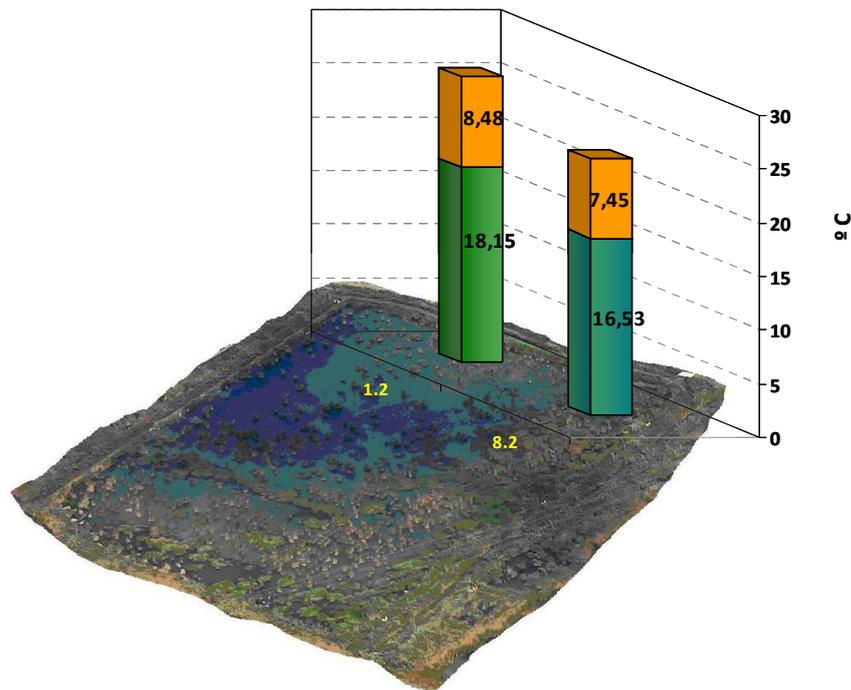
	TEMPERATURA (°C)		
	Mínima	Máxima	Promedio
1.1	6.0	30.4	19.0
2	3.1	27.7	17.2
4	5.4	29.1	17.3
6	4.5	30.7	17.4

Como se observa en la tabla 46, dentro de las celdas *FG1* y *FG2*, la temperatura máxima no alcanza los 30° C, aunque si se aproxima mucho a ésta. Ello se debe al efecto sombra que ejerce en verano la vegetación sobre la lámina de agua. En cambio, la celda *F3G*, que durante el verano su densidad de vegetación fue menor que la de las celdas anteriores, si se alcanzan los 30 ° C.

Finalmente, en las figuras que se exponen a continuación, se pueden observar los valores medios y la desviación típica, obtenidos en cada punto de muestreo, durante todo el periodo de estudio,



**Figura 197: Media (tramo inferior) y desviación típica (tramo superior) de los datos recogidos en los punto de muestreo 1.1, 2, 3, 4, 5, 6, y 7, durante todo el periodo anual (06/04/2009 al 22/03/2010).**



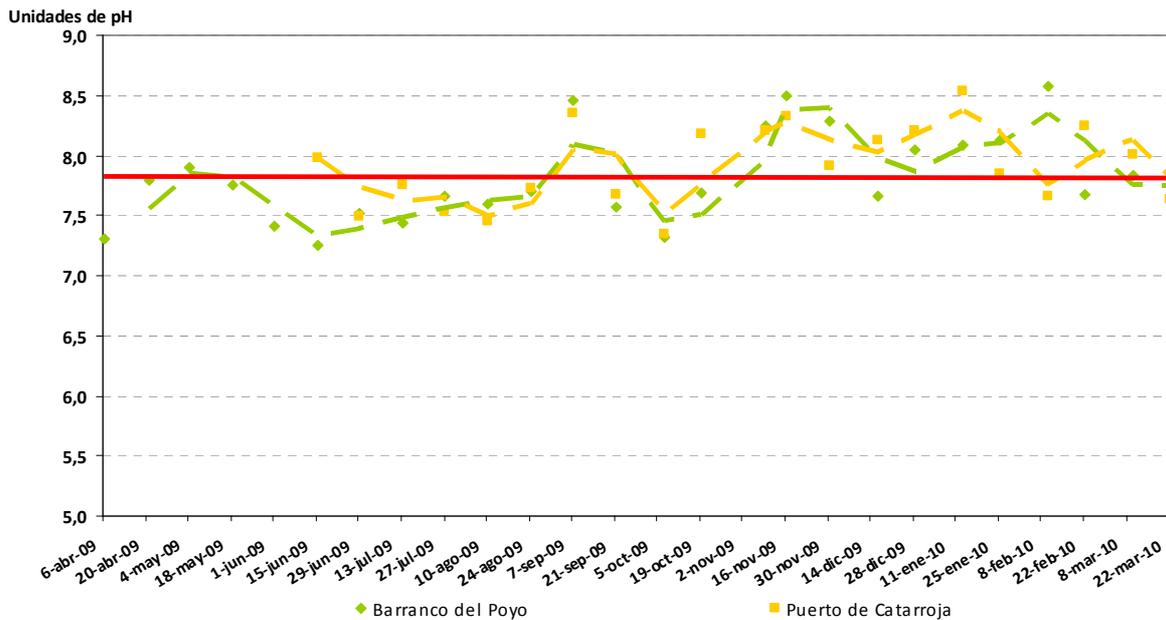
**Figura 198: Media (tramo inferior) y desviación típica (tramo superior) de los datos recogidos en los punto de muestreo 1.2y 8.2, durante todo el periodo anual (06/04/2009 al 22/03/2010).**

En los tres humedales, la temperatura media disminuyó desde la entrada, hasta la salida de los mismos.

## 7.9 pH

El pH del agua es una característica fundamental para el desarrollo de la actividad biológica y para determinar el grado de avance de numerosos procesos de naturaleza físico-química. Las aguas superficiales de buena calidad (Júcar) que pueden acceder al lago de l'Albufera tienen pHs ligeramente básicos, en el entorno de 7.8 unidades de pH. Si durante el día se detectan valores superiores a éstos, puede ser síntoma de eutrofización. Si se detectan valores inferiores lo más probable es que se hayan recibido aportes de aguas residuales urbanas tratadas o de otro tipo.

En la figura siguiente se muestra la evolución del pH en el agua de entrada por el Barranco del Poyo y por el Puerto de Catarroja a lo largo de todo el periodo de estudio,

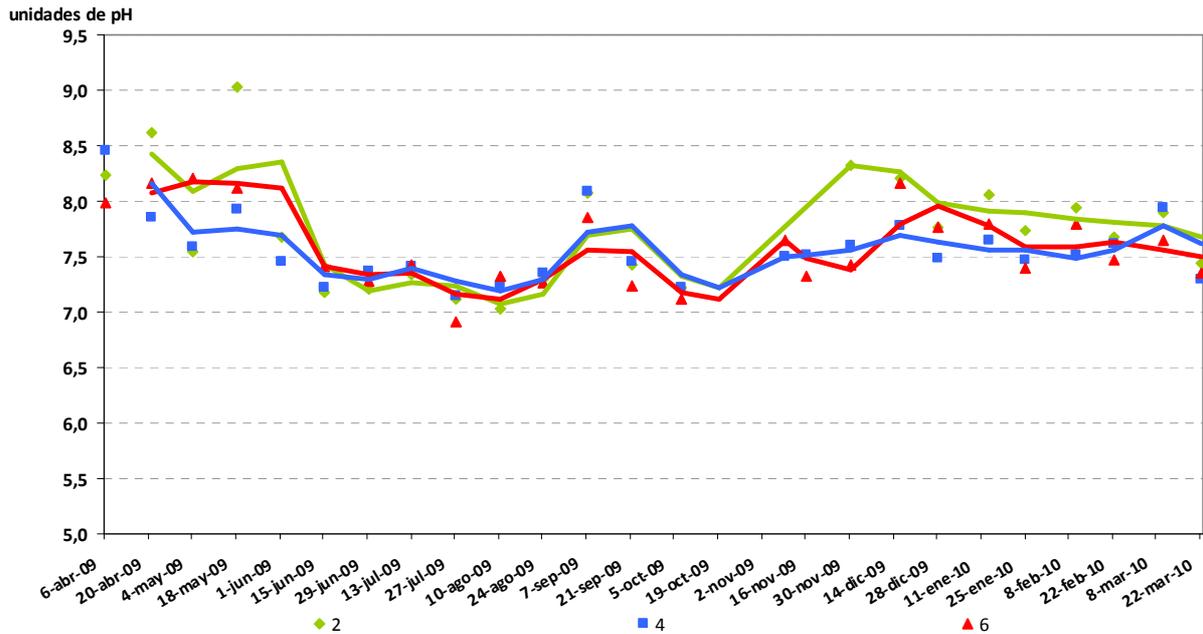


**Figura 199: pH (unidades de pH) en el agua de entrada al sistema por el Barranco del Poyo y por el Puerto de Catarroja, desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010. Las líneas discontinuas representan la media móvil con un periodo de 2.**

Como se puede observar, los valores de pH en las entradas al conjunto de humedales artificiales, se mueven entre valores de 7.25 y 8.57 en el Barranco del Poyo y entre 7.35 y 8.54 en la acequia del Puerto de Catarroja. Aunque los valores medios sean 7.81 y 7.91, respectivamente y la variabilidad sea baja (la desviación estándar es apenas el 5% y el 4 % del valor medio) eso no significa que las aguas se parezcan a las aguas superficiales de la zona.

El otro factor que hay que tener en cuenta a la hora de analizar estos resultados es que si el agua tiene un alto nivel de eutrofia, las oscilaciones diarias de pH pueden ser del orden de 1.5 unidades. A este respecto, los comentarios que se hicieron en el apartado de oxígeno son totalmente aplicables aquí.

La evolución del pH dentro de los humedales artificiales sigue un patrón bastante regular, al igual que ocurría con el oxígeno disuelto y con la temperatura. En la figura que se presenta a continuación, se observa como existe una tendencia, en las tres celdas del humedal *FG*, a la disminución en verano, similar al comportamiento del OD.



**Figura 200:** pH en los puntos 2,4 y 6, desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010. Las líneas verde, azul y rojo representan las medias móviles con un periodo de 2.

En la siguiente tabla se comparan los pH promedio y los valores máximos y mínimos alcanzados dentro del humedal FG y fuera del mismo,

**Tabla 47:** pH medido en los puntos 1.1, 2, 4 y 6 desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010

	pH(unidades de pH)		
	Mínima	Máxima	Promedio
1.1	7.25	8.57	7.81
2	7.03	9.03	7.74
4	7.14	8.45	7.57
6	6.91	8.20	7.59

Finalmente, en las figuras que se exponen a continuación, se pueden observar los valores medios y la desviación típica, obtenidos en cada punto de muestreo, durante todo el periodo de estudio,

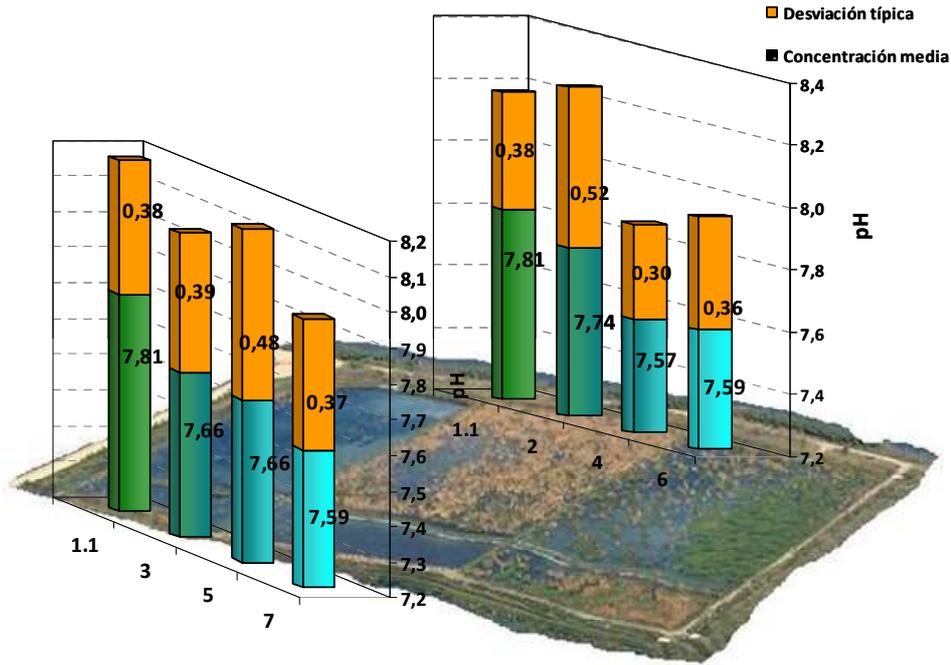


Figura 201: Media (tramo inferior) y desviación típica (tramo superior) de los datos recogidos en los punto de muestreo 1.1, 2, 3, 4, 5, 6, y 7, durante todo el periodo anual (06/04/2009 al 22/03/2010).

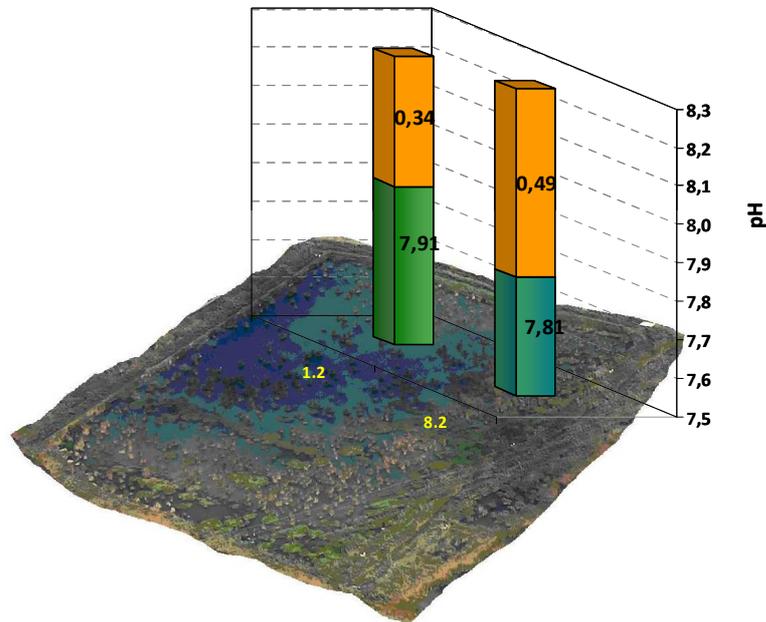


Figura 202: Media (tramo inferior) y desviación típica (tramo superior) de los datos recogidos en los punto de muestreo 1.2y 8.2, durante todo el periodo anual (06/04/2009 al 22/03/2010).

En la tabla 47 y en las figuras 201 y 202, se puede observar como el pH decrece desde las entradas hasta las salidas de los tres humedales. Este descenso probablemente sea debido a la nitrificación.

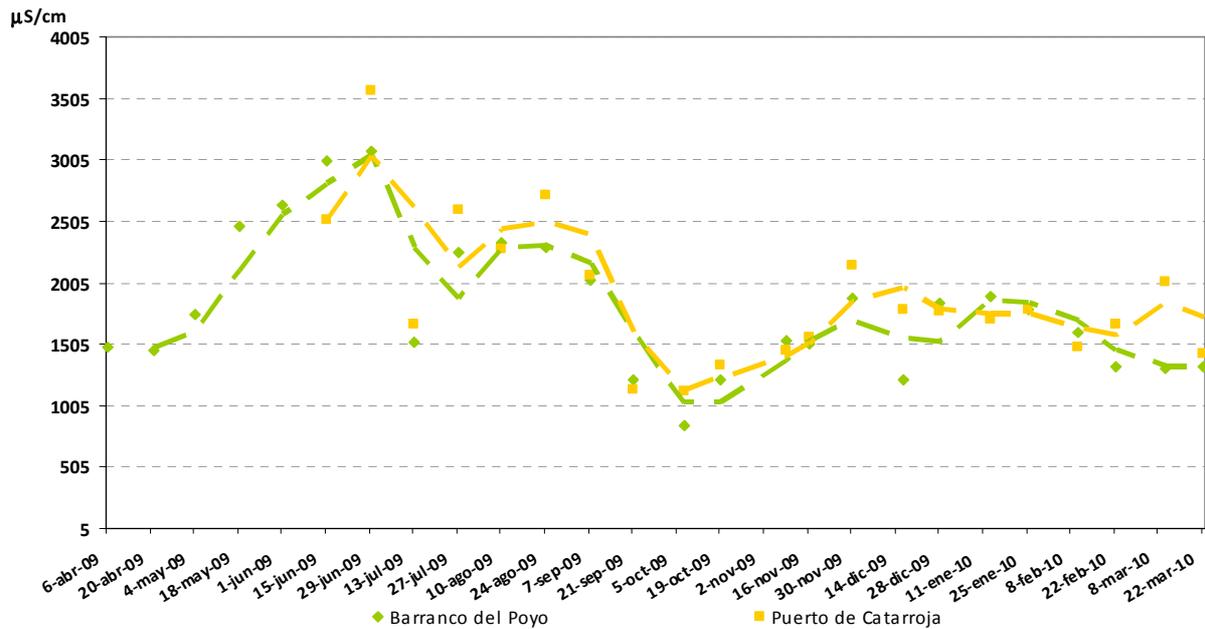
Álvarez y Bécares, también observaron como la presencia de vegetación, además de influir sobre la temperatura del agua, afectaba a otros parámetros físico químicos como el pH y la concentración de OD, debido a que la mayor materia orgánica en la zona con vegetación, supone una mayor actividad respiradora, lo que produce un menor pH y un mayor consumo de OD.

### **7.10 CONDUCTIVIDAD.**

A lo largo del recorrido del agua a través del sistema de humedales, es esperable que la concentración de sales disueltas tienda a aumentar debido a la evapotranspiración que se produce en el sistema. Este aumento variará con la época del año y el caudal tratado, de modo que cuanto mayor sea el caudal de entrada, menor será el incremento porcentual de sales para una misma evapotranspiración.

El otro factor que puede hacer modificar mucho la conductividad de los humedales es la precipitación directa sobre la superficie de las celdas de tratamiento. Esta influencia es debida al nivel de agua que se mantiene en los mismos, unos 25 cm, de manera que una precipitación de 25 l/m<sup>2</sup> en un día puede reducir la salinidad en un 10% aproximadamente. Basta mencionar como ejemplo la precipitación registrada el día 28 de septiembre de 2009, que fue de 125.8 l/m<sup>2</sup> y cuyos efectos en la salinidad se apreciaron en el primer muestreo de octubre de 2009. Asociado a este factor está el tiempo de retención hidráulica de cada celda que determina la inercia de los cambios de salinidad.

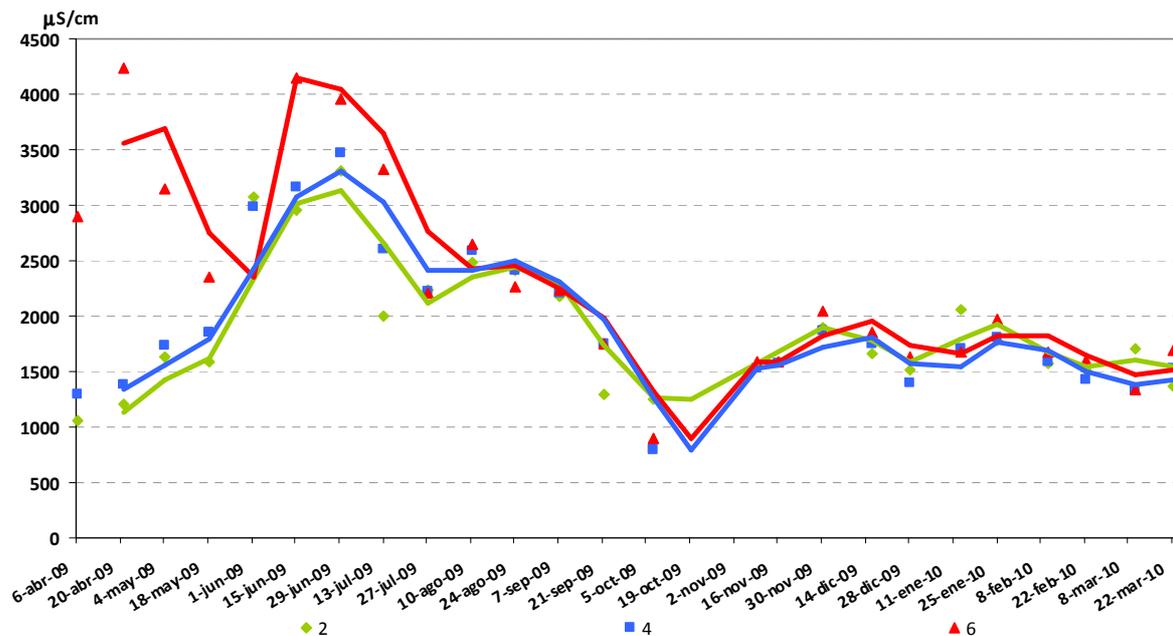
La evolución de la conductividad en el agua de entrada por el Barranco del Poyo y por el Puerto de Catarroja a lo largo de todo el periodo de estudio, se muestra en la figura siguiente,



**Figura 203: Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en el agua de entrada al sistema por el Barranco del Poyo y por el Puerto de Catarroja, desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010.**

Se observa como la conductividad fue más alta en la época de verano debido a la mayor evapotranspiración, y como decreció a medida que se iba acercando el invierno. También se aprecia claramente la bajada de la conductividad después de los eventos importantes de precipitación, comentados anteriormente en el apartado referido al fósforo total.

La evolución de la conductividad dentro de los humedales artificiales se presenta en la siguiente figura,



**Figura 204: Conductividad en los puntos 2,4 y 6, desde el 06/04/2009 hasta el 22/03/2010. Las líneas verde, azul y rojo representan las medias móviles con un periodo de 2.**

La conductividad por lo general, aumentó a lo largo de los humedales como consecuencia de la evapotranspiración, y además, al igual que ocurre con las entradas, es mayor en la época estival y va disminuyendo conforme van descendiendo las temperaturas. También se puede apreciar, la disminución de la concentración de sales como consecuencia de las precipitaciones.

Debido a la variación estacional, no tiene mucho sentido trabajar con valores medios anuales. Sin embargo, se van a mostrar en las siguientes figuras para al menos disponer de un orden de variación de las conductividades en el sistema,

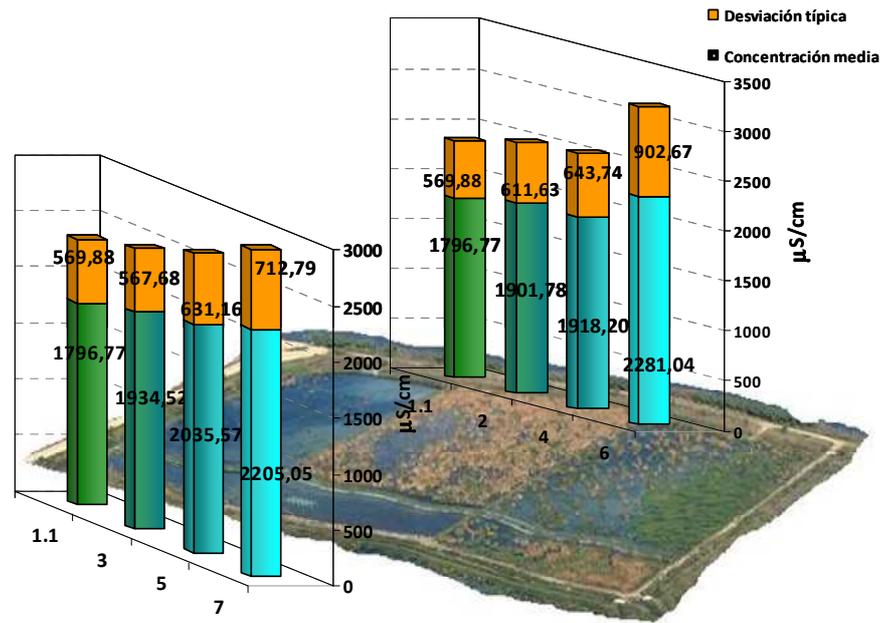


Figura 205: Media (tramo inferior) y desviación típica (tramo superior) de los datos recogidos en los punto de muestreo 1.1, 2, 3, 4, 5, 6, y 7, durante todo el periodo anual (06/04/2009 al 22/03/2010).

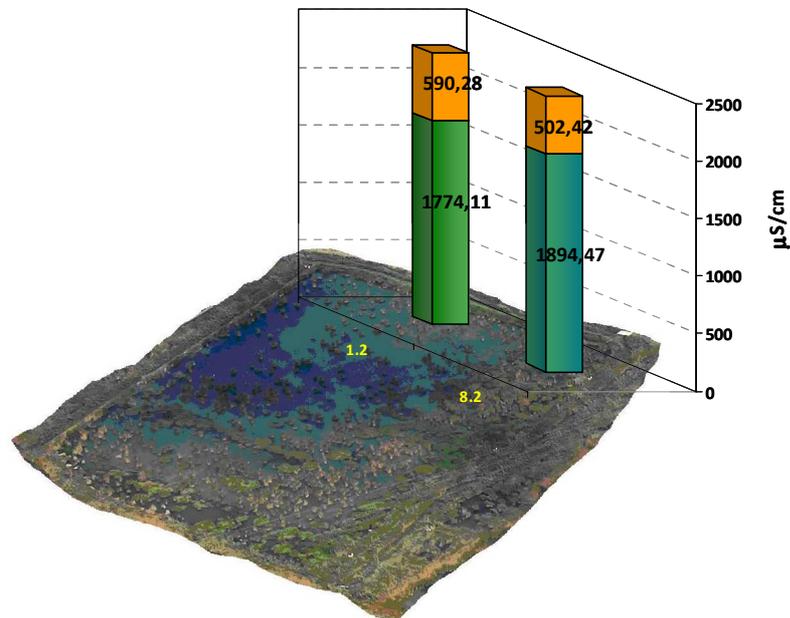


Figura 206: Media (tramo inferior) y desviación típica (tramo superior) de los datos recogidos en los punto de muestreo 1.2y 8.2, durante todo el periodo anual (06/04/2009 al 22/03/2010).

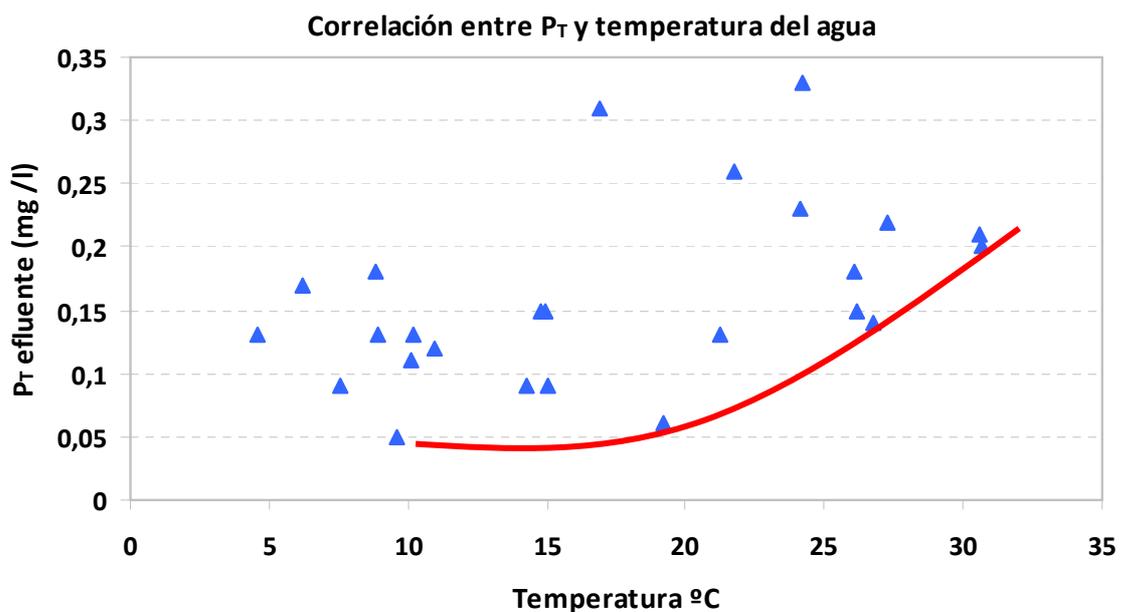
En ambas figuras se observa como la media de las conductividades recogidas durante todo el periodo de estudio, se incrementó desde las entradas, hasta las salidas de los humedales.

## 7.11 INTRODUCCIÓN A LA MODELACIÓN EN SISTEMAS DE HUMEDALES ARTIFICIALES: DESARROLLO DE MODELOS MATEMÁTICOS.

### 7.11.1 Desarrollo de un modelo empírico para el cálculo de la *Concentración base(C\*)*.

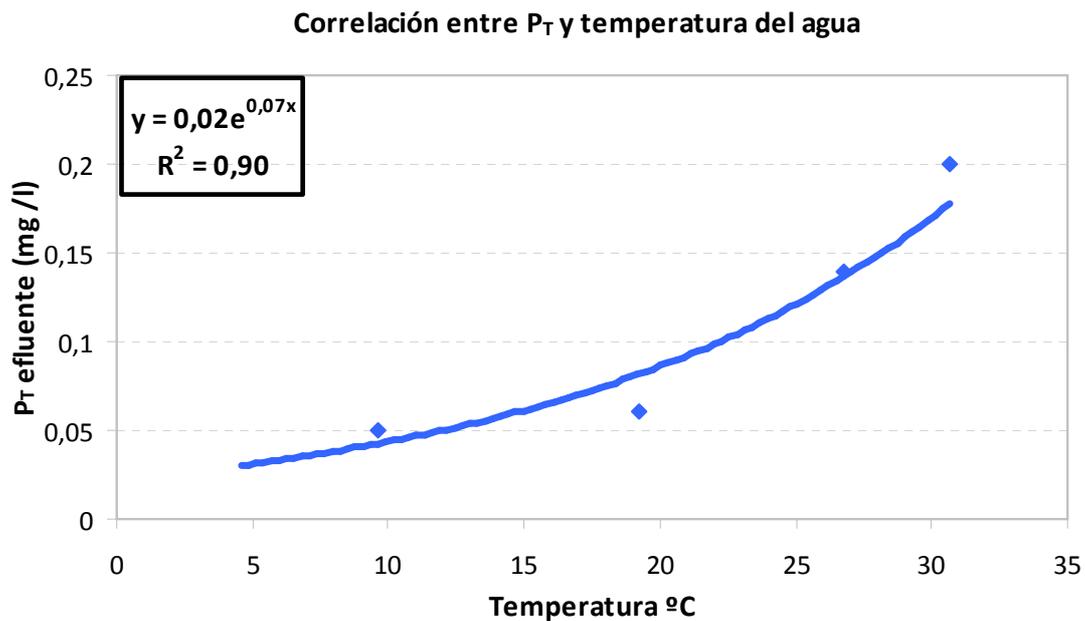
Basándonos en la información recogida en la bibliografía, hemos estimado el valor de la *concentración base* para los  $SS_T$ ,  $P_T$ ,  $N_T$ ,  $Cl_a$ , y  $DQO_T$  en nuestro sistema de estudio, a partir de las más bajas concentraciones de los mismos observadas en el efluente del humedal.

Para su cálculo se representan los valores obtenidos a la salida del sistema en función de la temperatura medida en el mismo. Ello nos permite delimitar visualmente una curvilínea que una los valores más bajos de concentración encontrados. Un ejemplo lo podemos ver en la siguiente figura,



**Figura 207: Relación entre el fósforo total en el punto 6 (salida de la celda FG3) y la temperatura del agua en ese mismo punto. Fuente: Basado en Kadlec y Wallace (2009).**

Los valores seleccionados, se ajustan a una curva exponencial, que representa para cada temperatura, el valor de la *concentración base* en el humedal. De este modo, conocido el valor de la temperatura, se puede determinar, la mínima concentración que se podría obtener en el efluente,



**Figura 208: Ajuste exponencial a los valores más bajos de fósforo total en el punto 6 (salida de la celda FG3) para distintas temperaturas.**

Mediante la ecuación resultante del ajuste exponencial, se han calculado valores de  $C^*$ , para un rango determinado de temperaturas (de 0 a 35°C).

Con el fin de asemejar el cálculo de la concentración base, a la ecuación de Arrhenius ( $k_T = k_{20} \cdot \theta^{(T-20)}$ ), se ha empleado un algoritmo de optimización (Solver) para determinar los valores de los parámetros de la ecuación, que hagan mínima la diferencia entre los valores de  $C^*$  calculados con la ecuación del ajuste exponencial y los de  $C^*$  calculados con la ecuación análoga a la de Arrhenius ,

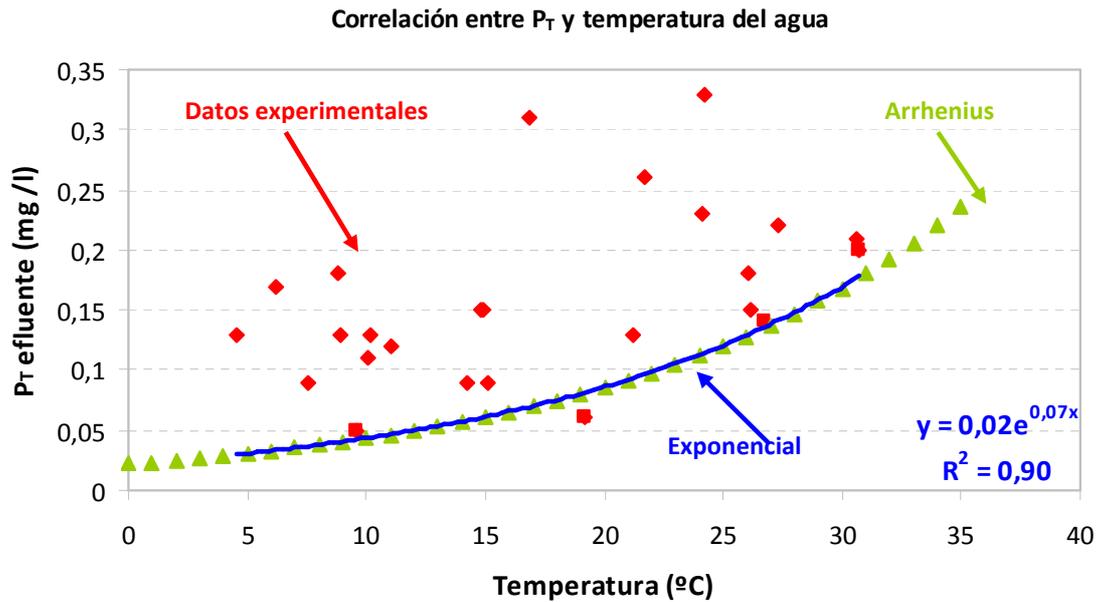


Figura 209: Representación de los valores experimentales, ajuste exponencial y ecuación de Arrhenius.

Las ecuaciones obtenidas para los sólidos suspendidos, fósforo total, nitrógeno total, DQO total y clorofila  $a$  en el humedal  $FG$  son las siguientes:

$$C^* (SS_T) = 2.96 \cdot 1.12^{T-15.40} \quad \text{mg/l}$$

$$C^* (P_T) = 0.06 \cdot 1.07^{T-15.41} \quad \text{mg/l}$$

$$C^* (N_T) = 0.07 \cdot 1.05^{T-15.44} \quad \text{mg/l}$$

$$C^* (DQO_T) = 15.25 \cdot 1.04^{T-10} \quad \text{mg/l}$$

$$C^* (Cl_a) = 3.59 \cdot 1.08^{T-10} \quad \text{mg/m}^3$$

Donde  $T$  es la temperatura expresada en grados Celsius.

Si solamente se considera la celda  $FG2$ , ya que la celda  $FG3$  tardó más tiempo en desarrollarse, los resultados obtenidos son:

$$C^* (SS_T) = 4.051 \cdot 1.054^{T-16.21} \quad \text{mg/l}$$

$$C^* (P_T) = 0.07259 \cdot 1.03^{T-15.41} \quad \text{mg/l}$$

$$C^* (N_T) = 0.4323 \cdot 1.1077^{T-12.48} \quad \text{mg/l}$$

$$C^* (DQO_T) = 2.602 \cdot 1.18^{T-10} \quad \dots \quad \text{mg/l}$$

$$C^* (Cl_a) = 0.357 \cdot 1.14^{T-10} \quad \text{mg/l}$$

Las ecuaciones obtenidas por Coveney (2002) fueron las siguientes:

$$C^* (s_{ST}) = 0.5 \cdot 1.25^{T-18.98} \quad \text{mg/l}$$

$$C^* (P_T) = 0.0720 \cdot 1.025^{T-21.29} \quad \text{mg/l}$$

### 7.11.2 Desarrollo de un modelo empírico para el cálculo de la concentración del efluente ( $C_o$ ).

Las principales variables que determinan la concentración a la salida del humedal ( $C_o$ ) son la carga hidráulica ( $q$ ), o el equivalente tiempo de retención hidráulico ( $h/q$ ), y la concentración en el influente. Otros parámetros que influyen son la temperatura, la radiación solar y el pH (Kadlec y Wallace, 2009).

Conocidos los datos de concentración a la salida del sistema, para un periodo de tiempo de un año, se ha ajustado un modelo simple que relaciona la concentración a la salida con la concentración a la entrada y con la carga hidráulica. La ecuación es la siguiente:

$$C_o = a \cdot C_i^b \cdot q^c$$

Los resultados obtenidos para el fósforo total son los siguientes:

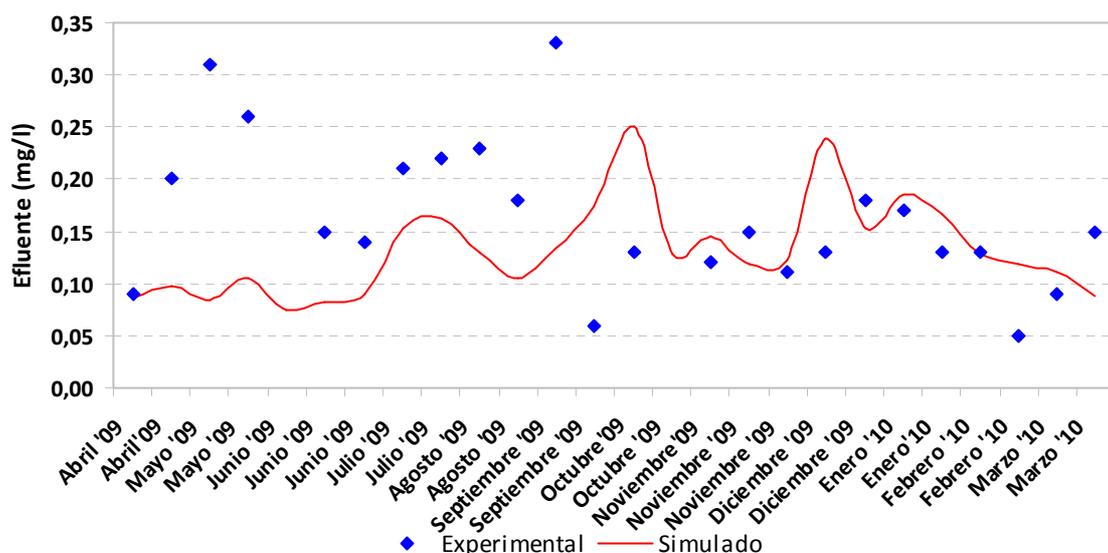


Figura 210: Representación de los valores experimentales y de los simulados, para el  $P_T$  en el humedal FG.

La ecuación que satisface los valores simulados es la siguiente:

$$C_o = 0.14 \cdot C_i^{0.6} \cdot q^{0.3}$$

Para el caso de los  $SS_T$  los resultados son:

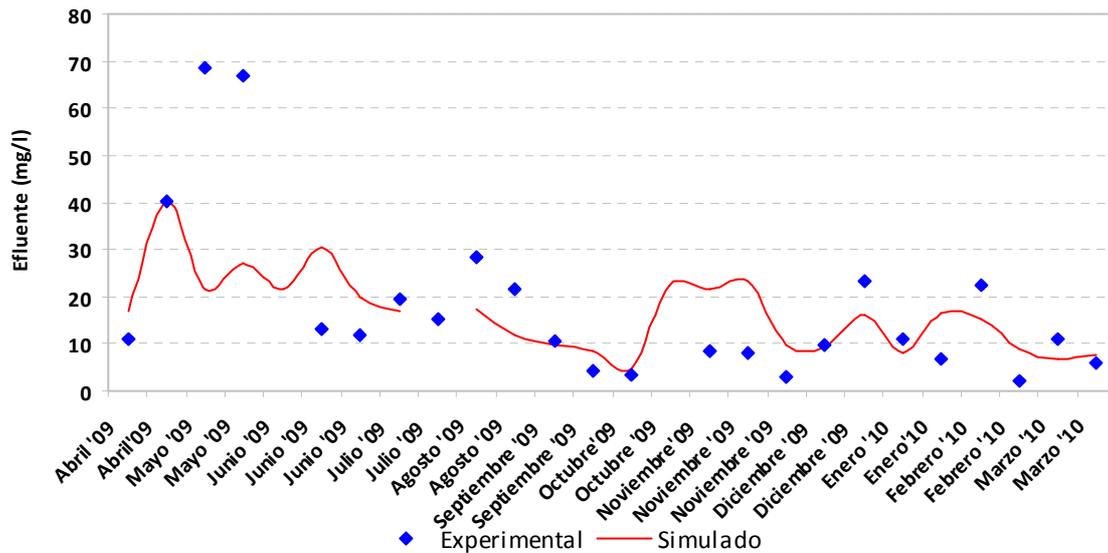


Figura 211: Representación de los valores experimentales y de los simulados, para los  $SS_T$  en el humedal FG.

En este caso, la ecuación queda de la siguiente manera:

$$C_o = 0.19 \cdot C_i^{1.21} \cdot q^{-0.05}$$

De la ecuación superior se desprende que la concentración de sólidos suspendidos a la salida del humedal decrece al aumentar la carga hidráulica, tal y como se observa en la figura siguiente:

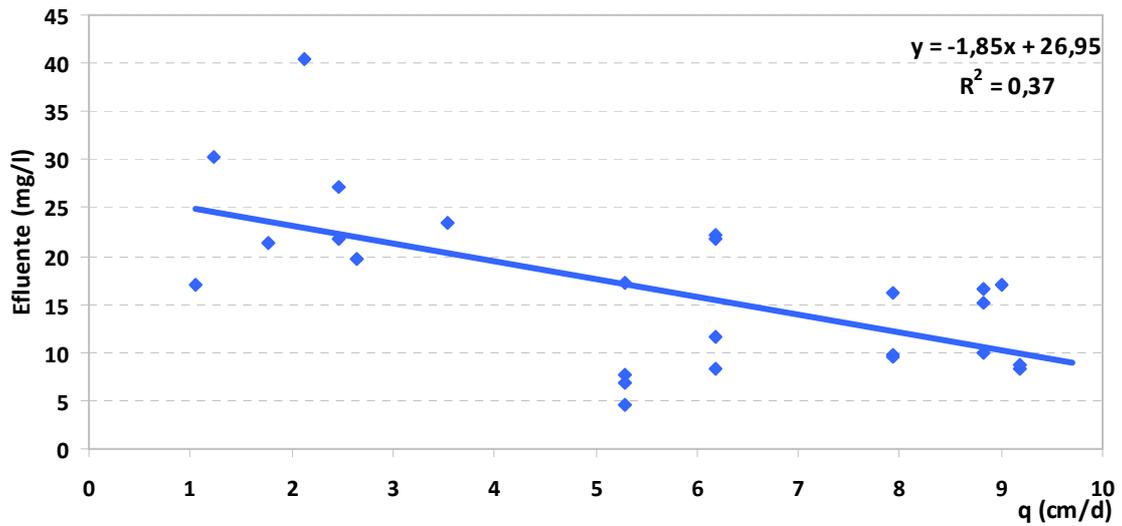


Figura 212: Correlación entre los valores calculados, mediante el modelo simple, para los  $SS_T$  a la salida del humedal *FG* y la carga hidráulica

Esta tendencia también se observa en los valores experimentales:

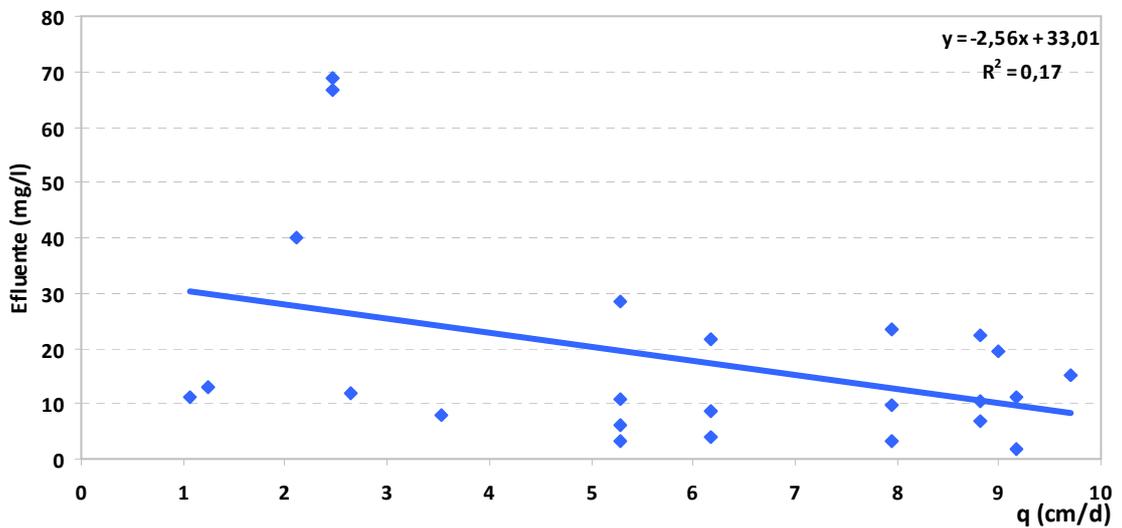


Figura 213: Correlación entre los valores experimentales de  $SS_T$  a la salida del humedal *FG* y la carga hidráulica.

El mismo procedimiento se ha seguido para la celda *FG2*, siendo en este caso la concentración del influente, la concentración en el punto 2 (salida de la celda *FG1*) y la concentración del efluente, la del punto 4.

Los resultados para el fósforo total son:

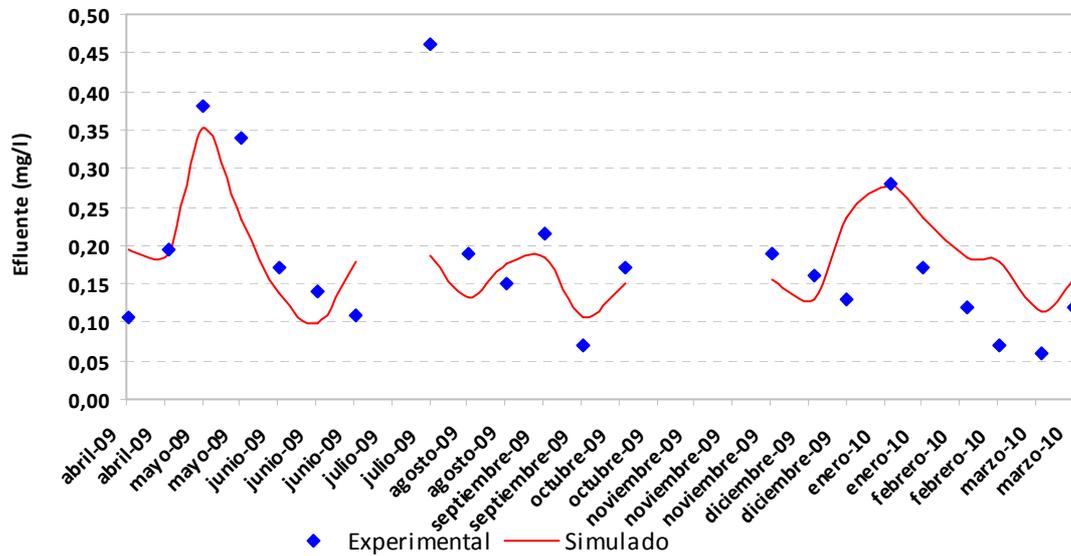


Figura 214: Representación de los valores experimentales y de los simulados, de la concentración de P<sub>T</sub> a la salida de la celda FG2.

La ecuación resultante, que permite predecir la concentración en el efluente conocidas la concentración en la entrada y la carga hidráulica es:

$$C_o = 0.31 \cdot C_i^{0.83} \cdot q^{0.19}$$

Los valores que toman en esta ecuación los parámetros del modelo, son semejantes a los obtenidos por Son, Y. (2010):

$$C_o = 0.3857 \cdot C_i^{0.9621} \cdot q^{0.2175}$$

En el caso de los sólidos suspendidos el resultado es el que aparece en la siguiente figura y en la posterior ecuación:

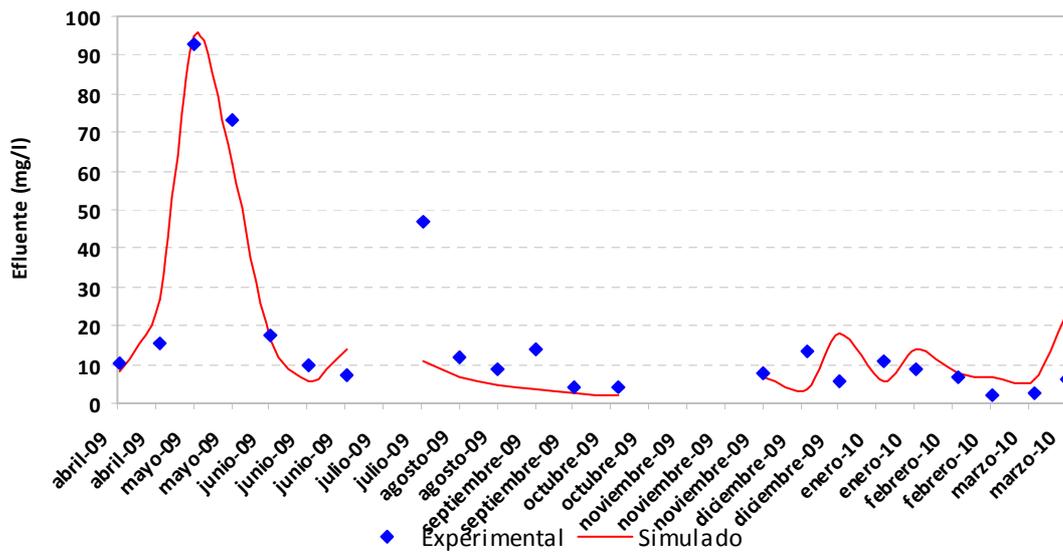


Figura 215: Representación de los valores experimentales y de los simulados, de la concentración de  $SS_T$  a la salida de la celda FG2.

$$C_o = 0.21 \cdot C_i^{1.44} \cdot q^{-0.35}$$

De nuevo, la concentración de sólidos en el efluente disminuye al incrementar la carga hidráulica:

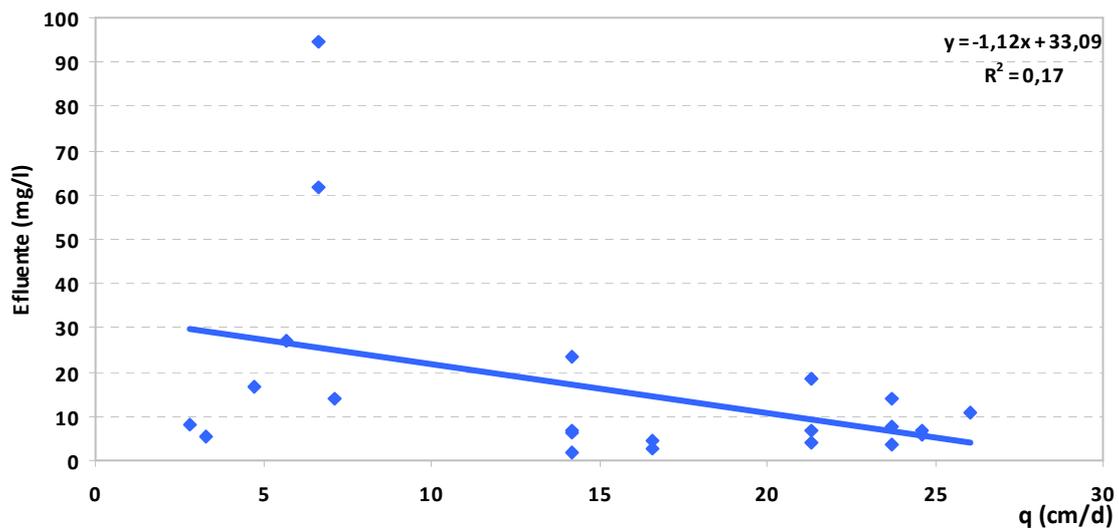


Figura 216: Correlación entre los valores calculados, mediante el modelo simple, para los  $SS_T$  en el efluente de la celda FG2 y la carga hidráulica.

En las figuras siguientes se representan de los valores simulados para el efluente de la celda FG2 versus los observados,

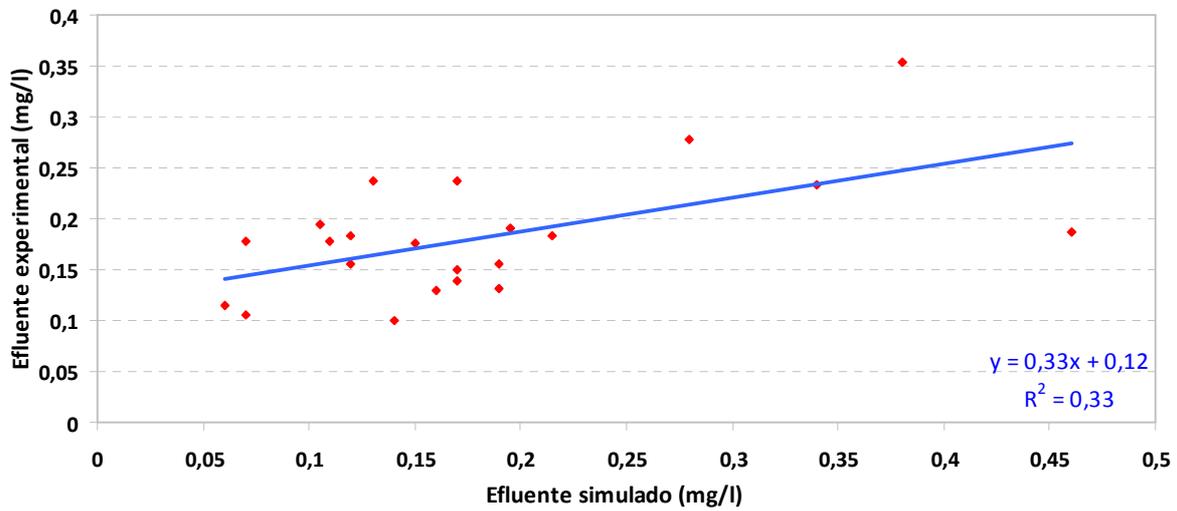


Figura 217: Correlación entre el  $P_T$  observado y el simulado.

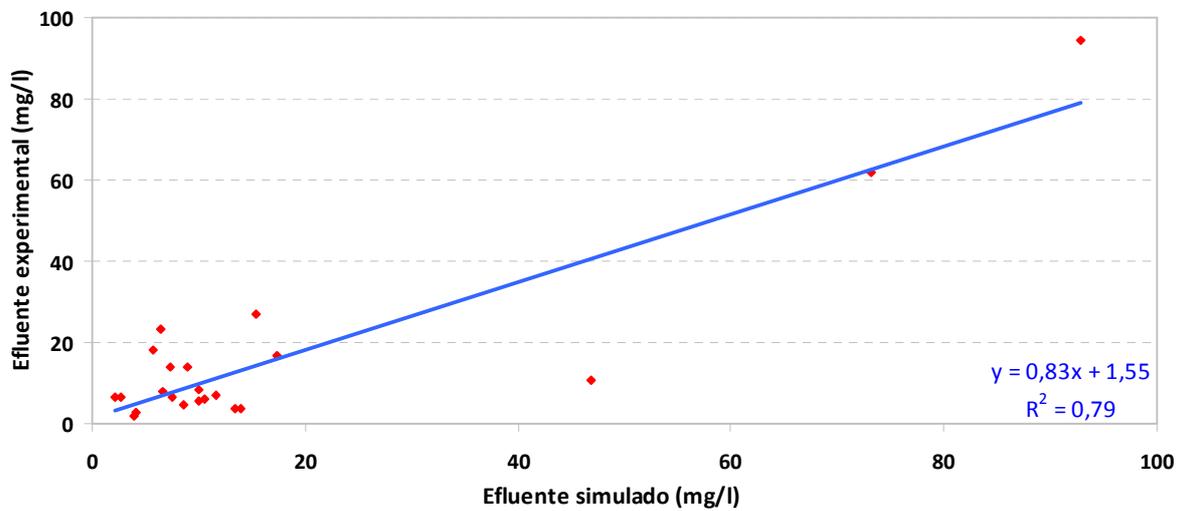


Figura 218: Correlación entre los  $SS_T$  observados y los simulados.



## CONCLUSIONES

---



## 8 CONCLUSIONES

Las principales conclusiones obtenidas del proceso de investigación llevado a cabo durante el primer año de funcionamiento (periodo de puesta en marcha) del sistema de humedales artificiales de flujo superficial ubicado en el Tancat de la Pipa (Parque Natural de l'Albufera de Valencia) son las siguientes:

- Las características del agua de entrada a los humedales artificiales se corresponden a las de una masa de agua en estado hipereutrófico. Éstas son:
  - Fósforo total:
    - En el Barranco del Poyo la concentración del mismo varió entre 0.20 mg P/l y 1.13 mg P/l, siendo la concentración media de 0.40 mg P/l.
    - En la Acequia del Puerto de Catarroja el rango de valores se situó desde 0.16 mg P/l hasta 0.94 mg P/L, con un valor medio de 0.38 mg P/l.
    - Según los valores límite de clasificación trófica para un sistema natural, extraídos del informe de la OCDE de 1982, las aguas con concentración de fósforo total mayor que 0.1 mg P/l, son hipereutróficas.
    - Además, en las dos entradas, prácticamente todo el fósforo que entra al sistema es fósforo no soluble. Las concentraciones de fósforo inorgánico soluble (medido como ortofosfatos) del agua de entrada mayoritariamente están por debajo del límite de detección del método (<0.01 mg P/l). No obstante, en momentos muy concretos, existen picos de fósforo inorgánico soluble, asociados a eventos de lluvia.
  - Clorofila *a*:
    - En el Barranco del Poyo la concentración de la misma varió entre 252 µg/l y 3 µg/l, siendo el valor medio de 76 µg/l.

- En la Acequia del Puerto de Catarroja el rango de valores varió entre 232  $\mu\text{g/l}$  y 4  $\mu\text{g/l}$ , siendo su valor medio de 65  $\mu\text{g/l}$ .
- El informe de la OCDE, de 1982, establece que un lago es hipereutrófico si su concentración media de Clorofila  $a$  es superior 25  $\text{mg Cl } a/\text{m}^3$  y la concentración máxima superior a 75  $\text{mg Cl } a/\text{m}^3$ .
  - Sólidos suspendidos volátiles:
- En las dos entradas, el porcentaje de materia orgánica que forma parte de los sólidos está en torno a un 40%. Esta fracción de sólidos se corresponde, en las aguas hipereutróficas como las de estudio, principalmente a organismos fitoplanctónicos y a detritos.
- Se ha comprobado que el sistema de humedales artificiales es un sistema efectivo para tratar las aguas hipereutrofizadas de una masa de agua natural como el lago de l'Albufera de Valencia.
  - El conjunto de humedales fueron capaces de eliminar sólidos suspendidos, fósforo total, nitrógeno total y clorofila  $a$  del agua procedente del lago de l'Albufera de Valencia con unos rendimientos globales del 46%, 56%, 56% y 42%, respectivamente.
  - El volumen de agua tratado durante todo el periodo de estudio fue aproximadamente de 1.8  $\text{Hm}^3$ . Este volumen representa un 8.6% del volumen del lago de l'Albufera.
  - La masa de sólidos suspendidos, fósforo total, nitrógeno total y clorofila  $a$  eliminada al cabo del año de estudio fue de 30046,8 Kg, 425,6 Kg, 4579,2 Kg y 54,8 Kg, respectivamente.
- Si se toman las siguientes consideraciones:
  - Ausencia de entradas de vertidos al lago, procedentes de otras fuentes distintas a la salida del sistema de tratamiento basado en humedales artificiales del Tancat de la Pipa.

- El valor promedio de sólidos suspendidos, fósforo total, nitrógeno total y clorofila *a* obtenidos del Barranco del Poyo durante el año de estudio, es el valor medio de los mismos contenidos en el lago de l'Albufera durante un año.
- Volumen de agua en el lago de 21 Hm<sup>3</sup>.

Se obtiene, que con el sistema de humedales artificiales se han eliminado el 4,1%, 5,1%, 5% y 5% de los sólidos suspendidos, fósforo total, nitrógeno total y clorofila, contenidos en dicho lago.

- Se ensayó con distintas cargas hidráulicas, con el fin de obtener el máximo volumen de agua que podría tratarse sin perjudicar la eficiencia del tratamiento. En este sentido, se fue incrementando la misma desde un valor de 0,02 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d a 0,08 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d. Los mejores resultados para los distintos parámetros fueron :
  - Sólidos suspendidos: 0,06 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d (uno 60 l/s).
  - Fósforo total: 0,08 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d (unos 80 l/s).
  - Nitrógeno total: 0,02 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d (entre 20 y 40 l/s).
  - Clorofila *a*: 0,02 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d (entre 20 y 40 l/s).
  
  - En el caso del fósforo total, el rendimiento obtenido con la carga hidráulica de 0,06 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d es prácticamente el mismo que el obtenido con la carga hidráulica de 0,08 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d (57% y 60%).
  
  - En el caso del nitrógeno total y de la clorofila *a*, el análisis de obtener la carga hidráulica óptima no se puede realizar debido a las bajas concentraciones en la entrada que se dieron en el periodo en que se trabajó con una carga hidráulica de 0,06 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d. El sistema no fue capaz de trabajar con un rendimiento elevado dado esas concentraciones de entrada tan bajas.
  
  - Por los motivos citados, se considera que la carga hidráulica óptima fue la de 0,06 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d y un caudal de 80 l/s. Ésta se

corresponde con un tiempo de residencia hidráulico en cada uno de los humedales de 3 días.

- Además, se ha observado que al incrementar la carga hidráulica de entrada a los diferentes humedales artificiales, decrece el rendimiento de estos durante un periodo de aproximadamente un mes o mes y medio. Pasado este lapso de tiempo el sistema vuelve a recuperar rendimientos elevados. Por tanto, los humedales necesitan de un tiempo de respuesta para absorber el cambio producido en el caudal de agua a tratar (inercia).
- Se ha comprobado que existe una concentración mínima de cada uno de los parámetros estudiados (concentración base) que el humedal artificial no es capaz de eliminar. Ello es debido a que la mayoría de los humedales, sostienen más productores que consumidores, resultando en un suministro neto de biomasa. Este exceso de material, normalmente queda enterrado en el sedimento o es exportado desde el humedal. La exportación neta resulta en una liberación interna de biomasa particulada y disuelta a la columna de agua, que es medida como niveles distintos de cero de demanda biológica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos totales ( $SS_T$ ), nitrógeno total ( $N_T$ ) y fósforo total ( $P_T$ ).
- También se ha comprobado la efectividad de estos sistemas en reducir los picos de nutrientes, que se dan en las escorrentías superficiales que desembocan el lago, tras los eventos de lluvia (efecto del lavado de la cuenca). Esta función amortiguadora de los picos de carga de nutrientes, refuerza la utilidad de este tipo de sistemas en el entorno del lago.
- Se ha establecido una buena correlación entre la medida de la turbidez y el contenido de sólidos suspendidos en las aguas sometidas al tratamiento. Ello permite establecer la turbidez como una variable de control de la calidad de las aguas y estimar a partir de ella, de una manera fácil y rápida, la concentración de sólidos suspendidos en el agua.
- Se ha observado que la concentración de oxígeno dentro de los humedales artificiales siguen un patrón bastante regular, disminuyendo su concentración en verano y aumentando en invierno. Por tanto, la concentración de oxígeno disuelto

varió inversamente con la temperatura. Las concentraciones más bajas se dieron desde finales de Julio hasta mediados de Octubre del 2009.

- Dentro de los humedales también decreció la concentración de oxígeno a lo largo de las celdas de tratamiento como resultado del consumo del mismo en los diferentes procesos biológicos, químicos y físicos que en el humedal tienen lugar.
- El comportamiento de la temperatura dentro del humedal fue inverso al del oxígeno disuelto, es decir, aumentó en verano y disminuyó en invierno.
- La evolución del pH dentro del humedal fue similar a la del oxígeno disuelto, disminuyó en verano y aumentó en invierno. Además, a lo largo del humedal el pH decrece, probablemente debido a la nitrificación.
- Finalmente, la conductividad en las entradas fue más alta en verano, debido a la mayor evapotranspiración y disminuyó en invierno. También, se ha observado la bajada de la conductividad tras los eventos de lluvia producidos en la zona.
- A lo largo de los humedales la conductividad aumentó como consecuencia de la evapotranspiración, y además su valor fue mayor en verano que en invierno. Dentro de los humedales también se aprecia la disminución de la concentración de sales después de los eventos de lluvia producidos.
- Como consecuencia del incremento en la concentración de sales que se produce a lo largo del humedal artificial, la conductividad es un parámetro importante a tener en cuenta a la hora de decidir el caudal de agua a tratar, ya que, éste ha de ser suficiente como para que el incremento de concentración en sales que se produce dentro del humedal no impida que pueda verterse esta agua tratada al lago.
- Se han elaborado dos modelos empíricos sencillos. Estos son los siguientes:
  - *Modelo empírico para el cálculo de la concentración base (Background Concentrations):* este modelo nos permite estimar, a partir de la temperatura en el humedal, el valor de la concentración base para los diferentes parámetros de estudio.

- *Modelo empírico para el cálculo de la concentración del efluente (Co):* este modelo permite estimar la concentración de un determinado componente a la salida del humedal, a partir de la carga hidráulica y de la concentración del mismo en el influente.

De los problemas presentados en el sistema de humedales artificiales y de la observación en campo de los procesos que allí se dieron, se han seleccionado una serie de recomendaciones que podrían servir para mejorar el funcionamiento del humedal en cuestión o de otros en vía de implantación. Dichas recomendaciones son las siguientes,

- Se recomienda el sistema de celdas en serie, ya que permite la operación y el mantenimiento independiente. Lo más destacable, es que permite realizar la cosecha por partes de modo que el humedal nunca queda totalmente desnudo de vegetación. Las celdas vegetadas pueden seguir depurando el agua, mientras en la celda cosechada la vegetación vuelve a crecer.
- La maquinaria empleada para la cosecha debe ser ligera, ya que la maquinaria pesada provoca tal compactación del sedimento y del suelo que las plantas tienen problemas para crecer nuevamente.
- Es importante que la densidad de vegetación dentro de los humedales sea la óptima. Se debe evitar que queden zonas sin vegetación, pues si es así, se facilita el crecimiento de malas hierbas y de algas filamentosas.
- Se ha comprobado que una densidad de vegetación menor de 1 planta /m<sup>2</sup> no da buenos resultados.
- En general, se debe evitar plantar enea (*Typha*) en aquellos lugares en los que habitan aves con una dieta alimenticia básicamente vegetal, pues la depredación que llevan a cabo sobre estos materiales vegetales puede llevar a disminuir significativamente la densidad de vegetación dentro de los humedales.
- Las motas que separan las celdas de tratamiento deben ser altas y resistentes para permitir incrementar la profundidad de la lámina de agua dentro de las celdas a la par que se incrementa el caudal de entrada. De este modo, el tiempo de residencia dentro de dichas celdas se pueda mantener invariable.

- La abundancia de aves en el humedal, afecta a la concentración base de los diferentes componentes estudiados. Por ello es importante estudiar en un futuro, la influencia de la presencia de aves en dicha concentración.
  
- Por último, aunque no se ha estudiado en el presente trabajo la influencia del zooplancton dentro del humedal, si que se ha detectado el efecto del mismo en la turbidez del agua, cuando éste está presente en abundancia en los humedales. Esta influencia también será estudiada en un futuro.



## BIBLIOGRAFÍA

---



## 9 **BIBLIOGRAFÍA.**

- Álvarez, J.A.; Bécares, Eloy. El papel de la vegetación en humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales.
- Angarita. P. (2010). Estimación del balance hídrico anual, en el humedal artificial del Tancat de la Pipa, con apoyo de modelos matemáticos de calidad de aguas, para contaminantes conservativos. Tesina final de master. Master en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.
- APHA (1992) Standard Method for Water and Wastewater Examination, 17th edn. American Public Health Association, Washington, D.C
- Aponasenko, A.D.; Shchur, L.A.; Lopatin, V.N. (2007). Relationship of the chlorophyll content with the biomass and disperse structure of phytoplankton. Doklady Biological Sciences, 412 ,61-63.
- Asaeda, T.; Trung, V.; K.; Manatunge, J. (2001) Modelling macrophyte–nutrient–phytoplankton interactions in shallow eutrophic lakes and the evaluation of environmental impacts. Ecol. Eng., 16, 341-357.
- Atif Mustafa, Miklas Scholz. (2010) Nutrient accumulation in *Typha latifolia* L. and sediment of a representative integrated constructed wetland. Water Air Soil Pollut. DOI 10.1007/s11270-010-0710-8.
- Bachand, Philip A. M.; Alexander J. Horne. (2000). Denitrification in constructed free-water surface wetlands: I. Very high nitrate removal rates in a macrocosm study. Ecol. Eng., 14, 9-15.
- Bing, Ji; Jihua, Chen. (2009). Low technology systems for rural high turbid and eutrophic water treatment in shanghai: Constructed Wetlands. Proceedings of the 2009 International Conference on Environmental Science and Information Application Technology - Volume 03.

- Brix H. (1997). Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?. *Wat. Sci. Tech.* 35, 5, 11-17.
- Collins Norberth Chinedu Ugochukwu; Nukpezah D. (2008). Ecotechnological methods as strategies to reduce eutrophication and acidification in lakes. *Environmentalist*, 28, 137-142.
- Cooper, PF; Job, GD; Green, MB; Shutes, RBE. (1996). Reed Beds and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. WRc.
- Coveney, M.F., Stites, D.L., Lowe, E.F., Battoe, L.E., and Conrow, R. (2002). Nutrient removal from eutrophic lake water by wetland filtration. *Ecol. Eng.*, 19, 141-159.
- D.S., Mitchell; A.J., Chick; G.W., Raisin. (1995). The use of wetlands for water pollution control in Australia: an ecological perspective. *Wat. Sci. Tech.* 32, 3, 365-373.
- DIRECTIVA 2000/60/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.
- Directiva 2006/44/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 6 de septiembre de 2006, relativa a la calidad de las aguas continentales que requieren protección o mejora para ser aptas para la vida de los peces.
- EPA, (2000). Manual: Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewater. EPA/625/R-99/010.
- Farnsworth-Lee LA, Baker LA (2000) Conceptual model of aquatic plant decay and ammonia toxicity for shallow lakes. *J Environ. Eng Asce.* 126,199-207.
- Fink, D.F.; Mitsch, W.J. (2004). Seasonal and storm event nutrient removal by a created wetland in an agricultural watershed. *Ecol. Eng.* 23, 313–325.
- Gervin, L., Brix, H., (2001). Removal of nutrients from combined sewer overflows and lake water in a vertical-flow constructed wetland system. *Wat. Sci. Tech.* 44,171-176.

- Guirado Valiente, S. (2009). Estudio de la evolución del aporte de nutrientes generados por descomposición de la biomasa planctónica de La Albufera de Valencia. Influencia de la radiación solar. EFC. Universidad Politécnica de Valencia.
- Healy, M.G.; Newell, J.; Rodgers, M. (2007). Harvesting effects on biomass and nutrient retention in *Phragmites Australis* in a free-water surface constructed wetland in western Ireland. *Biology and Environment: Proceedings of the Royal Irish Academy*.107B, 139-145.
- Hu M.H.; Ao Y.S.; Yang X.E.; Li T.Q. (2008). Treating eutrophic water for nutrient reduction using an aquatic macrophyte (*Ipomoea aquatica* Forsskal) in a deep flow technique system. *Agric. Water Manage.*, 95, 607-615.
- Huang, Yung-Ping; Kuo ,Wen-Chien; Lee ,Cheng-Haw; Ting, Cheh-Shyh; Hsieh, Hsun-Huang. (2007). River Water-Quality improvement using a large-scale constructed wetland in southern Taiwan *J. Environ. Eng. Manage.*, 17(4), 277-281.
- IIAMA, Universidad Politécnica de Valencia. (2010). Trabajos de control del sistema de Filtros Verdes en el Tancat de la Pipa.
- Instrucción de planificación hidrológica. (2008).
- Jamieson, Rob; Gordon, Robert; Wheeler, Natalie; Smith, Erin; Stratton, Glenn; Madani, Ali. (2007) Determination of first order rate constants for wetlands treating livestock wastewater in cold climates. *J. Environ. Eng. Sci.*, 6, 65-72.
- Jiménez Sales, M. (2006). Desarrollo y calibración de un modelo matemático de eutrofización a escala diaria en microcosmos experimentales en La Albufera de Valencia. EFC. Universidad Politécnica de Valencia.
- Jing, S.R.; Lin, Y.F. (2004) Seasonal effect on ammonia nitrogen removal by constructed wetlands treating polluted river water in southern Taiwan. *Environ. Pollut.* 127, 291-301.

- Jurado García, D. (1999), Diseño de un Sistema de Tratamiento Mediante Plantas Macrófitas de las Aguas de Lagos Altamente Eutrofizados. Aplicación al Tratamiento de Aguas del Lago de la Albufera de Valencia. EFC. Universidad Politécnica de Valencia.
- Kadlec R. H.; Wallace S. (2009). Treatment Wetlands. CRC Press, Boca Ratón, FL.
- Kadlec R.H.; Knight R.L. (1996). Treatment Wetlands. CRC Press, Boca Ratón, FL.
- Kadlec R.H.; Knight R.L. Vymazal J.; Brix H.; Cooper P. y Haberl R. (2000). Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation. IWA Specialist Group on Use of Macrophytes in Water Pollution Control. IWA. Publishing.
- Kadlec, R.H. (2000). The inadequacy of first-order treatment wetland models. Ecol. Eng., 15, 105-119.
- Li, L.F.; Li, Y.H.; Biswas, D.K.; Nian, Y.G.; Jiang, G.M. (2008). Potential of constructed wetlands in treating the eutrophic water: evidence from Taihu Lake of China. Bioresour. Technol., 99, 1656-1663.
- Lu, Q.; Z.L. He; D.A. Graetz; P.J. Stoffella; X. Yang.(2010). Phytoremediation to remove nutrients and improve eutrophic stormwaters using water lettuce (*Pistia stratiotes* L.). Environ Sci Pollut Res 17: 84-96.
- Martín Monerris, M. y Jurado García, D. (2003), Environmental restoration of hypertrophic lakes by means of the treatment with artificial wetlands. Analysis of viability in the case of the Albufera of Valencia, Spain. Environment 2010: Situation and Perspectives for the European Union. Universidad de Oporto (Portugal).
- Martín, M. (1998). Modelación de la Calidad en Aguas Superficiales. Aplicación al caso de la Albufera de Valencia. Tesis Doctoral para optar al grado de Doctor en Ciencias Químicas. Universidad de Valencia.

- Min, Joong-Hyuk; Wise, William R. (2009). Simulating short-circuiting flow in a constructed wetland: the implications of bathymetry and vegetation effects. *Hydrol. Process.* 23, 830–841.
- Ministerio de Medio Ambiente (2004). Estudio para el desarrollo sostenible de la Albufera de Valencia. Confederación Hidrográfica del Júcar.
- Ministerio de Medio Ambiente (2005). Memoria del Proyecto de recuperación de espacios y actuaciones de gestión hídrica en la desembocadura del Poyo. Confederación hidrográfica del Júcar.
- Miracle, M. R.; Soria, J.M.; Vicente, E.; Romo, S. (1987). Relaciones entre la luz, los pigmentos fotosintéticos y el fitoplancton en la Albufera de Valencia, laguna litoral hipertrófica. *Limnetica*, 3, 25-34.
- Mitsch, W.J. (1995) Restoration of our lakes and rivers with wetlands - an important application of ecological engineering. *Wat. Sci. Tech.* 31,167-177.
- Oliver, N. (2010). Desarrollo y calibración de un modelo matemático de la evolución del aporte de nutrientes por descomposición de la biomasa fitoplanctónica de la Albufera de Valencia. Influencia de la radiación solar. Ejercicio Final de Carrera. Licenciatura en Ciencias Ambientales. Universidad Politécnica de Valencia, Spain.
- Proyecto Depuranet (2008). Gestión Sostenible del Agua Residual en Entornos Rurales. Tratamiento de aguas residuales con finalidades productivas, en el ámbito rural y espacios naturales del Espacio Atlántico, mediante sistemas de tratamiento natural o de bajo coste energético. España. Netbiblo, S.L.
- Quaak M.; Does J.; Boers P.; Vlugt J . (1993). A new technique to reduce internal phosphorus loading by in-lake phosphate fixation in shallow lakes. *Hydrobiologia.* 253: 337-344.
- Reinhardt M, Gächter R, Wehrli B, Müller B.(2005) Phosphorus retention in small constructed wetlands treating agricultural drainage water. *J. Environ. Qual.*, 34, 1251–1259.

- Rodrigo, M. A.; Alonso, J. L., Rubio, F.; Rojo, C. (2010). Proyecto de seguimiento de las variables bióticas (plancton y vegetación sumergida) del sistema de filtros verdes, del ullal y de las lagunas educativas del Tancat de la Pipa (Parc Natural Albufera de Valencia). REF. TSA0027683.
- S.B. He; L. Yan; H.N. Kong; Z.M. Liu; D.Y. Wu; Z.B. Hu. (2007). Treatment efficiencies of constructed wetlands for eutrophic landscape river water. *Pedosphere*, 17 (4), 522–528.
- S.R. Jing; Y.F. Lin; D.Y. Lee; T.W. Wang. (2001). Nutrient removal from polluted river water by using constructed wetlands. *Bioresour. Technol.*, 76, 131-135.
- S.R. Jing; Y.F. Lin; D.Y. Lee; T.W. Wang. (2001). Using constructed wetland systems to remove solids from highly polluted river water. *Water Sci. Technol.: Water Supply*, Vol. 1, Nº1, 89-96.
- Son, Y. K.; Yoon, C. G.; Kim, H. C.; Jang, J. H.; Lee, S. B.(2010). Determination of regression model parameter for constructed wetland using operating data. *Paddy Water Environ.*8, 325-332.
- Soria, J. M.; Vicente, E. (2002). Estudio de los aportes hídricos al parque natural de la Albufera de Valencia. *Limnetica*, 21, 105-115.
- Soria, J.M. (2006). Past, present and future of la Albufera of Valencia Natural Park. *Limnetica*. 25, 135-142.
- Soria, J.M., Miracle, M. R.; Vicente E. (1987): Aporte de nutrientes y eutrofización de la Albufera de Valencia. *Limnetica* 3, 227-242
- Tang, X.Q.; Huang, S.L.; Scholz, M. (2009). Nutrient removal in pilot-scale constructed wetlands treating eutrophic river water: assessment of plants, intermittent artificial aeration and polyhedron hollow polypropylene balls. *Water Air Soil Pollut.*197, 61–73.
- U.S. EPA. (2000). Humedales de Flujo Libre Superficial. EPA 832-F-00-024.

- UNE-EN ISO 5667.
- Vörös, L.; V.-Balogh, K.; Koncz, E.; Kovács, A. (2003). Phytoplankton and bacterioplankton production in a reed-covered water body. *Aquat. Bot.* 77, 99-110.
- Vymazal, Jan (2007) Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Sci. Total Environ.*, 380, 48-65.
- Vymazal, Jan ; Kropfelova, Lenka. (2008). *Wastewater Treatment In Constructed Wetlands With Horizontal Sub-surface Flow*. Springer Verlag.
- Wang G.X.; Zhang L.M.; Chua H; Li X.D.; Xia M.F; Pu P.M.(2009) A mosaic community of macrophytes for the ecological remediation of eutrophic shallow lakes. *Ecol. Eng.*35, 582-590.
- Wetzel, R. (1981), *Limnología*.
- X. N. Li, H. L. Song, W. Li, X. W. Lu, O. Nishimura. (2010). An integrated ecological floating-bed employing plant, freshwater clam and biofilm carrier for purification of eutrophic water. *Ecol. Eng.*, 36, 382-390.
- <http://depuranat.itccanarias.org/>
- <http://estaciones.ivia.es/diario0.php3?idprovincia=46&idestacion=17>
- [www.albufera.com](http://www.albufera.com)
- [www.eea.europa.eu/es](http://www.eea.europa.eu/es)
- [www.gva.es](http://www.gva.es)
- [www.limnetica.com](http://www.limnetica.com)
- [www.tancatdelapipa.net](http://www.tancatdelapipa.net)

- [www.upv.es](http://www.upv.es)