

KEEP THE BALL ROLLING: CONTROL ESTADÍSTICO DE LA CALIDAD PARA LA INDUSTRIA 5.0

Salvador Naya, Javier Tarrío
Saavedra, Miguel Flores

XI Xornada de Usuarios de R en Galicia

Santiago de Compostela (Spain),
24/10/2024



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



CITIC



ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL

Índice

Contexto. Industria 4.0/5.0

Librerías de R y bibliografía

Datos de ejemplos para el libro CEC

Control de Procesos con datos del Canal de Panamá

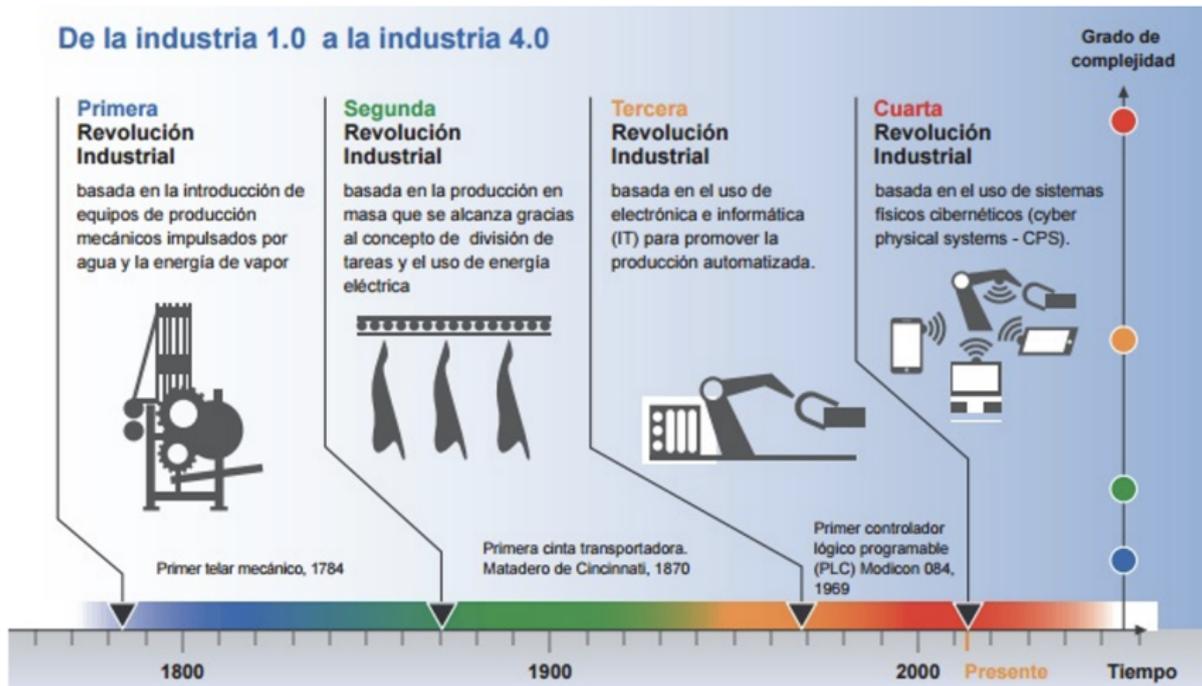
Control de Calidad Multivariante

Control del consumo energético en centro comercial

Referencias

Industria 4.0

De la industria 1.0 a la industria 4.0





1. Flores, M., Fernández-Casal, R., Naya, S., & Tarrío-Saavedra, J. (2022). qcr: Quality Control Review. package=qcr.
2. Flores, M., Fernández-Casal, R., Naya, S. & Tarrío-Saavedra J. ILS: Interlaboratory Study. r package version 0.3 (2023). package=ILS.
3. Flores, M., Fernández-Casal, R., Naya, S., & Tarrío-Saavedra, J. (2021). Statistical Quality Control with the qcr Package. R Journal, 13(1).
4. Control Estadístico de la Calidad para la Industria 5.0: (2025). Aula Magna. McGrawHill.

qcr: Quality Control Review

Univariate and multivariate SQC tools that completes and increases the SQC techniques available in R. Apart from integrating different R packages devoted to SQC ('qcc','MSQC'), provides nonparametric tools that are highly useful when Gaussian assumption is not met. This package computes standard univariate control charts for individual measurements, 'X-bar', 'S', 'R', 'p', 'np', 'c', 'u', 'EWMA' and 'CUSUM'. In addition, it includes functions to perform multivariate control charts such as 'Hotelling T²', 'MEWMA' and 'MCUSUM'. As representative feature, multivariate nonparametric alternatives based on data depth are implemented in this package: 'r', 'Q' and 'S' control charts. In addition, Phase I and II control charts for functional data are included. This package also allows the estimation of the most complete set of capability indices from first to fourth generation, covering the nonparametric alternatives, and performing the corresponding capability analysis graphical outputs, including the process capability plots. See Flores et al. (2021) [doi:10.32614/RJ-2021-034](https://doi.org/10.32614/RJ-2021-034).

Version: 1.4
Depends: R (≥ 2.10), [qcc](#), [fda.usc](#), [mvtnorm](#), [MASS](#)
Suggests: [markdown](#), [knitr](#)
Published: 2022-03-02
Author: Miguel Flores  [aut, cre], Ruben Fernandez-Casal  [aut], Salvador Naya [aut], Javier Tarrío-Saavedra [aut]
Maintainer: Miguel Flores <ma.flores at outlook.com>
BugReports: <https://github.com/mflores72000/qcr/issues>
License: [GPL-2](#) | [GPL-3](#) [expanded from: GPL (≥ 2)]
URL: <https://github.com/mflores72000/qcr>
NeedsCompilation: no
Materials: [README NEWS](#)
CRAN checks: [qcr results](#)

Documentation:

Reference manual: [qcr.pdf](#)

Downloads:

Package source: [qcr 1.4.tar.gz](#)

Windows binaries: r-devel: [qcr 1.4.zip](#), r-release: [qcr 1.4.zip](#), r-oldrel: [qcr 1.4.zip](#)

macOS binaries: r-release (arm64): [qcr 1.4.tgz](#), r-oldrel (arm64): [qcr 1.4.tgz](#), r-release (x86_64): [qcr 1.4.tgz](#), r-oldrel (x86_64): [qcr 1.4.tgz](#)

Old sources: [qcr archive](#)

Control Estadístico de Procesos,
Detección de anomalías, Análisis de
la capacidad, DoE, ...

Control de calidad de cigüeñales de auto

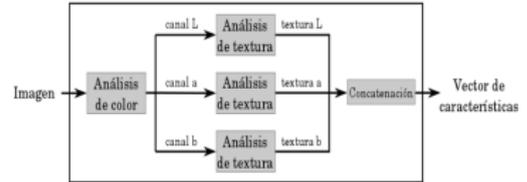
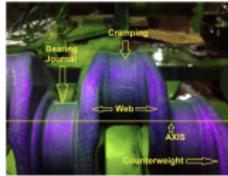
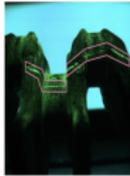
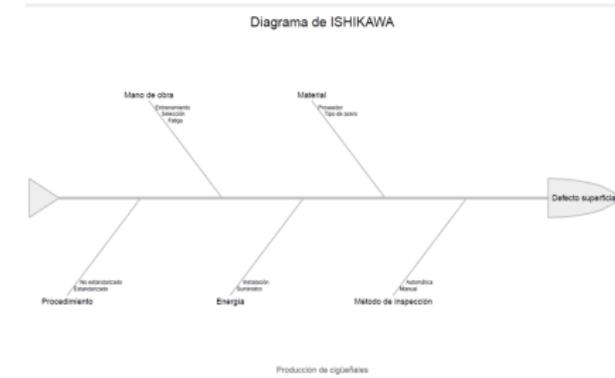
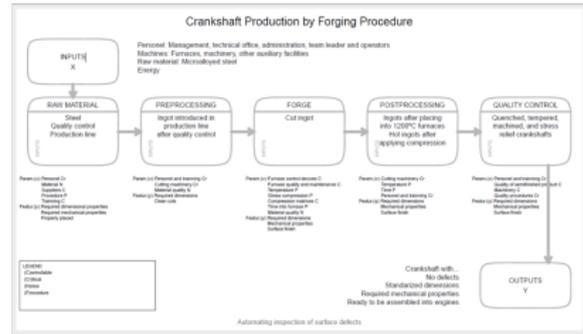


Diagrama de ISHIKAWA



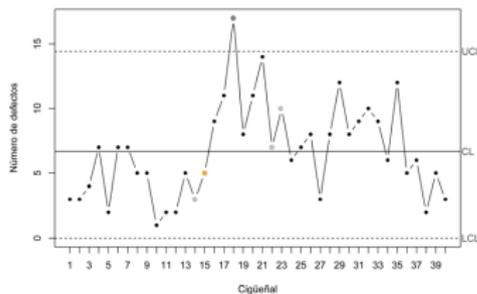
Crankshaft Production by Forging Procedure



Control de calidad de cigüeñales de auto

	N_defectos	Operario	N_defectos	Operario	N_defectos	Operario	N_defectos	Operario
1	3	1	14	2	6	1	13	2
2	3	1	7	2	5	1	7	2
3	4	1	10	2	5	1	9	2
4	7	1	6	2	4	1	8	2
5	2	1	7	2	4	1	10	2
6	7	1	8	2	6	1	7	2
7	7	1	3	2	1	1	9	2
8	5	1	8	2	4	1	11	2
9	5	1	12	2	5	1	5	2
10	1	1	8	2	5	1	12	2
11	2	1	9	2	4	1	8	2
12	2	1	10	2	6	1	12	2
13	5	1	9	2	4	1	8	2
14	3	1	6	2	3	1	8	2
15	5	1	12	2	1	1	9	2
16	9	2	5	1	2	1	13	2
17	11	2	6	1	3	1	12	2
18	17	2	2	1	4	1	8	2
19	8	2	5	1	5	1	11	2
20	11	2	3	1	3	1	15	2

Gráfico c para el control del nº de defectos per cigüeñal



Number of groups = 40
Center = 6,675
StdDev = 2,983602

LCL = 0
UCL = 14,42581

Number beyond limits = 1
Number violating runs = 4

Control de calidad del Jet A-1



a new era in filtration performance & innovation

Facet

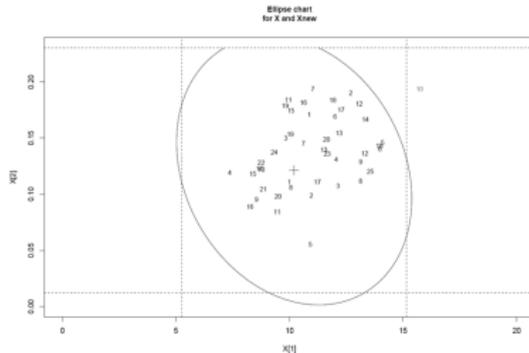
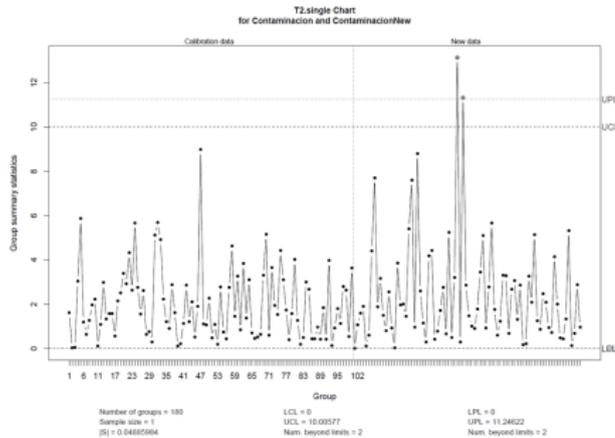
JetGard
Remote Fuel Quality and Traceability System

a new era in filtration performance & innovation

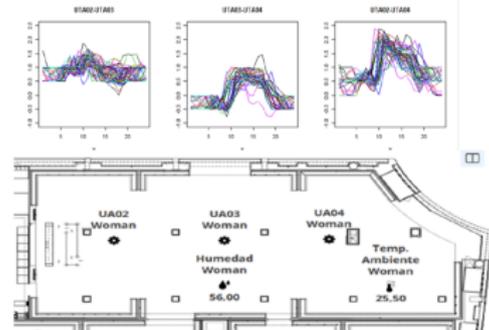
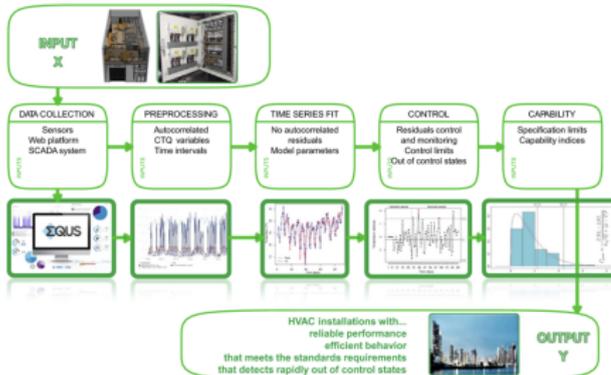
Facet

ISO Code	Number of particles per 100 ml	
	more than	up to
22	2.000.000	4.000.000
21	1.000.000	2.000.000
20	500.000	1.000.000
19	250.000	500.000
18	130.000	250.000
17	64.000	128.000
16	32.000	64.000
15	16.000	32.000
14	8.000	16.000
13	4.000	8.000
12	2.000	4.000
11	1.000	2.000
10	500	1.000
9	250	500
8	130	250
7	64	130

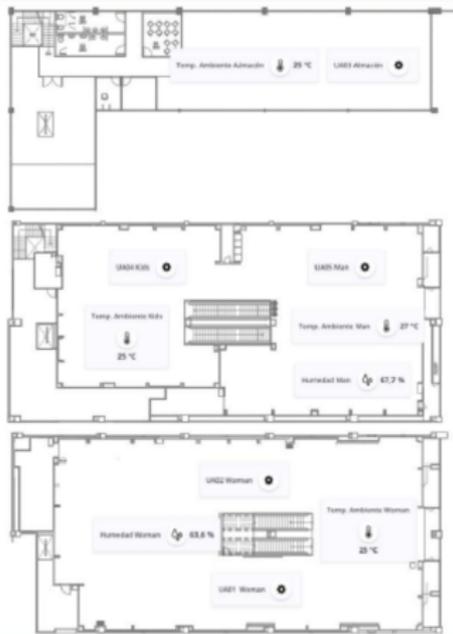
Control de calidad del Jet A-1



Control de calidad eficiencia energética



Control de calidad eficiencia energética



Total averages:

0.0267739208 -> Temperatura (°C) Entrada_Agua_General
 0.0266118808 -> Temperatura_Retorno (°C) Agua_CL02_Ventas
 0.0253941138 -> Temperatura_Impulsión (°C) CL02_Ventas
 0.0253431498 -> Temperatura_Ambiente (°C) CL01_Ventas
 0.0247264540 -> Temperatura_Retorno (°C) Agua_CL01_Ventas
 0.0236253646 -> Temperatura_Impulsión (°C) CL01_Ventas
 0.0232939155 -> Temperatura_Ambiente (°C) CL02_Ventas
 0.0154717839 -> Humedad_Relativa (%) Ventas
 0.0132083763 -> Temperatura_Retorno (°C) Agua_CL03_Almacén
 0.0110942777 -> Temperatura_Ambiente (°C) CL03_Almacén
 0.0107792047 -> Temperatura_Impulsión (°C) CL03_Almacén
 0.0107327591 -> Analizador_Chiller_Potencia_Activa (KW)
 0.0102031855 -> Analizador_General_Potencia_Activa (KW)

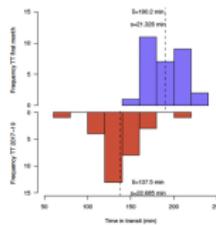
Set	Number of days	Number of anomalies	Total record
Training	217	28	5208
Testing	217	29	5208

Control de calidad del tráfico en el Canal de Panamá

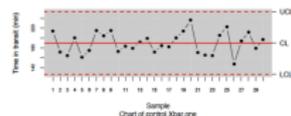


Lock	Direction	Type	Transit time mean (min)	Transit time st. dev. (min)
Agua Clara	North	Container	160-0000	34-40689
Agua Clara	North	LNG	127-2667	13-66156
Agua Clara	North	LPG	132-6667	32-17030
Agua Clara	South	Container	164-1744	31-95261
Agua Clara	South	LNG	133-8696	16-57848
Agua Clara	South	LPG	160-5000	38-16275
Cocolí	North	Container	165-0941	32-07891
Cocolí	North	LNG	141-2000	31-65258
Cocolí	North	LPG	146-8947	34-80444
Cocolí	South	Container	159-6860	32-74510
Cocolí	South	LNG	122-9130	24-48546
Cocolí	South	LPG	145-6364	39-78085

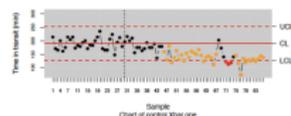
Process change identification: 15th observation.



Agua Clara - South Direction - Containers

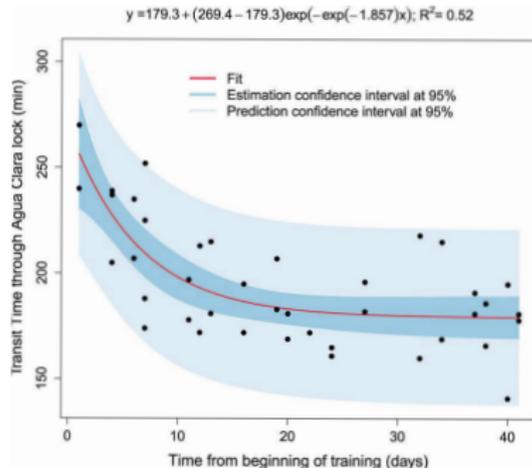
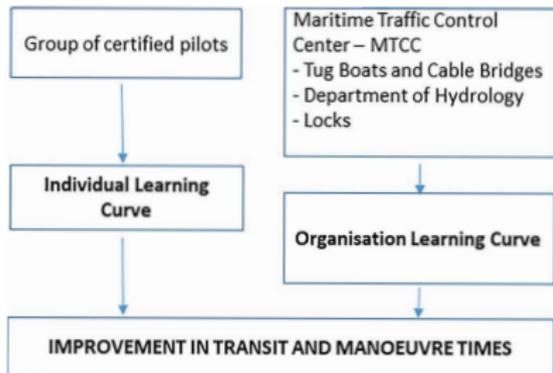


Agua Clara - South Direction - Containers



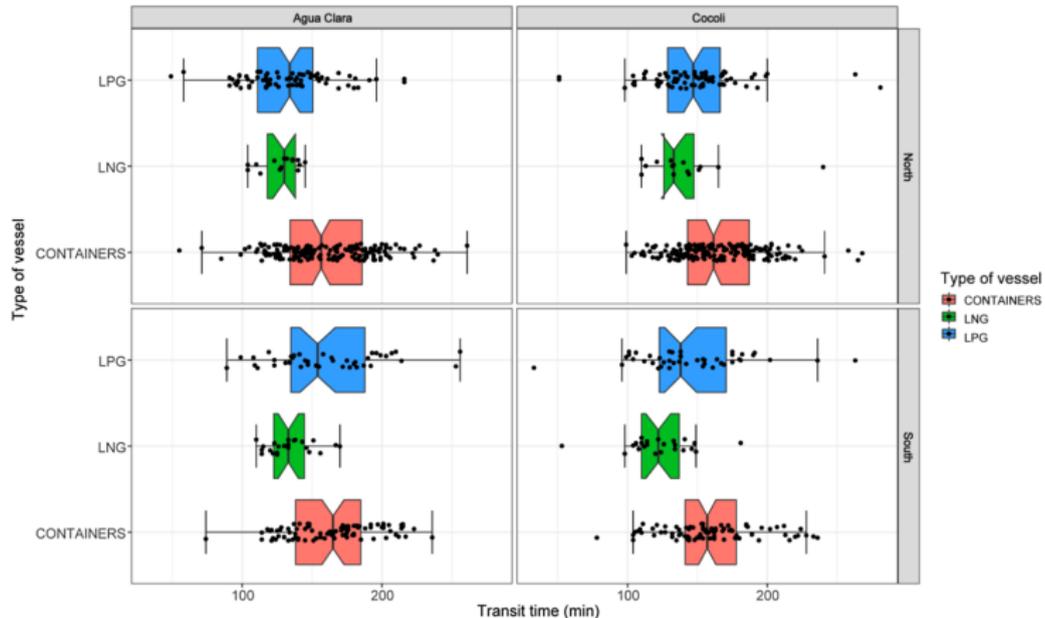
Control de procesos y curvas de aprendizaje

- Canal de Panamá (terceras exclusas).
- **Objetivo:** Identificar posibles patrones y curvas de aprendizaje para los pilotos del Canal
- **Variable crítica de calidad:** Tiempo de tránsito entre Agua Clara (Atlántico) y Cocolí (Pacífico).



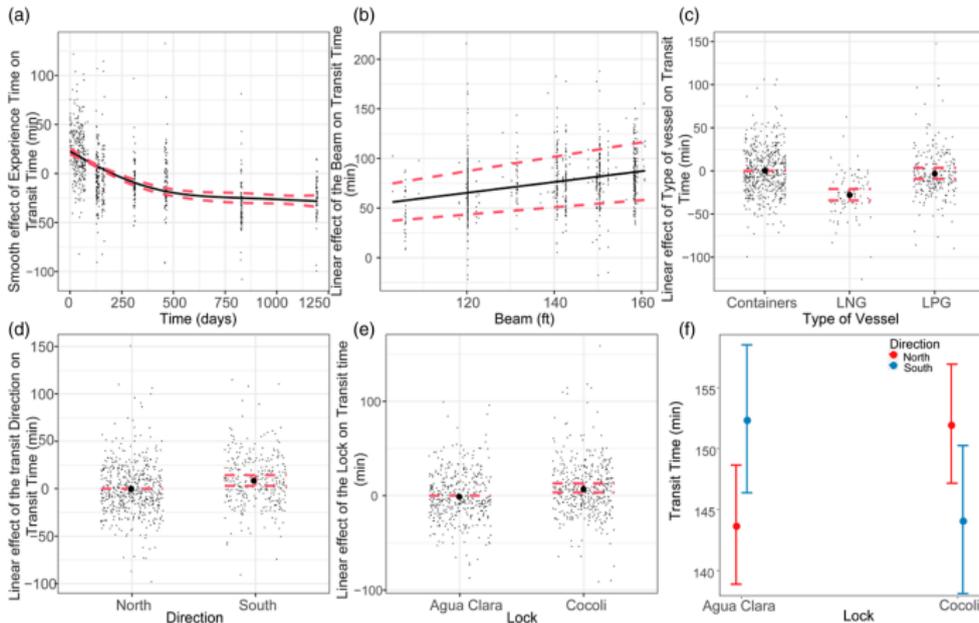
Identificación del patrón de aprendizaje en el CEC

- Paso 1: ¿Qué variables afectan el tiempo de tránsito a través de una esclusa?
- Análisis descriptivo: ANOVA gráfico.
- del tipo de embarcación, esclusa y dirección.



Identificación del patrón de aprendizaje en el CEC

- Segundo paso: ¿Cómo es el efecto de cada variable?
- Modelos de regresión semiparamétrica: Modelos aditivos generalizados (GAM).
- Modelos de regresión multivariante que permiten la inclusión de efectos lineales y no lineales (suaves).



Gráficos de control univariantes

$$H_0 : \mu = \mu_0 \quad \textit{versus} \quad H_\alpha : \mu \neq \mu_0$$

$$\text{UCL} = \mu_w + L\sigma_w$$

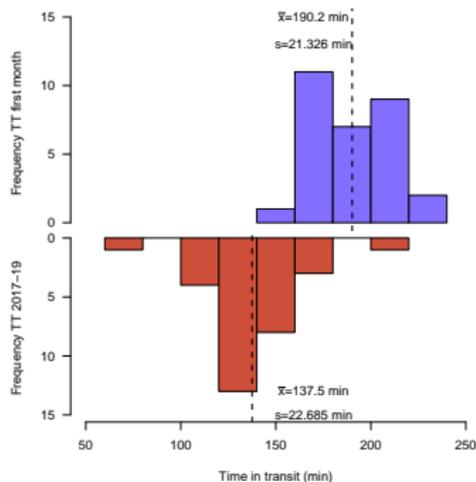
$$\text{CL} = \mu_w$$

$$\text{LCL} = \mu_w - L\sigma_w$$

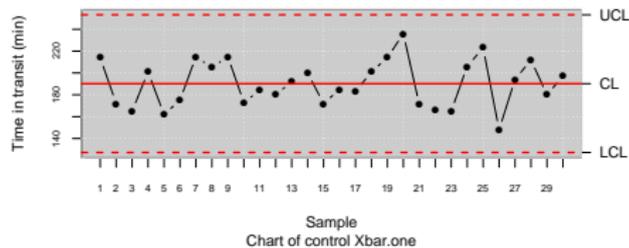
Gráfico de control individual

- Tránsito de buques portacontenedores por Agua Clara, dirección sur.
- `qcd(data, var.index=1, sample.index=2, covar.index=NULL, covar.names=NULL, data.name=NULL, type.data=c("continuous", "atribute", "dependence"), sizes=NULL)`
- `qcs.one(x, center=NULL, std.dev=c("MR", "SD"), k=2, conf.nsigma=3, limits=NULL, plot=FALSE, ...)`

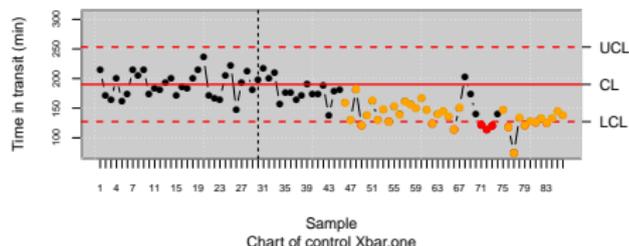
Identificación de cambios de proceso: observación 16.



Agua Clara – South Direction– Containers



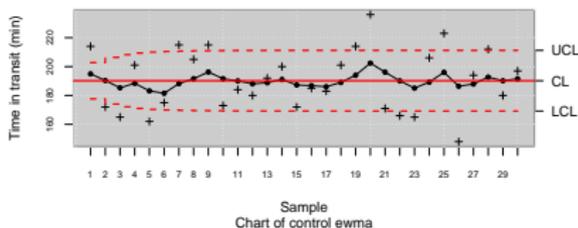
Agua Clara – South Direction – Containers



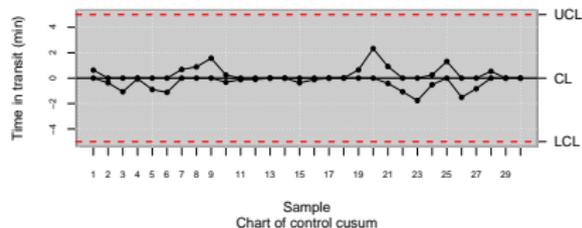
gráficos de control con memoria

- Tránsito de buques portacontenedores por Agua Clara, dirección sur.
- Detectar cambios de menos de 2σ de la media.
- `qcs.ewma(x,center=NULL,std.dev=NULL,nsigma=3, lambda=0.2,plot=FALSE,...)`
- `qcs.cusum(x,center=NULL,std.dev=NULL,decision.interval = 5,se.shift = 1,plot = FALSE,...)`
- Cambio de proceso en la observación 13.

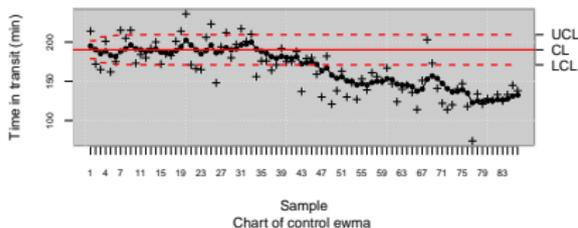
Agua Clara – South Direction – Containers: Calibrating



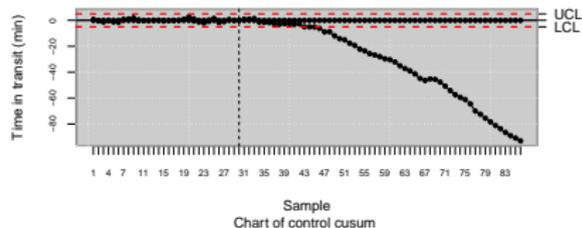
Agua Clara – South Direction – Containers: Calibrating



Agua Clara – South Direction – Containers: Monitoring



Agua Clara – South Direction – Containers: Monitoring



Análisis de capacidad de proceso

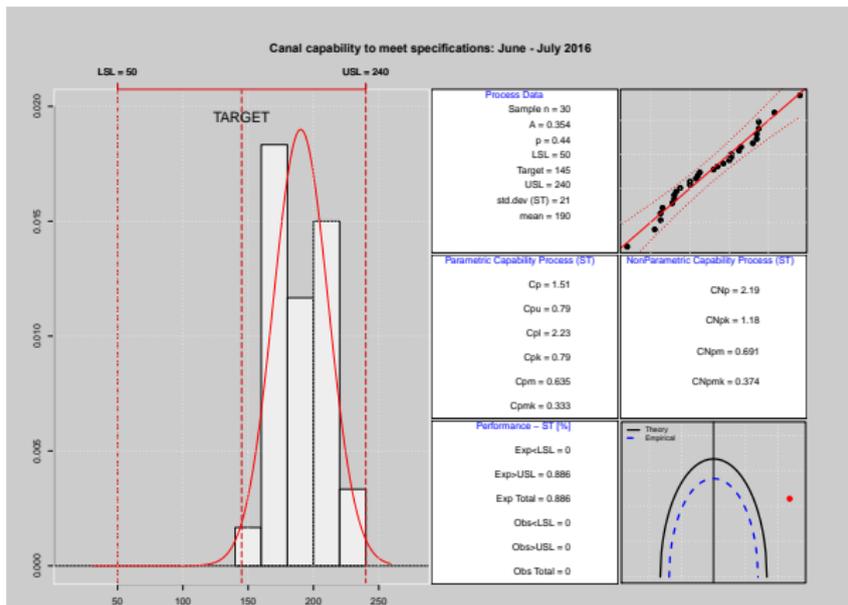
- ¿Las instalaciones del Canal ampliado son capaces de cumplir con las especificaciones de la Autoridad del Canal de Panamá?
- Se puede suponer que un proceso es capaz cuando $PCR \geq 1,33$ (≈ 66 defectos por millón).
- $C_p(u, v) = \frac{d-u|\mu-m|}{3\sqrt{\sigma^2+v(\mu-T)^2}}$. Los índices que se muestran en la tabla se obtienen utilizando esta expresión considerando valores de 0 o 1 para u and v : $C_p(0, 0) = C_p$, $C_p(1, 0) = C_{pk}$, $C_p(0, 1) = C_{pm}$, $C_p(1, 1) = C_{pkm}$, con $m = \frac{USL+LSL}{2}$ y $d = \frac{USL-LSL}{2}$.

Capacidad	$\hat{C}_p = \frac{USL-LSL}{6\hat{\sigma}}$
	$\hat{C}_{p,lower} = \frac{\hat{\mu}-LSL}{3\hat{\sigma}}$
Actual capacidad respecto a los límites de especificación limits	$\hat{C}_{p,upper} = \frac{USL-\hat{\mu}}{3\hat{\sigma}}$
	$\hat{C}_{pk} = \min \left[\frac{USL-\hat{\mu}}{3\hat{\sigma}}, \frac{\hat{\mu}-LSL}{3\hat{\sigma}} \right]$
desplazamiento de la media con respecto del objetivo (target)	$\hat{C}_{pm} = \frac{\hat{C}_p}{\sqrt{1+\left(\frac{\hat{\mu}-T}{\hat{\sigma}}\right)^2}}$
C_{pk} corrección para detectar desviaciones con respecto al Target	$\hat{C}_{pkm} = \frac{\hat{C}_{pk}}{\sqrt{1+\left(\frac{\hat{\mu}-T}{\hat{\sigma}}\right)^2}}$

PCR desde la primera a la cuarta generación, USL : límite superior de especificación limit, LSL : límite inferior de especificación, μ : media, $\hat{\mu}$: media estimada, y $\hat{\sigma}$: desviación estimada.

Análisis de capacidad de tiempo de tránsito

- $C_p > 1,33$, but C_{pk} , C_{pm} , $C_{pkm} < 1,33$. Proceso potencialmente capaz pero no en la práctica.
- Proceso descentrado (ver histograma, gráfico de capacidad).
- `qcs.ca(object, limits=c(lsl=-3,usl=3), target=NULL, std.dev=NULL, nsigmas=3, confidence=0.9973, plot=TRUE, main=NULL,...)`



Control de procesos multivariante: T^2

- $H_0 : \mu_i = \mu_0, \forall i$ vs $H_1 : \mu_i \neq \mu_0$, **sistema bajo control?** Para responder a esta cuestión hay diferentes métodos que se basan en la:
- **Hotelling T^2 :**

$$T_i^2 = n(\bar{\mathbf{x}}_i - \boldsymbol{\mu}_0)^\top \Sigma_0^{-1} (\bar{\mathbf{x}}_i - \boldsymbol{\mu}_0)$$

donde $\bar{\mathbf{x}}_i = (\bar{x}_{i1}, \dots, \bar{x}_{ip})$ es el vector de medias p para i -th submuestra.

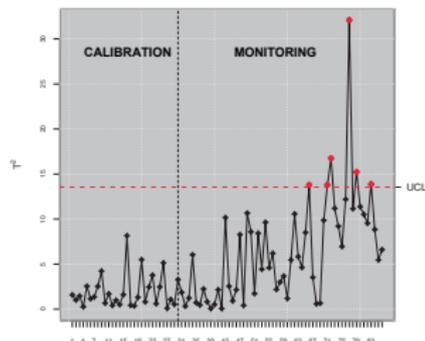
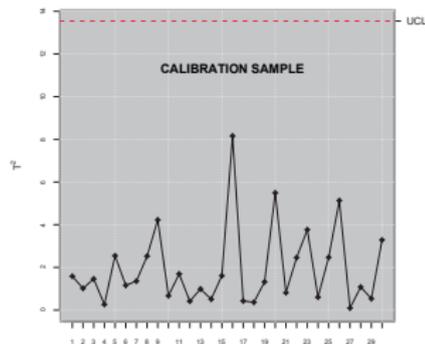
- Si el proceso está bajo control ($\mu_i = \mu_0$), α es la probabilidad de que T_i^2 exceda del valor crítico $\chi_{p,\alpha}^2$. If $T_i^2 > \chi_{p,\alpha}^2$ Hay una señal fuera de control.
- para medidas individuales $UCL = \frac{p(m+1)(n-1)}{m^2-mp} F_{\alpha,p,m-p}$ and $LCL = 0$.

Gráfico de control multivariante: T^2 de Hotelling

- FASE I (calibrado): Estimación de los límites de control.
- FASE II (monitorizado): ¿Cada nueva observación pertenece a la distribución de la muestra de calibración?
- Hay un efecto de aprendizaje: el proceso ha cambiado con respecto a la muestra de calibración.
- El proceso está fuera de control en el tránsito del buque número 36 (2018).

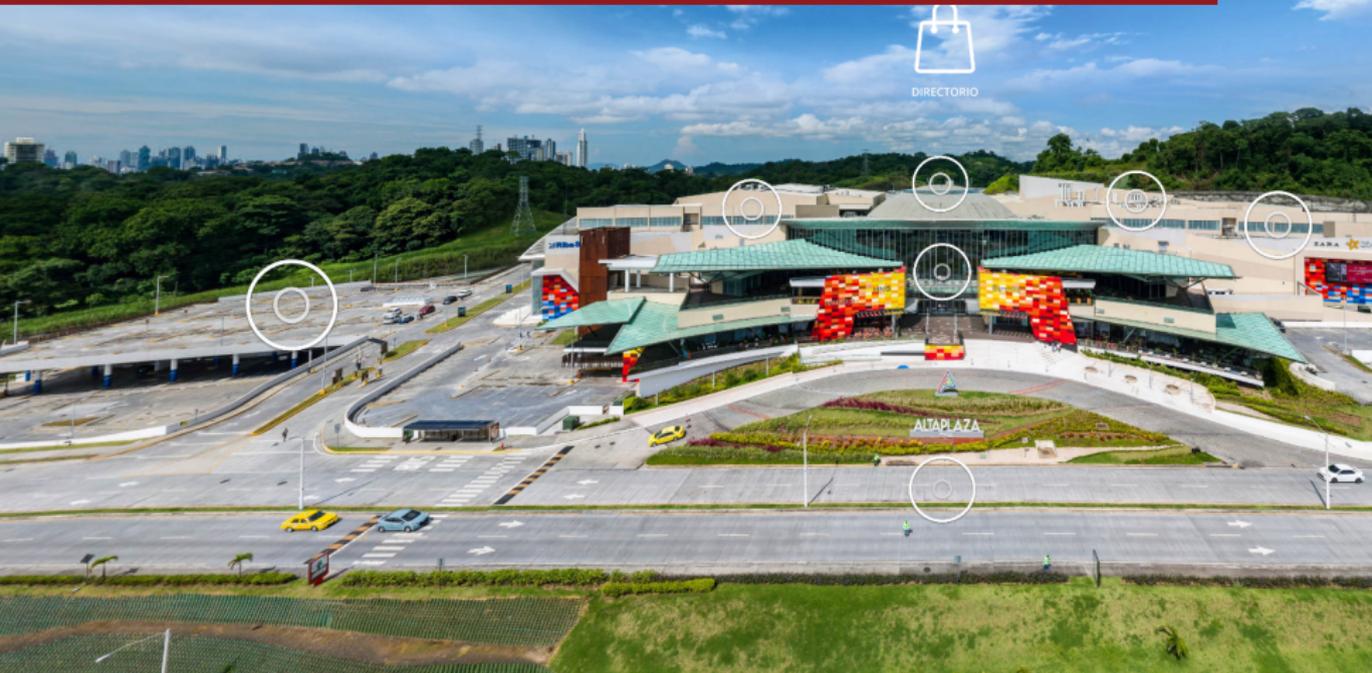
```
R> datos <-
as.matrix(Panama.sur.cont[1:86,7:8])
R> data.mqcd <- mqcd(datos)
R> res.mqcs.mot <- mqcs.t2(data.mqcd,Xmv=Xmv,
S=S, limits=res.mqcs$limits)
```

T^2 control chart: Containers transits in Agua Clara lock - South D.



Control del consumo energético en comercios ubicados en la Ciudad de Panamá

- Detección de anomalías.
- Dos variables CTQ: Consumo energético en aire acondicionado e iluminación (kW).
- Se mide el consumo diario.



Gráficos de control multivariantes no paramétricos

- **Basado en el concepto de profundidad de datos:**

- Simplicial depth (Liu, 1990),
- Mahalanobis depth (Mahalanobis, 1936),
- Halfspace or Tukey depth (Tukey, 1975),
- Likelihood depth (Fraiman, 1997), y
- Random projection depth (Zuo, 2000).

- **r o Rank statistic:** $r_{G_m}(y) = \frac{\#\{D_{G_m}(Y_j) \leq D_{G_m}(y), j=1, \dots, m\}}{m}$

- **Q statistic**, alternativo al \bar{x} : $Q(G_m, F_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_{G_m}(X_i)$

- **S statistic**, alternativo al CUSUM:

$$S_n(G_m) = \sum_{i=1}^n (r_{G_m}(X_i) - \frac{1}{2}). \text{ Being } CL = 0 \text{ and}$$

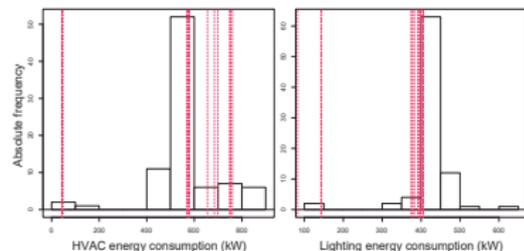
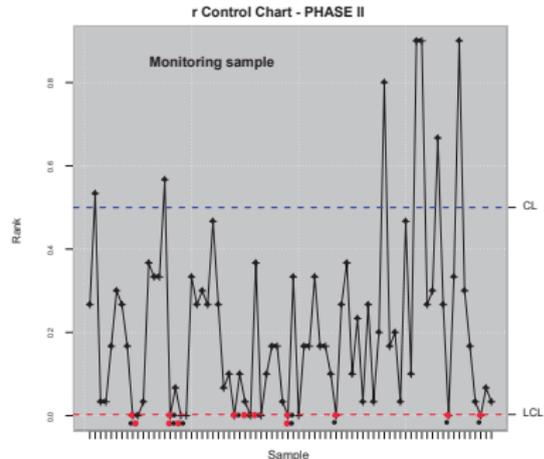
$$LCL = -Z_\alpha \sqrt{n^2 \frac{(\frac{1}{m} + \frac{1}{n})}{12}}.$$

- y : nueva observación multivariante; Y_j with $j = 1, \dots, m$: muestra de calibrado; $D_{G_m}(y)$: profundidad de y con respecto a una distribución de calibración, G_m ; F_m : distribución de la muestra monitoreada.

Aplicación del gráfico de rangos al control del consumo energético

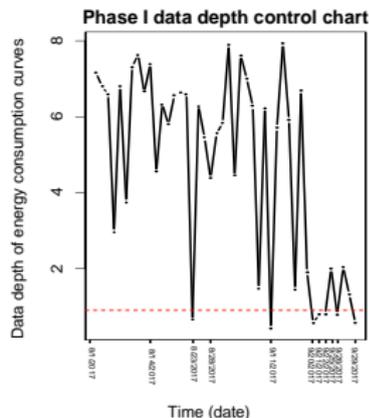
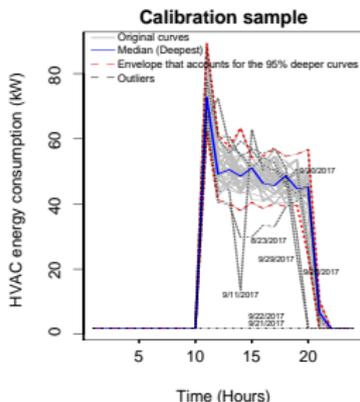
- FASE II gráfico.
- Dos variables: HVAC y Consumo de iluminación en una tienda en Panamá → NO GAUSIANA, NO AUTOCORRELADA.

```
R> x<-as.matrix(Shop[c(44:dim(Shop)[1]),c(3,8)])
R> G<-as.matrix(Shop.week[c(1:30),c(3,8)])
R> data.npqcd<-npqcd(x, G)
R> res.npqcs<-npqcs.r(data.npqcd,method = "Tukey",
alpha = 0.0028)
R> plot(res.npqcs, title = r Control Chart")
```



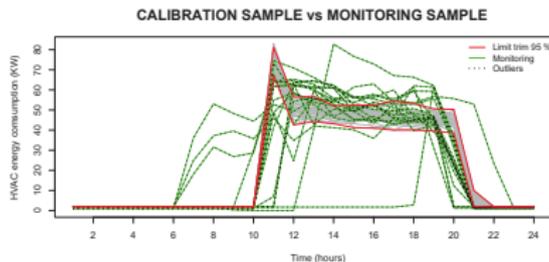
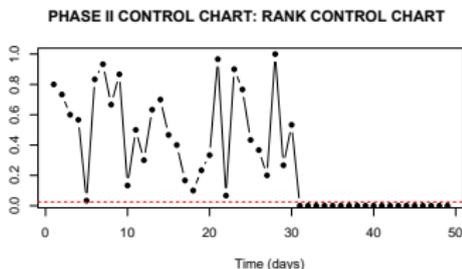
Gráficos de control para datos funcionales · Fase I

- FASE I:** Se propone un gráfico de control basado en la profundidad de los datos. con $\{\mathcal{X}_1(t), \mathcal{X}_2(t), \dots, \mathcal{X}_n(t)\}$, observaciones de la variable funcional \mathcal{X} , la hipótesis $H_0 : \mathcal{X}_i(t) \stackrel{d}{=} \mathcal{X}_j(t), \forall i, j \in \{1, \dots, n\}$, se testa contra $H_a : \mathcal{X}_i(t) \neq \mathcal{X}_j(t)$, para $i, j \in \{1, \dots, n\}$
- Se calcula la profundidad de cada curva. $D(\mathcal{X}_i)_{i=1}^n$ utilizando la profundidad de Fraiman, la profundidad del modo o la profundidad de proyecciones aleatorias.
- LCL se estima mediante el método propuesto por Febrero et al. (2008).



Gráficos de control para datos funcionales · Fase II

- **FASE II: Observaciones futuras se monitorean con gráficos de control de rango.**
- $\{\mathcal{X}_{n+1}(t), \mathcal{X}_{n+2}(t), \dots, \mathcal{X}_m(t)\}$, con G distribución, son monitoreadas, asumiendo la muestra de calibración $\{\mathcal{X}_1(t), \mathcal{X}_2(t), \dots, \mathcal{X}_n(t)\}$ se distribuye con F . Para, $H_0: F = G$ vs $H_1: F \neq G$.
- From $\{\mathcal{X}_1(t), \mathcal{X}_2(t), \dots, \mathcal{X}_n(t)\}$, Las profundidades para la muestra de calibración $D(\mathcal{X}_i)_{i=1}^n$, y para la muestra, $D(\mathcal{X}_j)_{j=n+1}^m$, se han obtenido.
- El estadístico de rango $r_G(\mathcal{X}_{n+1}), \dots, r_G(\mathcal{X}_m)$ se calcula con la muestra de calibración $\{\mathcal{X}_1(t), \mathcal{X}_2(t), \dots, \mathcal{X}_n(t)\}$: $r_G(\mathcal{X}) = \frac{\#\{\mathcal{X}_i | D(\mathcal{X}_i) \leq D(\mathcal{X}), i=1, \dots, n\}}{n}$
- La línea central de controles $CL=0.5$ and $LCL=\alpha$. Si $r_G(\mathcal{X}_j) \leq LCI$ para j , El proceso está fuera de control (anomalía). Las curvas originales se muestran con la envolvente correspondiente al 99% de profundidad (calibración).



“

Referencias

Flores, M., Fernández-Casal, R., Naya, S., & Tarrío-Saavedra, J. (2021). Statistical Quality Control with the qcr Package. **R Journal**, 13(1).

Flores, M., Naya, S., Fernández-Casal, R., Zaragoza, S., Raña, P., & Tarrío-Saavedra, J. (2020). Constructing a control chart using functional data. **Mathematics**, 8(1), 58.

Carral, L., Tarrío-Saavedra, J., Sáenz, A. V., Bogle, J., Alemán, G., & Naya, S. (2021). Modelling operative and routine learning curves in manoeuvres in locks and in transit in the expanded Panama Canal. **The Journal of Navigation**, 74(3), 633-655.

Flores, M., Moreno, G., Solórzano, C., Naya, S., & Tarrío-Saavedra, J. (2021). Robust bootstrapped Mandel'sh and k statistics for outlier detection in Interlaboratory Studies. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, 104429.

Tobar, A., Flores, M., Castillo, S., Naya, S., Zaragoza, S., Tarrío-Saavedra, J. (2023). Bootstrap-LOCI data mining methodology for anomaly detection in buildings energy efficiency. **Energy Reports**, 10, 244-254. Sosa Donoso, J. R., Flores, M., Naya, S.,

Tarrío-Saavedra, J. (2023). Local Correlation Integral Approach for Anomaly Detection Using Functional Data. **Mathematics**, 11(4), 815.

“

References

I. Barbeito, S. Zaragoza, J. Tarrío-Saavedra, & Naya, S. (2017). Assessing thermal comfort and energy efficiency in buildings by statistical quality control for autocorrelated data, **Applied Energy**, 190. 1-17.

S. Naya, J. Tarrío-Saavedra, J. López-Beceiro, M. Francisco-Fernández, M. Flores, R. Artiaga. (2014). Statistical functional approach for interlaboratory studies with thermal data. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 118(1229-1243).

S. Naya, R. Cao, M. Francisco-Fernandez, J. Tarrío-Saavedra, H. Brage, & C. Cancelo. (2013). Estimating water and solid impurities in jet fuel from iso codes. **Energy & fuels**, 27(12), 7858–7867.

Flores, M., Fernández-Casal, R., Naya, S. & Tarrío-Saavedra J. ILS: Interlaboratory Study. **r package version 0.3 (2023)**. <https://CRAN.R-project.org/package=ILS>.

M. Flores, J. Tarrío-Saavedra, R. Fernandez-Casal, & S. Naya. (2018). Functional extensions of mandel h and k statistics for outlier detection in interlaboratory studies, **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, 176, 134–148.



KEEP THE BALL ROLLING: CONTROL ESTADÍSTICO DE LA CALIDAD PARA LA INDUSTRIA 5.0

Salvador Naya, Javier Tarrío
Saavedra, Miguel Flores

XI Xornada de Usuarios de R en Galicia

Santiago de Compostela, 24/10/2024



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

