

Treball Final de Màster

## **Màster en Enginyeria Ambiental**

Utilització de piles microbianes com a  
bioindicadors d'activitat biològica en  
entorns de recàrrega gestionada d'aqüífers

**- ANNEXES -**

Autor:

**Guillem de Lorenzo Martínez**

Directors:

**Paula Rodríguez i Escales**

**Xavier Sanchez-Vila**

Barcelona, 27 de setembre de 2024



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA**  
**BARCELONATECH**

---

**Escola Tècnica Superior d'Enginyeria  
de Camins, Canals i Ports de Barcelona**

## Annex 1: tractament de dades d'entrada a la PCA

### Decalatge temporal

Pet tal d'analitzar l'efecte del decalatge entre les diferents variables i punts de mostreig, s'estudia la correlació de la mateixa variable a diferents profunditats i respecte a la temperatura ambiental, buscant la millor correlació en el decalatge de les oscil·lacions diàries.

En aquest estudi no es troba decalatge ni a l'oxigen dissolt ni a la humitat relativa a diferents profunditats. La conductivitat de l'afluent, al no tenir oscil·lacions diàries, no es pot estudiar el decalatge respecte a la temperatura ambiental, però sí que es pot aplicar el mateix criteri que a la temperatura de l'afluent.

La temperatura de l'afluent té un decalatge positiu de 3 hores respecte a la temperatura ambiental. Això vol dir que, de mitjana, els pics i valls de temperatura diària estan 3 hores avançades a l'afluent respecte la temperatura ambiental.

En quan a la temperatura a les barreres, es manté en les dues barreres i les dues sondes, humitat relativa i oxigen dissolt, un patró d'endarreriment temporal del canvi de temperatura a més profunditat, però amb comportaments diferents de velocitat i decalatge respecte a la temperatura ambiental (Taula A1).

Les oscil·lacions diàries a la barrera 31, tenen un endarreriment respecte a la temperatura ambiental de 2, 5 i 8 hores a 5, 10 i 20 cm de profunditat respectivament. A la sonda d'humitat relativa, el decalatge és nul a 10cm, de 3 hores a 20cm i de 7 hores a 30cm.

En canvi, a la barrera 51, on es descarta la profunditat a 5cm per tenir un patró molt atenuat, hi ha un avançament d'1 hora (sonda OD) i 2 hores (sonda HR) a 10 cm, decalatge nul a 20cm (ambdues sondes) i endarreriment d'1 hora (sonda OD) i 4 hores (sonda HR) a 30cm.

*Taula A1: estudi de decalatge de la temperatura a diferents profunditats de les dues barreres respecte la temperatura ambiental. Valors positius signifiquen un avançament dels pics i valls de les oscil·lacions diàries a la barrera respecte la temperatura ambiental.*

	31 sonda OD	31 sonda HR	51 sonda OD	51 sonda HR
5 cm	-2 h	Nd	Nd	Nd
10 cm	-5 h	0	+1 h	+2 h
20 cm	-8 h	-3 h	0	0
30 cm	Nd	-7 h	-1 h	-4 h

Amb tot això es pot concloure que les dues sondes instal·lades a la mateixa profunditat mostren un decalatge diferent i que les dues barreres també mostren un comportament diferenciat en quan a evolució de la temperatura en profunditat.

Tenint en compte la dificultat de quantificar el decalatge de temperatura afluent-ambient-barrera, que la correcció de decalatges de implicaria moure en el temps també dades associades entre elles (per exemple temperatura afluent amb conductivitat afluent) i que les diferents PCA prèvies a llarg termini no mostren millores substancials amb i sense correcció de decalatge de temperatura (les diferents temperatures s'agreguen en l'espai de components igualment tan si es corregeix decalatge com si no) es decideix no corregir decalatges en les PCAs finals.

#### Extrapolació de dades

Els criteris seguits i les extrapolacions fetes s'expliquen a continuació.

Les piles microbianes tenen 3 períodes sense dades, de 2 a 3 dies de duració. No es fa extrapolació, donada la falta de referències com dades a altres profunditats, la falta de correlació entre barreres i la dificultat per preveure el comportament de la sèrie, així com ser la dada objectiu principal d'aquest estudi. A més, durant els tres períodes on falten dades d'intensitat, també falten dades en altres variables. En el cas que hi hagi absència de dades en una de les dues piles, només s'analitzarà en la PCA la barrera amb dades d'intensitat de corrent. Del total de 1105 dades horàries entre les dates de l'estudi, hi ha disponibles 963 per a la barrera 31 i 935 per a la barrera 51.

L'oxigen dissolt és una altra variable amb falta de dades. No es fa extrapolació per la falta de dades a totes les profunditats, falta de correlació entre profunditats, falta de correlació entre barreres i patró de la sèrie poc clar.

Es disposa d'un total de 896 dades a la barrera 31, amb una interpolació, i de 902 a la 51, amb 5 interpolacions, del total de 1105 dades. Gran part dels valors perduts per OD, coincideixen amb valors perduts d'intensitat de corrent.

Les dades de temperatura de la barrera a 20 cm de profunditat tenen 97 valors perduts a l'inici de la sèrie. Com que a la resta de la sèrie la correlació entre la temperatura a 10 cm i a 20 cm és casi absoluta, amb la diferència d'un avançament d'una hora, es completen les dades amb la sèrie de 10 cm corregint el decalatge.

En quan a la humitat relativa a 20cm de profunditat, les dues barreres tenen un comportament similar en quan a resposta a esdeveniments puntuals com la pluja, però tenen oscil·lacions diàries decalades en el temps i uns nivells mitjans més elevats a la barrera 31. A més, a l'inici de la sèrie les tendències son oposades, la barrera 31 té valors a l'alça mentre que a la barrera 51 disminueix la HR. Tenint en compte això, els 97 valors perduts a l'inici de la sèrie de dades de la barrera 31 s'extrapolen amb valors de la mateixa sèrie en el període immediatament posterior,

ja que les condicions ambientals es consideren estables i la HR a la barrera 51 mostra un patró estable al llarg del mateix període.

A la resta de sèrie de dades, les dues barreres tenen tendències molt paral·leles, per la qual cosa els valors perduts s'extrapolen amb dades de l'altra barrera corregint el decalatge en les oscil·lacions diàries i el valor basal.

A la PCA a curt termini s'extrapolen 97 dades d'humitat relativa (d'un total de 193) a la barrera 31 i a llarg termini 171 i 27 a la barrera 31 i 51 respectivament (Taula A2).

*Taula A2: dades reals, interpolades i extrapolades per a totes les variables a la PCA a curt termini (193 dades) i a llarg termini (1105 dades). Cada dada correspon a una mitjana horària de la variable. Entre parèntesi, dades aprofitades després de descartar franges horàries amb valors perduts i no extrapolats.*

Variable	Període curt 02.04.2021 (12:00) al 10.04.2021 (13:00)			Període llarg 02.04.2021 (12:00) al 18.05.2021 (12:00)		
	Dades reals	Dades interpolades	Dades extrapolades	Dades reals	Dades interpolades	Dades extrapolades
<b>Intensitat 31</b>	193	0	0	963 (871)	0	0
<b>Intensitat 51</b>	192	1	0	935 (808)	1	0
<b>Temp. ambiental</b>	193	0	0	1105 (871;809)	0	0
<b>Temp. afluent</b>	193	0	0	1105 (871; 809)	0	0
<b>Cond. afluent</b>	193	0	0	1105 (871; 809)	0	0
<b>Nivell aqüífer 31</b>	192	1	0	1104 (870)	1	0
<b>Nivell aqüífer 51</b>	191	1	0	1103 (808)	1	0
<b>OD 31</b>	193	0	0	913 (870)	1	0
<b>OD 51</b>	193	0	0	897 (807)	2	0
<b>Temp. barrera 31</b>	193	0	0	913 (871)	0	0
<b>Temp. barrera 51</b>	114	0	79	897 (806)	3	79
<b>HR 31</b>	96	0	97	836 (700)	0	171
<b>HR 51</b>	193	0	0	1029 (782)	0	27

### Aplicació de logaritmes

Per tal d'avaluar si cal o no aplicar logaritmes a les diferents variables d'entrada a la PCA, es fa un anàlisi previ comparant diferents escenaris tenint en compte que les variables que milloren la seva correlació amb la resta de variables aplicant logaritmes en un anàlisi multivariant són la intensitat de corrent i l'OD. A partir d'aquí, s'han fet un seguit de PCAs amb i sense logaritmes a

les variables intensitat de corrent i oxigen dissolt per veure com reacciona l'anàlisi a aquestes variacions (Taula A3).

*Taula A3: PCAs de les barreres 31 i 51 fetes amb i sense logaritmes decimals per a l'oxigen dissolt i la intensitat de corrent. Les dades d'entrada no inclouen extrapolacions.*

PCA	KMO	Extracció intensitat	Extracció OD	Variabilitat explicada 2D
31 sense log	0,794	0,670	0,425	61,89
<b>31 log intensitat</b>	<b>0,796</b>	<b>0,705</b>	<b>0,428</b>	<b>61,97</b>
31 log OD	0,801	0,729	0,441	62,23
<b>31 log OD i intensitat</b>	<b>0,800</b>	<b>0,766</b>	<b>0,442</b>	<b>62,29</b>
31 tot log	0,786	0,772	0,436	62,13
51 sense log	0,722	0,799	0,810	72,46
<b>51 log intensitat</b>	<b>0,729</b>	<b>0,846</b>	<b>0,812</b>	<b>73,16</b>
51 log OD	0,728	0,789	0,793	72,25
<b>51 log OD i intensitat</b>	<b>0,729</b>	<b>0,827</b>	<b>0,790</b>	<b>72,81</b>
51 tot log	0,720	0,824	0,792	72,39

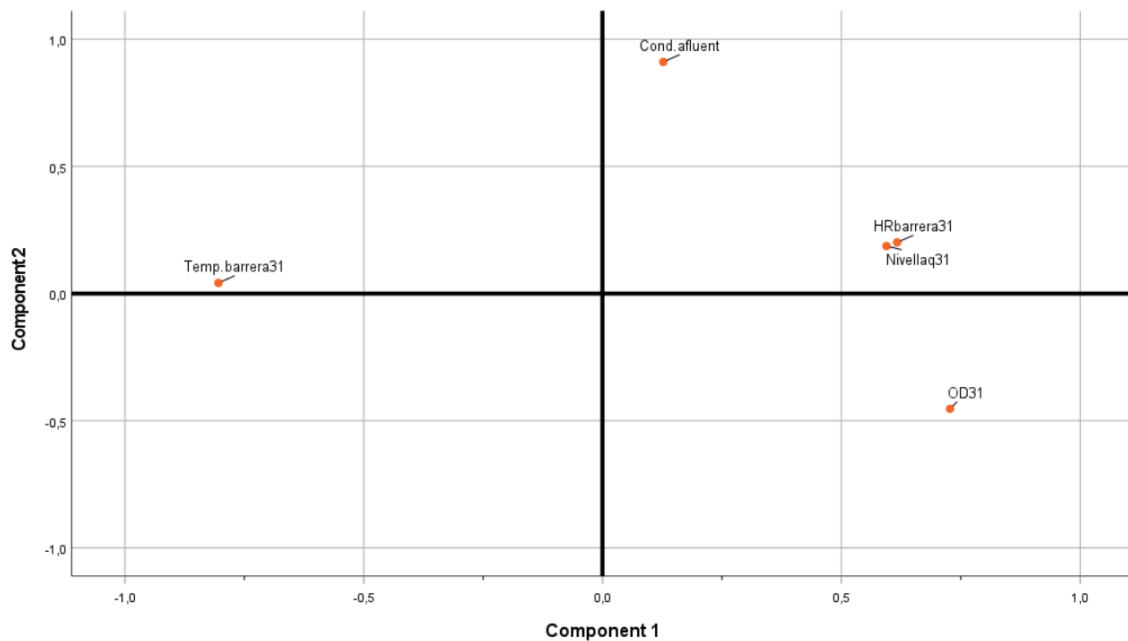
L'aplicació de logaritmes té una resposta diferent segons la barrera. Quan apliquem logaritmes a la barrera 31 a la intensitat i a l'oxigen dissolt, milloren els principals paràmetres KMO, variabilitat explicada i la extracció de la intensitat de corrent i OD, tot i que disminueix lleugerament la extracció d'altres variables (dades no mostrades). En canvi, a la barrera 51 l'aplicació de logaritmes a la intensitat de corrent si que millora lleugerament els resultats, però no ho fa quan ho apliquem a l'OD.

Per tal de potenciar la fortalesa de la intensitat de corrent a la PCA i aplicar el mateix criteri a les dues barreres, es decideix utilitzar logaritmes només a la intensitat de corrent.

## Annex 2: resultats PCA sense la variable intensitat de corrent

Taula A4: extracció de les variables per components obtingudes amb els 2 anàlisis de components principals, 31 i 51. Entre parèntesis, grau d'extracció de la variable per a cada component en espai rotat (mètode Varimax amb normalització Keiser). Les variables en negreta indiquen valors d'extracció superiors a 0,5 en més d'una component. Percentatge de variabilitat explicada per cada component expressat en percentatge no acumulat

	Components extreptes	Variables		% de variància	Valor test KMO
		Correlació positiva	Correlació negativa		
PCA 31	1	OD 31 (0,735) HR barrera 31 (0,614) Nivell aq. 31 (0,592)	Temp. barrera (0,805)	38,5	0,606
	2	Cond. afluent (0,913)		22,2	
PCA 51	1	<b>Nivell aq 51 (0,744)</b> <b>HR barrera 51 (0,660)</b>	OD 51 (0,891)	36,9	0,514
	2	Temp. barrera 51 (0,808) <b>HR barrera 51 (0,560)</b>	Cond. afluent (0,602) <b>Nivell aq. 51 (0,507)</b>	31,4	



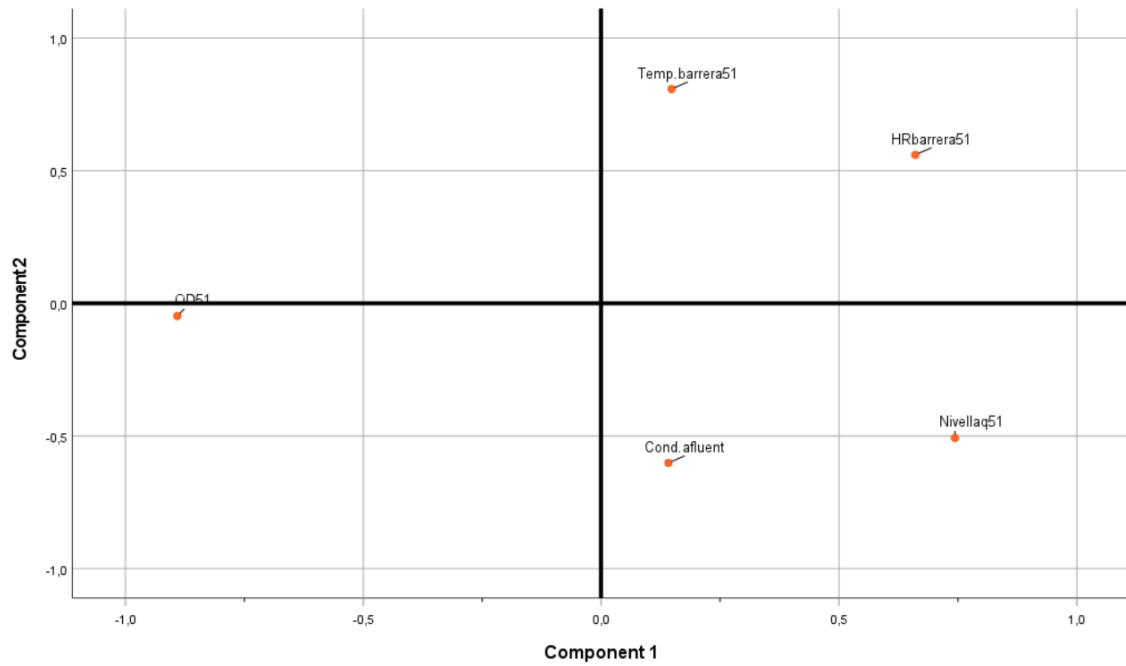
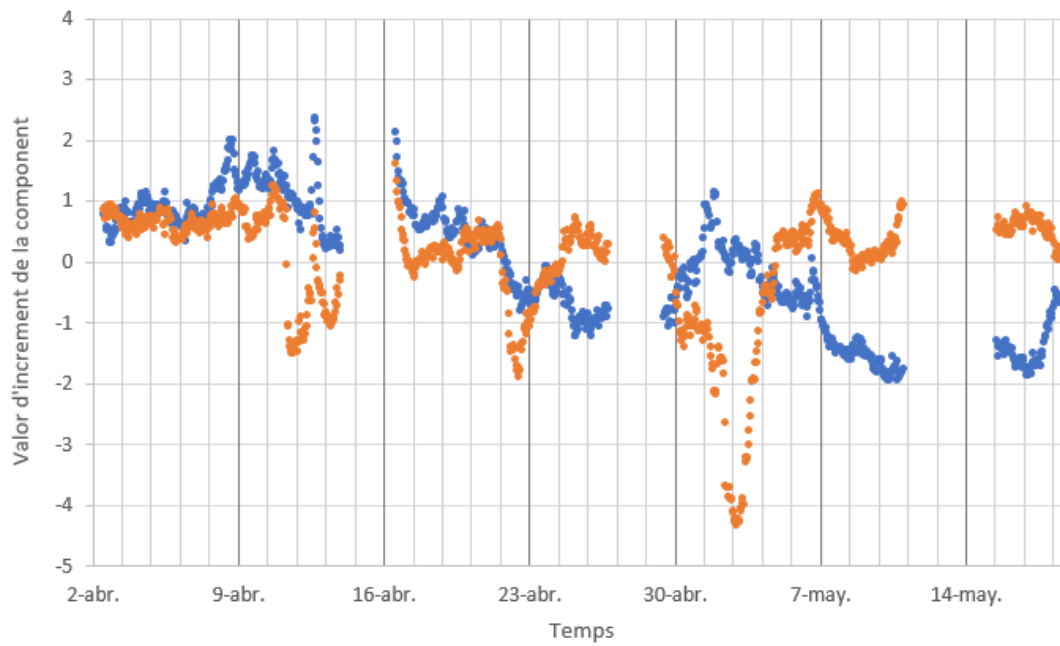


Figura A1: distribució de la correlació de les variables amb les 2 components principals dels anàlisis PCA 31 (superior) i 51 (inferior) per al període llarg d'estudi.



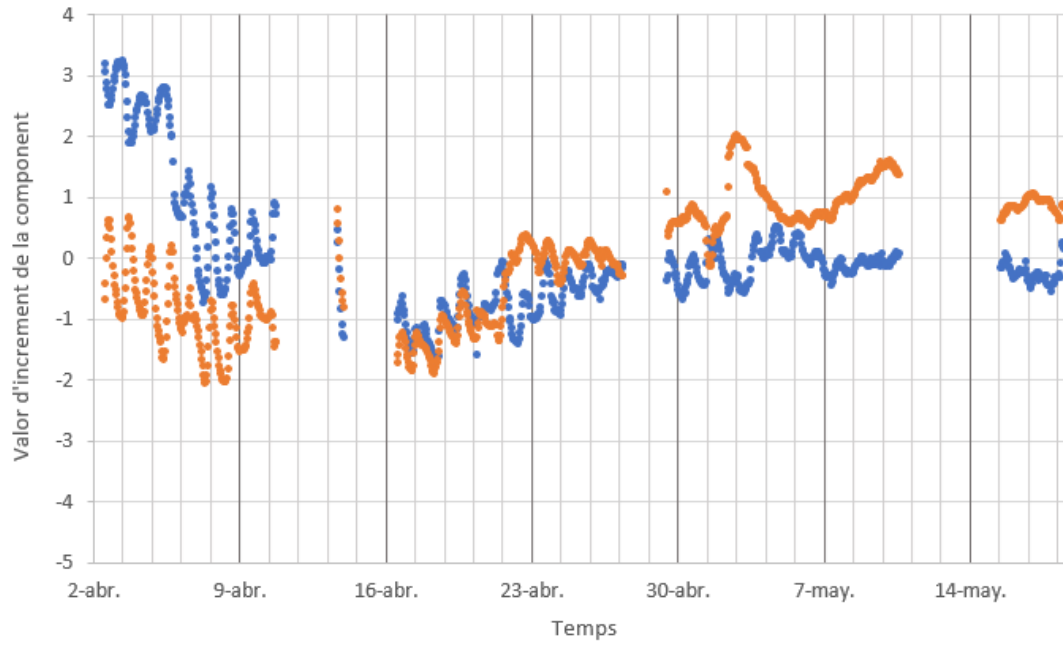


Figura A2: comportament de la component 1 (blau) i 2 (taronja) al llarg del temps per a les PCA 31 (superior) i 51 (inferior). Valors d'increment de la variable expressats com a puntuació factorial extretes pel mètode de regressió. Cada punt correspon a un període d'una hora.

## Annex 3: PCA amb i sense pluja

Taula A5: extracció de les variables per components obtingudes en els anàlisis de components principals a la barrera 31 i 51 en absència (taula superior) o presència (taula inferior) de pluja. Entre parèntesis, grau d'extracció de la variable per a cada component en espai rotat (mètode Varimax amb normalització Keiser). Les variables en negreta indiquen valors d'extracció superiors a 0,5 en més d'una component. Percentatge de variabilitat explicada per cada component expressat en percentatge no acumulat

	Components extretes	Variables		% de variància	Valor test KMO
		Correlació positiva	Correlació negativa		
PCA 31 No pluja	1	Temp. barrera (0,888) Intensitat corrent 31-Log (0,826)	OD 31 (0,729)	37,5	0,534
	2	HR barrera 31 (0,745) Nivell aq. 31 (0,644) Cond. afluent (0,552)		20,6	
PCA 51 No pluja	1	Intensitat corrent 51-Log (0,913) Temp. barrera 51 (0,774)	Nivell aq. 51 (0,646) Cond. afluent (0,436)	38,5	0,545
	2	HR barrera 51 (0,743) Nivell aq. 51 (0,663)	OD 51 (0,892)	31,1	

	Components extretes	Variables		% de variància	Valor test KMO
		Correlació positiva	Correlació negativa		
PCA 31 Pluja	1	Temp. barrera 51 (0,933) Intensitat corrent 51-Log (0,891)	HR barrera 31 (0,542)	38,8	0,444
	2	Nivell aq. 31 (0,830) OD 31 (0,890)	Cond. afluent (0,341)	27,1	
PCA 51 Pluja	1	HR barrera 51 (0,970) Intensitat corrent 51-Log (0,963) Temp. barrera 51 (0,827)	Cond. afluent (0,835)	55,8	0,542
	2	OD 51 (0,490)	Nivell aq. 51 (0,921)	20,9	

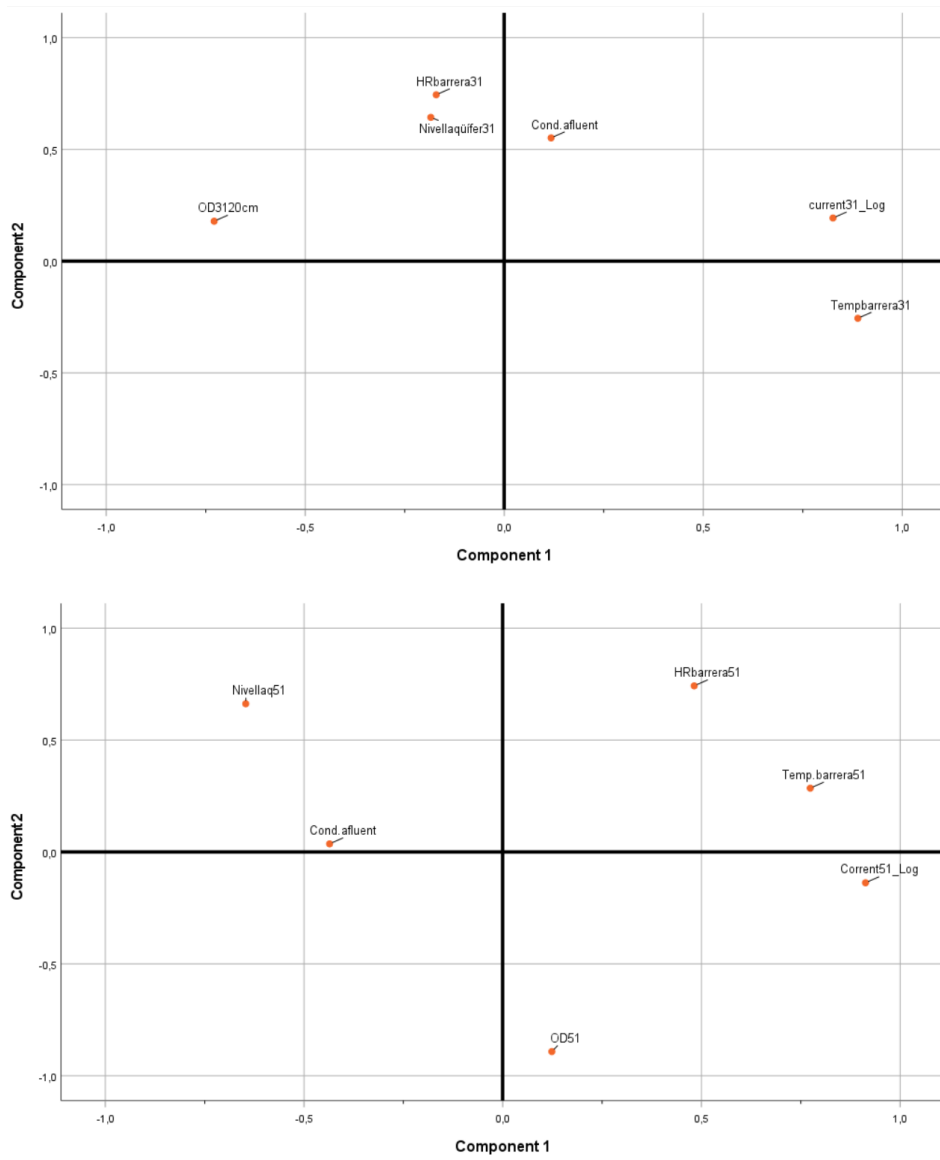


Figura A3: distribució de la correlació de les variables amb les 2 components principals dels anàlisis PCA 31 (superior) i 51 (inferior) per al període llarg d'estudi en absència de pluja.

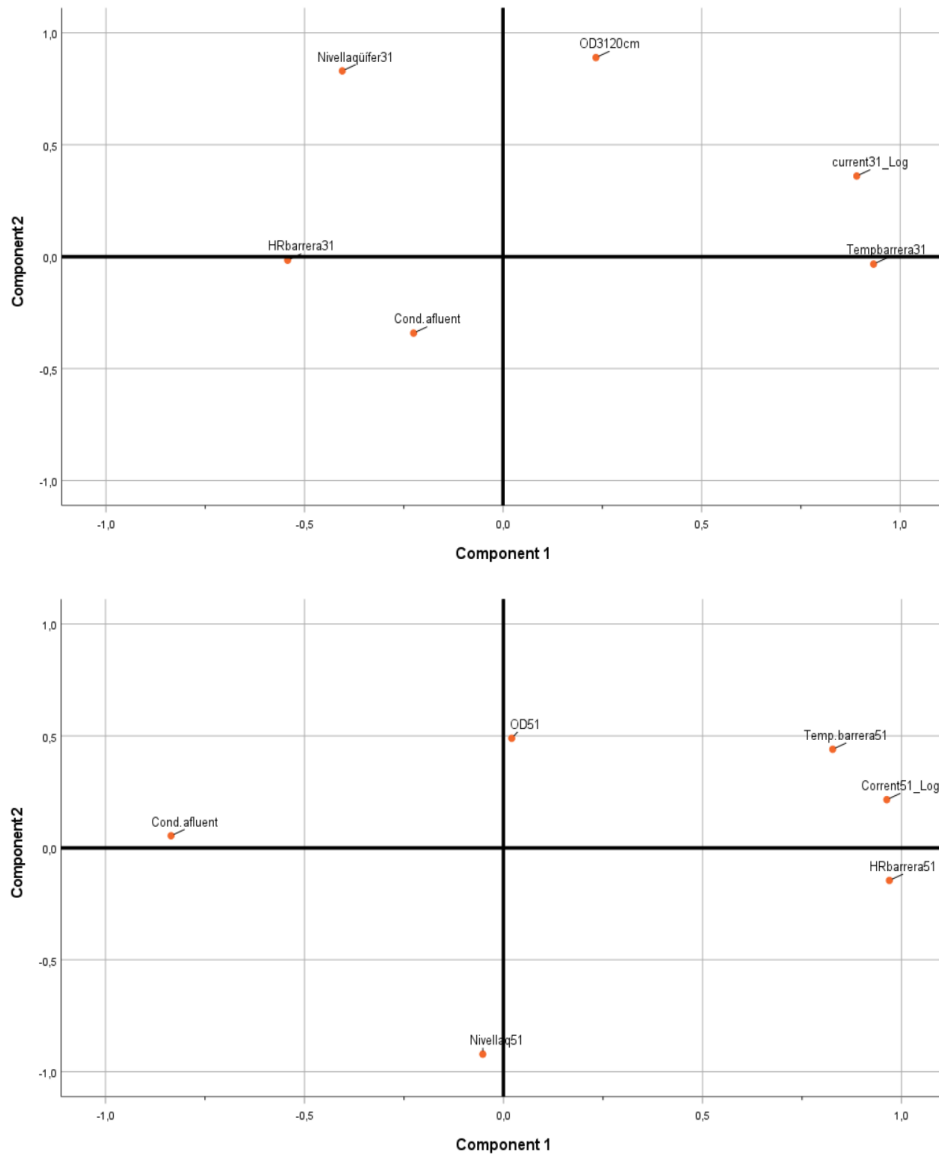


Figura A4: distribució de la correlació de les variables amb les 2 components principals dels anàlisis PCA 31 (superior) i 51 (inferior) per al període llarg d'estudi en presència de pluja.

## Annex 4: dades biològiques i carboni orgànic a la barrera.

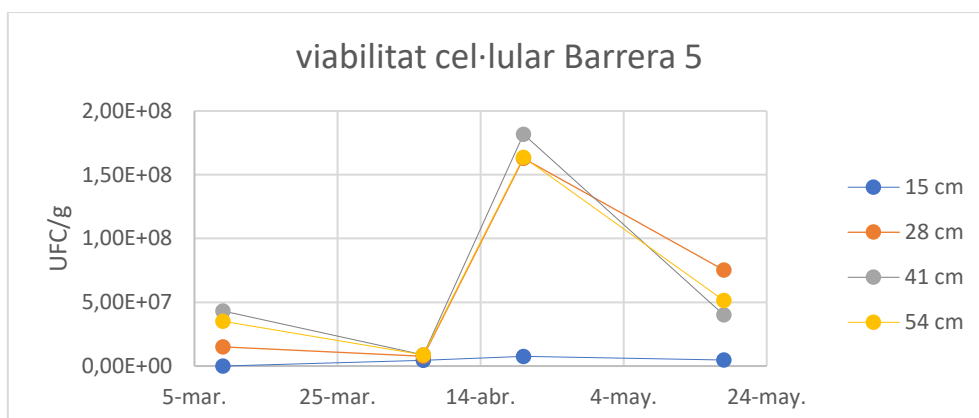
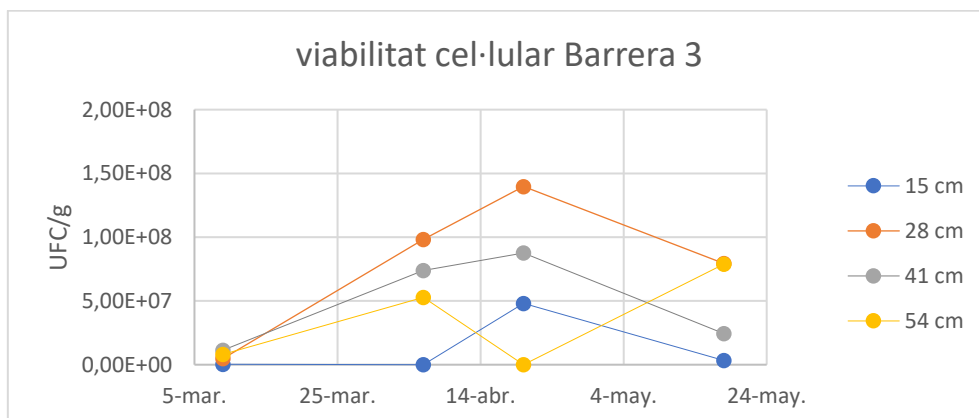
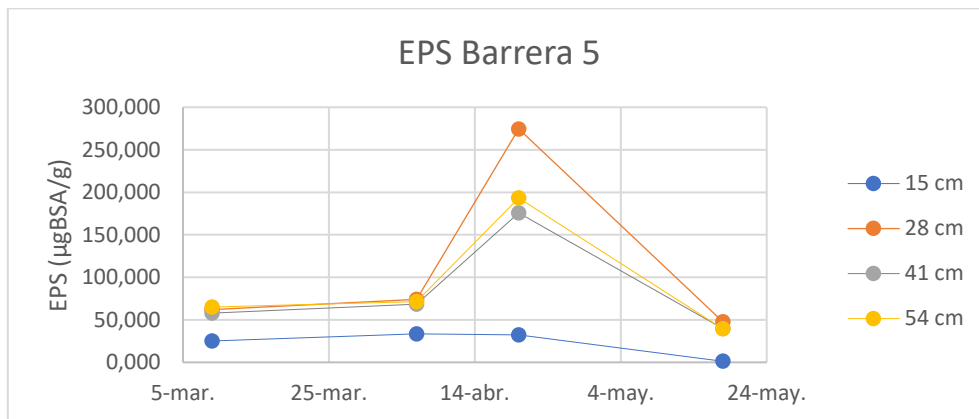
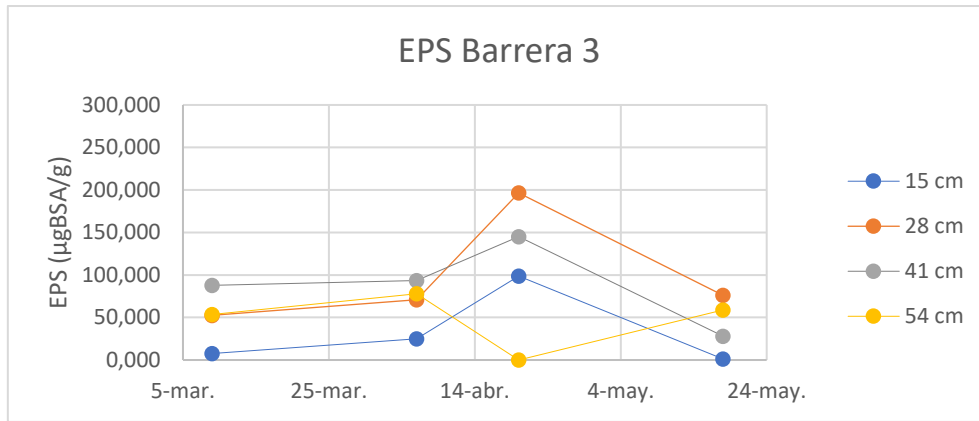
L'anàlisi de correlació entre les dades biològiques i la matèria orgànica a la barrera ens mostra una falta generalitzada de relació entre elles.

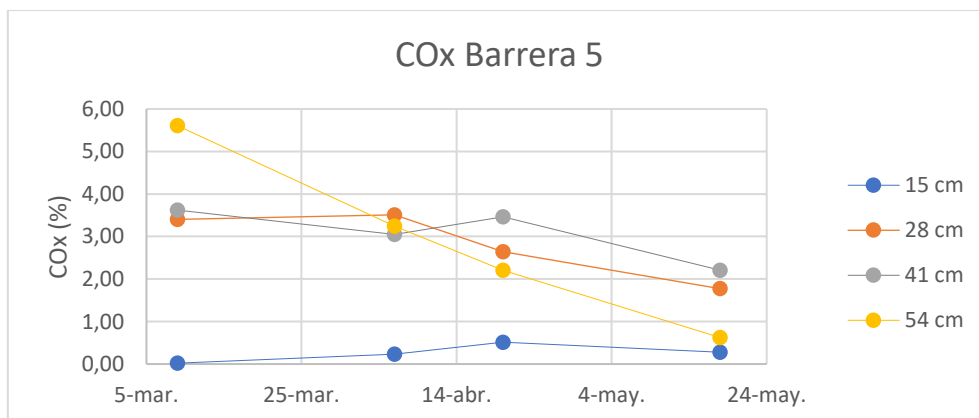
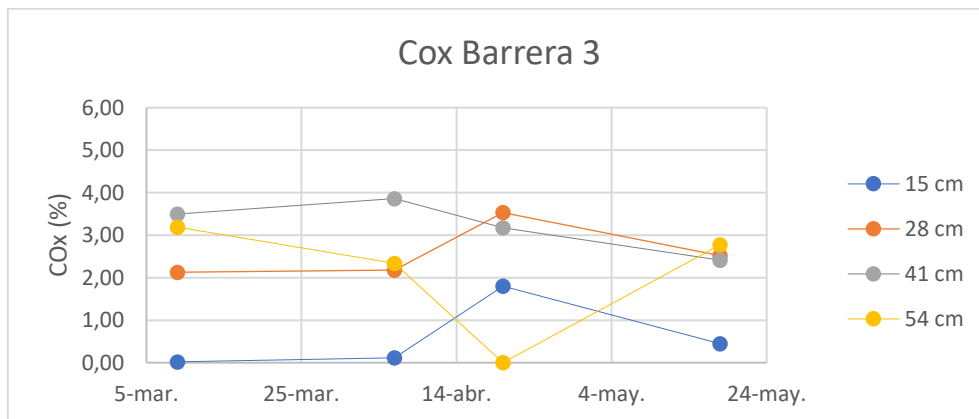
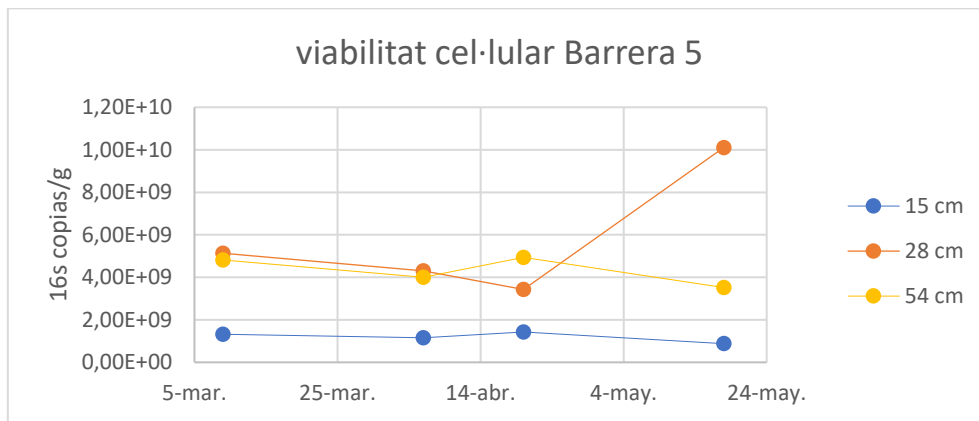
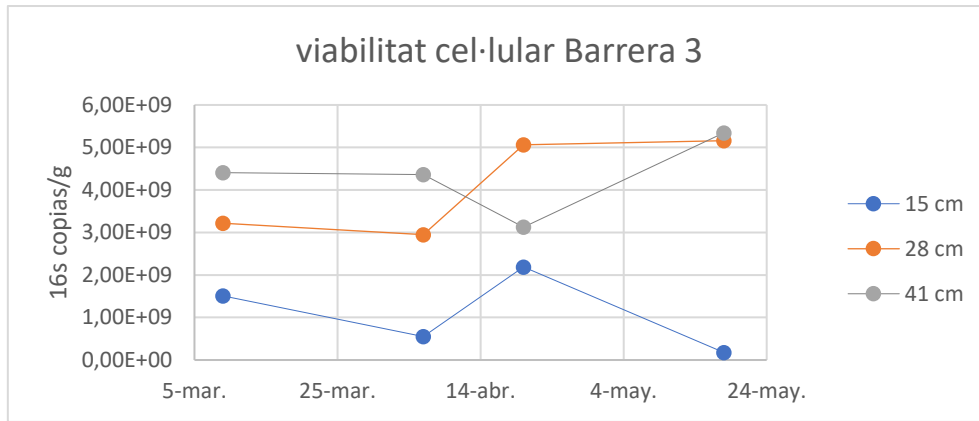
Destaquem la correlació entre les dades EPS tan entre les dues tècniques, bsa i glucosa, com entre les dues barreres, 31 i 51. Això ens indica per una banda que les dues tècniques que estudien la l'activitat biològica a través de l'anàlisi al medi de la presència de diferents molècules segregades per l'activitat biològica estan relacionades entre elles i, per altra banda, que les dues barreres tenen un comportament similar en quan a l'activitat biològica mesurada com a EPS.

En canvi, altres tècniques que mesuren també l'activitat biològica amb altres tècniques, com l'anàlisi d'ADN i les unitats formadores de colònies (UFC) no tenen correlació entre barreres ni amb l'EPS.

*Taula A6: valors de correlació lineal de Pearson entre les variables biològiques, carboni oxidable i matèria orgànica de les barreres 31 i 51 una profunditat de 28 cm. En tots els casos n = 4. Correlació bilateral significativa 0,05\* o 0,01\*\*.*

	EPSbsa_B3	EPSglu_B3	UFC_B3	ADN_B3	Cox_B3	MO_B3	EPSbsa_B5	EPSglu_B5	UFC_B5	ADN_B5	Cox_B5	MO_B5
EPSbsa_B3	1	,981*	0,791	0,616	,984*	0,763	,979*	,966*	0,934	-0,435	-0,251	-0,177
EPSglu_B3	,981*	1	0,778	0,450	0,929	0,738	,993**	,991**	0,847	-0,600	-0,060	-0,342
UFC_B3	0,791	0,778	1	0,515	0,759	0,209	0,706	0,688	0,704	-0,238	-0,306	0,148
ADN_B3	0,616	0,450	0,515	1	0,745	0,473	0,467	0,413	0,850	0,434	-0,911	0,592
Cox_B3	,984*	0,929	0,759	0,745	1	0,778	0,937	0,915	,983*	-0,277	-0,411	-0,035
MO_B3	0,763	0,738	0,209	0,473	0,778	1	0,813	0,809	0,764	-0,409	-0,117	-0,404
EPSbsa_B5	,979*	,993**	0,706	0,467	0,937	0,813	1	,998**	0,863	-0,594	-0,067	-0,371
EPSglu_B5	,966*	,991**	0,688	0,413	0,915	0,809	,998**	1	0,831	-0,641	-0,007	-0,424
UFC_B5	0,934	0,847	0,704	0,850	,983*	0,764	0,863	0,831	1	-0,106	-0,560	0,112
ADN_B5	-0,435	-0,600	-0,238	0,434	-0,277	-0,409	-0,594	-0,641	-0,106	1	-0,762	0,922
Cox_B5	-0,251	-0,060	-0,306	-0,911	-0,411	-0,117	-0,067	-0,007	-0,560	-0,762	1	-0,861
MO_B5	-0,177	-0,342	0,148	0,592	-0,035	-0,404	-0,371	-0,424	0,112	0,922	-0,861	1





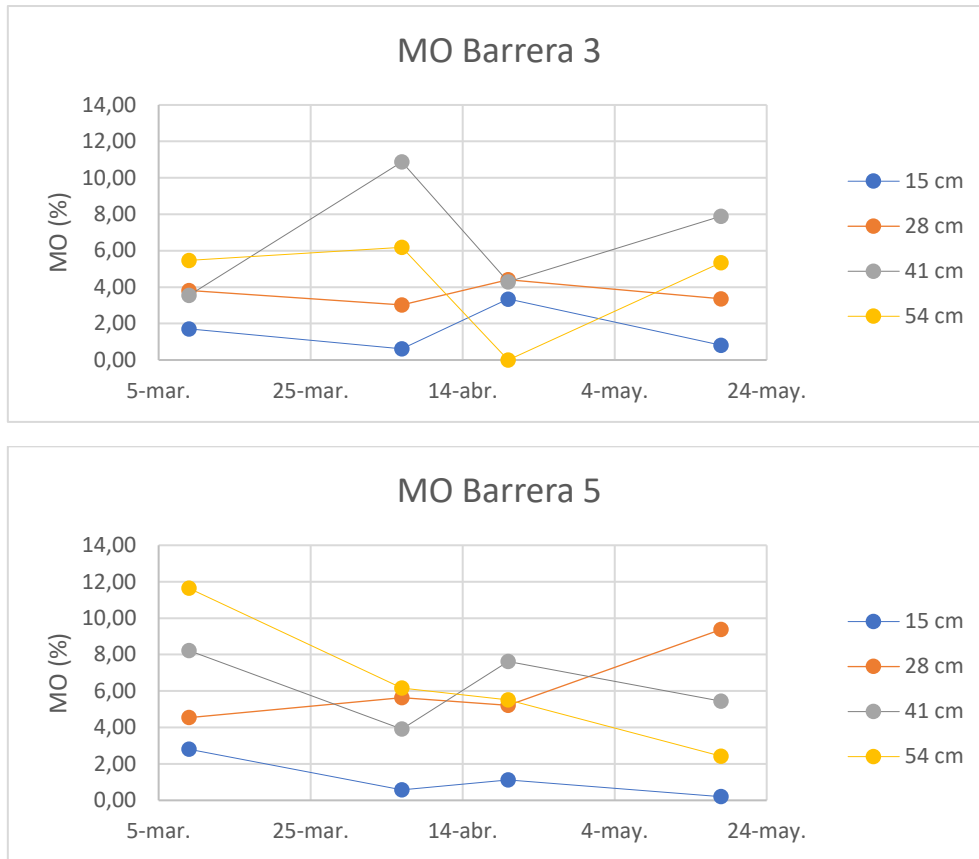


Figura A5: gràfics amb els valors d'activitat biològica, carboni oxidable i matèria orgànica a diferents profunditats de la barrera 3 i 5.