

**CALIDAD**

## GRÁFICOS DE CONTROL MULTIVARIANTES PARA EL SEGUIMIENTO DE LA CONTAMINACIÓN LITORAL

### **Resumen / Abstract**

La costa este de España sufre periódicamente episodios de proliferación masiva de algas, que provocan graves perjuicios para los sectores turístico y pesquero, e incluso suponen un riesgo sanitario para la población. Este trabajo muestra un método que permite la detección de variaciones significativas en el estado del ecosistema, como cambios en las concentraciones de nutrientes y densidad de fitoplancton. Se expone el uso de gráficos de control estadístico de procesos basados en componentes principales (PC) de las variables que se miden regularmente en estas playas. Los PC encontrados facilitan la interpretación de las razones por las que se producen estos episodios. Por otra parte, los gráficos de control propuestos tienen la capacidad de detectar situaciones anómalas que favorecen las proliferaciones masivas, permitiendo un eficaz control medioambiental en estas playas.

*On some beaches of the spanish east coast, instances of large scale proliferation of algae occur, severely damaging the tourist and fishing industries, and pose possible risks to public health. In this paper, the use of statistical process control charts is proposed, based on principal components of variables that are regularly measured on these beaches. The PC's found assist the analysis of the causes behind these occurrences. Moreover, the control charts put forward are capable of identifying the anomalous situations leading to the presence of blooms, therefore allowing efficient environmental control of the beaches.*

**Francisco Aparisi García**, Ingeniero Industrial, Doctor en Ingeniería Industrial, Departamento de Estadística e IO, Universidad Politécnica de Valencia, España

-mail:faparisi@eio.upv.es

**Pedro Fuentes Durá**, Licenciado en Ciencias Químicas, Doctor en Ciencias Químicas, Departamento de Ingeniería Química y Nuclear, Universidad Politécnica de Valencia, España

-mail:pfuentes@iqn.upv.es

**Julio González del Río**, Licenciado en Ciencias Biológicas, Doctor en Ciencias Biológicas, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, España

-mail:jgonzrio@hma.upv.es

Recibido: septiembre del 2002

Aprobado: noviembre del 2002

### **Palabras clave / Key words**

*Eutrofización, fitoplancton, control de procesos estadístico multivariante, análisis de componentes principales*

*Eutrophication, phytoplankton, multivariate statistical process control, principal component analysis*

### **INTRODUCCIÓN**

Los diferentes aportes continentales al litoral han ocasionado acumulación de nutrientes en algunas playas del Mediterráneo Occidental. Como consecuencia de esta acumulación algunas áreas se encuentran eutrofizadas. La eutrofización consiste, simplificando, en un desarrollo excesivo de algas como resultado de la adición de macronutrientes (fósforo y nitrógeno, entre otros) a partir de diferentes fuentes. Este proceso ha sucedido en el Golfo de Valencia,<sup>1</sup> Aunque no se han alcanzado los niveles del Adriático Norte<sup>2</sup> se han originado problemas tanto a las actividades humanas como a los propios ecosistemas.<sup>3,4</sup> Los estudios ambientales de estos procesos, sus causas y consecuencias, son esenciales para dar una solución a los problemas de la eutrofización litoral.

Las repercusiones de los aportes de aguas continentales en las poblaciones de fitoplancton (organismos fotosintéticos que viven en el seno del agua) es obvia. Los nutrientes contenidos en estos aportes permiten la proliferación del fitoplancton. El contenido de fósforo y(o) nitrógeno de los aportes es el principal desencadenante de las proliferaciones masivas (*blooms*). Los efectos de estas proliferaciones están bien descritos actualmente.<sup>5</sup> La coloración del agua, el aumento de la turbidez y los olores desagradables son efectos comunes, y en principio, no muy graves. Pero pueden aparecer zonas anóxicas o proliferar especies tóxicas que originen mortandades masivas de flora y fauna. Esto origina perjuicios ecológicos y económicos (pérdida del aprovechamiento pesquero y turístico) e incluso implica un riesgo potencial para el ser humano al causar, directa o indirectamente, diversos tipos de enfermedades e incluso la muerte.<sup>6</sup>

La medición de la variable en estudio, densidad de fitoplancton, se obtiene a través de indicadores de la densidad de algas unicelulares como son la concentración de clorofila *a* (pigmento fotosintético) y(o) recuentos de población. Las mayores densidades celulares se encuentran casi siempre en las playas afectadas por una mayor concentración de nutrientes (nitrato, amonio, fósforo) vitales para el desarrollo de estos organismos. Pero la relación entre estos nutrientes y el fitoplancton es muy compleja, debido a efectos como:

- El confinamiento en la acumulación de los nutrientes.
- El tiempo de crecimiento del fitoplancton desde la llegada de los nutrientes.
- La inhibición que la baja salinidad (función de los aportes de aguas continentales a las playas) puede tener en las poblaciones de fitoplancton.

Con este trabajo se pretenden conocer las causas internas de la proliferación masiva de algas que se dan en estas playas, es decir, buscar los causantes y en qué medida contribuye cada uno de ellos, mediante el empleo de técnicas estadísticas multivariantes. Además, se intenta desarrollar una herramienta que sea capaz de controlar las variables que producen estos episodios de eutrofización, con el fin de detectar cambios en el comportamiento histórico de los nutrientes en cada una de las playas.

Se ha empleado un conjunto de datos (obtenidos con el soporte de la administración local, COPUT) procedentes de 28 playas de la costa situada entre Castellón y Benicasim en el Golfo de Valencia. En cada una de estas 28 playas se realizó un total de 13 muestreos. En cada muestreo se midieron 23 variables. El intervalo entre cada muestra es de 17 días, en promedio y con desviación típica de 2,1 días. La tabla 1 muestra las variables que se obtienen en cada muestra.

Como puede observarse, las variables 16 - 23 son combinación de las variables ya definidas. Esto es así porque el uso de estas combinaciones está ampliamente extendido en los estudios medioambientales, con el fin de facilitar la interpretación del estado del sistema.

Como ya se ha comentado, uno de los objetivos de este trabajo es desarrollar un control sobre estos nutrientes que favorecen e crecimiento explosivo de fitoplancton. En principio se quiere detectar, dado los valores de las variables obtenidas en una muestra de una playa, si se ha producido una situación irregular, poco probable con las condiciones habituales que se dan en esa playa y que favorezca el crecimiento del fitoplancton. Algunos ejemplos que pudieran producir esta situación irregular son:

1. Aporte anormal de aguas continentales (superficiales o subterráneas, detectados por el descenso de la salinidad); aportes de aguas residuales urbanas más o menos cargadas de lo habitual (principalmente detectados por variaciones en la concentración de fósforo y amonio) y una combinación de las anteriores.

Pueden encontrar similitudes entre este método de control en estudio y el control estadístico de procesos (SPC) de un proceso industrial. Un cambio en la situación habitual en una playa puede ser comparado con una situación fuera de control en un proceso productivo. Así pues, los autores se plantearon el uso de herramientas de SPC como forma de controlar el estado medioambiental en estas playas.

En un principio, podría pensarse en el control mediante gráficos univariantes para cada una de las variables estudiadas, utilizando herramientas como el gráfico de medidas individuales,<sup>7</sup> el gráfico CUSUM<sup>8</sup> o el EWMA,<sup>9</sup> entre otros. Sin embargo, esta estrategia tiene los inconvenientes expuestos a continuación.

**TABLA 1**  
**Variables obtenidas en cada muestra**

Var. 1: Temperatura (°C)	Var.2: Salinidad (g/kg)
Var.3: Densidad (g/l)	Var.4:Amonio (µatg/l)
Var. 5: Nitrito (µatg/l)	Var.6: Nitrato (µatg/l)
Var.7: Fósforo (µatg/l)	Var.8: Silicio (µatg/l)
Var. 9: Clorofila a (µg/l)	Var.10: Dinoflagelados(nº cel.10 <sup>4</sup> /l)
Var.11: Diatomeas (nº cel.10 <sup>4</sup> /l)	Var.12: Prasinofíceas(nº cel.10 <sup>4</sup> /l)
Var. 13: Primmnesiofíceas (nº cel.10 <sup>4</sup> /l)	Var.14: Clorofíceas (nº cel.10 <sup>4</sup> /l)
Var.15: Criptofíceas(nº cel.10 <sup>4</sup> /l)	Var.16: Nitrógeno inorgánico disuelto (Var.4+Var.5+Var.6)
Var. 17: % Amonio (Var.4/Var.16)	Var.18: % Nitrito (Var.5/Var.16)
Var.19: % Nitrato (Var.6/Var.16)	Var.20: % Nitrógeno reducido ((Var.4+Var.5)/Var.16)
Var. 21: Nitrato +Nitrito (Var.5+Var.6)	Var.22: Relación N/P (Var.16/Var.7)
Var.23: Relación N/Si (Var.16/Var.8)	

En primer lugar, se tendría que llevar  $p$  gráficos, cada uno de ellos con su probabilidad de error tipo I, lo que daría una probabilidad de error tipo I, para el conjunto del control, bastante alta si se fijasen los valores de  $\alpha$  para cada gráfico en los valores habituales. Aunque resulta posible obtener los valores de  $\alpha$  para cada gráfico dado un valor  $\alpha$  general, esto último resulta bastante complicado cuando las variables son dependientes.<sup>10</sup>

En segundo lugar, la tabla 2 muestra la matriz de varianzas-covarianzas,  $S$ , de las variables que se están midiendo en las playas reseñadas. A la vista de la matriz anterior se plantea otro problema; las variables están altamente correlacionadas. En estos casos es recomendable el uso de técnicas multivariantes en las que se tiene en cuenta la correlación de las variables, obteniéndose métodos de control con mayor potencia a la hora de detectar cambios.

Suponiendo que  $p$  variables,  $X_1, X_2, \dots, X_p$ , se distribuyen

normalmente con vector de media  $\frac{r}{\mu_0} = (\mu_{0,1}, \mu_{0,2}, \dots, \mu_{0,p})'$  y

matriz de varianzas-covarianzas,  $S_0$ , cuando el proceso permanece estable. Cuando se toma una muestra de tamaño  $n$  (en este caso  $n = 1$ ) se tiene  $n$  valores de cada característica y es posible calcular

$\bar{X}_i$  que representa la  $i$ -ésima muestra del vector de medias de las  $p$  variables.<sup>11</sup> proporcionó una solución al problema de controlar simultáneamente  $p$  medias utilizando el estadístico graficable.

$$T_i^2 = n \left( \bar{X}_i - \mu_0 \right) \Sigma^{-1} \left( \bar{X}_i - \mu_0 \right)$$

$T_i^2$  se distribuye como una variable chi-cuadrado con  $p$  grados de libertad. En la práctica se sugiere el uso de un gráfico de control del tipo de Shewhart basado en los valores provenientes de la variable  $X^2$  con límite de control superior (UCL) igual a  $X_{p,\alpha}^2$ <sup>12,13</sup>

Sin embargo, en este caso esta herramienta no es de aplicación, puesto que muchas de las variables poseen una distribución muy asimétrica e irregular (distribución común en variables que miden contaminantes) que no es transformable a la variable normal.

El primer componente principal (PC) de  $X$  es definido como la combinación lineal  $t_1 = p_1^T X$  que tiene máxima varianza sujeta a  $|p_1| = 1$ . El segundo PC es aquella combinación lineal definida por  $t_2 = p_2^T X$  que tiene máxima varianza, sujeta  $|p_2| = 1$  y debe estar relacionada con el primer PC ( $t_1$ ). Un total de  $p$  PC son definidos de forma similar descomponiendo la matriz de datos observados  $X$  como:

$$X = TP^T = \sum_{i=1}^k t_i p_i^T \quad \dots(2)$$

En general no es necesario obtener los  $p$  PC puesto que entonces no obtendría una reducción del número de variables. La mayor parte de la variabilidad suele ser explicada por los pocos primeros PC. De esta forma es posible aproximar la matriz de datos  $X$  utilizando solo los  $A$  primeros PC:

$$\hat{X} = \sum_{i=1}^A t_i p_i^T \quad \dots(3)$$

De esta forma se pueden controlar las variables observadas mediante gráficos de control basados en estos primeros PC.

### ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

Buscando identificar la estructura interna de los datos se realizó un análisis factorial de componentes principales. Dicho análisis se llevó a cabo tomando una matriz cuyas columnas eran las variables citadas y cuyas filas eran las 28 playas objeto de estudio. Los valores que completaban la matriz eran las medianas de cada variable (en cada playa se han obtenido 13 valores de cada variable). El empleo de la mediana se utiliza con el fin de interpretar las condiciones intermedias o normales de estas playas. Resulta una mejor opción, a criterio de los autores, que la media dada, la elevada asimetría presente en las variables.

Antes de realizar el análisis se procedió a evaluar la medida de adecuación de las variables a través del índice Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), procediendo a la eliminación de aquellas variables que no resultan adecuadas para el análisis factorial, hasta que dicha medida alcanzó un valor de 0,70. Las catorce variables seleccionadas fueron amonio, fósforo, nitrato, porcentaje de nitrógeno reducido, relación N/P, silicio, nitrato+nitrito, salinidad, y la densidad de población de criptofíceas, diatomeas, prasinofíceas, clorofíceas, dinoflagelados y primnesiofíceas. (Ver tabla 3.)

A continuación se aplicó la extracción de componentes principales, y la rotación varimax para facilitar la interpretación de los factores obtenidos. Se extrajeron los factores con un eigenvalor superior a 1, es decir, aquellos que explican más varianza que una variable sola. Se encontró que los 3 primeros factores explican un 80,4% de la varianza total.

El primero de los factores explica el 37,5 % de la varianza y está claramente asociado con los valores bajos de salinidad y con los valores elevados de la concentración de nitrato, nitrato+nitrito, silicio y de la relación N/P. Esto quiere decir que este primer factor coincide en gran medida con "aportes continentales que contienen elevadas concentraciones de nitrato y silicio". De hecho, se puede afirmar en esta aseveración si se observan las puntuaciones de las demás variables en este eje. La presencia de nitrato es consecuencia de la prácticas agrícolas habituales en la zona (abonos inorgánicos nitrogenados). La variable nitrato+nitrito tiene una puntuación muy alta porque en las playas afectadas por dichos aportes el nitrato representa la inmensa mayoría del nitrógeno inorgánico disuelto. Así pues, los valores de ambas variables son muy parecidos. La relación N/P también tiene una puntuación elevada puesto que los mencionados aportes elevan en gran medida dicha relación.

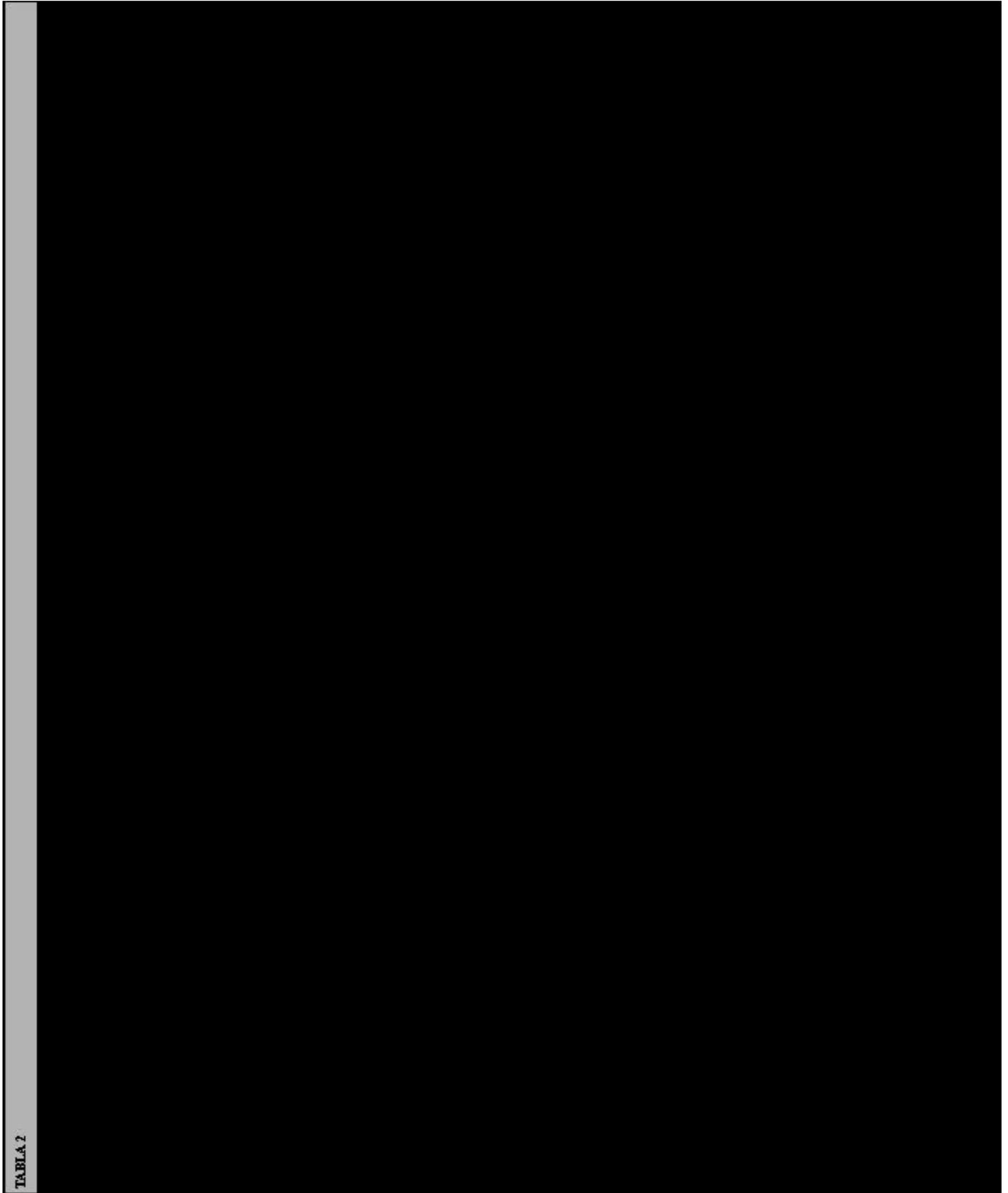


TABLE 2

Las criptofíceas tienen una puntuación negativa y relativamente alta ya que es una clase que compite mal en aguas salobres. El resto de variables tienen una puntuación muy baja en este factor, destacando las variables amonio y PSR, con puntuaciones entre -0,02 y 0,02. Esto no quiere decir que estos aportes no produzcan una variación en los contenidos de dichos nutrientes, sino que no constituyen la principal fuente de sus variaciones fundamentales.

El segundo factor explica el 26,9 % de la varianza y está muy asociado con las concentraciones de amonio, fósforo, porcentaje de nitrógeno reducido y la densidad de clorofíceas. Esto quiere decir que este segundo factor coincide en gran medida con aportes con elevadas concentraciones de amonio y PSR. Estos nutrientes son característicos de las aguas residuales urbanas. El porcentaje de nitrógeno reducido presenta una puntuación elevada debido a la composición característica de dichas aguas. Las clorofíceas, conjunto de especies eurihalinas y características de aguas salobres y contaminadas, también tienen una puntuación alta. Tienden a alcanzar valores extremos en ambientes con elevadas concentraciones de los nutrientes mencionados. Las criptofíceas tienen una puntuación negativa y relativamente alta ya que es una clase que compite mal en aguas con aportes elevados de nutrientes. Las cuatro variables mejor relacionadas con el primer factor (nitrato, nitrato+nitrato, silicio y salinidad) presentan en este segundo eje una puntuación entre -0,05 y 0,02 mostrando la ausencia de correlación.

El tercer factor explica el 16,1 % de la varianza y está muy asociado con las densidades celulares de diatomeas, linoflagelados, prasinofíceas y primnesiofíceas. Esto quiere decir que este tercer factor coincide en gran medida con la densidad de población fitoplanctónica. Las criptofíceas presentan una puntuación positiva pero relativamente baja (es la única variable cuya puntuación es inferior a 0,54 en todos los ejes), indicando que su distribución es distinta de la correspondiente a los grupos citados anteriormente, que se distribuirán de forma bastante similar. Las clorofíceas presentan una puntuación positiva pero muy baja, lo cual parece indicar que su distribución será muy distinta a la de los grupos anteriores (recuérdese que esta variable estaba muy asociada a valores elevados de PSR y amonio). Es muy destacable el hecho de que ninguna variable ambiental (las que no se refieren a densidad de fitoplancton) tiene una puntuación fuera del rango -0,18 y 0,16. Esto indica que se alcanzan densidades celulares similares con concentraciones muy distintas de nutrientes, debido a que las condiciones nutritivas no determinan de forma directa la composición de la comunidad puesto que las playas constituyen un medio dinámico. Es decir, aunque un aporte de nutrientes pueda producir un aumento de la densidad de población fitoplanctónica, este no tiene porque producirse de una forma tan rápida que permita que los efectos del crecimiento se aprecien en la propia playa.

Resumiendo, se han encontrado los siguientes factores, que explican el 80,4 % de la varianza total: Aporte de nutrientes procedentes de aguas continentales; aporte de nutrientes procedentes de aguas residuales urbanas y fitoplancton.

## PROCEDIMIENTO DE CONTROL

El procedimiento de control consiste en llevar gráficos de las puntuaciones de los tres factores explicados anteriormente. Cada

valor a graficar del factor corresponderá a un muestreo realizado en una playa bajo control, donde se alcanzan los valores de las variables que configuran el factor. Es decir, se obtiene una combinación lineal de variables medidas de la forma:

$$F_i = \sum_{j=1}^{14} a_j z_j \quad \dots(4)$$

donde:

$F$ : Factores propuestos.

$a_j$ : Puntuaciones de las variables en cada factor, obtenidas según el método de Rubin-Anderson.

$z_j$ : Puntuaciones de las variables tipificadas.

El método de Rubin-Anderson garantiza la independencia de las puntuaciones obtenidas de los factores.

La metodología SPC asume las siguientes hipótesis: los valores a graficar son independientes; se suele admitir una distribución de referencia (en la mayoría de los casos la distribución normal).

En la figura 1 se muestra el correlograma obtenido para la serie de datos a graficar del factor 1 para la playa 24. Como se puede ver los valores son independientes de muestra a muestra. Resultados similares se obtienen para las otras playas y para los otros dos factores. Las variables que se están midiendo en cada muestra presentan continuidad temporal y, por tanto, los factores son continuos en el tiempo. Sin embargo, el hecho de que la toma de muestras esté separada con intervalo de media de 17 días, permite la independencia de los valores obtenidos.

En cuanto a la segunda hipótesis, resulta que la distribución de los valores de los factores que se obtienen tras cada muestra, no sigue una distribución conocida. Esta situación es lógica puesto que, como ya se comentó, la mayoría de las variables que se están midiendo no siguen una distribución conocida. Esto dificulta la obtención de los límites de control, aunque no interfiere en el uso de otras señales adicionales de falta de control. Se ha optado por utilizar un límite de control superior (UCL) y no incluir en los gráficos un límite de control inferior (LCL). La razón principal es que el objetivo del control es detectar situaciones que favorecen la proliferación masiva de fitoplancton. Estas situaciones, dada la composición de los factores, tenderán a ocurrir cuando alguno de los factores puntúe alto. Las puntuaciones bajas de estos factores no favorecen, en principio, el crecimiento del fitoplancton. No obstante, se debe controlar, mediante señales adicionales como tendencias o zonas de atención, si se ha producido una mejora en la situación de la playa como consecuencia de un cambio en la gestión del agua, obras en el litoral, etcétera.

Así pues, esta tarea consiste en buscar un UCL de tal forma que:

$$\Pr(F_i > UCL_i) = \alpha \quad \dots(5)$$

donde:

$\alpha$ : probabilidad del error de primera especie.

Puesto que no se conoce la distribución teórica de cada uno de los factores hay que plantearse cómo estimar la posición del UCL en el gráfico.

Componentes	Componentes		
	1	2	3
Var.4	0,005	0,268	-0,039
Var.14	0,036	0,238	0,027
Var. 15	-0,086	-0,154	0,192
Var. 11	0,059	-0,010	0,319
Var. 10	0,069	-0,005	0,359
Var. 6	0,192	-0,007	0,039
Var.21	0,192	-0,007	0,040
Var.20	-0,069	0,235	-0,065
Var. 12	-0,009	-0,061	0,344
Var. 13	-0,015	-0,067	0,309
Var. 7	0,005	0,265	-0,025
Var.22	0,168	-0,038	-0,017
Var.2	-0,190	0,001	-0,044
Var.8	0,193	0,007	0,045

La primera posibilidad consiste en fijar el valor del UCL utilizando la distribución empírica de los factores, obtenida a partir de las observaciones. En principio se podría pensar en seleccionar el valor de UCL como aquel que solo fuera superado por un porcentaje pequeño de valores o, incluso, tomar el mayor de los valores registrados, Willemain y Runger<sup>17</sup> analizan este procedimiento aplicado a los gráficos de control cuando la distribución teórica no es conocida. A la vista de este interesante trabajo se comprobó que no se tienen suficientes valores para aplicar este criterio, puesto que se obtendrían longitudes de racha (RL) muy pequeñas, indicando el gráfico una situación de fuera de control muy frecuentemente. En el gráfico propuesto, RL es el número de puntos en el gráfico de control hasta que uno de ellos supera el UCL.

En concreto, teniendo 13 valores de la distribución de los factores, si se toma como UCL el valor máximo registrado se obtendría, como máximo, un valor medio de RL, ARL, igual :  $13/2 = 6,5$ .

Otra posibilidad parte de la aplicación de la desigualdad de Tchebycheff:

$$P(|X - E(X)| \geq k\sigma) \leq \frac{1}{k^2} \quad \dots(6)$$

donde:

$E(X)$ : Media de la random variate  $X$

$\sigma$ : Desviación típica.

Tomando como variable aleatoria los factores.

$F_i$  y dando valores a  $k$  se puede obtener un UCL.

$$LCS_i = E(F_i) + k\sigma_{F_i} \quad \dots(7)$$

Como es sabido, la desigualdad de Tchebycheff es conservadora, en el sentido  $d$  que el límite de probabilidad

obtenido,  $\frac{1}{k^2}$ , es la cota máxima, muy alta para algunas

distribuciones poco dispersas, como la normal. Sin embargo dada la gran asimetría de las distribuciones empíricas obtenidas para los factores, se sabe que esta estimación del valor de  $\alpha$  es más adecuado que en casos de menor asimetría. En el trabajo este es el procedimiento que se ha elegido, se debe tener en cuenta que los valores de la media y desviación típica de los factores son estimaciones de los valores verdaderos.

La tabla 4 muestra el error de primera especie estimado,  $\sigma_{est}$  y el valor de ARL en función de algunos valores de  $k$ .

Teniendo en cuenta que el valor proporcionado por la desigualdad de Tchebycheff es el valor máximo posible para

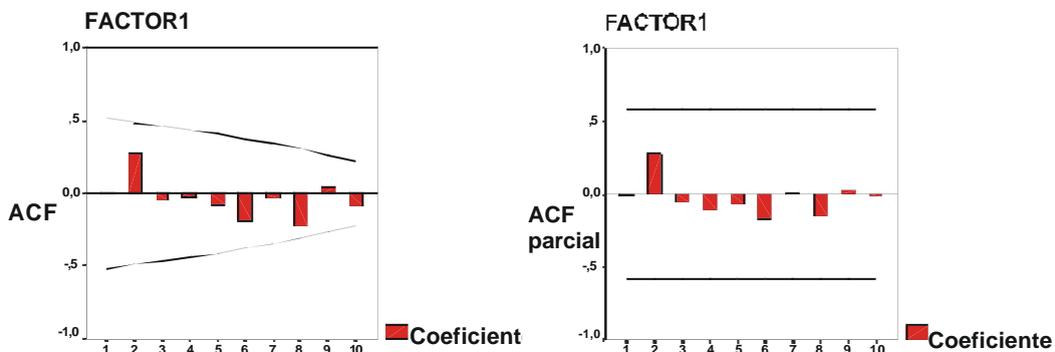


Fig. 1

cuales cualquier distribución, se sabe que el valor verdadero de  $\alpha$  es menor que el proporcionado por la tabla 4 y, por tanto, el ARL real es mayor. A la vista de los valores se ha optado por tomar un valor de  $k = 4$ .

El valor propuesto de ARL es sensiblemente inferior a los habitualmente propuestos en SPC. En el uso habitual de los gráficos de control en la industria, la presencia de una falsa señal de falta de control en el gráfico supone muchas veces tener que parar el proceso productivo para buscar las posibles causas especiales que han producido esa salida de control del proceso. Dado el elevado coste económico de esta acción, el valor  $\alpha$  de suele ser bastante pequeño, con la consiguiente falta de potencia en el scheme a la hora de detectar pequeños cambios en el proceso. En este caso un valor de  $ARL = 16$ , aunque pudiera parecer pequeño, tiene su justificación. En primer lugar, se recuerda que el valor real será mayor. En segundo lugar, se está controlando un proceso medio ambiental. En estos casos, una falsa señal supone un estudio en mayor profundidad por parte del investigador de la situación ambiental que se da en ese momento, con el fin de decidir si se está produciendo realmente un cambio en las condiciones ambientales. Por tanto, los posibles efectos de una falsa señal de alarma son mucho menores que en las aplicaciones industriales de los gráficos de control. Al mismo tiempo, se obtiene una potencia mayor para detectar un cambio en las condiciones medioambientales, tal y como es política común en los test de hipótesis que se aplican en esta área de la ciencia.<sup>18,19</sup>

La figura 2 muestra los tres gráficos de control obtenidos para la playa 24.

TABLA 4		
	$\alpha_{est}$	ARL
3	11,1 %	9
4	6,25 %	16
5	4 %	25
6	2,78 %	36

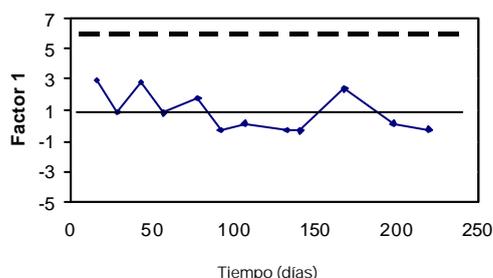


Fig. 2 a)

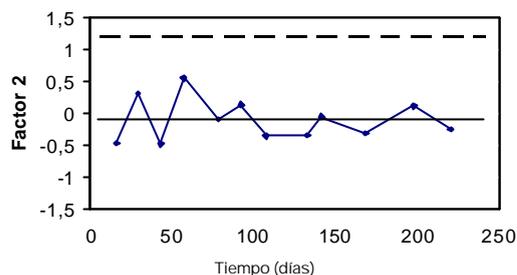


Fig. 2 b)

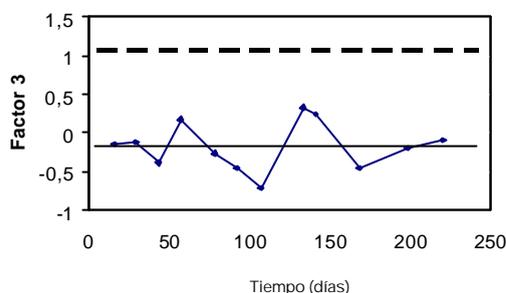


Fig. 2 c)

## CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Se ha propuesto un método de control de los nutrientes que favorecen el crecimiento de las algas en las playas, utilizando técnicas de control estadístico de procesos. Puesto que se obtienen en cada muestreo una gran cantidad de datos, se propone el uso de componentes principales como método de síntesis de la información. Los factores obtenidos son fácilmente interpretables debido a que son capaces de detectar situaciones anómalas en las playas.

Este procedimiento presenta las siguientes ventajas frente al control univariante de las variables que se miden: 1. El estado medioambiental es resumido en gran medida con solo tres puntuaciones. 2. Los factores obtenidos tienen la capacidad de detectar las situaciones extremas correspondientes a blooms. 3. Al utilizar solo tres gráficos disminuye la probabilidad de falsa alarma.

El método propuesto supone una fructífera síntesis entre la metodología SPC y técnicas de control medioambiental. En concreto, es directamente aplicable a zonas costeras similares, donde se obtendría una estructura factorial muy similar.

La metodología propuesta puede ser aplicable a otros problemas medioambientales, como son el control de la contaminación atmosférica, calidad de aguas de ríos, control

bacteriológico de aguas. En estos casos se dispone de muchas medidas y suelen ser difícilmente interpretables.

Como trabajo futuro se está investigando la capacidad de los factores 1 y 2 a la hora de predecir proliferaciones masivas de algas. Puesto que los valores altos de estos factores indican un aporte elevado de nutrientes en las playas es de suponer que aumenta la probabilidad de que se produzca, a corto plazo, un *bloom*. Así pues, es posible pensar en una herramienta predictiva que consista en predecir un bloom cuando alguno de los factores puntúe alto, por ejemplo, supere el UCL. Los estudios realizados hasta ahora, no concluidos, muestran que esta herramienta predictiva tiene utilidad en alguna de las playas en estudio. Se debe seguir trabajando para mejorar la validez predictiva de esta herramienta. ☐

## REFERENCIAS

1. **TORRES, E. S. AND J. G DEL RIO:** "Spatial Variations of Phytoplankton Community Structure in a Highly Eutrophicated Coast of the Western Mediterranean Sea", *Water Science & Technology*, 32(9-10): 313-322, 1995.
2. **INNAMORATI, M.:** *Hyperproduction of Mucilages by Micro and Macro Algae in the Tyrrhenian Sea. Sci. Total Env.*, 165(1-3): 65-81, 1995.
3. **MORAND, P. AND X. BRIAND:** "Excessive Growth of Macroalgae", *Botanica Marina*, 39(6): 491-516, 1996.
4. **BURKHOLDER, J. M.:** *Implications of Harmful Microalgae and Heterotrophic Dinoflagellates in Management of Sustainable Marine Fisheries. Ecological Applications*, 8(1): 37-62, 1998.
5. "The State of the Marine and Coastal Environment in the Mediterranean Region", *MAP Technical Reports Series, 100. UNEP*, 127pp., Athens, Greece. 1996.
6. **CHARMICHAEAL, W. W.:** *Algal Toxins*, Adv. Bot. Res., 12, 47-101, 1986.
7. **PETERMAN, R. M. AND M'GONIGLE, M.:** "Statistical Power Analysis and the Precautionary Principle", *Marine Pollution Bulletin*, 24(5): 231-234, 1992.
8. **EWAN, W. D. AND K. W. KEMP:** "Sampling Inspection of Continous Processes with no Autocorrelation Between Successive Results", *Biometrika*, 47(3 and 4), 363-380, 1960.
9. **LUCAS, J. M. AND M. S. SACCUCCI:** "Exponentially Weighted Moving Average Control Schemes: Properties and Enhancements", *Techhnometrics*, 32(1), 1-29, 1990.
10. **APARISI, E.:** "Hotelling's T2 Control Chart with Adaptive Sample Sizes", *International Journal of Production Research*, 34 (10), 2853-2862, 1996.
11. **HOTELLING, H.:** *Multivariate Quality Control in Techniques of Statistical Analysis*, pp. 111-184 (Eds. C. Eisenhart, M. Hastay and W. A. Wallis), McGraw-Hill, 1991.
12. **JACKSON, J. E.:** *Multivariate Quality Control, Communications in Statistics*, 14 (11), pp. 2657-2688, 1985.
13. **ALT, F. B.:** *Multivariate Control Charts, Encyclopedia of Statistical Sciences*, Vol 6, pp. 110 -122 (S. Kotz and N. L. Johnson, Eds. Wiley), New York, 1985.
14. **WENNING, R. J. AND G.A. ERICKSON:** "Interpretation and Analysis of Complex Environmental Data using chemometric methods. *Trends in Analytical Chemistry*, 13(10): 446-457, 1994
15. **KRESTA, J. V.; J. F. MacGREGOR, AND T. E. MARLIN:** "Multivariate Statistical Monitoring of Process Operating Performance", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 69, 35-47, 1991.
16. **KOURTI, T. AND J. F. MacGREGOR:** *Process Analysis, Monitoring and Diagnosis, Using Multivariate Projection Methods, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 28, 3-21, 1995.
17. **WILLEMAIN, T. R. AND G. C. RINGER:** "Designing Control Charts Using an Empirical Reference Distribution", *Journal of Quality Technology*, 28, 31-38, 1996.
18. **SHEWHART, W. A.:** *Economic Control of Quality of Manufactured Product*, New York: Van Nostrand Co., Inc (Published in 1981 by the ASQC, Milwaukee, WI), 1931.
19. **FAIR WEATHER, P. G.:** *Statistical Power and Design Requirements for Enviromental Monitoring*, Aust. J. Mar. Freshwater Res., 42, 555-567, 1991.

## ESTIIN'2003

Encuentro de Estudiantes de Ingeniería Industrial, Administración y Afines

Integración para el desarrollo



Del 13 al 16 de mayo del 2003, Facultad de Ingeniería Industrial, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, CUJAE, Ciudad de La Habana, Cuba, e-mail: [estiin2003@ind.cujae.edu.cu](mailto:estiin2003@ind.cujae.edu.cu)  
[www.ispjae.edu.cu/eventos/estiin](http://www.ispjae.edu.cu/eventos/estiin)