

## Desarrollo de herramientas para la gestión óptima de envases vacíos de fitosanitarios y sus contenidos residuales

A.E. Sorichetti<sup>1</sup>\*[0000-0002-2650-2207], M. González Prieto<sup>2</sup>[0000-0002-9123-5301], A.A. Savoret<sup>1</sup>[0000-0001-5098-8641], S. Barbosa<sup>3</sup>[0000-0002-0434-0972] y J.A. Bandoni<sup>3</sup>[0000-0002-9475-3825]

<sup>1</sup>Universidad Nacional del Sur (UNS), Centro de Emprendedorismo y Desarrollo Territorial Sostenible (CEDETS) – Universidad Provincial del Sudoeste (UPSO) – Comisión de Investigación Científicas de la Pcia. de Buenos Aires (CIC), Bahía Blanca, Argentina.

<sup>2</sup>Universidad Nacional del Sur (UNS), Centro de Emprendedorismo y Desarrollo Territorial Sostenible (CEDETS) – Universidad Provincial del Sudoeste (UPSO) – CONICET, Bahía Blanca, Argentina.

<sup>3</sup>Planta Piloto de Ingeniería Química (PLAPIQUI), Universidad Nacional del Sur (UNS) – CONICET, Bahía Blanca, Argentina.

antonelesorichetti@gmail.com

**Abstract.** En este trabajo se presenta un modelo de optimización multiperíodo para el diseño de un Sistema de Gestión Integral de Envases Vacíos de Fitosanitarios. El propósito es generar un esquema para la recolección de envases dentro del Sudoeste Bonaerense (SOB) y determinar las localizaciones óptimas para la instalación de Centros de Acopio Transitorio (CAT) y de Plantas Operadoras (OPR) de envases, conociendo la tasa de generación de envases en cada partido del SOB. La formulación propuesta considera la inversión y los costos operativos (fijos y variables) de cada CAT y OPR, así como los costos de transporte incurridos en la recolección de los envases y en el traslado a las plantas de procesamiento. Además, se incorpora la alternativa de realizar Campañas Itinerantes en las que los envases se transportan en forma directa desde los partidos a las plantas operadoras. El modelo matemático resultante corresponde a un Problema Mixto Entero Lineal (MILP) donde las decisiones discretas se emplean para determinar la instalación y uso de los CAT y OPR a lo largo del tiempo. El criterio de performance utilizado es la maximización del valor presente neto del sistema completo de gestión, teniendo en cuenta diferentes costos e ingresos por la venta del producto de las OPR. Los 4 escenarios estudiados arrojan resultados prometedores con un valor presente neto superior a USD 570.000 a lo largo de un período de 15 años.

**Keywords:** Fitosanitarios · Optimización · Modelo Mixto-Entero Lineal.

## 1 Introducción

Argentina cuenta con más de 36 millones de hectáreas cultivadas en las que se emplean casi 230 millones de litros de herbicidas y cerca de 350 millones de litros de agroquímicos [1]. Los envases necesarios para su comercialización generan unas 13.000 toneladas de polietileno de alta densidad (PEAD) cada año [2]. Particularmente, en la provincia de Buenos Aires se generan aproximadamente 5 millones por año de envases vacíos de agroquímicos [3]. Dentro del país los envases ya utilizados y sus contenidos residuales son considerados residuos peligrosos conforme la Ley Nacional de Residuos Peligrosos 24.051 [4]. En la actualidad, el manejo de estos envases se hace de diversas formas dependiendo del usuario. Tradicionalmente, los envases de agroquímicos vacíos han sido quemados, enterrados, reutilizados como contenedores para otros productos o bien tirados en canales de riego, ríos, arroyos, zanjas o campo a cielo abierto, generando focos de contaminación al medio ambiente y representando un peligro para la salud de personas y animales [5]. Los efectos por el uso de plaguicidas y sus envases reflejados en la salud de los usuarios directos, de la población expuesta indirectamente y los daños al ambiente, plantean la necesidad de medidas preventivas que garanticen el manejo seguro de estas sustancias [6].

Recientemente se sancionó la Ley Nacional 27.279 (Resolución N.º 327/17) [7], que establece los presupuestos mínimos de protección ambiental para la gestión de los envases vacíos de fitosanitarios, en virtud de la toxicidad del producto que contuvieron, requiriendo una gestión diferenciada y condicionada. Dicha Ley específica que el sistema se articulará en tres etapas: a) del Usuario al Centro de Acopio Transitorio, b) del Centro de Acopio Transitorio al Operador, c) del Operador a la Industria. Esta ley introduce el concepto de Responsabilidad Extendida y Compartida en la gestión de envases vacíos de agroquímicos. La misma asigna responsabilidades y establece obligaciones específicas a los distintos actores de la cadena. También es importante mencionar que el Art. N.º 5 apartado b) especifica que el tránsito inter-jurisdiccional no podrá ser prohibido por las provincias, pero si razonablemente reglamentado.

Múltiples esfuerzos para la gestión de envases de agroquímicos se han llevado a cabo en forma aislada tanto por municipios como por organizaciones no gubernamentales, sin obtener una solución concreta para el problema real. Aun se observan grandes fallencias logísticas y de implementación, procesando una mínima cantidad de envases vacíos sin trazabilidad de su limpieza.

En este contexto, el presente trabajo presenta un estudio de gestión integral sostenible para los envases vacíos de fitosanitarios en el Sudoeste de la Prov. de Bs.As. Dicha región tiene como principal actividad productiva la producción agropecuaria. Además, su lejanía con respecto a las plantas operadoras localizadas en Cnel. Brandsen y en Lanús y su gran extensión territorial, representan un verdadero desafío a la hora de diseñar un plan eficiente de gestión para la recuperación de los envases vacíos de fitosanitarios. Como herramienta para el análisis se desarrolló un modelo matemático de optimización que permite estudiar los aspectos de diseño y operación de una red logística de recolección y disposición de dichos envases vacíos, teniendo como marco la Ley Nacional 27.279.

## 2 Formulación del problema

Teniendo en cuenta que la sostenibilidad es un pilar esencial para la gestión exitosa de los residuos, y que a su vez la misma se basa en tres aspectos fundamentales íntimamente relacionados entre sí, tales como la economía, la ecología y los aspectos sociales, este estudio se focaliza en la problemática asociada a los productores y municipios del Sudoeste de la Provincia de Buenos Aires (SOB).

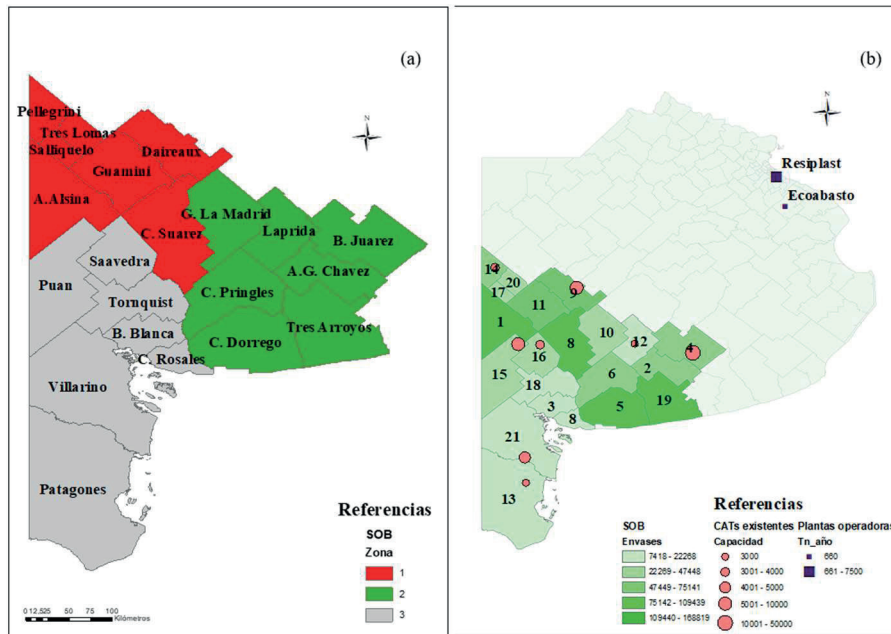
El SOB se conforma con 22 partidos, 21 de los cuales tienen como principal actividad económica la producción agropecuaria. En el SOB se concentran 8 de los 27 Centros de Acopio Transitorio (CATs) instalados en la provincia de Buenos Aires y no posee ninguna planta operadora habilitada para lavar y procesar el plástico de los bidones [8,9]. En la Tabla 1 se listan los partidos que integran el SOB y se indica la capacidad de almacenamiento de envases vacíos de aquellos que poseen un CAT habilitado. En conjunto, los CATs habilitados tienen la capacidad para almacenar 89.000 envases de 20 litros, lo que representa aproximadamente un 6% del total de envases generados anualmente en el SOB.

**Tabla 1.** Partidos que conforman el sudoeste bonaerense

| Partido              | CAT (envases) | Partido           | CAT (envases) |
|----------------------|---------------|-------------------|---------------|
| (1) A. Alsina        |               | (12) Laprida      | 3.000         |
| (2) A. G. Chávez     |               | (13) Patagones    | 3.000         |
| (3) B. Blanca        |               | (14) Pellegrini   | 4.000         |
| (4) B. Juárez        | 50.000        | (15) Puan         | 10.000        |
| (5) C. Dorrego       |               | (16) Saavedra     | 4.000         |
| (6) C. Pringles      |               | (17) Salliqueló   |               |
| (7) C. Rosales       |               | (18) Tornquist    |               |
| (8) C. Suarez        |               | (19) Tres Arroyos |               |
| (9) Daireaux         | 10.000        | (20) Tres Lomas   |               |
| (10) Gral. la Madrid |               | (21) Villarino    | 5.000         |
| (11) Guaminí         |               |                   |               |

Resulta importante para el diseño de un sistema de gestión integral contar con un diagnóstico actualizado de la localización geográfica, cantidad y tipo de envases que se generan en la región en estudio. La cantidad de envases se determinó a partir del área sembrada de cada cultivo extensivo y los protocolos de siembra aplicados a cada uno. Se realizó una regionalización del SOB en función del uso de fitosanitarios de acuerdo a las condiciones de suelo y el clima de cada región (ver Fig. 1). Los protocolos de siembra se consultaron a Extensionistas de las Agencias de INTA referentes de cada región: Bahía Blanca, Coronel Suárez y Tres Arroyos. Por otra parte, a partir los datos publicados por la Dirección Nacional de Análisis Económico Agroindustrial (Dirección de Estimaciones Agrícolas) en las Campañas 2008 a 2018 [10], se obtuvieron regresiones lineales, para estimar la superficie sembrada en el área de interés en función de los años a lo largo de un periodo de 15 años. El número de envases de 20 litros que se genera por año en promedio en cada partido del SOB se muestra en el mapa de la Figura 1. En la misma se incluye la ubicación y capacidad de los CATs instalados actualmente,

como también la localización de las dos plantas operadoras y su capacidad de procesamiento de plásticos por año.



**Fig. 1.** Mapa del sudoeste bonaerense (SOB). (a) Regionalización del SOB por protocolo de siembra. (b) Envases generados en cada partido y ubicación de centros de acopio transitorio y plantas operadoras. Los partidos siguen la numeración provista en la Tabla 1. (Fuente: elaboración propia)

Una característica importante del SOB son las grandes distancias entre los lugares de generación del residuo y entre éstos y los centros de acopio y de tratamiento, por lo que resulta importante pensar adecuadamente los aspectos logísticos para generar un sistema integral de gestión de residuos que resulte práctico y eficiente.

### 3 Modelo matemático

El modelo consta de 34 ecuaciones para determinar la estructura óptima del problema de asignación de unidades de infraestructura con capacidades acotadas (CATs y OPRs), así como ecuaciones de costos fijos y operativos, en forma anual y a lo largo de un dado horizonte de tiempo.

La logística representa un costo significativo en cualquier plan de gestión de residuos, particularmente en las regiones en las que hay mucha distancia entre las áreas agrícolas y la zona de reciclaje y eliminación. Transportar envases vacíos es ineficiente, debido a la razón entre su gran volumen y su peso. Transportar los bidones enteros

consigue movilizar apenas un 20% de los kilos de plástico que pueden transportarse compactados. Los pre-tratamientos más utilizados para la disminución del volumen de los envases vacíos de fitosanitarios son la compactación y/o el triturado [11]. A diferencia del triturado de los envases, su compactado no afecta el proceso de reciclado que se lleva a cabo posteriormente en las plantas operadoras. En este trabajo se asume que la compactación solo se realiza en los CATs, donde se instalan equipos de prensado (enfardadoras), dado que es la opción que el Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible considera utilizar. Por lo cual, los bidones se transportan enteros desde los partidos hasta los CAT o desde los partidos hasta la planta operadora. Dentro del sistema de gestión, este último transporte constituye las campañas itinerantes de recolección de envases.

Dado que se trata de un problema de planificación a lo largo de un horizonte de tiempo, de la instalación de infraestructura necesaria para efectuar la recolección y tratamiento de los envases vacíos de fitosanitarios que se generan en el SOB, se elige como función objetivo maximizar el valor presente neto (VPN). Es necesario aclarar que, la instalación de al menos un CAT es una restricción del modelo. Esta restricción se incluye no solo por ser establecimientos definidos en el contexto de la Ley Nacional 27.279 sino también por constituir espacios que aseguran el correcto almacenamiento de los envases vacíos, desde el punto de vista de seguridad para las personas y cuidado del medio ambiente.

El modelo formulado es de tipo Mixto Entero Lineal (MILP). En la siguiente sección se presentan las definiciones de los diferentes conjuntos, parámetros (o datos) y variables enteras y continuas que definen el modelo.

### 3.1 Nomenclatura

#### Conjuntos

|     |                                       |
|-----|---------------------------------------|
| $i$ | Partidos del SOB.                     |
| $j$ | Centros de acopio transitorio (CAT).  |
| $t$ | Periodos del horizonte de planeación. |
| $l$ | Plantas operadoras (OPR).             |

#### Parámetros

|                      |  |
|----------------------|--|
| CAP                  | Costo del agua de proceso [USD/m <sup>3</sup> ].                       |
| CapcamC              | Capacidad de carga vehículos de envases compactados [kg].              |
| CapcamE              | Capacidad de carga vehículos de envases enteros [kg].                  |
| CAPreal <sub>j</sub> | Capacidad real de los CATs instalados en el SOB [envases].             |
| CC <sub>j</sub>      | Pendiente promedio de la curva de economías de escala del CAT $j$      |
| CEE                  | Costo del MWh [USD].   |
| CEnfar               | Costo de compra de una enfardadora [USD].                              |
| CEsAP                | Consumo específico de agua en la planta operadora [m <sup>3</sup> /t]. |
| CEsEE                | Consumo específico en la planta operadora [kWh/t].                     |
| CEsEEE               | Consumo específico de EE de la enfardadora [kWh/t].                    |

|            |   |
|------------|---|
| $c_{il}$   | Distancia entre el partido $i$ y la planta operadora $l$ [km].      |
| CMCAT $_j$ | Capacidad operativa máxima del CAT $j \in J$ [envases/mes].         |
| CMOPR $_l$ | Capacidad operativa máxima de las OPRs $l \in L$ [envases/periodo]. |
| COCATfijo  | Costo fijo de operación de cada CAT [USD/mes].                      |
| CT         | Costo unitario de transporte de mercancías [USD/km].                |
| CTA        | Costo del tratamiento de agua [USD/m <sup>3</sup> ].                |
| CTP        | Costo unitario de transporte de residuos peligrosos [USD/km].       |
| $d_{ij}$   | Distancia entre el partido $i$ y el CAT $j$ [km].                   |
| ECOP       | Costo de los equipos críticos planta operadora [USD].               |
| Fadm       | Factor costo fijo administrativo.                                   |
| Fcomer     | Factor costo fijo comercialización.                                 |
| Fman       | Factor costo fijo mantenimiento.                                    |
| $fr_t$     | Fracción de recuperación de envases en cada periodo $t$ .           |
| $h_{it}$   | Envases del partido $i$ en el periodo $t$ [envases/periodo].        |
| IAOP       | Factor de costo de instalación y auxiliares de las OPRs [USD].      |
| $M$        | Valor utilizado para restricciones de tipo "Big-M".                 |
| NC         | Número máximo de CATs a instalar.                                   |
| NCmin      | Número mínimo de CATs a instalar.                                   |
| NOP        | Número máximo de plantas operadoras a instalar.                     |
| OOj        | Ordenada al origen de la curva de economías de escala del CAT $j$ . |
| $P$        | Meses por periodo.  |
| PE         | Peso del envase de 20 L de HDPE [kg/envase].                        |
| Per        | Cantidad de personas para operar la planta operadora.               |
| Pr         | Precio de venta de plástico HDPE [USD/t].                           |
| PTEL       | Costo de la planta de tratamiento de efluentes [USD].               |
| rec        | Reciclo del agua de proceso.  |
| $r_{jl}$   | Distancia entre el CAT $j$ y la planta operadora $l$ [km].          |
| $S$        | Sueldo por persona [USD/periodo].                                   |
| TR         | Tasa de descuento de capital entre los periodos $l$ y $t$ .         |

## Variables

### Binarias

|             |   |
|-------------|---|
| $x_{jt}$    | Representa la operación del CAT $j$ en el periodo $t$ .   |
| $y_{lt}$    | Representa la operación de la OPR $l$ en el periodo $t$ . |
| $z_{CAT_j}$ | Representa la instalación de un CAT en $j$ .              |
| $z_{OPR_l}$ | Representa la instalación de una OPR en $l$ .             |

### Continuas

|                   |   |
|-------------------|---|
| BEN $_t$          | Beneficios netos en cada periodo $t$ [USD/periodo].             |
| CICATamp $_j$     | Costo de ampliación de los CATs existentes [USD].               |
| CICAT $_j$        | Costo de inversión en $j$ [USD].                                |
| CIOPR $_l$        | Costo de inversión en $l$ [USD].                                |
| COCAT $_{jt}$     | Costo operativo de $j$ en el periodo $t$ [USD/ periodo].        |
| COCATtot $_t$     | Costo operativo de los CATs en cada periodo $t$ [USD/ periodo]. |
| COOPRfijo $_{lt}$ | Costo fijo de la OPR $l$ en el periodo $t$ [USD/ periodo].      |
| COOPR $_{lt}$     | Costo operativo de $l$ en cada periodo $t$ [USD/ periodo].      |
| COOPRtot $_t$     | Costo operativo de las OPRs en cada periodo $t$ [USD/ periodo]. |

|                          |  |
|--------------------------|--|
| COOPRvar <sub>it</sub>   | Costo variable de la OPR l en el periodo t [USD/ periodo].         |
| COP <sub>t</sub>         | Costos operativos totales en cada periodo t [USD/ periodo].        |
| COTRA <sub>t</sub>       | Costo del transporte en cada periodo t [USD/ periodo].             |
| e <sub>ijt</sub>         | Envases enviados desde i al CAT j en t [envases/periodo].          |
| f <sub>jlt</sub>         | Envases enviados del CAT j a la OPR l en t [envases/periodo].      |
| g <sub>ilt</sub>         | Envases enviados desde i a la OPR l en t [envases/periodo].        |
| ING <sub>t</sub>         | Ingresos totales en cada periodo t [USD/periodo].                  |
| STCAT <sub>jt</sub>      | Cantidad de envases en el CAT j en el periodo t [envases/periodo]. |
| STOPR <sub>lt</sub>      | Cantidad de envases en la OPR l en el periodo t [envases/periodo]. |
| TSTCAT <sub>extraj</sub> | Tamaño de ampliación requerida de CATs existentes [envases].       |
| TSTCAT <sub>j</sub>      | Máx. N° de envases en el CAT j [envases/mes].                      |
| z                        | Variable objetivo.   |

### Ecuaciones

A continuación, se presenta el modelo completo.

$$\begin{aligned} \text{Max } z &= \sum_t \text{BEN}_t \cdot (1 + \text{TR})^{-t} - \sum_j (\text{CICAT}_j + \text{CICATamp}_j) - \sum_l \text{CIOPR}_l & (1) \\ \sum_j x_{jt} &\geq \text{NCmin} & \forall t & (2) \\ \sum_j x_{jt} &\leq \text{NC} & \forall t & (3) \\ \sum_l y_{lt} &\leq \text{NOP} & \forall t & (4) \\ x_{j,t+1} &\geq x_{jt} & \forall j, t & (5) \\ y_{l,t+1} &\geq y_{lt} & \forall l, t & (6) \\ z\text{CAT}_j &\geq x_{jt} & \forall j, t & (7) \\ z\text{OPR}_l &\geq y_{lt} & \forall l, t & (8) \\ \text{fr}_t \cdot h_{it} &= \sum_j e_{ijt} + \sum_l g_{ilt} & \forall i, t & (9) \\ \sum_i e_{ijt} &= \sum_l f_{jlt} & \forall j, t & (10) \\ e_{ijt} &\leq M \cdot x_{jt} & \forall i, j, t & (11) \\ f_{jlt} &\leq M \cdot y_{lt} & \forall j, l, t & (12) \\ \sum_i e_{ijt} &= \text{STCAT}_{jt} & \forall j, t & (13) \\ \text{STCAT}_{jt} &\leq M \cdot x_{jt} & \forall j, t & (14) \\ \sum_j f_{jlt} + \sum_i g_{ilt} &= \text{STOPR}_{lt} & \forall l, t & (15) \\ \text{STOPR}_{lt} &\leq M \cdot y_{lt} & \forall l, t & (16) \\ \text{STCAT}_{jt}/P &\leq \text{TSTCAT}_j & \forall j, t & (17) \\ \text{TSTCAT}_{extraj} &= \text{TSTCAT}_j - \text{CAPreal}_j & \forall j & (18) \\ \text{TSTCAT}_j &\leq M \cdot z\text{CAT}_j & \forall j & (19) \\ \text{STOPR}_{lt} &\leq \text{CMOPR}_l & \forall l, t & (20) \\ \text{TSTCAT}_j &\leq \text{CMCAT}_j & \forall j & (21) \\ \text{CICAT}_j &= \text{OOj} \cdot z\text{CAT}_j + \text{CCj} \cdot \text{TSTCAT}_j + \text{CEnfar} \cdot z\text{CAT}_j & \forall j & (22) \\ \text{CICATamp}_j &= \text{OOj} \cdot z\text{CAT}_j + \text{CCj} \cdot \text{TSTCAT}_{extraj} + \text{CEnfar} \cdot z\text{CAT}_j & \forall j & (23) \\ \text{CIOPR}_l &= ((1 + \text{IAOP}) \cdot \text{ECOP} + \text{PTEL}) \cdot z\text{OPR}_l & \forall l & (24) \\ \text{COCAT}_{jt} &= x_{jt} \cdot \text{COCATfijo} \cdot P + \text{CEsEEE} \cdot \text{CEE} \cdot \text{STCAT}_{jt} \cdot \text{PE} \cdot 1.10^{-6} & \forall j, t & (25) \\ \text{COOPRvar}_{it} &= \frac{\text{STOPR}_{lt}}{1000} \cdot \text{PE} \cdot (\text{CEE} \cdot \text{CEsEE} + \text{CAP} \cdot \text{CEsAP} \cdot (1 - \text{rec}) + \text{CEsAP} \cdot \text{CTA}) & \forall l, t & (26) \\ \text{COOPRfijo}_{it} &= \frac{\text{STOPR}_{lt}}{1000} \cdot \text{PE} \cdot \text{Pr} \cdot (\text{Fadm} + \text{Fcomer}) + \text{Per} \cdot S \cdot z\text{OPR}_l + \text{CIOPR}_l \cdot \text{Fman} & \forall l, t & (27) \end{aligned}$$

$$COOPR_{it} = COOPRfijo_{it} + COOPRvar_{it} \quad \forall i, t \quad (28)$$

$$COCAT_{tot_t} = \sum_j COCAT_{jt} \quad \forall t \quad (29)$$

$$COOPR_{tot_t} = \sum_l COOPR_{jt} \quad \forall t \quad (30)$$

$$COTRA_t = CT \cdot \left( \sum_i \sum_j \frac{e_{ijt} \cdot d_{ij} \cdot PE}{CapcamE} \right) + CTP \cdot \left( \sum_i \sum_l \frac{g_{ilt} \cdot c_{il} \cdot PE}{CapcamE} + \sum_j \sum_l \frac{f_{jlt} \cdot r_{jl} \cdot PE}{CapcamC} \right) \quad \forall t \quad (31)$$

$$COP_t = COTRA_t + COCAT_{tot_t} + COOPR_{tot_t} \quad \forall t \quad (32)$$

$$ING_t = Pr \cdot \sum_l \frac{STOPR_{lt}}{1000} \cdot PE \quad \forall t \quad (33)$$

$$BEN_t = ING_t - COP_t \quad \forall t \quad (34)$$

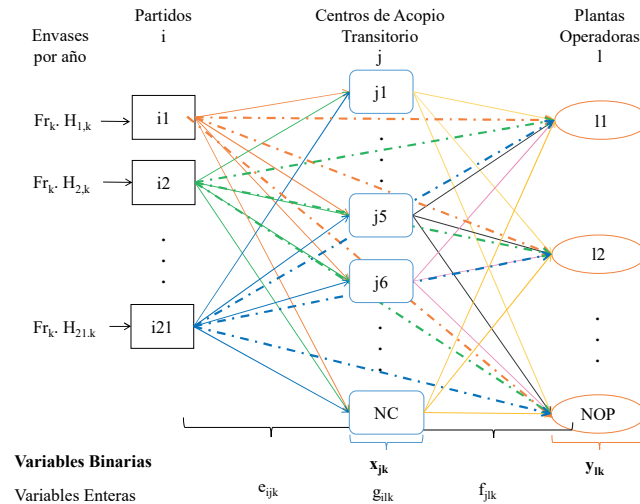
La Ecuación (1) es la función objetivo que maximiza el valor presente neto del problema de instalación de CATs y OPRs y de transporte de los envases. Las Ecuaciones (2) a (8) son las ecuaciones lógicas para la determinación de la localización de los CATs y OPRs. Las Ecuaciones (9) a (21) determinan el tamaño de los envíos de los partidos a los CATs, de los CATs a las OPRs y de los partidos a las OPRs. También determinan el stock por mes de cada CAT y por año de cada OPR. Las Ecuaciones (22) a (32) calculan los costos anuales de inversión, operativos y de transporte. La Ecuación (33) calcula los beneficios anuales de la venta del plástico procesado y la Ecuación (34) calcula los beneficios netos cada año.

El modelo se implementó y resolvió con el programa GAMS 24.2.3 (General Algebraic Modeling System) [12], con CPLEX 12 como programa de resolución del modelo MILP. Los resultados que se presentan en la siguiente sección se obtuvieron en una computadora con procesador Intel(R) Core (TM) i7-85500, 2,00 GHz y una memoria RAM de 16GB.

## 4 Resultados

El modelo matemático se aplica para la resolución de dos escenarios, cada uno con dos alternativas. El Escenario 1 es el de una situación en la que se diseña desde cero la red de CATs y OPRs, donde se determina en forma óptima la cantidad y ubicación de estas unidades, así como la asignación del envío de los envases desde los partidos a los CATs y/o OPRs, y desde los CATs a las OPRs. Además, se impone que al menos se instale un CAT. El propósito del Escenario 1 es tener una referencia y compararlo con el Escenario 2, que consiste esencialmente en el mismo problema, pero si bien se pueden ubicar unidades adicionales con su correspondiente costo de instalación y de operación, se respeta la cantidad y ubicación de los CATs y OPRs ya existentes, por lo que para ellos no se considera su costo de instalación. En total para este escenario hay 8 CATs instalados y 2 plantas operadoras ubicadas en los partidos de Brandsen y Lanús, en la Provincia de Buenos Aires, pero fuera de la región SOB (ver Figura 1).

Ambos escenarios se dividen en dos situaciones, en la primera (Escenarios 1a y 2a) se considera que el 100% de los envases que se generan en el SOB se alimentan al sistema de recuperación de envases, mientras que en la segunda situación (Escenarios 1b y 2b) esta alimentación se realiza en forma gradual desde el primer periodo hasta el último. En la Fig. 2 se muestra un esquema general del problema a resolver.



**Fig. 2** Esquema general de los escenarios estudiados en este trabajo. (Fuente: elaboración propia)

Para los cuatro escenarios, el tamaño del modelo indica que se trata de un problema relativamente chico tanto en variables continuas como binarias como se observa en la Tabla 2. En la Tabla 3 se puede observar que las soluciones se alcanzan en tiempos de CPU del orden de uno a dos minutos, lo cual es razonable en relación al tamaño de los problemas. En esta tabla se observa además que el esfuerzo computacional de resolución es menor en los casos donde el porcentaje de recuperación de envases aumenta con los años (E1b y E2b). También se presentan los tiempos empleados para alcanzar el valor final de la función objetivo, que se ve son mucho menores a los tiempos necesarios para lograr el gap cero en todos los escenarios, lo que sugiere que los tiempos de cómputo podrían reducirse sustancialmente si fuera necesario, fijando un gap mayor para convergencia y sin que eso implique un deterioro de la función objetivo.

**Tabla 2.** Tamaño de los modelos empleados para describir los escenarios estudiados en este trabajo

| Escenario | Variables binarias | Variables continuas | Ecuaciones | Desigualdades |
|-----------|--------------------|---------------------|------------|---------------|
| E1 a y b  | 768                | 26053               | 3709       | 17367         |
| E2 a y b  | 768                | 26095               | 3751       | 17367         |

**Tabla 3.** Resumen de los tiempos de cómputo de los escenarios estudiados en este trabajo y valor de la función objetivo obtenida para cada uno

|                        | E1a       | E1b     | E2a       | E2b     |
|------------------------|-----------|---------|-----------|---------|
| CPU GAP=0 (s)          | 68,734    | 44,703  | 435,406   | 57,922  |
| CPU solución (s)       | 34,61     | 39      | 317       | 1,36    |
| Función objetivo (USD) | 4.337.487 | 771.367 | 3.883.426 | 570.295 |

Como puede observarse en la Tabla 3, para todos los escenarios estudiados el VPN es positivo y superior a 570.000 USD indicando que el sistema de gestión integral de envases vacíos de agroquímicos propuesto para cada caso resulta atractivo económicamente. El VPN del Escenario 2a es del orden del 90% del correspondiente al Escenario 1a, cuando el 100% de los envases forman parte del sistema de gestión; mientras que el VPN del Escenario 2b es un 75% del obtenido para el Escenario 1b. Esto sugiere que, si el sistema opera con menor cantidad de envases, lo hace más alejado del escenario de referencia óptimo. Además, para ambos escenarios, el VPN de las alternativas b es apenas el 20% de las alternativas a.

La localización óptima de los CATs y de las plantas operadoras para cada escenario se indican en las Tablas 4 a 7, además se incluye el costo de instalación de los mismos y la cantidad máxima de envases que se reciben y procesan respectivamente. Debido a que el número de envases generados en el SOB crece a lo largo del horizonte de tiempo de estudio, la capacidad máxima de la planta operadora tiene lugar en el último período, al igual que la ocupación máxima de los CATs en los Escenarios 1b y 2b ya que la incorporación de envases al sistema es gradual y se incrementa con el tiempo. Para los Escenarios 1a y 2a, los CATs operan en su capacidad máxima desde el primer período estudiado. Además, es importante destacar que el costo de inversión de la planta operadora es el mismo para todos los escenarios, esto se debe a que la cantidad anual de envases vacíos generados en el SOB, es menor a la capacidad mínima de las tecnologías de procesamiento de plástico comúnmente empleadas para el reciclado del PEAD de estos contenedores.

**Tabla 4.** Resultados para el escenario 1a

| Localización de los CATs | Costo de inversión (USD) | Ocupación mensual (máx. envases) |
|--------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| J19: Tres Arroyos        | 193.538                  | 41.483                           |
| Localización de las OPRs | Costo de inversión (USD) | Ocupación anual (máx. envases)   |
| L11: Guaminí             | 745.237                  | 1.593.637                        |

CATs: Centros de Acopio Transitorio, OPRs: Plantas Operadoras

**Tabla 5.** Resultados para el escenario 1b

| Localización de los CATs | Costo de inversión (USD) | Ocupación mensual (máx. envases) |
|--------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| J19: Tres Arroyos        | 82.181                   | 14.469                           |
| Localización de las OPRs | Costo de inversión (USD) | Ocupación anual (máx. envases)   |
| L8: Coronel Suarez       | 745.237                  | 1.434.274                        |

CATs: Centros de Acopio Transitorio, OPRs: Plantas Operadoras

**Tabla 6.** Resultados para el escenario 2a

| Localización de los CATs | Costo de inversión (USD) | Ocupación mensual (máx. envases) |
|--------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| J4: Benito Juárez        |                          | 37.460                           |
| J9: Daireaux             |                          | 10.000                           |
| J12: Laprida             |                          | 3.000                            |
| J13: Patagones           |                          | 2.482                            |
| J14: Pellegrini          | 28.025 (ampliación)      | 10.045                           |
| J15: Puan                | 14.440 (ampliación)      | 13.114                           |
| J16: Saavedra            | 5.543 (ampliación)       | 5.195                            |
| J21: Villarino           |                          | 5.000                            |
| Localización de las OPRs | Costo de inversión (USD) | Ocupación anual (máx. envases)   |
| L8: Coronel Suarez       | 745.237                  | 1.593.637                        |

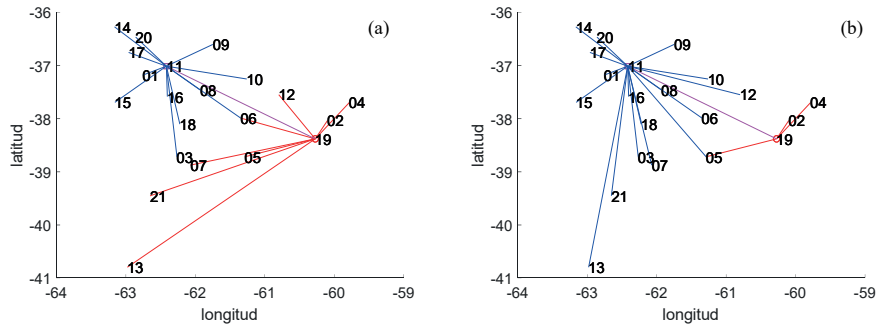
CATs: Centros de Acopio Transitorio, OPRs: Plantas Operadoras

**Tabla 7.** Resultados para el escenario 2b

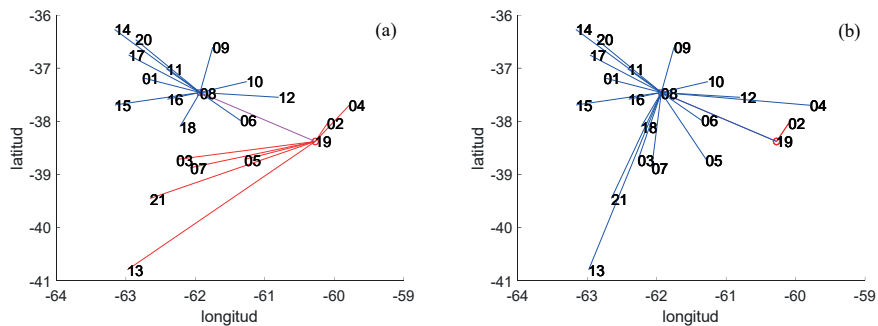
| Localización de los CATs | Costo de inversión (USD) | Ocupación mensual (máx. envases) |
|--------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| J4: Benito Juárez        |                          | 50.000                           |
| J9: Daireaux             |                          | 10.000                           |
| J12: Laprida             |                          | 3.000                            |
| J13: Patagones           |                          | 3.000                            |
| J14: Pellegrini          | 14.204 (ampliación)      | 7.404                            |
| J15: Puan                |                          | 10.000                           |
| J16: Saavedra            | 4.277 (ampliación)       | 5.025                            |
| J21: Villarino           |                          | 5.000                            |
| Localización de las OPRs | Costo de inversión (USD) | Ocupación anual (máx. envases)   |
| L27: Brandsen            | 0                        | 1.434.274                        |

CATs: Centros de Acopio Transitorio, OPRs: Plantas Operadoras

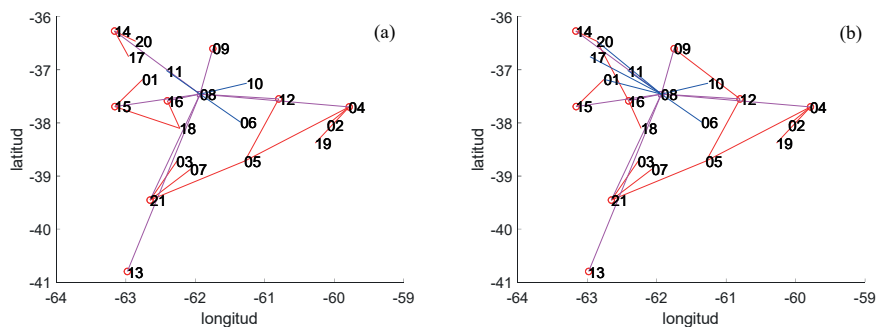
Para facilitar la visualización de los resultados obtenidos, las Figuras 3 a 6 muestran el esquema óptimo de asignación de Partidos-CATs-OPRs que deben seguir los envases vacíos de fitosanitarios para cada uno de los escenarios estudiados en este trabajo. En cada figura se puede notar como se modifica el esquema a lo largo del horizonte de tiempo estudiado, las Figuras 3 a 6 (a) corresponden al primer período y las Figuras 3 a 6 (b) al último.



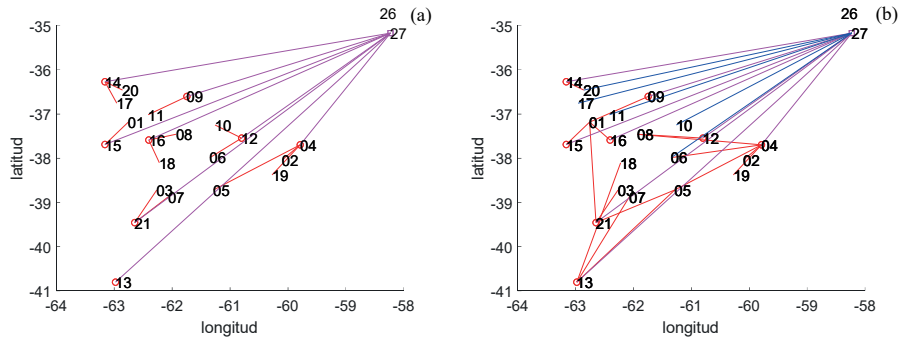
**Fig. 3.** Escenario 1a, (a) primer período (b) último período. Las líneas rojas indican los partidos que se asignan a las unidades de CATs seleccionados por el modelo, las magenta corresponden a las asignaciones de los CATs a las OPRs y las líneas azules indican las campañas itinerantes. Los partidos siguen la numeración prevista en la Tabla 1. (Fuente: elaboración propia)



**Fig. 4.** Escenario 1b (a) primer período (b) último período. Las líneas rojas indican los partidos que se asignan a las unidades de CATs seleccionados por el modelo, las magenta corresponden a las asignaciones de los CATs a las OPRs y las líneas azules indican las campañas itinerantes. Los partidos siguen la numeración prevista en la Tabla 1. (Fuente: elaboración propia)



**Fig. 5.** Escenario 2a (a) primer período (b) último período. Las líneas rojas indican los partidos que se asignan a las unidades de CATs seleccionados por el modelo, las magenta corresponden a las asignaciones de los CATs a las OPRs y las líneas azules indican las campañas itinerantes. Los partidos siguen la numeración prevista en la Tabla 1. (Fuente: elaboración propia)



**Fig. 6.** Escenario 2b (a) primer período (b) último período. Las líneas rojas indican los partidos que se asignan a las unidades de CATs seleccionados por el modelo, las magenta corresponden a las asignaciones de los CATs a las OPRs y las líneas azules indican las campañas itinerantes. Los partidos siguen la numeración provista en la Tabla 1, 26 y 27 representan las plantas operadoras de Lanús y Brandsen respectivamente. (Fuente: elaboración propia)

En particular, como resultado de la optimización del escenario de referencia, es decir, sin tener en cuenta los CATs que se encuentran actualmente instalados en el SOB, el modelo sugiere instalar un CAT y una OPR en el SOB. Independientemente de la oferta de envases (escenarios a y b). En el caso en que todos los envases generados en el SOB se integren al sistema de gestión integral desde el primer año, el modelo sugiere la instalación de un único CAT con capacidad para 42.000 envases en Tres Arroyos. En el caso en el que la incorporación de los envases al sistema sea progresiva, el CAT también se instala en Tres Arroyos, pero tiene una capacidad menor, menos de la mitad. En ambos casos, alrededor de 8 partidos envían sus envases al CAT como puede observarse en la Figuras 3 y 4. A lo largo del horizonte de tiempo, como se muestra en las figuras, para ambos escenarios se incrementa el número de campañas itinerantes. La localización de la planta operadora es distinta para los dos escenarios, en el escenario 1a se instala en Guaminí mientras que en el escenario 1b se instala en Coronel Suárez. Esto se debe a la alimentación progresiva de envases en el tiempo que tiene lugar en el Escenario 1b. En esta situación, es más rentable instalar un CAT de menor capacidad en Tres Arroyos y realizar más campañas itinerantes en los años que sea necesario. En consecuencia, para reducir los costos de transporte, el modelo decide instalar la planta operadora 68 km al sudeste de Guaminí (localización de la planta operadora del E1a), en un punto central geográficamente del SOB. Este efecto puede visualizarse comparando las Figuras 3 y 4.

Por otro lado, los resultados para el escenario 2 indican que no se instalan nuevos CATs, si no que conviene ampliar los existentes. Sin embargo, la capacidad de almacenamiento total en el Escenario 2a disminuye en un 3% respecto a la capacidad instalada en la actualidad (Tabla 1), lo que sucede es que el CAT ubicado en Benito Juárez no se ocupa su totalidad. Por otro lado, en el Escenario 2b la capacidad de almacenamiento de envases vacíos se incrementa en apenas un 5%, en ambos escenarios lo que ocurre es que principalmente aumenta la capacidad relativa de los CATs que se ubican en la zona noroeste del SOB y en particular es el CAT ubicado en Pellegrini el que aumenta de forma más significativa su capacidad. Como puede observarse en la Figura

5 el número de campañas itinerantes se duplica a lo largo del tiempo para el Escenario 2a y a partir de la Figura 6 se puede notar que en el caso del Escenario 2b aparecen recién en el último período, representando apenas la mitad que en el Escenario 2a. En el escenario 2a se instala una planta operadora en el partido de Coronel Suárez, mientras que para el escenario 2b, los envases son enviados a la planta existente en Brandsen. Este resultado muestra que, mientras el factor de recuperación de envases en el SOB sea cercano al 100% es conveniente invertir en una planta operadora en lugar de utilizar la de la localidad de Coronel Brandsen, como se obtiene en el escenario 2b, donde el factor de recuperación de envases aumenta de forma gradual a lo largo del horizonte de planificación.

Una de las principales características de los problemas logísticos es la incertidumbre en los datos [13,14]. En particular en la logística de envases fitosanitarios vacíos la oferta de los mismos es uno de tales datos críticos dado que no se dispone de registros oficiales de los mismos [15,16]. Por este motivo se realizó un análisis de sensibilidad alrededor de la solución nominal (fijando las variables binarias) para los 4 escenarios, considerando una variación de  $\pm 30\%$  en los envases a recolectar. Los resultados indican una importante sensibilidad en este parámetro ya que una variación del 30 % en la cantidad de envases disponibles influye en un 40 % en el VPN en el escenario 1a, en un 85 % en el escenario 1b y en un 100 % en el escenario 2b. En el caso del escenario 2a, solo se realizó un análisis de sensibilidad de entre el + 10% y + 30% ya que en el caso de que la oferta disminuyera, el modelo localiza la planta en Cnel. Brandsen.

## 5 Conclusiones

Los resultados del trabajo indican que las alternativas estudiadas para la gestión de la recolección de envases vacíos de fitosanitarios resultan rentables con valores del VPN superiores a los 570.000 USD a 15 años.

Además, se logra cuantificar la importancia de la concientización, difusión y capacitación constante acerca del sistema de gestión integral para lograr el desarrollo de una economía circular entorno al mercado de agroquímicos en el sudoeste bonaerense, como así también, la importancia de determinar fehacientemente la cantidad de envases para que el diseño del sistema sea confiable. El VPN de los Escenarios 1b y 2b disminuye drásticamente en un 80% respecto a las alternativas 1a y 2a en las que el 100% de los envases vacíos generados en el SOB se alimentan al sistema de gestión integral.

Los resultados del modelo para los Escenarios 2 a y b que tienen en cuenta los CATs actualmente instalados, indican que se requiere la ampliación de la capacidad de almacenamiento de envases vacíos de los CATs ubicados en el noroeste del SOB para optimizar el funcionamiento del sistema de gestión integral. También se puede notar la importancia de las campañas itinerantes como herramienta para el buen desempeño del sistema de recupero de envases vacíos.

Otro aspecto interesante para destacar es que para el Escenario 2a que considera que el total de los envases generados en la región se alimentan al sistema de gestión, el modelo indica como óptima la instalación de una planta operadora en Coronel Suárez un partido muy productivo y ubicado en el centro geográfico del SOB. Si en cambio, la

incorporación de los envases es gradual, es más conveniente económicamente enviar los envases del SOB a procesar a la planta existente en Brandsen. Este aspecto también se demuestra mediante el análisis de sensibilidad. Se podría concluir que el esfuerzo conjunto de todos los actores de la cadena de comercialización de agroquímicos del SOB podría tener como resultado un importante impacto en el desarrollo de la región.

## Referencias

1. Unidad de Investigación y Desarrollo Ambiental, Dirección Nacional de Articulación Institucional, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación: Acciones en gestión de envases de agroquímicos. 2º Jornadas del Sur Bonaerense. Actualización en Seguridad Agroalimentaria: Agroquímicos y Toxicología.
2. Cámara de Sanidad Agropecuaria y Fertilizantes, Comisión Técnica: Task Force Ley de Envases, Minuta 1era Reunión, viernes 27 de Marzo de 2015, Buenos Aires.
3. Cavallin, A., Rossit, D.G., Savoretti, A.A., Sorichetti, A.E., Frutos, M.: Logística Inversa de residuos agroquímicos en Argentina: resolución heurística y exacta. 46 Jornadas Argentinas Informática JAIIO, Córdoba, Argentina (2017).
4. Argentina: Ley de Residuos peligrosos de la Nación 24.051/1992. Publicada en el Boletín Oficial del 17/1/1992, número: 27307.
5. Editor Nuevo Día Digital, <https://diarionuevodia.com.ar/saavedra-denuncian-que-arrojaron-envases-de-agrotoxicos-al-lado-de-un-arroyo/>, último acceso 2020/08/10.
6. Ministerio de Salud. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable: La problemática de los agroquímicos y sus envases, su incidencia en la salud de los trabajadores, la población expuesta por el ambiente. 1a ed. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Buenos Aires (2007).
7. Argentina: Ley de Presupuestos Mínimos de Protección Ambiental para la Gestión de Envases Vacíos de Fitosanitarios 27.279/2016. Publicada en el boletín oficial del 11/10/2016, número: 33479.
8. Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible. Gobierno de la Provincia de Buenos Aires, <http://www.opds.gba.gov.ar/fitosanitarios/centrosdealmacenamiento>, último acceso 2020/08/10.
9. Envases/Mapa legal CREA, <https://www.crea.org.ar/mapalegal/envases/buenos-aires>, último acceso 2020/08/10.
10. Dirección Nacional de Análisis Económico Agroindustrial (Dirección de Estimaciones Agrícolas), <http://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>, último acceso 2020/08/10.
11. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación: Código internacional de conducta sobre la distribución y utilización de plaguicidas. Directrices sobre opciones de manejo de envases vacíos de plaguicidas, Roma (2008).
12. Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A., Raman R.: GAMS, A User's Guide. GAMS Development Corporation, Washington, DC (2012).
13. Rubio, S., El sistema de logística inversa en la empresa: análisis y aplicaciones, Tesis Doctoral, Universidad de Extremadura, Badajoz (2003)
14. Banguera, L.A., Sepúlveda, J.M., Ternero, R., Vargas, M., Vázquez, Ó.C., Reverse logistics network design under extended producer responsibility: The case of out-of-use tires in the Gran Santiago city of Chile, *International Journal of Production Economics* (2018)
15. Briassoulis D., Hiskakis, M., Karasali H., Briassoulis, C., Design of a European agrochemical plastic packaging waste management scheme – Pilot implementation in Greece, *Resources, Conservation and Recycling* 87, 72-88 (2014)
16. Sato S.G., Carbone, G.T., Moori, R.G., Reverse logistics of agrochemical packaging in Brazil: Operational Practices, *InterfacEHS*, v.1, n.1, Art 7, (2006)