

## PREDICTING MUNICIPAL SOLID WASTE GENERATION IN ANDORRA WITH SYSTEM DYNAMICS MODELLING

M. Pons<sup>†\*</sup>, C. Pérez<sup>†‡</sup>, E. Jover<sup>3†</sup> and J.J. de Felipe<sup>4‡</sup>

<sup>†</sup>Observatori de la Sostenibilitat d'Andorra, Plaça de la Germandat 7, Sant Julià de Lòria,  
AD600 - Principat d'Andorra

Web page: <http://www.obsa.ad>

<sup>‡</sup> Departament de Màquines i Motors Tèrmics. Grup de recerca en "Mesura i Modelització de  
la Sostenibilitat". Universitat Politècnica de Catalunya

EPSEM, Av. De les Bases de Manresa, 61-73, 08240 Manresa (Barcelona), Spain

e-mail<sup>\*</sup>: [mpons@obsa.ad](mailto:mpons@obsa.ad)

e-mail<sup>2</sup>: [cperez@obsa.ad](mailto:cperez@obsa.ad)

e-mail<sup>3</sup>: [ejover@obsa.ad](mailto:ejover@obsa.ad)

e-mail<sup>4</sup>: [felipe@mmt.upc.edu](mailto:felipe@mmt.upc.edu)

**Conference Topic:** Modelling of Sustainability

**Area:** Wastes

### ABSTRACT

Waste management is becoming a central point on public policies due to its economic and environmental impacts. Therefore, prediction of Municipal Solid Waste (MSW) generation is an important issue both for public service planning (such as waste collection services, infrastructures and MSW treatment facilities) and for assessing society sustainability.

Conventional forecasting of MSW generation frequently uses demographic and socioeconomic factors in a per-capita basis<sup>1,2</sup>. However, this approach is not reliable in all situations. In this way, in highly impacted touristic areas MSW generation could be variable, highly influenced on tourist flows and not only on the town inhabitants<sup>3</sup>.

In this work, we developed a system dynamic model to predict the MSW generation of Andorra, a small Pyrenean country, where the touristic activity is one of the main basis of its economy. Therefore, our model, will be built using the available MSW and socioeconomic data time series integrating tourist flow information in order to account to the country economic specificity. The developed prediction tool should be useful for both Andorra public services and private waste management companies as they will be able to plan needed investments on a much more solid basis. Furthermore, similar models should be useful in predicting MSW generation in other touristic areas.

## 1 INTRODUCCIÓ

Durant la segona meitat de segle XX, l'activitat econòmica ha experimentat un creixement sense precedents que ha transformat els hàbits de consum de les societats occidentals. Aquest model de consum ha originat un important increment de la producció de Residus Sòlids Urbans (RSU) que causen un fort impacte ambiental.

Aquest fet ha provocat que l'adequada gestió dels RSU sigui un dels reptes més importants als quals la societat i les diferents administracions han de fer front durant el segle

## XXI.

El progressiu augment de la preocupació i conscienciació de la societat sobre els impactes socioeconòmics i ambientals derivats de la generació de residus obliga a les diferents administracions encarregades del planejament de serveis públics a buscar estratègies que siguin viables econòmicament i respectuoses amb el medi ambient. No obstant, l'aplicació de tals estratègies i polítiques no ha anat acompanyada d'una adequada caracterització i coneixement de la quantitat i qualitat de residus generats degut, en part a una manca de registres històrics complets i a l'absència d'eines de predicció. Disposar de prediccions/projeccions precises i dades fiables sobre la generació de RSU resta imprescindible per tal de dur a terme una adequada planificació i optimització de la gestió.

Les particularitats d'Andorra per la seva situació geogràfica entre França i Espanya, per la limitació del territori i per la fluctuació de les entrades econòmiques i de visites degudes a l'activitat turística singularitzen la gestió dels residus a Andorra. Els acords amb països membres de la Unió Europea (UE) són del tot necessaris, sobretot pel que fa al reciclatge.

Encara que Andorra no forma part de la UE; des del Conveni de Basilea sobre el control dels moviments transfronterers de residus de 1999, les autoritats andorranes treballen per adequar les seves pròpies lleis i per gestionar els residus conforme la Directiva Marc Europea de Residus<sup>4</sup>. Per crear el Pla Nacional de Residus (PNR), s'han fet servir els mateixos criteris amb el mateix ordre jeràrquic que a la resta d'Europa: prevenció, reutilització, reciclatge, valorització i eliminació segura<sup>5</sup>.

Al 2005, el total de residus generats al país va ser de 64.597 tones. El 20,3% del total es va reciclar. Els residus recaptats als contenidors de recollida selectiva es van exportar a Espanya i França.

Per conèixer la quantitat de residus generada per càpita, i degut a les particularitats d'Andorra com a destinació turística, el Ministeri de Finances va crear l'Índex de Pressió Humana (IPH) (eq. 1)<sup>5</sup>

$$\text{IPH} = \text{població resident a Andorra/dia} + (\text{persones treballadores no residents al país/dia} \times 0,4) + (\text{visites que no pernocten al país/dia} \times 0,4) + (\text{visites que pernocten/dia})$$

$$\text{IPH} = 78.549 + 0,4 \times 1.539 + 0,4 \times 23.647 + 17.821 = \mathbf{106.444} \quad (1)$$

Segons aquest càlcul, l'estimació de població diària pel 2005 era de 106.444 persones que generen 1,2 kg de residu per dia.

Degut a les dimensions i l'orografia del país, la solució preferida per a eliminació de residus a Andorra ha estat, des de fa anys, el tractament tèrmic dels RSU amb la subseqüent exportació de les escòries per a la seva revalorització (e.g. com a material de suport de les carreteres) i de les cendres cap a abocadors especialitzats. Des del 2007 està en ple funcionament una nova planta incineradora que a part de garantir un millor control de les seves emissions al medi ambient, també permet cogenerar fins a un 3% de l'electricitat consumida al país<sup>6,7</sup>.

## - EVOLUCIÓ RESIDUS ANDORRA

En la Figura 1, podem veure l'evolució dels RSU generats d'Andorra. Cal destacar, que degut als canvis importants realitzats en la gestió de residus del país no estem segurs que s'hagin pogut seguir sempre els mateixos criteris per a calcular aquestes dades. Així doncs, és possible que petites fluctuacions puguin provenir tant de canvis reals com d'errades associades a l'avaluació dels RSU. Globalment, podem veure que la producció del país ha seguit una tònica general de lleuger increment amb una important davallada entre el 2006 i 2007 que es correspon amb el moment de la posada en funcionament de la instal·lació de tractament tèrmic (possible diferència en la manera d'avaluar la quantitat de RSU).

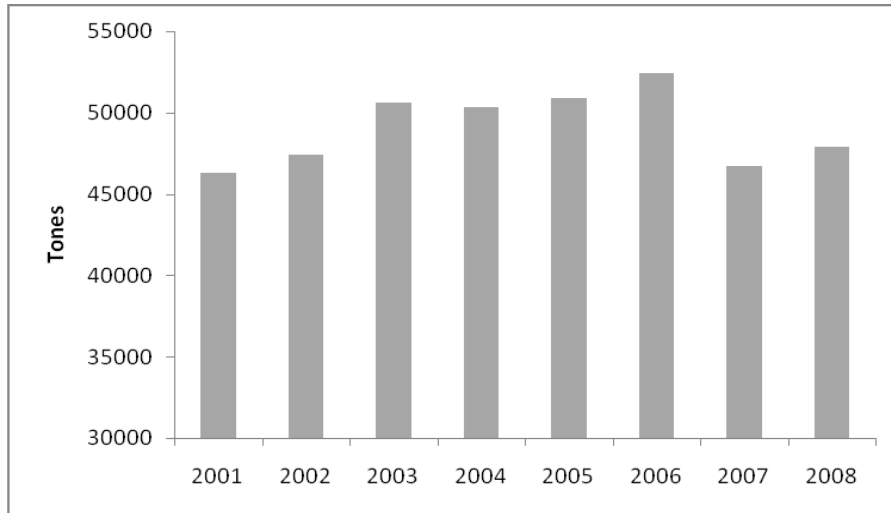


Figura 1. Evolució de la producció de RSU a Andorra en els últims anys (Dades facilitades pel Departament de Medi Ambient del Govern d'Andorra).

- ESTACIONALITAT RESIDUS

L'activitat turística exerceix una pressió molt irregular sobre el territori. L'increment sobtat del nombre de persones amb el conseqüent augment de producció de residus és un dels reptes als quals les administracions i les gestores de residus han de fer front<sup>8</sup>. L'estacionalitat d'aquests fluxes obliguen a fer una planificació acurada dels recursos necessaris per a poder gestionar els RSU.

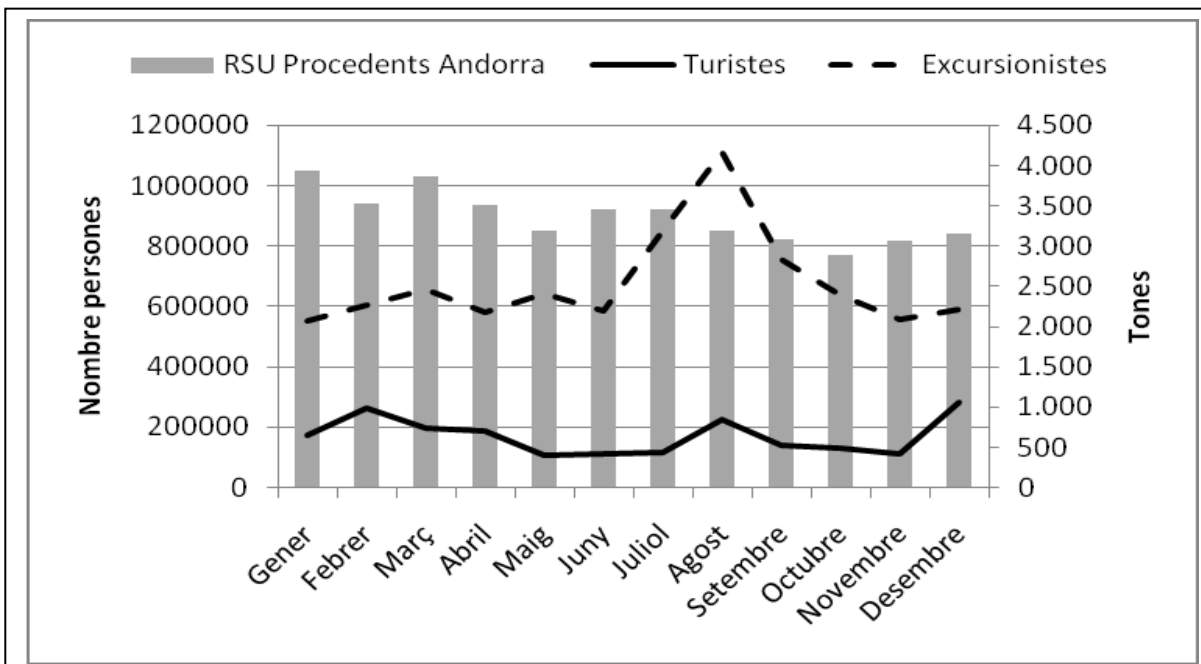


Figura 2. Estacionalitat turística i de la generació de residus al llarg de l'any 2008 [Elaboració pròpia a partir de les dades del Departament d'Estadística i del Departament de Medi Ambient del Govern d'Andorra].

En la Figura 2, podem veure l'estacionalitat de la generació de RSU a Andorra que marca un màxim al gener i a la primavera i un màxim local al juny/juliol. Es pot veure com aquesta estacionalitat segueix en regla general, la mateixa tendència que la dels turistes i excursionistes exceptuant el mes d'agost. En efecte, cal destacar que el màxim de visitants per les dos tipologies estudiades es correspon clarament al mes d'agost. Observem un increment de turistes i excursionistes, relativament, al mes de juliol del 89% i del 30% respectivament mentre que en el mateix període els RSU disminueixen lleugerament (-8%). Aquesta diferència de comportament s'explica pel fet que al mes d'agost el increment de visitants es veu pal·liat per una disminució de la població d'Andorra degut a les vacances de la majoria de professions no correlacionades directament amb el sector turístic. En el període hivernal, la quantitat de RSU produïdes és superior al que podríem preveure tan sols considerant la quantitat de visitants. Aquest fet bé donat, en part, per l'arribada dels temporers que treballen en el sector turístic de la neu i que representen un increment de la població d'Andorra al voltant d'un 4% (Dades del Departament d'Estadística del Govern d'Andorra).

Si considerem la població fixa d'Andorra tenim que la generació per càpita i dia de residus varia molt al llarg de l'any (1.1/kg/persona/dia si considerem el mes d'octubre i 1.5/kg/ persona/dia si considerem el mes de gener). Aquests resultats semblen una mica baixos, fet que podria ser causat per una sobrevaloració de la població. De totes maneres, aquesta tipologia de diferències ja ha estat observada per d'altres destinacions turístiques com per exemple les illes balears<sup>9</sup>. Si empram ara els valors de generació de residus considerant els visitants, emprant l'índex IPH presentat anteriorment, s'obtenen valors de 1.0 kg/persona/dia si considerem el mes d'octubre i 1.3 kg/persona/dia si considerem el mes de gener. Podem veure que la diferència entre aquests extrems ha disminuït però es continua mantenint elevada quan, de fet esperariem tenir gràcies aquest índex un factor de generació de residus gairebé constant. Aquesta diferència que resta es pot suposar que ve donada per diferents factors entre els que destaca la no consideració dels temporers o el fet que els coeficients que es fixen en la definició del IPH són tan sols aproximacions.

Finalment, caldria destacar que en el conjunt de l'IPH calculat pel 2008 la població permanent en representaria relativament el 85%. Això ens mostra que fins i tot en un país eminentment turístic, pel que fa la generació de residus, la població permanent és la principal responsable del IPH.

La modelització de la generació de RSU té com a objectiu l'obtenció d'informació acurada i fiable<sup>1</sup>. Els models de RSU han esdevingut una important eina de suport en la presa de decisions, identificant paràmetres que poden ajudar tant a entendre la situació actual dels RSU com a avaluar les dades futures de la seva generació. A més, poder predir la quantitat de RSU és essencial per conscienciar, la societat i els responsables de les administracions amb poder d'actuació, de la necessitat d'implementar polítiques i estratègies que siguin sostenibles.

Fins a dia d'avui, els models de generació de RSU que s'han desenvolupat han tractat amb

un gran ventall de paràmetres i criteris. Grossman *et al.*<sup>10</sup> va analitzar els efectes de la població, el nivell d'ingressos i la dimensió de les vivendes per a planificar-ne el sistema de recollida. Dennison *et al.*<sup>11, 12</sup> van realitzar un treball similar per planificar-ne les infraestructures necessàries. D'altra banda, Leao *et al.*<sup>13</sup> van aconseguir avaluar la demanda de sòl necessari que hauria de ser destinat a l'abocament de residus. Altres aspectes que intenten resoldre els models de generació de RSU és l'avaluació de la capacitat de tractament i producció elèctrica de les plantes incineradores. Chang i Lin<sup>14</sup> van aplicar un model amb sèries temporals per analitzar els impactes del reciclatge en la generació de RSU i van utilitzar les projeccions per avaluar la capacitat de les incineradores a la ciutat de Taipei a Taiwan. Com a eina per avaluar les polítiques i les estratègies de gestió, Daskalopoulos *et al.*<sup>15</sup>, enllaçant la inversió total dels consumidors amb el PIB, van desenvolupar un model que permetia estimar la quantitat de residus sòlids urbans generats per persona. Matsuto i Tanaka<sup>16</sup> van analitzar les dades diàries de tones de RSU recollides en zones residencials de Japó per crear un model que permetés avaluar els costos relacionats amb el personal i els vehicles necessaris a la seva gestió. Per la seva banda, Sufian i Bala<sup>17</sup> van desenvolupar un model amb dinàmica de sistemes per predir la generació de RSU, la capacitat de recollida, i l'electricitat generada. El model permet avaluar les necessitats de gestió de residus de la ciutat de Dakha, Bangladesh.

Tot i que els models desenvolupats fins a dia d'avui intenten solucionar aspectes molt similars, no s'ha aconseguit assolir cap estàndard de modelització dels RSU ja que s'observa una gran heterogeneïtat en el mètodes i les tècniques aplicades<sup>1</sup>. El mètodes estadístics de predicció tradicionals es basen en l'anàlisi de sèries temporals, les correlacions i regressions amb una o varies variables independents<sup>14-16</sup>. Normalment utilitzen factors per càpita que es consideren a vegades com a constants, a vegades estimant-ne una variació amb el temps. No obstant, aquests models necessiten una gran quantitat i qualitat d'informació per realitzar l'anàlisi i tal i com s'ha comentat la manca d'informació de les bases de dades dels municipis i administracions dificulten assolir tals requeriments.

La modelització dinàmica intenta resoldre el problema de l'escassetat de dades i permet tractar amb situacions en les quals es disposa d'informació molt limitada en entorns no molt definits o desconeguts. Aquest mètode permet realitzar projeccions a partir de petits conjunts de dades convertint-se en una eina molt efectiva per tractar amb sistemes complexos de gran escala. Els models de dinàmica de sistemes intenten construir mitjançant diagrames causals un marc de treball teòric descrivint les variables i els paràmetres que afecten a l'objecte d'estudi i com interactuen entre ells<sup>18, 19</sup>. Alguns exemples de models realitzats mitjançant dinàmica de sistemes són els desenvolupats per Dyson and Chang<sup>20</sup> per predir la generació de RSU a la ciutat de Sant Antonio, caracteritzada per un gran creixement tant econòmic com poblacional o el treball ja comentat de Sufian i Bala<sup>17</sup> a la ciutat de Dakha.

Andorra per les seves característiques geogràfiques (territori de superfície petita (468 km<sup>2</sup>) i relativament tancat) i polítiques (estat independent) és un indret especialment interessant per a desenvolupar tècniques de modelització ja que és més fàcil calcular-hi els fluxos de les diferents variables d'estudi.

L'objectiu específic d'aquest treball és de desenvolupar un model per a predir l'evolució dels RSU generats a Andorra, gràcies a un sistema de modelització dinàmic. Responent a les característiques socioeconòmiques del país, el model ha de permetre integrar en la seva parametrització variables relacionades amb el sector turístic. De la mateixa manera, que en la majoria de països, Andorra també està patint en l'actualitat una important crisi econòmica. Els diferents escenaris que es construeixin a partir del model haurien de permetre ajudar a entendre les conseqüències d'aquesta crisi en l'àrea concreta de la generació de residus. El model que es desenvolupi ha de representar un estri per a la planificació de la gestió de residus tant de les administracions públiques com de les empreses privades que intervenen en aquesta temàtica.

## **2 METODOLOGIA EMPRADA I RESULTATS**

La metodologia emprada pel desenvolupament del model de generació de "Residus Sòlids Urbans" del Principat d'Andorra és la dinàmica de sistemes. Una descripció detallada d'aquesta metodologia es donada per Forrester<sup>19</sup> i Bala<sup>21,22</sup>.

El model ha esta desenvolupat en el marc del conveni de col·laboració entre l'Observatori de la Sostenibilitat d'Andorra i la Universitat Politècnica de Catalunya i construït a l'entorn del software de recerca STELLA v9.0 (ISEE systems, Lebanon (NH, EUA)). Software dissenyat específicament per representar models de sistemes complexes en dinàmica de sistemes.

El diagrama de flux del model de generació de RSU del Principat d'Andorra es mostra en la figura 3.

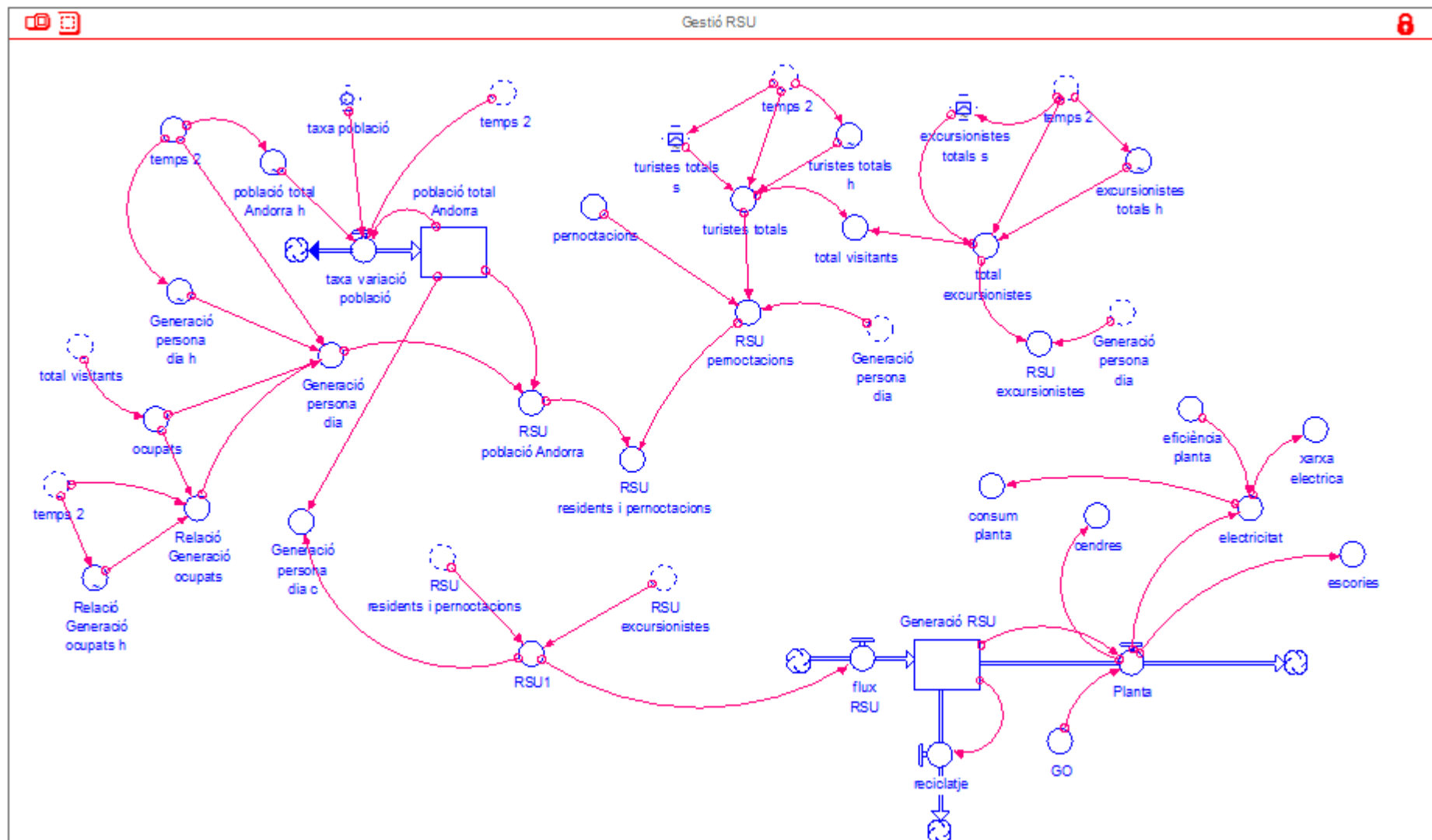


Figura 3. Diagrama de flux del model de generació de RSU del Principat d'Andorra

El model de generació de RSU tindrà en compte l'activitat econòmica, mesurada gràcies a la previsió del sector turístic que és un dels principals sectors de l'economia del país. En aquest cas diferenciarem els visitants en excursionistes i turistes degut a dos motius. Primer, com ja hem vist tenen un impacte directe diferent en la generació de residus; segon, també tenen un impacte molt diferent en l'activitat econòmica del país receptor d'aquest turisme. Per aquest motiu, podem veure que aquest sector ocupa una gran part del diagrama de flux de la Figura 3. Una altra manera de considerar l'activitat econòmica del país és d'inserir també com a variable la proporció de població ocupada del país.

El model contempla també un altre variable d'estat "Generació RSU", amb l'objecte de poder determinar la gestió dels residus en el sentit d'exportar per reciclatge o tractar al centre de tractament tèrmic amb l'objectiu de realitzar la seva valorització energètica. Aquesta variable, és el RSU total procedent de la recollida selectiva i de la resta.

A partir del model que obtindrem generarem escenaris de futur amb l'objectiu de realitzar prediccions de la generació de RSU a Andorra en funció de diferents paràmetres. Aquests escenaris ens serviran tant com a eina de planificació com per a entendre com es correlacionen les variables entre elles i així entendre millor com evoluciona la quantitat de RSU generada al país.

En el cas present, serà interessant veure com la predicció es modifica en funció de l'evolució del nombre de visitants però també més concretament en funció de la proporció que visitin el país d'excursionistes i turistes.

La crisi mundial ha afectat Andorra com a molts altres països però un dels efectes que potser el diferencia dels altres és una possible disminució de la població. Pel moment encara no tenim aquesta dada actualitzada però ja la podem intuir i de fet la podem extrapolar, en una primera aproximació, considerant la caiguda de la població assalariada. En aquest punt, cal destacar que el sistema de seguretat social Andorrà no inclou subsidi d'atur; així doncs, part de la gent que en un moment de crisi es queden sense feina opten per tornar al seu país d'origen. D'aquesta manera, un dels escenaris de futur que desenvoluparem estarà enfocat en planificar l'evolució de la generació de residus considerant que la crisi econòmica provocarà una reducció de la població permanent d'Andorra.

La creació dels escenaris de futur (prospectiva) es basa en les següents hipòtesis aplicades sobre el model.

Les hipòtesis que emprarem per a poder implementar el model són les següents:

\* La generació de RSU es deu a la població resident i flotant del Principat. Aquesta última dividida en turistes (visitants que realitzen pernoctacions) i turistes (visitants que no pernocten).

\* La intensitat de la generació de RSU, mesurada com els kgs de RSU generats al dia i per càpita, depèn de la riquesa del país, aquest paràmetre el mesurem com la proporció de la població ocupada, la qual a la vegada segurament depèn del nombre de visitants ja que l'economia del país és basa principalment en el sector turístic.

En funció d'aquestes hipòtesis es variaran les diferents variables d'entrada al model (inputs) i s'obtindran tota una sèrie de possibles escenaris de futur en la generació de RSU. Amb la anàlisi d'aquest conjunt d'escenaris es podran determinar les variables més crítiques



del sistema.

## AGRAÏMENTS

Els autors volen agrair especialment el Departament d'Estadística i el Departament de Medi Ambient del Govern d'Andorra per les dades que ens han facilitat.

## REFERÈNCIES

- [1] P. Beigl, S. Lebersorger, S. Salhofer, "Modelling municipal solid waste generation: A review.", *Waste Management*, **28**, 200-214, (2008).
- [2] N.B. Chang and Y.T. Lin, "An analysis of recycling impacts on solid waste generation by time series intervention modeling." *Resources, Conservation and Recycling*, **19**, 165-186, (1997).
- [3] J.F. Vera Rebollo and J.A. Ivars Baidal, "Measuring Sustainability in a Mass Tourist Destination: Pressures, Perceptions and Policy Responses in Torrevieja, Spain." *Journal of Sustainable Tourism*, **11**, 181-203, (2003).
- [4] Llei de 25/2004, del 14 de desembre, de residus publicada al BOPA n. 3 any 17, 12.1.2005
- [5] Revisió del Pla Nacional de Residus publicada al BOPA n. 11 any 19, 31.1.2007
- [6] Decret pel qual s'autoritza la posada en funcionament del Centre de Tractament de Residus Tèrmic de la Comella publicat al BOPA n. 62 any 18, 9.8.2006.
- [7] FEDA, Forces Elèctriques d'Andorra, [www.feda.ad](http://www.feda.ad), últim accés juliol 2009.
- [8] T. M. Patterson, V. Niccolucci, N. Marchettini "Adaptative environmental mangement of tourism in the Province of Siena, Italy using the ecological footprint" *Journal of Environmental Management* **86** (2008) 407-418.
- [9] M. Fortuny, R. Soler, C. Cánovas and A. Sánchez "Technical approach for a sustainable tourism development. Case study in the Balearic Islands" *Journal of Cleaner Production*, **16**, 860-869, (2008).
- [10] Grossman, D., Hudson, J.F., Mark, D.H., 1974," Waste generation methods for solid waste collection. *Journal of Environmental Engineering*". ASCE **6**, 1219-1230.
- [11] Dennison, G.J., Dodd, V.A., Whelan, B., 1996b," A socio-economic based survey of household waste characteristics in the city of Dublin, Ireland, I. Waste composition." *Resources, Conservation and Recycling* **17** (3), 245-257.
- [12] Dennison, G.J., Dodd, V.A., Whelan, B., 1996b," A socio-economic based survey of household waste characteristics in the city of Dublin, Ireland, II. Waste quantities." *Resources, Conservation and Recycling* **17** (3), 245-257.
- [13] Leao, S., Bishop, I., Evans, D., 2001, "Assessing the demand of solid waste disposal in urban region by urban dynamics modelling in a gis environment." *Resources, Conservation and Recycling*, **33** (4), 289-313.
- [14] Chang, N.-B., Lin, Y.T., 1997, "An analysis of recycling impacts on solid waste generation by time series intervention modelling". *Resources, Conservation and Recycling* **19** (3), 165-186.

- [15] Daskalopoulos, E., Badr, O., Probert, S.D., 1998, "Municipal solid waste: a prediction methodology for the generation rate and composition in the European Union countries and the United States of America." *Resources, Conservation and Recycling* 24 (1), 155–166.
- [16] Matsuto, T., Tanaka, N., 1993, "Data analysis of daily collection tonnage of residential solid waste in Japan." *Waste Management and Research* 11 (4), 333–343.
- [17] Sufian, M.A., Bala B.K., 2007, "Modeling of urban solid waste management system: The case of Dhaka city." *Waste Management*, 27(7), 858-868.
- [18] Forrester, J.W., 1961,"*Industrial Dynamics*", The MIT press, Cambridge, Massachussets, USA.
- [19] Forrester, J.W., 1968,"*Principles of systems*", Cambridge, Massachussets. Productivity Press, MA.
- [20] Dyson, B., Chang, N.-B., 2005, "Forecasting municipal solid waste generation in a fast-growing urban region with system dynamics modeling." *Waste Management* 25 (7), 669-679.
- [21] Bala, B.K., 1998. *Energy and Environment: Modeling and Simulation*. Nova Science Publisher, New York.
- [22] Bala, B.K., 1999. *Principles of System Dynamics*. Agrotech Publishing. Academy, Udaipur, India.