



FACULTADE DE CIENCIAS

Departamento de Enxeñería Química

Ensaio respirométrico na caracterización de residuos orgánicos e compost.

Ensayos respirométricos en la caracterización de residuos orgánicos y compost.

Respirometric tests in the characterization of organic residues and compost.

Traballo de Fin de Grao

Carlos Ces Mariño

Grao en Química

Director: Manuel Soto Castiñeira

A Coruña, Febreiro 2018

ÍNCIDE

-Resumo	pág.5
-Introdución	pág.7
-1.Obxectivo	pág.13
-2.Métodos e materiais	pág.15
-2.1.Análise físico-químicos	pág.15
-2.2.Respirometría	pág.16
-2.3.DBO(demanda biolóxica de osíxeno)	pág.20
-2.4.Preparación da dispersión para os ensaios de respirometría e DBO	pág.22
-2.5.Reactivos utilizados nos ensaios de respirometría e DBO	pág.23
-2.6.Rottegrade	pág.23
-3.Resultados	pág.25
-3.1.Orixe e características das mostras utilizadas	pág.25
-3.2.Adaptación do método da respirometría	pág.26
-3.3.Ensaio previos ca DBO	pág.26
-3.4.Gráficos das mostras de compost	pág.28
-3.5. Reproducibilidade do ensaio de DBO	pág.36
-3.6. Correlación entre os diferentes métodos	pág.37
-3.6.1.DEA20h fronte a DBO	pág.38
-3.6.2.Rottegrade fronte a DEA20h e DBO	pág.39
-3.6.3.VECOM fronte a DBO	pág.40
-3.6.4.VECOM fronte a DEA20h	pág.41
-4.Conclusións	pág.43
-5.Bibliografía	pág.47

Resumo

Resumo

A compostaxe é un proceso natural de descomposición de materia orgánica que ten como finalidade reincorporar esta materia ó solo en forma de fertilizante. O aspecto máis importante a hora de usar un compost é o seu grao de maduración, xa que un compost maduro evita componentes fitotóxicos e nutre a terra de forma adecuada, polo que a determinación do grao de maduración é un aspecto básico na elaboración de compost de calidade. A respirometría é o método de referencia para a medida deste parámetro, pero é un método laborioso custoso, polo que encontrar unha alternativa máis sinxela sería de gran interese e utilidade.

Neste traballo analizáronse oito mostras de compost con diferentes graos de maduración e diferentes lugares de procedencia. Destas mostras obtivemos a humidade e a cantidade de sólidos volátiles que presentaban. Feito isto, determinamos o grao de maduración das mesmas por 3 métodos, a respirometría e o Rottegrade; ambos métodos aceptados de referencia; e o método da DBO, amplamente utilizado en augas residuais e presentes en laboratorios medioambientais, adaptandoo para usalo en mostras de compost. Tivo tamén que ser adaptado o método da respirometría para poder traballar coas mostras das que dispoñíamos. Realizando a comparativa entre os diferentes métodos comprobouse que a DBO tamén é válida para determinar a estabilidade do compost e proporcionáanos resultados fiables para as mostras analizadas. Isto é de gran interese, xa que é un método sinxelo e rápido para obter resultados, de maneira que simplificaría moito o traballo a realizar para avaliar a calidade do compost.

Resumen

El compostaje es un proceso natural de descomposición de materia orgánica que tiene como finalidad reincorporar esta materia orgánica al suelo en forma de fertilizante. El aspecto más importante a la hora de usar un compost es su grado de maduración ya que un compost maduro evita componentes fitotóxicos y nutre la tierra de forma adecuada, por lo que la determinación del grado de maduración es un aspecto básico en la elaboración de compost de calidad. La respirometría es el método de referencia para la medida de este parámetro, pero es un método laborioso y costoso, por lo que encontrar una alternativa más simple sería de gran interés y utilidad.

En este trabajo se analizaron ocho muestras de compost con diferentes grados de maduración y diferentes lugares de procedencia. De estas muestras obtuvimos la humedad y la cantidad de sólidos volátiles que presentaban. Hecho esto determinamos el grado de maduración de las mismas por 3 métodos, la respirometría y el Rottegrade, ambos métodos aceptados de referencia, y el método de la DBO, ampliamente utilizado en aguas residuales y presente en laboratorios medioambientales, adaptándolo para usar en muestras de compost. Tuvo también que ser adaptado el método de la respirometría para poder trabajar con las muestras de las que disponíamos. Realizando la comparativa entre los diferentes métodos se ha comprobado que la DBO también es válida para determinar la estabilidad de compost y nos proporciona resultados fiables para las muestras analizadas. Esto es de gran interés, ya que es un método sencillo y rápido para obtener resultados, de manera que simplifica mucho el trabajo a realizar para evaluar la calidad del compost.

Summary

Composting is a natural process of decomposition of organic matter that aims to reincorporate this organic matter into the soil in the form of fertilizer. The most important aspect when using a compost is its degree of maturation since a mature compost avoids phytotoxic components and nourishes the soil in an appropriate way, so the determination of the degree of maturation is a basic aspect in the preparation of quality compost. Respirometry is the reference method for measuring this parameter, but it is a laborious and expensive method, so finding a simpler alternative would be of great interest and usefulness.

In this work eight samples of compost with different degrees of maturation and different places of origin were analyzed. From these samples we obtained the humidity and the amount of volatile solids they presented. Once this was done, we determined the degree of maturation of these by 3 methods, respirometry and Rottegrade, both accepted methods of reference, and the BOD method, widely used in wastewater and present in environmental laboratories, adapting it for use in samples of compost. It also had to be adapted the respirometry method to be able to work with the samples that we had. By comparing the different methods, it has been agreed that the BOD is also valid for determining the stability of compost and provides us with reliable results for the samples analyzed. This is of great interest, since it is a simple and fast method.

Introdución

A compostaxe é un método natural que permite descompoñer a materia orgánica e convertela nun fertilizante estable e de calidade. Trátase dun método de tratamento de residuos orgánicos descentralizado, que pode ser realizado incluso en vivendas unifamiliares, e que supón un sistema de tratamento destes residuos máis que axeitado. Mediante o uso de composteiros domésticos pódese obter un compost de gran calidade que pode ser usado no propio lugar en que se produce, conseguindo con iso a diminución nos custos, xa que podemos evitar o transporte en caso de realizar o proceso de maneira centralizada. É un proceso sinxelo, no que mesturaremos os restos orgánicos da cociña con restos de poda ou similar. Ademais non require moito tempo nin supervisión, xa que o proceso de compostaxe apenas necesita coidados. Está demostrado que a implantación dun programa de compostaxe doméstico queda amortizada en catro anos (Amigos de la Tierra, 2015), reducindo ademais a cantidade de residuos xerados por vivenda e facendo por tanto que a recollida municipal de residuos sexa máis efectiva, evitando que certos produtos acaben no vertedoiro, mellorando así a calidade das augas subterráneas e conseguindo que diminúa a produción de gases de efecto invernadoiro. No plano ambiental tamén cabe destacar que a compostaxe é a maneira máis ecolóxica para tratar a fracción orgánica no lixo, xa que na natureza non hai desperdicios como tal, e por tanto o procesado de toda a materia orgánica é cíclico, co que con este método devolvemos os nutrientes ao solo.

A compostaxe consiste nun proceso bioquímico e biooxidativo de material orgánico ata transformalo nun material estable que presenta os nutrientes necesarios para o crecemento das plantas, e que por tanto pode ser usado como fertilizante nos solos (Tiquia, 2010). Este proceso ademais elimina a toxicidade de certos produtos orgánicos que afectan o crecemento das plantas. A compostaxe prodúcese de forma natural xa que é un proceso biolóxico espontáneo de descomposición de materia orgánica nun ambiente aerobio. Por este motivo é recomendable a comprobación de certos factores durante o proceso, para evitar sobre todo problemas de malos olores e asegurarnos ademais de obter un produto de calidade. Factores como son a humidade, a porosidade, densidade relativa e osíxeno dispoñible son clave para a optimización do proceso de compostaxe, xa que proporcionarán un entorno óptimo para o crecemento dos microorganismos encargados da degradación da materia orgánica. Tamén deben ser optimizados os factores relativos a mestura inicial (Chang e Hsu, 2008), nos que destacan o tamaño de partícula e a porosidade da mezcla. Analizaremos agora como afectan algunha desas variables por separado.

-Porosidade

É un factor de gran importancia durante todo o proceso, xa que debemos ter unha porosidade alta para permitir o paso do osíxeno a través de toda a mezcla e o proceso sexa aerobio en todo momento. Debemos ter un espazo poroso próximo o 80% para conseguir unha porosidade óptima (Bunt, 1988; Abad e col., 2004), é dicir, que entre aire e auga, teremos ocupados o 80% do volume total do material en compostaxe. En caso de traballar cun residuo pouco poroso debemos introducir máis cantidade de estruturante para adecuarnos o valor desexado. En caso de ter valores de porosidade inferiores os desexados teríamos problemas de malos olores, xa que traballariamos en condicións anaerobias e se os valores de porosidade son superiores, o problema que teríamos sería o de non conseguir a temperatura de traballo adecuada, xa que as perdas de calor serían superiores ás convenientes. Por tanto, a composición da mezcla e algo a ter en conta no proceso de compostaxe.

-Composición inicial

En función do tipo de residuo usado, o tempo necesario para a descomposición total e a temperatura acadada serán moi diferentes, por tanto é un factor a ter en conta para a súa optimización no plano teórico, pero logo a hora de aplicalo non tería sentido seleccionar os residuos e separalos en función da súa diferente velocidade de degradación, xa que supoñería un traballo extra que lle restaría rentabilidade o proceso da compostación. En caso de poder facerse, o recomendable sería colocar a materia orgánica mas facilmente degradable cara o interior da pila para axudar a esta a acadar rápido a temperatura, mentres que a velocidade de degradación iría diminuindo cara o exterior, tendo por fora unha última capa só de estruturante, o que impediría tamén a saída de olores cara o exterior.

-Aireación

A aireación da pila de compost é outro factor a ter moi en conta durante todo o procedemento, xa que se trata dun proceso aerobio, isto quere dicir que os microorganismos que interveñen necesitan osíxeno para vivir e realizar o proceso de oxidación da materia orgánica. Ademais cunha correcta aireación podemos favorecer a eliminación do CO₂ xerado no proceso e eliminar o exceso de humidade. Debemos ter en conta que unha correcta aireación tamén nos vai permitir ter controlada a temperatura, pero se nos excedemos enfriaremos demasiado a pila e secarémola moito, facendo que o traballo dos microorganismos sexa mas lento (Zhu, 2006). Por outra banda, se a aireación é escasa, teremos mas organismos anaerobios que aerobios, tendo así unha descomposición mas lenta, ademais de producirse SH₂ asociado a malos olores (Bildlingmaier, 1996). Por tanto, a concentración óptima de osíxeno esta no rango entre 15% e 20% segundo a bibliografía (Rasapoor e col., 2009), aínda que estes valores varían en función da profundidade da matriz, sendo a concentración de osíxeno mas alta contra o exterior, e a concentración de CO₂ mas alta no interior.

-Temperatura

Debe manterse unha temperatura por debaixo dos 65º coa axuda da aireación. O aumento da temperatura é un indicativo da actividade microbiana, por tanto é un método axeitado para determinar o grado de avance no proceso de compostaxe (Kaiser, 1996; Haug, 1993). Tense comprobado que é o factor máis determinante de todos os citados anteriormente, xa que as pequenas variacións na temperatura afectan moito máis o proceso microbiano que calquera pequena variación na humidade ou na aireación. Ademais é un factor moi importante a ter en conta xa que o acadar temperaturas superiores os 55º esta comprobado que se eliminan os posibles patóxenos en só tres días (Foster, 1995). Tamén sabemos que a actividade microbiana a partir dos 72ºC alcanza valores moi baixos, polo que o rango de temperaturas óptimas para a compostaxe situase entre 40-65ºC (de Bertoldi e col., 1983).

Pode controlarse a temperatura na pila de compostaxe con operacións de volteo, xa que se reducira a temperatura por enfriamento por evaporación, aínda que tamén é unha opción valida a de engadirlle auga en cantidades controladas a pila de compostaxe.

Mediante un perfil de temperatura pode verse a evolución de todo o proceso, en el diferenciaremos claramente dúas etapas, a fase biooxidativa e o proceso de maduración.

Na fase biooxidativa, e nun sistema en descontinuo, podemos observar 3 etapas claramente diferenciadas (Keener e col., 2000).

- A fase mesofílica: prodúcese durante os 3 primeiros días e cunha temperatura inferior os 45°C. Nesta etapa degrádanse os compostos simples como proteínas e azucres e a temperatura da pila aumenta rapidamente.
- A fase termofílica: pasados os 3 días a temperatura aumenta por enriba dos 45°C e degrádanse graxas e celulosa. Esta é a etapa de maior degradación da materia orgánica, e co aumento de temperatura tamén se produce a morte dos posibles patóxenos presentes.
- A fase de enfriamento: dende que remata a etapa anterior, a temperatura comeza a diminuír xa que detéñense os procesos microbianos ao non quedar materia orgánica que degradar. Mentres a temperatura diminúe, prodúcense as degradacións dos últimos azucres e celulosas.

A etapa de maduración é aquela na que o compost comeza a estabilizarse e acadar a humidade adecuada (Gajalakshmi e Abbasi, 2008). Por tanto rematada esta fase pode considerarse que obtivemos un produto hixienizado e beneficioso para o crecemento das plantas. En definitiva preparado para o seu uso.

-Humidade

É outro dos factores importantes a controlar na elaboración do compost xa que o contido en humidade afecta directamente as características físicas e químicas dos residuos a degradar, e por tanto a calidade final do produto (Iqbal e col., 2010). Tendo en conta que se trata dun proceso biolóxico, a presenza de auga é algo imprescindible para que se produzan as reaccións de descomposición, xa que actuarán como transporte dos nutrientes e axudaran a eliminar os produtos de rexeite. Por esta razón a humidade é considerada a variable mas importante a controlar durante a produción do compost, xa que en caso de esta ser demasiado elevada verase incrementado o tempo para a degradación da materia orgánica, ademais de obter unha degradación pouco eficiente xa que o estar cuberto de auga, parte das reaccións serán anaerobias (Das e Keener, 1997). Por outra banda, o ter un compost demasiado seco a vida dos microorganismos non poden progresar, e por tanto a actividade biolóxica redúcese, sendo practicamente nula por debaixo do 30% de humidade.

Os porcentaxes óptimos de humidade estarán entre o 40% e o 70% dependendo do tipo de material que usemos, ou de forma máis restrinxida, entre o 55% e o 65%. Para controlar estes valores debemos ter en conta que se trata dun proceso exotérmico, por tanto parte da auga presente o principio do proceso será evaporada, polo que será necesario volver a humidificar o material cada certo tempo.

-Sólidos volátiles e materia orgánica presente

En todo o proceso de compostaxe distinguimos 3 clases diferentes de materiais. Os residuos de materia orgánica de fácil degradación (restos de comida etc.), os residuos orgánicos que se degradan de maneira mas lenta (produtos de horta e restos de poda) e por ultimo os minerais que non sufriran cambios durante o proceso. O longo do tempo e gracias as reaccións, a porcentaxe de materia orgánica e de sólidos volátiles irá diminuindo xa que os microorganismos consumen carbono durante o proceso, é de supoñer que as fontes de carbono biodegradable iran diminuindo ata esgotarse (Avnimelech e col., 1996). Este proceso tamén fai que o peso total da pila de compostaxe descenda, debido as perdas de carbono en forma de CO₂ e de auga. Aínda que non é unha variable que se poida optimizar demasiado, si que é recomendable que a mezcla

final sexa ben homoxénea, xa que os residuos orgánicos que se degradan de maneira mas lenta poden funcionar tamén como estruturante, axudando así a todo o proceso.

-Indicadores da estabilidade e da madurez

Para que un compost poida ser usado no solo con total seguridade, debemos comprobar que este está totalmente estabilizado e maduro. Con isto conseguimos evitar a presenza de compostos fitotóxicos e patóxenos para as plantas, ademais de ter unha cantidade de materia orgánica controlada.

Polo momento ningún dos métodos usados para a determinación do grado de maduración e aceptado universalmente, chegando incluso a confundir os termos de madurez e estabilidade. Aplicaremos madurez cando falemos do potencial de crecemento das plantas ou da fitotoxicidade do compost, entendendo por tanto que un compost esta maduro cando está estabilizado tanto térmica como quimicamente. Cando falemos de estabilidade referímonos a actividade microbiana do mesmo, estando relacionado coa taxa de descomposición da materia orgánica durante o proceso, por tanto, e unha medida directa da actividade biolóxica do mesmo.

O compost que non madurou de maneira axeitada pode darnos problemas en todas as etapas do seu uso (almacenamento, transporte e aplicación) xa que produciríanse zonas anaerobias no mesmo, xerando por tanto malos olores e ademais, unha vez aplicado, tería un efecto negativo sobre o crecemento das plantas, xa que consumiría o osíxeno que necesitan as plantas para rematar o seu proceso de descomposición.

As características físicas como son a cor ou olor dan unha idea da etapa da descomposición acadada, pero dan pouca información en canto a madurez do produto. Usando a calor como parámetro, e realizando un perfil de temperatura, si poderemos sacar unha idea do grado de maduración, xa que ao ser un indicador da actividade microbiana, en canto a temperatura se estabilice podemos concluír que o compost está maduro. De todas maneiras e para ser mas precisos, para determinar o grao de madurez do compost usaremos test respirométricos, test comerciais(DBO) ou o test Dewar de autoquecemento, explicados todos no apartado de materiais e métodos.

En condicións aerobias un átomo de carbono combinase con dous átomos de osíxeno para formar unha molécula de CO_2 liberando tamén neste proceso calor, polo tanto, o consumo de osíxeno, a produción de dióxido de carbono ou o aumento da temperatura son valores aceptados como indicadores do grao de maduración.

En resumo, a pesar das moitas variables presentes na elaboración do compost, non resulta complicado obter un compost de calidade no ámbito doméstico, polo que se trata dun procedemento sinxelo co que axudaremos moito a xestión de residuos, e con ela o medio ambiente e a calidade dos solos.

A necesidade de que o compost cando séa aplicado o solo estea maduro fai que sexa necesario o uso de métodos para comprobar o grao de maduración do mesmo. Ata o momento o método estandarizado máis utilizado para esta comprobación é a respirometría (Lasardi e Steinfeld, 1998), explicada no apartado 2.2, pero a súa complexidade e elevado custo fai que sexa necesario a busca de novos métodos que nos permitan coñecer como avanza o proceso. Outro método de referencia é o Rottegrade, explicado no apartado 2.6, é un procedemento que nos

permite coñecer a temperatura acadada por unha mostra de compost e que en función dunha escala (Brinton e col. 1995) nos proporciona información do grado de estabilidade da mostra, de maneira que tamén así poderemos comprobar o grao de maduración das mostras.

Neste traballo exploraremos estes novos métodos, buscando unha alternativa máis barata e robusta as técnicas estándar. Tendo en conta as características do compost fixarémonos en dous aspectos básicos do mesmo, como son o consumo de osíxeno e a temperatura que acada nun sistema pechado.

O uso das DBO_5 (demanda biolóxica de osíxeno) está amplamente desenrolado para o análise de augas residuais, polo que é un equipamento presente en calquera laboratorio de tipo medioambiental, isto fainos pensar que mediante algunha adaptación pode ser un método válido para a análise do compost, xa que tamén nos proporciona unha medida do consumo de osíxeno acumulado. O principal inconveniente deste método é a necesidade de traballar con mostras líquidas. Unha posible solución sería facelo mediante unha suspensión da mostra de compost en auga. Os primeiros estudos realizados (Cossu e Raga) foron moi prometedores, permitiéndonos así ter unha base sólida para comezar a buscar alternativas a respirometría.

Vázquez (2015) “indicate that BOD_5 method offers a unique parameter, either expressed as the 5-days accumulated specific oxygen demand or as average consumption rate after 5 d of assay. By comparison with the results of respirometric method, the equivalent stability threshold resulted in $23 \text{ mgO}_2/\text{gVS}\cdot\text{d}$ of BOD_5 . Furthermore, the ratio of BOD_5 to the 20 h accumulated oxygen demand obtained by the reference respirometric method resulted in 1.55 ± 0.15 being independent of the degree of compost stabilization. However, these results are derived from only two compost samples from composting systems at UDC campus.”

Realizaremos entón ensaios do método proposto de DBO_5 , e dos métodos estandarizados de respirometría e Rottegrade para as mesmas mostras e tentaremos de comparalas para ver as posibles relacións entre eles e o seu comportamento. Empregaremos mostras tanto dos sistemas de compostaxe da UDC como de todo o ciclo de tratamento da fracción orgánica dunha planta de residuos sólidos urbanos.

1. Obxectivo

Obxectivo

O obxectivo de este traballo de fin de grado é o estudo das características de diferentes mostras de compost e a determinación dunha posible relación entre os diferentes métodos de análise do grado de maduración das mesmas. Búscase en particular comparar a viabilidade do método comercial de DBO como método para determinar a estabilidade de mostras de compost, por comparación con outros métodos estandarizados.

Objetivo

El objetivo de este trabajo de fin de grado es el estudio de las características de diferentes muestras de compost y la determinación de una posible relación entre los diferentes métodos de análisis del grado de maduración de las mismas. Se busca en particular comparar la viabilidad del método comercial de DBO como método para determinar la estabilidad de muestras de compost, por comparación con otros métodos estandarizados.

Abstract

The objective of this work is the study of the characteristics of different compost samples and the determination of a possible relation between the different methods of analysis of the degree of maturation of the same ones. In particular, we study the viability of the commercial method of BOD as a method to determine the stability of compost samples by comparison with other standardized methods.

2. Métodos e materiais

2.1 ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICOS

Cando recibimos unha mostra de compost, xa sexa de comedor escolar ou da planta de tratamento de residuos de Lousame o primeiro que debemos facer é saber en que condicións ven a mostra que temos entre mans, polo que realizámoslle unhas cantas probas para obter as súas características. O primeiro que fixemos foi volcar nunha bandexa a cantidade de compost que usaremos, normalmente un par de kilos e retiramos de forma manual os anacos demasiado grandes de estruturante (páus e restos de poda) e todos os inertes que vimos (plásticos e demais lixo). Cando tivemos unha mostra de compost adecuada para o análise medimos a humidade e os sólidos volátiles que presenta.

-Humidade: para determinala enchemos 4 crisois coa mostra de compost e pesámoslos, cun tamaño de mostra próximo aos 80 gramos, para logo metelos na estufa 24 horas a unha temperatura de 100°C. Pasado ese tempo volvemos pesar cada un dos crisois e metémoslos outras 2 horas na estufa a mesma temperatura. Realizamos unha nova pesada e se non tivemos diferenza entre ambas pesadas sabemos que non quedan restos de auga na mostra, polo que por diferenza de pesadas saberemos a cantidade de auga perdida e poderemos calcular a humidade da mostra da seguinte maneira.

$$\frac{\text{Peso humedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso húmedo}} * 100 = \% \text{ humidade}$$

-Sólidos Volátiles: partimos agora dos crisois secos de antes, dos que xa sabemos o peso seco e húmido e metémoslos na mufla a 600°C un par de horas. Debemos ter precaución de realizar este paso coa mufla na campana extractora xa que produce moitos fumes. Pasado o tempo deixamos os crisois atemperarse e volvemos a pesalos, sabendo a cantidade de sólidos volátiles por diferenzas de pesada sendo:

$$\frac{\text{Peso seco} - \text{Peso tras calcinar}}{\text{Peso seco}} * 100 = \% \text{ Sólidos Volátiles}$$

Con estes dous datos calculamos a cantidade de sólidos volátiles por mostra, que será o dato que realmente utilizaremos para os futuros cálculos, sendo a relación.

$$\frac{\text{Peso seco} - \text{Peso tras calcinar}}{\text{Peso húmido}} = \text{gSV/g mostra}$$

-Presencia de inertes: en algunha das mostras tivemos que determinar o porcentaxe de inertes que presenta xa que apreciouse visualmente que era unha cantidade elevada. Para esta determinación botamos nunha bandexa grande previamente pesada unha cantidade grande de mostra, aproximadamente 2Kg, e volvemos a pesar, sabendo así a masa exacta da mostra da que dispoñemos. Feito isto retiramos de maneira manual todos os inertes que vimos para logo volver

a pesar a mostra sen inertes, sabendo así por diferenza de pesada a porcentaxe de inertes por mostra.

2.2 RESPIROMETRÍA

A respirometría microbiana está directamente relacionada co consumo de osíxeno xa que os microorganismos aerobios vanse desenvolver dun xeito máis rápido na presenza de grandes cantidades de materia orgánica facilmente degradable, e por tanto consumindo maior cantidade de osíxeno. Deste xeito o consumo de osíxeno como a produción de CO₂ son uns claros indicadores do proceso de maduración, sendo o consumo moito máis elevado cun compost inmaduro ou fresco, e diminuíndo paulatinamente ata que a maduración é completa.

O método estandarizado proposto por Lasardi e Stentiford(1998) indica que se realizará o proceso cunha sonda de osíxeno dentro dunha mostra de compost en suspensión baixo unhas condicións óptimas de actividade microbiana e máxima velocidade de reacción. Ó tratarse dun método en estado líquido reduciremos o efecto da transferencia de osíxeno, o ter a mostra en auga en constante axitación. Con este método determinaremos dous valores, como son a Velocidade Específica de Consumo de Osíxeno máxima (VECOM, ou SOURm en inglés, Maximum Specific Oxygen Uptake Rate) e a Demanda de Osíxeno en 20 horas (DO_{20h}), ou consumo acumulado de osíxeno, calculado como a integral do consumo de osíxeno entre 0 e 20 horas. A medición da VECOM é o método de referencia aceptado en máis países xa que se trata dun método sinxelo que proporciona resultados correctos. En este método, como noutros, deberemos dar os resultados en función da materia orgánica presente na mostra, e non só en función do peso total, polo que compre determinar o contido en sólidos volátiles.

A proba que realizamos consiste na medición da concentración de osíxeno dunha dispersión de compost en intervalos de 2 minutos por un período próximo as 24 horas. O método a usar divide este tempo en seccións dunha hora, nas que 45 minutos temos aireación difundida na dispersión e outros 15 minutos sen ela, podendo por tanto sacar unha relación do consumo de osíxeno no período de ausencia de aireación. Trátase dun método estático xa que interrompemos o aporte de osíxeno en certos momentos. Realizamos cos datos obtidos unha gráfica na que representamos a concentración de osíxeno da disolución fronte o tempo(Figura 2) na que observamos con claridade o tramo con e sen aireación, e da que poderemos sacar os datos de interese.

Unha vez que temos a dispersión nunha concentración adecuada, segundo se describe no punto (2.4), e realizamos a experiencia por duplicado, enchemos dous vasos de precipitados de 1L con mostras alícuotas representativas, aos que lle engadimos:

- Axitador magnético
- 30 mL de disolución de tampón fosfato (ver apartado 2.5)
- 10mL de cada un dos nutrientes (ver apartado 2.5)
- 2mL de inhibidor da nitrificación (aliltiurea)

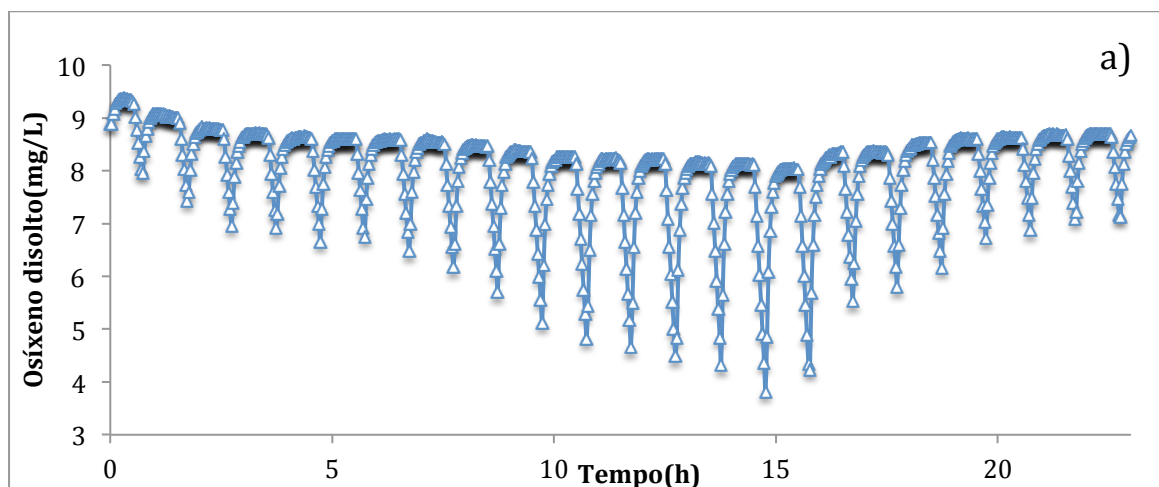
Feito isto pasamos a realizar a montaxe na cámara de 20°C, onde realizamos todo o procedemento, para elo necesitamos unha bomba aireadora de acuario e un pedra difusora, unha

base axitadora e un temporizador, ademais da sonda respirométrica e o seu detector (YSI, modelo ProODO). Colocamos os vasos de precipitados sobre a base axitadora, cunha axitación de 350rpm e metemos no vaso a pedra difusora coa aireación a metade, regulada por unha chave. Enchufamos o aireador nun temporizador, que estará programado para traballar 45 minutos e parar 15 en ciclos sucesivos seguidos. Tamén introducimos na disolución a sonda medidora de osíxeno e conectamos esta o detector, programado para tomar datos cada dous minutos (Figura 1).



Figura 1: Equipamento e montaxe utilizado na determinación da respirometría de mostras de compost.

Pasadas as 24 horas temos os datos almacenados no detector, que teremos que volcar no ordenador para poder traballar con eles. Teremos dous tipos de gráficos diferenciados, os de compost maduro, nos que a variación da concentración de osíxeno non será excesiva e os gráficos de compost fresco, no que a variación vai ser moito máis acusada (Figura 2).



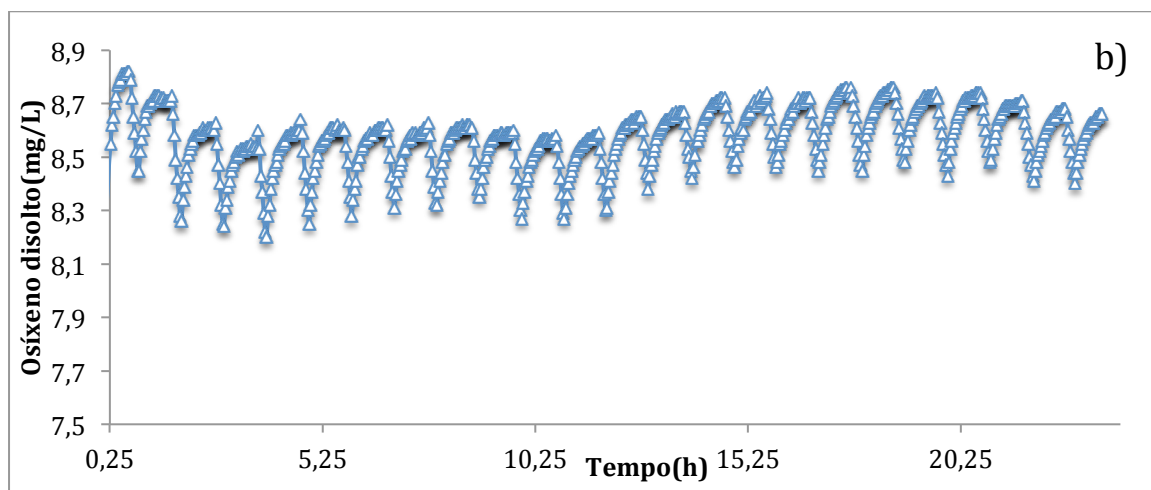


Figura 2. Exemplo de respirometrías para compost fresco (a) e maduro (b).

Como se pode ver a demanda de osíxeno que presenta a mostra fresca e moito mas alta que a que presenta a mostra madura, isto é debido a que no proceso de transformación de compost necesítase a presenza de osíxeno, de maneira que unha vez que o compost xa madurou, esta necesidade de osíxeno é moito menor que no caso fresco. En ambos casos, os mínimos da curva de consumo de osíxeno corresponden ao momento final do período de non aireación. A flexibilidade do método é tal que permite obter resultados válidos sempre que durante o período de non aireación poidamos obter con precisión a velocidade de caída da concentración de osíxeno. Así, se a actividade é moi elevada, a concentración de osíxeno pode caer a cero en poucos minutos, o que nos levaría a ter que repetir o experimento cunha menor concentración de SV. Pola contra, se a actividade é moi baixa e non hai unha caída apreciable durante o período de non aireación de 15 minutos, podemos optar por aumentar a concentración de SV, ou alternativamente por ampliar o tempo de non aireación, por exemplo a 30 min durante o ciclo de 1 h.

Unha vez feita esta gráfica e cos datos de dous en dous minutos como temos, vamos a facer a representación de cada tramo sen aireación, tendo unha recta por cada hora, na que sacaremos a pendente mediante a ecuación da recta. Polo xeral, o coeficiente de regresión (R^2) destes axustes lineais é superior a 0,99. A excepción dáse no caso de velocidades de consumo moi reducidas, e neste caso podemos aceptar como correctos valores situados por riba de 0,7, sempre e cando a identificación dos mesmos coincida de forma clara coa periodicidade horaria dos períodos de non aireación. Presentamos agora por tanto un exemplo dunha recta de axuste dun compost maduro, e dicir, cun consumo reducido e un axuste non demasiado bo (Figura 3a), e unha recta de axuste dun compost moi activo, e por tanto cun axuste bo e unha pendente alta (Figura 3b).

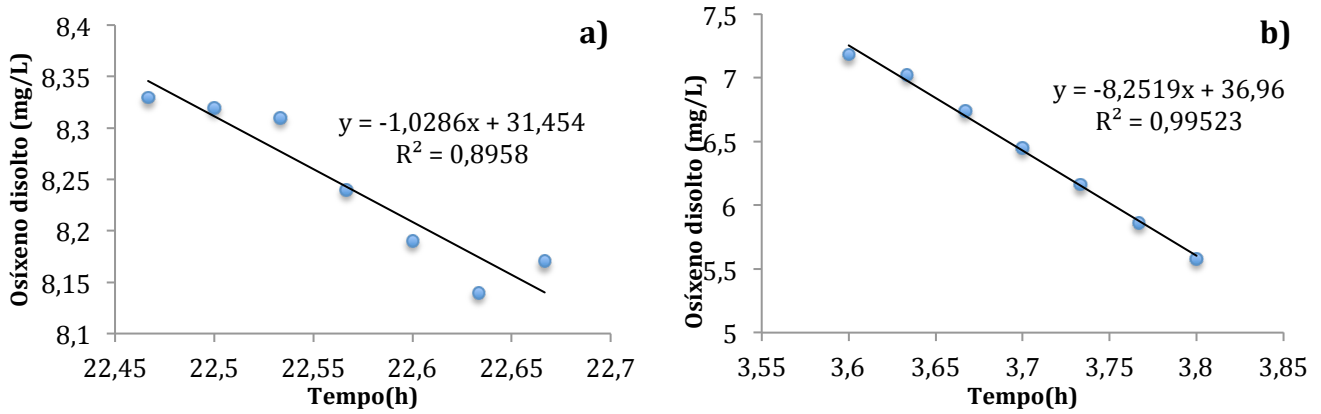


Figura 3. Pendentes para compost maduro (a) e fresco (b).

Ao dividir o valor de esa pendente entre os gramos de SV da dispersión teremos o consumo de osíxeno por gSV. Poderemos de esta maneira representar este valor para cada hora e obter así en que momento se produciu o máximo de consumo, ademais de poder comprobar que non tivemos ningún erro ou problema no método (unha caída sin explicación no consumo de osixeno, etc.)(Figura 4).

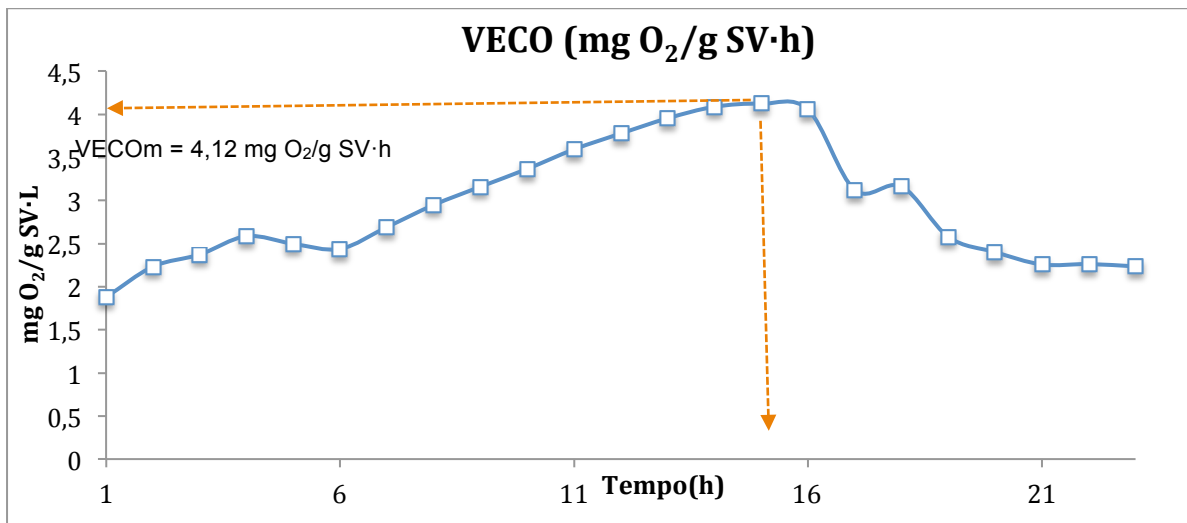


Figura 4: Gráfico do consumo de osíxeno por gramo de SV obtido para cada hora.

2.3 DBO

Como sabemos que a actividade biolóxica que se realiza na transformación da materia orgánica en compost necesita de osíxeno para o seu correcto desenvolvemento, controlando esta variable coñeceremos o estado do compost. Polo tanto a DBO (demanda biolóxica de osíxeno) realiza a medición do consumo dunha mostra de compost o longo de 5 días. Determinaremos o consumo de osíxeno dunha mostra de compost expresada en mgO_2 consumidos respecto a g SV presentes na mostra. Para a determinación usaremos uns capuchóns da marca *Velp* e uns botellins de vidro ámbar coa boca roscada, así como un equipo de axitación para estas botellas, da mesma marca (*Figura 5*).



Figura 5: Base axitadora, botellas de vidro e medidores da DBO da marca Velp.

Rematado o proceso de comprobación do método, explicado no apartado 3.3 podemos proceder o análise de mostras de compost. O proceso é o mesmo, solo que debemos preparar a mostra de compost para este procedemento e elixir a escala de maneira correcta, en función do grado de maduración do mesmo, canto máis maduro é o compost, menor é o seu consumo. Neste traballo decidimos utilizar sempre dúas escalas, co obxectivo de acertar no rango a aplicar, e así no peor dos casos sempre teremos como mínimo unha serie de datos válida, e dicir, que non se nos saian da escala escollida.

Para adecuar a mostra de compost sólida a este proceso vamos usar a mesma dispersión que preparamos para a respirometría (apartado 2.4), cunha concentración aproximada de 4gSV/L auga en compost intermedio e maduro, mentres que cando usemos compost fresco tentaremos baixar esta concentración a 3gSV/L preparando unha nova dispersión. Medimos o volume que temos que engadir para cada un dos botellins por pesada. Engadimos os nutrientes e a disolución

tampón cunha concentración de 1mL/L de dispersión, pero no caso do inhibidor o volume e diferente sendo 1,3mL para a escala de 90; 0,8 para a de 250; 0,5 para a de 600 e 0,3 para a de 999. Por tanto a modo de resumo, utilizaremos as cantidades indicadas na Táboa 1.

Táboa 1. Volumes necesarios para a DBO.

	Escala 90	Escala 250	Escala 600	Escala 999
Volume tampón fosfato	0,4mL	0,25mL	0,15mL	0,1mL
Volume nutrientes	0,4mL	0,25mL	0,15mL	0,1mL
Volume inhibidor	1,3mL	0,8mL	0,5mL	0,3mL
Volume dispersión	400mL	250mL	150mL	100mL

Unha vez realizado todo este proceso remataremos cun dato de DBO5d que nos proporcionará o consumo de osíxeno acumulado nun tempo de 5 días expresado en mgO₂/L, que ao dividilo polos gSV/L que usamos na dispersión teremos o dato de consumo acumulado de osíxeno en mgO₂/gSV, que será o que necesitemos para todos os nosos cálculos posteriores.

Teremos ademais o consumo de osíxeno acumulado o longo de cada un dos días. Con este dato podemos comprobar o funcionamento de todo o proceso, xa que se todo vai ben debemos ter un gráfico que relaciona o consumo de osíxeno fronte os días, cunha forma ascendente que tende a unha asíntota horizontal, sendo por tanto o consumo maior nos primeiros días. Teremos unha gráfica como a da Figura 6.

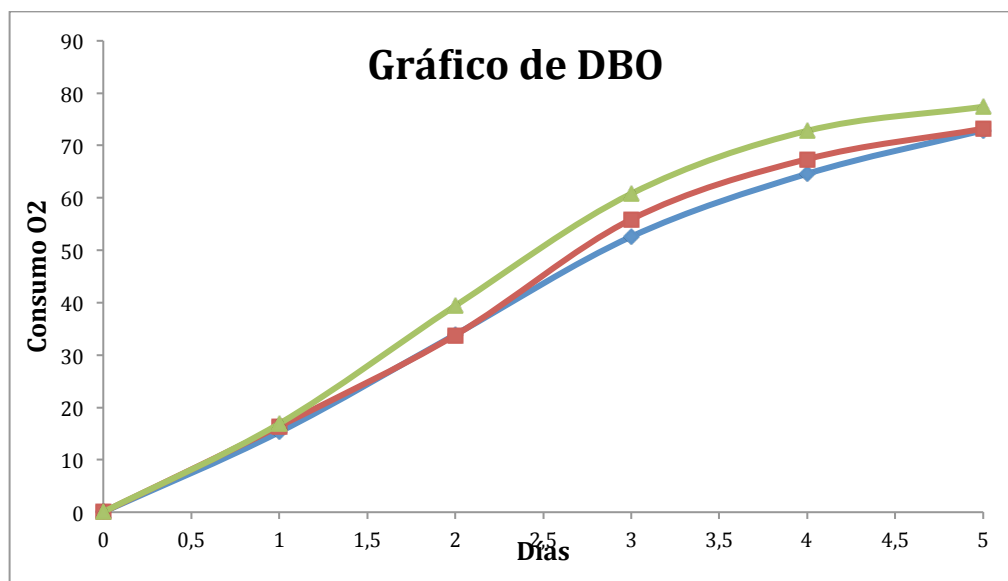


Figura 6: Exemplo do comportamento dun gráfico de DBO correcto.

En algún dos casos no que o gráfico non nos quedou desta maneira, xa sexa por que acadou o máximo moi rápido e comezou a baixar, ou porque nos pasamos da escala e faltaba algún dos días, debemos repetir o proceso ata acadar un resultado conforme cos criterios do método de DBO5.

Todo o proceso se realizou dentro da cámara de 20°C para manter a temperatura constante e aínda que en algún momento esta deixou de funcionar correctamente, e chegamos os 26°C non apreciamos ningunha variación considerable por as diferencias de temperatura. Isto explícase porque a temperatura afecta á velocidade do proceso, pero en menor medida ao consumo acumulado, ao menos cando as variacións son limitadas como no caso mencionado.

2.4 PREPARACIÓN DA DISPERSIÓN DE COMPOST PARA OS ENSAIOS DE RESPIROMETRÍA E DBO

Unha vez que tivemos un método de traballo axeitado e todos as sondas respirométricas e todos os detectores de DBO comprobados(apartado 3.1 e 3.2) comezamos a traballar sobre as mostras de compost. Para facelo debemos realizar a dispersión do compost sobre auga destilada. Collemos unha mostra de compost coñecido, aproximándonos a unha concentración de 4gSV/L, para facer esta aproximación supoñemos que as mostras que temos son 0,2gSV/g mostra (isto dependen do contido en humidade e en SV da mostra en cuestión, resultando o valor de 0,2 gSV/g mostra para o caso dunha mostra con 60% de auga e 50% de SV; o coñecemento da orixe da mostra e a apreciación sensorial do contido en auga permitirannos estimar o seu contido en SV). Como a dispersión total será de 5L (que usaremos tanto para os ensaios de respirometría como para os de DBO) pesamos nun vaso de precipitados unha cantidade próxima os 100g de mostra. Engadimos sobre o sólido un pouco máis de medio litro de auga destilada e pasamos todo polo batidora para telo o mas particulado posible. Arrastramos todos os sólidos que nos quedan por a batidora e o vaso e levámoslos a un recipiente mas grande. Feito isto pasamos a tamizar cunha malla de aproximadamente 2mm de paso, eliminando todos os materiais de maior tamaño para evitar que nos ocasionen problemas na sonda. En caso de ter unha mostra demasiado activa, que terá un consumo de osíxeno demasiado alto, teremos que reducir a cantidade de sólidos volátiles, repetindo o mesmo proceso pero con menor cantidade de materia.

2.5 REACTIVOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS DE RESPIROMETRÍA E DBO

-Disolución reguladora (tampón fosfato)

- 8,5g KH_2PO_4 /L
- 33,4g $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ /L
- 39,7g K_2HPO_4 /L
- 1,7g NH_4Cl /L
- pH final da disolución 7,2

-Nutrientes

- Disolución de CaCl_2 27,5g/L
- Disolución de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0,25g/L
- Disolución de MgSO_4 22,5g/L

-Inhibidor da nitrificación

- Alitiotourea 1g/L

2.6 ROTTEGRADE

Trátase dun test de autoquecemento estandarizado en 1995 por Brinton e Col. no que comprobaremos o incremento da temperatura debido a calor xerada por unha mostra de compost nun ambiente controlado e durante un período de incubación de aproximadamente 9 días, para elo, metemos un volume de 1,5L de mostra de compost nun vaso Dewar, que proporciona un illamento térmico, e rexistramos a variación da temperatura. Teremos as mostras por duplicado cun termómetro en cada unha delas e un termómetro medindo a temperatura exterior, anotando as diferentes temperaturas en cada un dos vasos como mínimo unha vez por día.

Para que a experiencia sexa válida debemos ter unhas características físicas definidas e similares en ambos casos. Debemos ter a mostra de compost cunha humidade próxima o 60%-65%, en caso de estar moi por debaixo engadiremos auga ata alcanzar ese nivel. Procuraremos ademais que a mostra non esté apelmazada e non teñamos ningún anaco maior de 3-4cm. Para evitar isto verteremos a mostra nunha bandexa e desmiuazaremos e cortaremos o máis posible coa axuda dunhas tesoiras.

Unha vez teñamos o compost coa textura e humidade desexadas introducímolo no vaso Dewar ata o borde intentando non apertar demasiado e colocaremos a sonda de temperatura cerca do fondo, co extremo inferior da sonda a 1/3 da altura total do vaso, que é o punto onde se alcanza maior temperatura.

Con estes datos podemos clasificar as mostras de compost segundo a cantidade de materia orgánica facilmente degradable que aínda teñen e tendo por tanto 5 niveles de maduración en función da variación de temperatura acadada.

Táboa 2, Brinton e Col.1995.

Variación temperatura	Grao de estabilidade	Descrición	Tipo de compost
0-10°C	V	Moi estable	Acabado
10-20°C	IV	Moderadamente estable	Acabado
20-30°C	III	Materia en descomposición	Activo
30-40°C	II	Produto moi activo(inmaduro)	Activo
40-50°C(ou máis)	I	Fresco	Fresco

3.Resultados

3.1.ORIXE E CARACTERÍSTICAS DAS MOSTRAS UTILIZADAS

Traballamos con 2 tipos diferentes de residuos ou compost, debemos separalos en función do seu lugar de procedencia e tendo en conta as súas diferentes características, sendo compost en proceso ou acabado obtido a partir de residuo de comedor universitario (nomeado coa letra C nas táboas) do campus da Zapateira da UDC, e o residuo fresco e compost en proceso ou maduro procedente da planta de tratamento de Lousame (nomeado como L nas táboas).

Táboa 3. Estado e procedencia das mostras de compost.

Mostra	Procedencia	Estado
C1	Composteiro de filloxía	Estable
C2	Composteiro de apareladores	Maduración intermedia
C3	Comezo do compostador automático	Case fresco
C4	Centro do compostador automático	Moi pouco maduro
L1	Primeira etapa da planta de tratamento de residuo de Lousame	Fresco
L2	Residuo fresco de Lousame sen tratar	Moi fresco
L3	Etapa final da planta de Lousame (húmido)	Estable
L4	Compost de Lousame listo para comercializar	Moi estable

Táboa 4. Características das mostras utilizadas.

Mostra	Estado de maduración previsto	Humidade	Sólidos volátiles	Dispersión (gSV/L)	
				Resp.	DBO
C1	Maduro	67,25%	77,6%	4	
C2	Intermedio	65,5%	70,1%	4	
C3	Fresco	71,21%	80,68%	3,65	
C4	Fresco	68,78%	60,47%	3,96	
L1	Intermedio	45,43%	39,6%	2,83	3,41
L2	FORU*	60,03%	54,53%	3,66	1,88
L3	Maduro	16,82%	34,98%	4,61	
L4	Maduro	31,96%	40,97%	4,86	

FORU: fracción orgánica de residuo urbano, e dicir, residuo fresco recién recollido, sen nada de estruturante

Mostraremos no apartado 3.4 os distintos resultados obtidos en forma de gráfica, presentando unha gráfica por cada escala de DBO utilizada, unha gráfica coa respirometría ou respirometrías combinadas en caso de ser válidos os duplicados e unha gráfica cos valores do Rottegrade por duplicado.

3.2 ADAPTACIÓN DO MÉTODO DA RESPIROMETRÍA

Para poder poñer en práctica as nosas experiencias primeiro procedemos a comprobar o correcto funcionamento das sondas e dos medidores. Para facer isto, medimos a concentración de osíxeno nunha mostra con aireación e despois retirala a aireación para ver como o consumo de osíxeno baixaba, fixándonos nas gráficas para descartar calquer anomalía, comprobando que as rectas e as pendentes nos tramos con e sen aireación se ven de forma clara.

Foi necesario adaptar o método, xa que o método existente indicaba o uso de erlenmeyer de 500mL e ao pouco tempo comprobamos que non iamos ter resultados fiables de esta maneira porque os sólidos presentes na dispersión proxectábanse polas paredes do erlenmeyer e por tanto a constante de reparto entre o sólido do compost e o líquido non ía ser a correcta ao non encontrarse todos os sólidos en disolución. Para intentar remediar ese problema probamos a realizar a mesma experiencia nun vaso de precipitados de medio litro, aumentando así a superficie de contacto entre o sólido e o líquido, xa que o sólido flota en gran parte sobre a superficie do líquido. Con esta adaptación do método tamén se nos presentaron problemas debido a aireación, xa que se formaban espumas e parte da disolución proxectábase cara fora do vaso de precipitados, perdendo parte do volume e por tanto variando os resultados. Para intentar paliar este problema pasamos a un vaso dun litro, usando tamén o dobre de volume e comprobamos que o novo método funcionaba perfectamente, xa que as proxeccións eran mínimas e tanto a aireación como a axitación non sufría ningún inconveniente. Por tanto, finalmente adoptouse esta configuración, en vaso de precipitados de 1 L, para a realización do ensaio de respirometría de referencia (Figura 1).

3.3 ENSAIOS PREVIOS PARA A DBO

Procedemos a comprobar e revisar tanto os medidores de osíxeno como as bases axitadoras e todo o equipo de DBO5 en mostras de auga residual sintética (concentración coñecida), antes de comezar cas nosas experiencias de avaliación do método con mostras de compost. Para elo usaremos o efluente procedente dun sistema de depuración de augas residuais urbanas en operación no laboratorio (Gonzalo, 2017), do cal sabemos que ten unha flora bacteriana aerobia activa. Comezaremos cun volume aproximado de 5L de este efluente, ao que lle axustamos o pH a un valor entre 6,8 e 7,2 para posteriormente poñelo en aireación cunha bomba de acuario durante un período próximo ás 24 horas. Pasado este tempo engadimos 50mg/L de ácido acético neutralizado, co cal introducimos a materia orgánica para degradar, de maneira que poderemos sacar unha referencia para a estimación do osíxeno consumido e a comprobación do funcionamento dos equipos. Engadimos tamén os nutrientes necesarios para o proceso(segundo o indicado no apartado 2.5), cunha concentración de 1mL/L e comezamos a facer probas con diferentes concentracións e escalas, variando a cantidade de ácido acético presente nelas.

Cada un dos detectores *Velp* ten 4 escalas posibles que se escollen en función da demanda de osíxeno que esperamos ter. Procedeuse a comprobalas todas, usando a seguinte aproximación teórica de 0,42gDBO5/gHAc, calculando para os valores de 15%, 30% e 60% do máximo de cada escala e axustándonos a elas con ácido acético neutralizado. Engadimos agora o inhibidor da nitrificación para cada unha das experiencias, un axitador magnético e os capuchóns con 3

pastillas de sosa. Tapámoslos cos medidores *Velp*, escollemos a escala adecuada para cada caso, colocamos os botellins de vidro nunha base axitadora e deixamos transcorrer os 5 días. Repetiremos o proceso ata ter comprobado cada unha das escalas por duplicado. Como realizaremos varias probas ao mesmo tempo para axilizar o calibrado, teremos un montaxe como o da Figura 7.

A maioría dos detectores mostraron valores próximos os esperados de forma teórica, e os que deron datos anómalos foron descartados, de maneira que o final quedámonos cos detectores que presentaron un correcto funcionamento, e sendo estes os usados para as medidas do compost.

3.4 GRÁFICOS DAS MOSTRAS DE COMPOST

3.4.1 Mostra C1 (compost maduro de residuo de comedor)

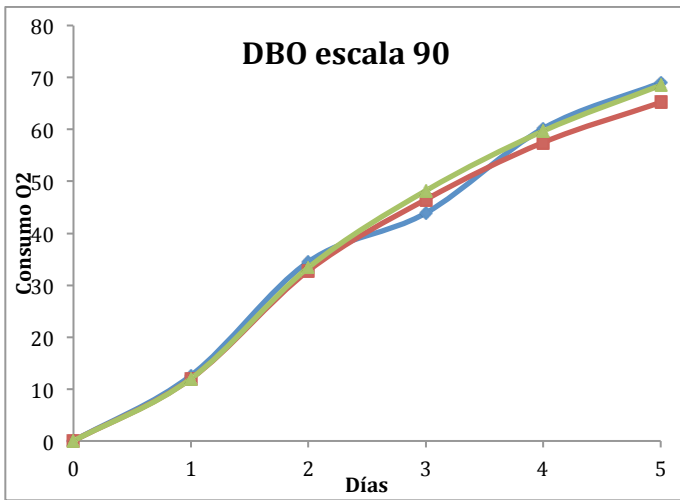


Figura 7.

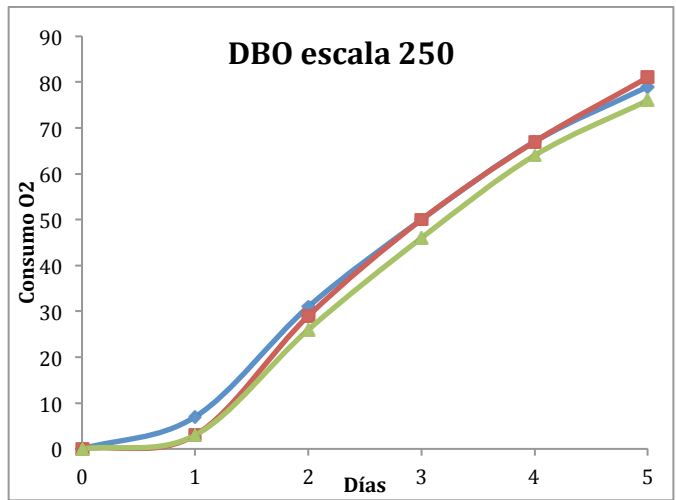


Figura 8.

Dispersión utilizada 4 gSV/L
 Osíxeno acumulado 16,89 mgO₂/gSV

Dispersión utilizada 4gSV/L
 Osíxeno acumulado 19,66mgO₂/gSV

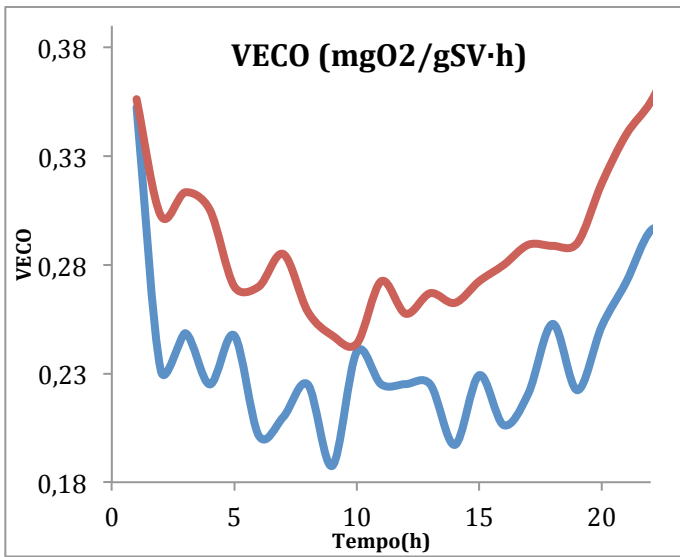


Figura 9.

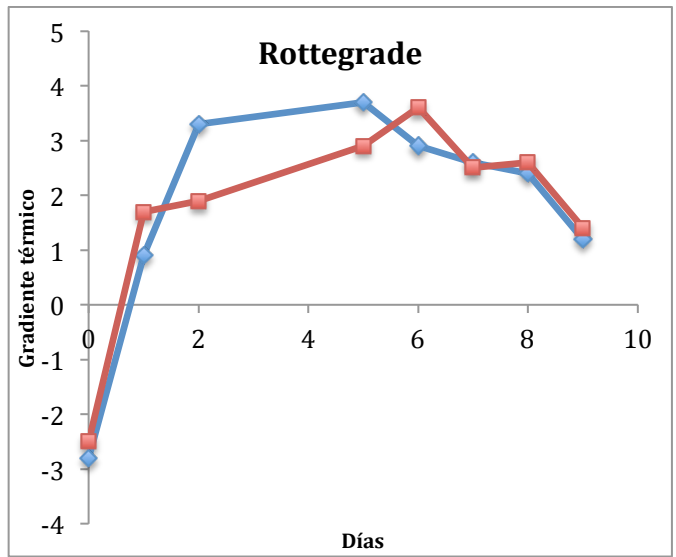


Figura 10.

Dispersión utilizada 4 gSV/L
 Consumo de osíxeno acumulado 5,32 mgO₂/gSV

Gradiente térmico máximo 3,7

3.4.2 Mostra C2(Compost intermedio de residuo de comedor)

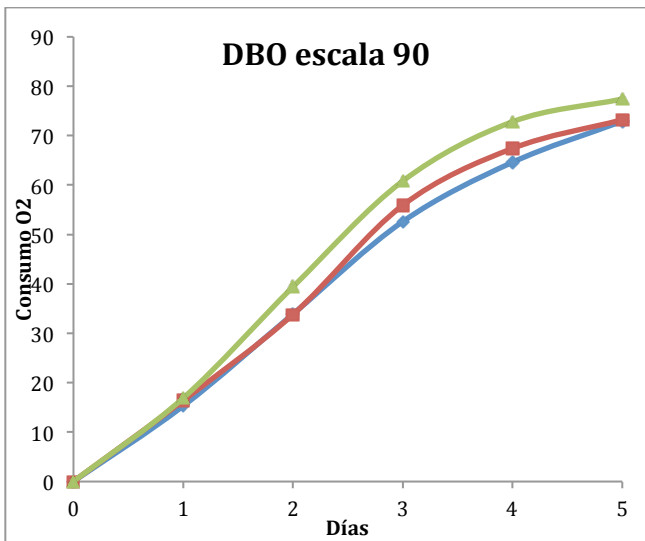


Figura 11.

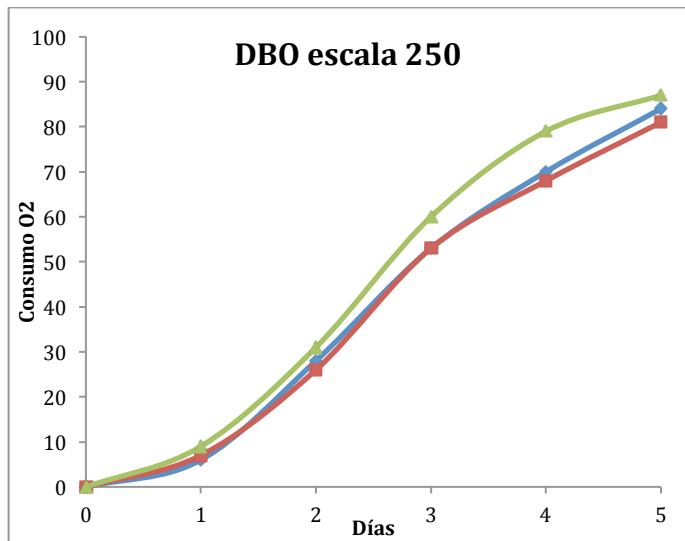


Figura 12.

Dispersión utilizada 4 gSV/L
Osíxeno acumulado 18,62 mgO₂/gSV

Dispersión utilizada 4 gSV/L
Osíxeno acumulado 21 mgO₂/gSV

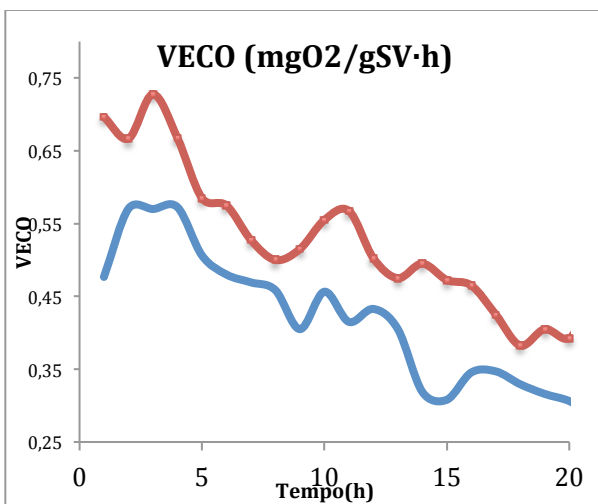


Figura 13.

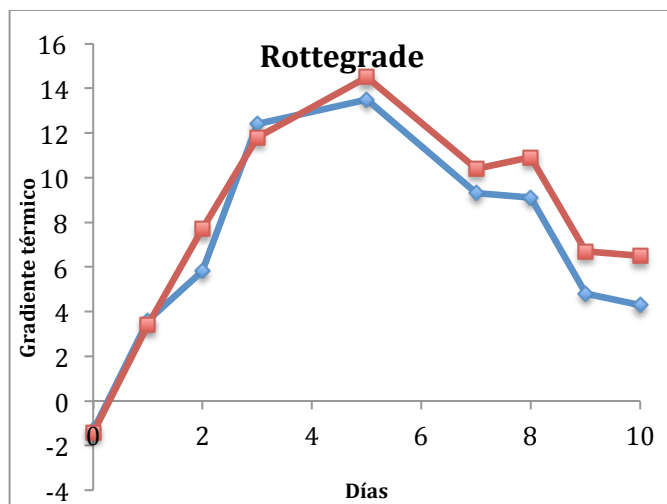


Figura 14.

Dispersión utilizada 4 gSV/L
Consumo de osíxeno acumulado 9,36 mgO₂/gSV

Gradiente térmico máximo 14,5

3.4.3 Mostra C3(Compost fresco de residuo de comedor)

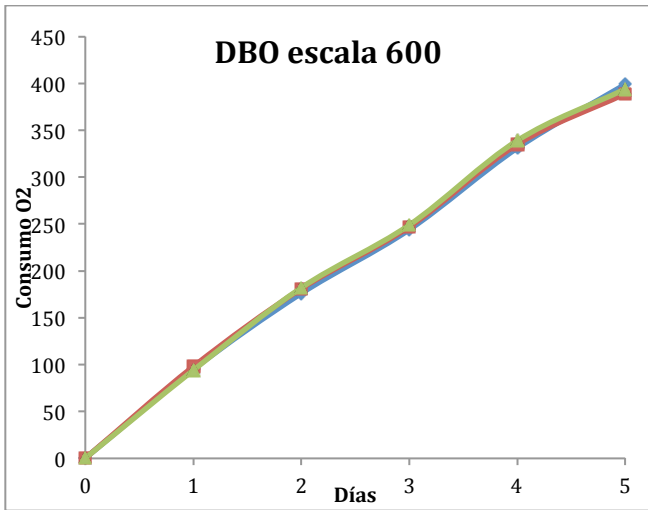


Figura 15.

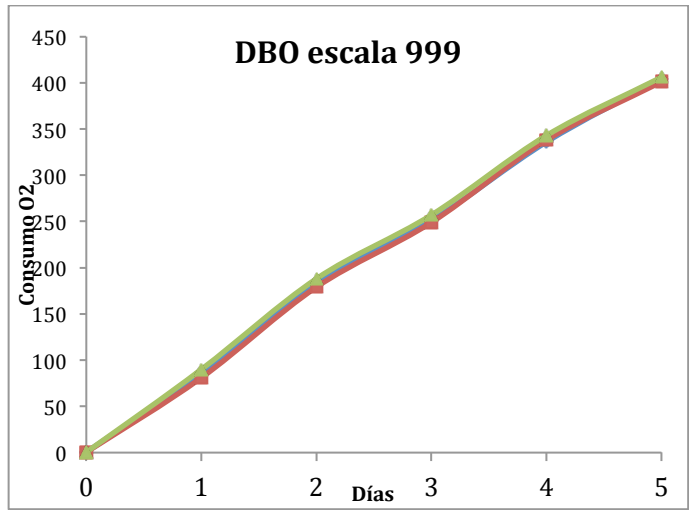


Figura 16.

Dispersión utilizada 3,65 gSV/L
 Osíxeno acumulado 107,94 mgO₂/gSV

Dispersión utilizada 3,65 gSV/L
 Osíxeno acumulado 110,59 mgO₂/gSV

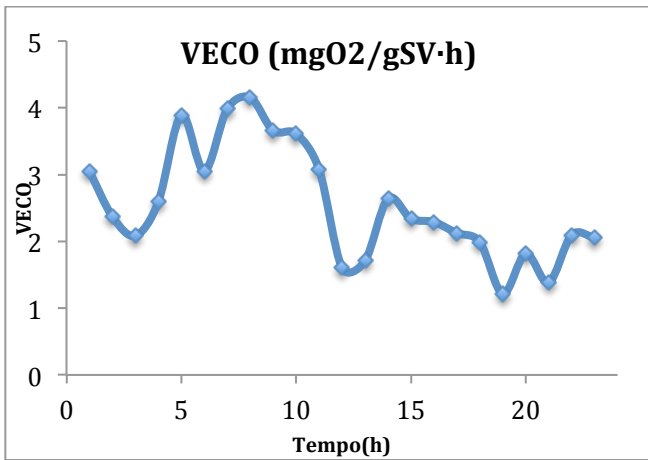


Figura 17.

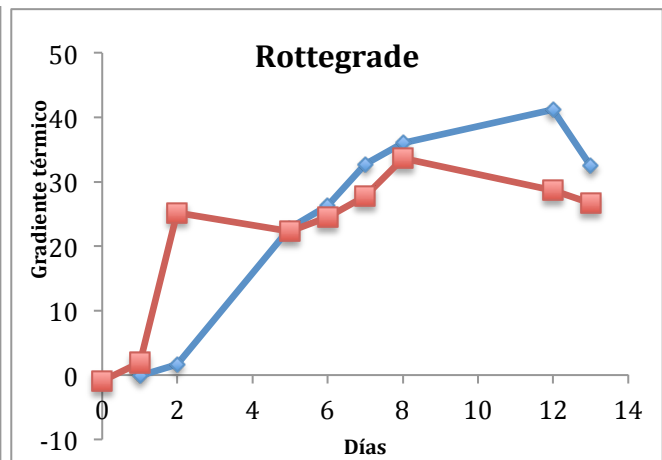


Figura 18.

Dispersión utilizada 3,65 gSV/L
 Consumo de osíxeno acumulado 54,4 mgO₂/gSV

Gradiente térmico máximo 41,2

3.4.4 Mostra C4(Compost fresco de residuo de comedor)

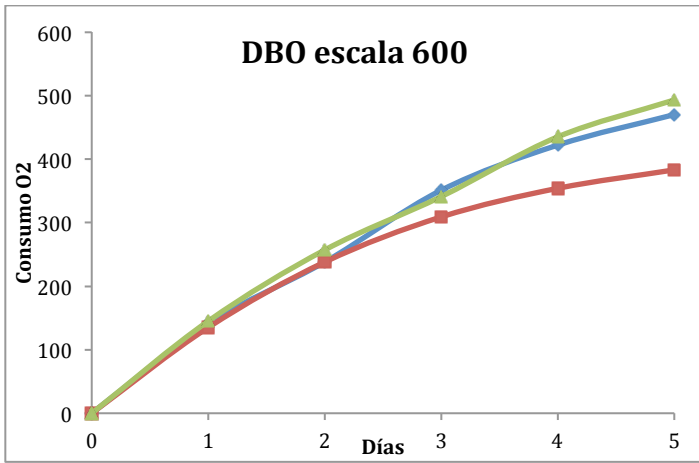


Figura 19.

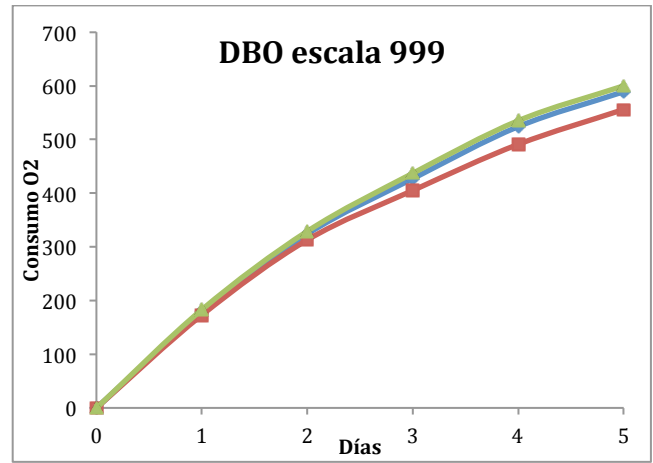


Figura 20.

Dispersión utilizada 3,96 gSV/L
 Osíxeno acumulado 113,3 mgO₂/gSV

Dispersión utilizada 3,96 gSV/L
 Osíxeno acumulado 146,88 mgO₂/gSV

Pódese apreciar na *Figura 19* unha serie de datos desviase notablemente dos outros dous, e dicir, e un dato anómalo. En casos como este, e dispoñendo do triplicado con dous dos ensaios moi próximos e un desviado, descartamos este último e empregamos a media dos dous primeiros.

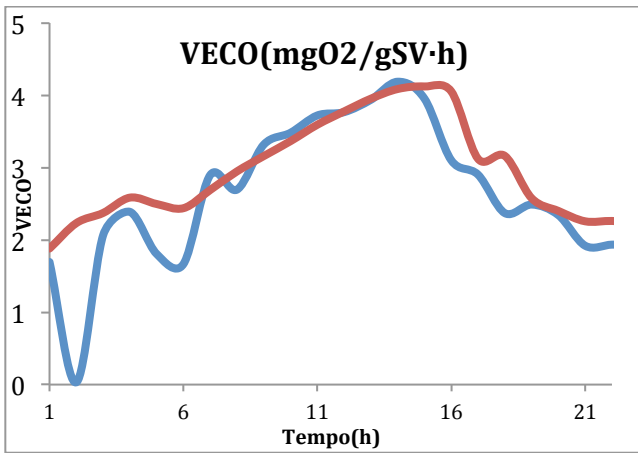


Figura 21.

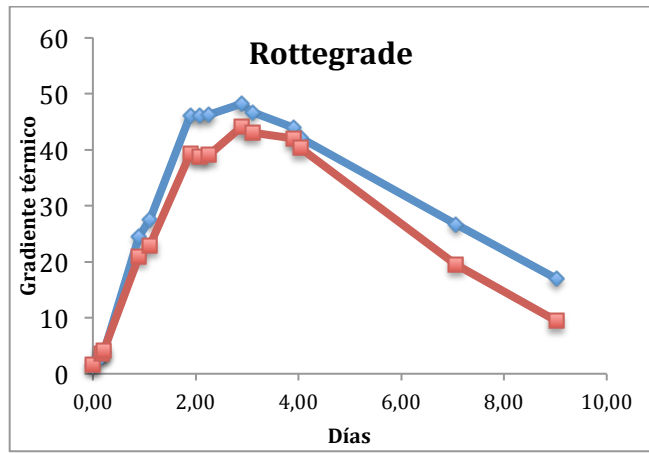


Figura 22.

Dispersión utilizada 3,96 gSV/L
 Consumo de osíxeno acumulado 60,68 mgO₂/gSV

Gradiente térmico máximo 48,2

3.4.5 Mostra L1(Compost intermedio procedente de Lousame)

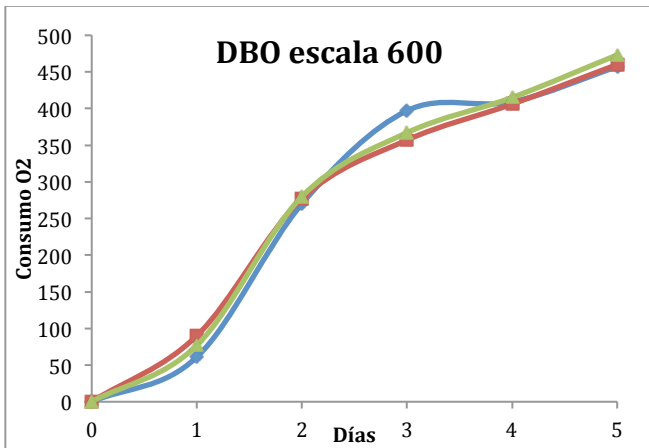


Figura 23.

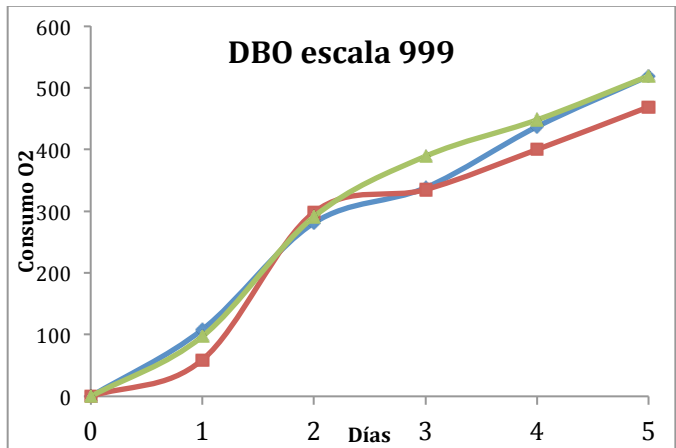


Figura 24.

Dispersión utilizada 2,83 gSV/L
Osíxeno acumulado 135,87 mgO₂/gSV

Dispersión utilizada 2,83 gSV/L
Osíxeno acumulado 147,31 mgO₂/gSV

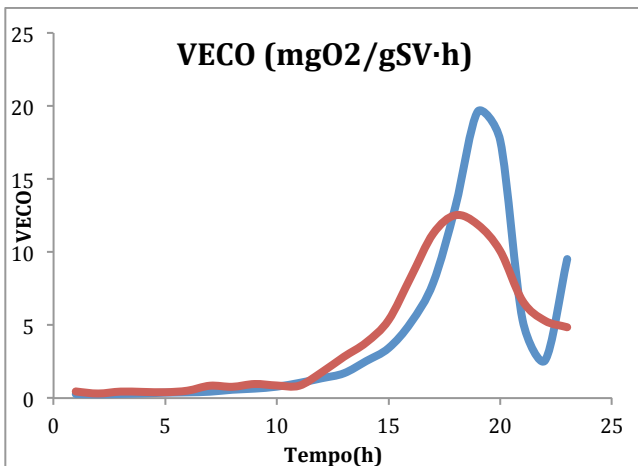


Figura 25.

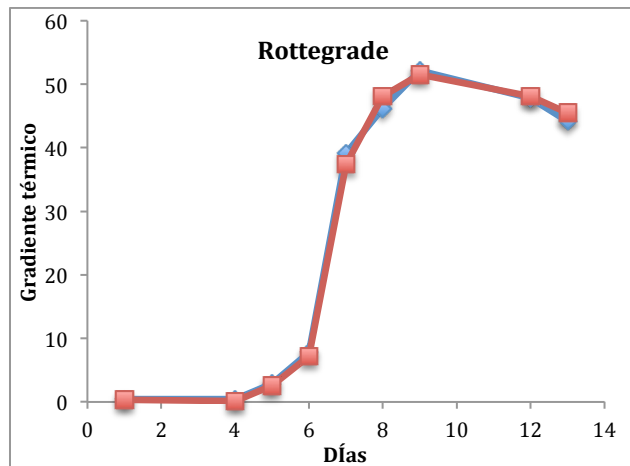


Figura 26.

Dispersión utilizada 3,41 gSV/L
Consumo de osíxeno acumulado 82,25 mgO₂/gSV

Gradiente térmico máximo 51,5

Segundo o gráfico da VECO (Figura 25), vese claramente que a mostra de compost na respirometría tardou moito en comezar a consumir osíxeno, pero de todas as maneiras o consumo total acumulado repórtanos un dato que concorda cos valores esperados, e repetindo o proceso sae un gráfico similar, polo que usaremos ese valor a pesar da que o consumo de osíxeno tardou en activarse. Tamén vemos como o Rottegrade (Figura 26) tardou moitos días en comezar a coller temperatura, entón isto fainos pensar que a mostra viña coa flora bacteriana inactiva, polo que tivo que xerarse unha nova colonia de bacterias para que comezaran a producirse as reaccións de oxidación que desprenden temperatura.

3.4.6 Mostra L2 (FORU procedente de Lousame)

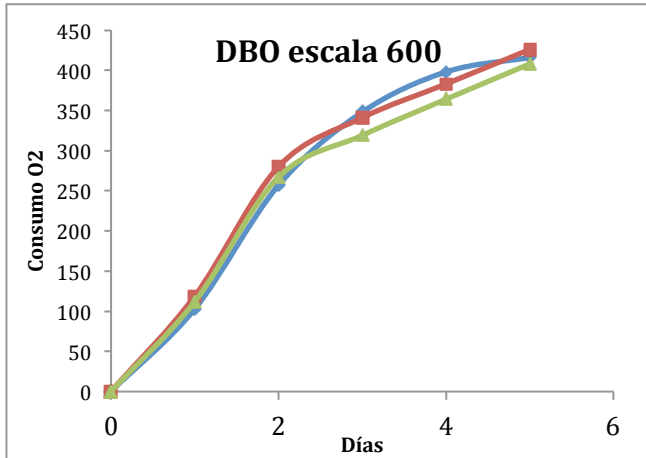


Figura 27.

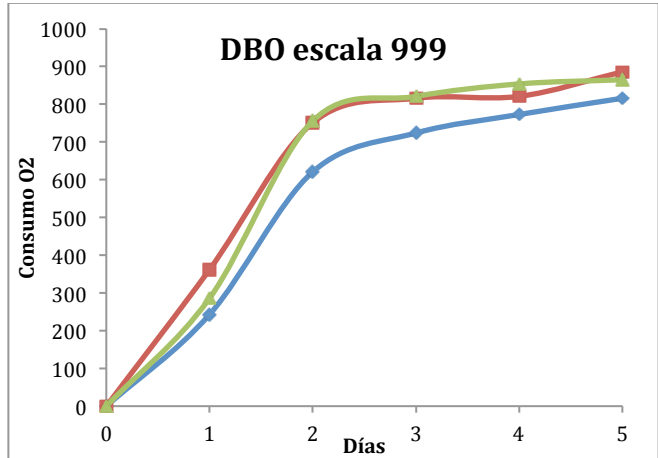


Figura 28.

Dispersión utilizada 1,88 gSV/L
 Osíxeno acumulado 229,23 mgO₂/gSV

Dispersión utilizada 3,66 gSV/L
 Osíxeno acumulado 221,63 mgO₂/gSV

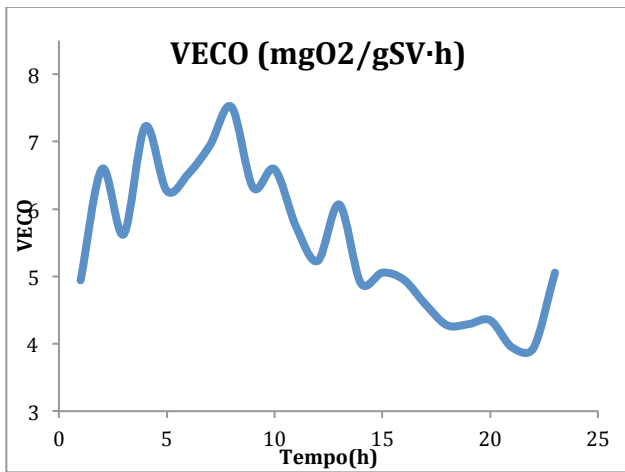


Figura 29.

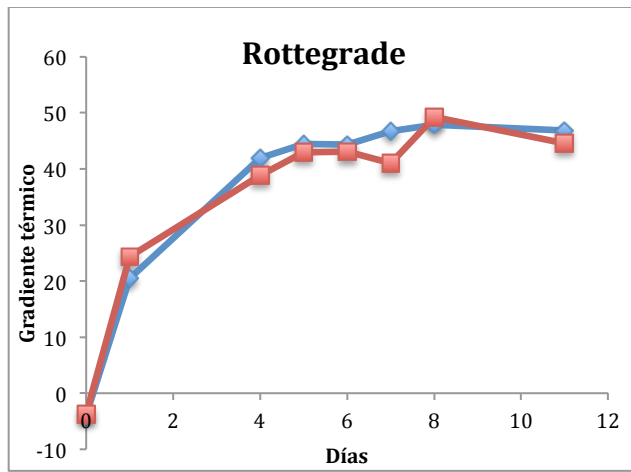


Figura 30.

Dispersión utilizada 3,66 gSV/L
 Consumo de osíxeno acumulado 106,88 mgO₂/gSV

Gradiente térmico máximo 49,2

3.4.7Mostra L3(Compost maduro procedente de Lousame)

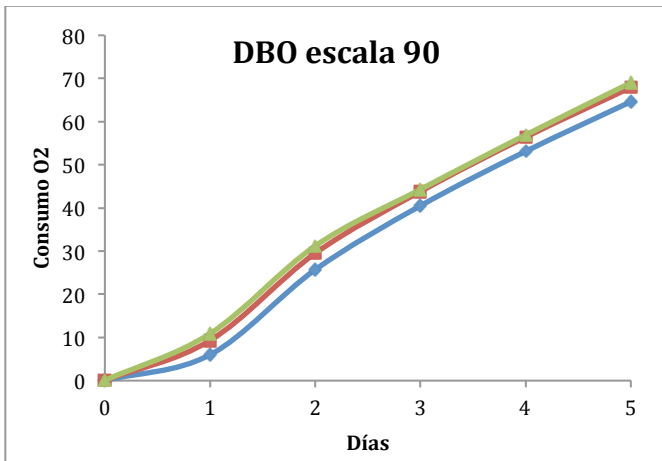


Figura 31.

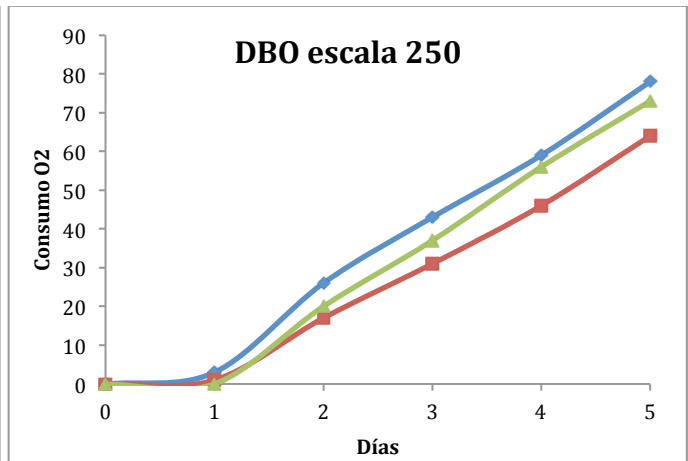


Figura 32.

Dispersión utilizada 4,61 gSV/L
 Osíxeno acumulado 14,57 mgO₂/gSV

Dispersión utilizada 4,61 gSV/L
 Osíxeno acumulado 15,54 mgO₂/gSV

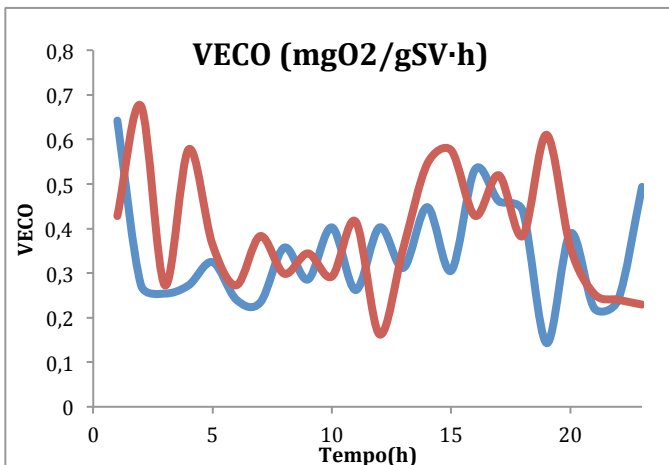


Figura 33.

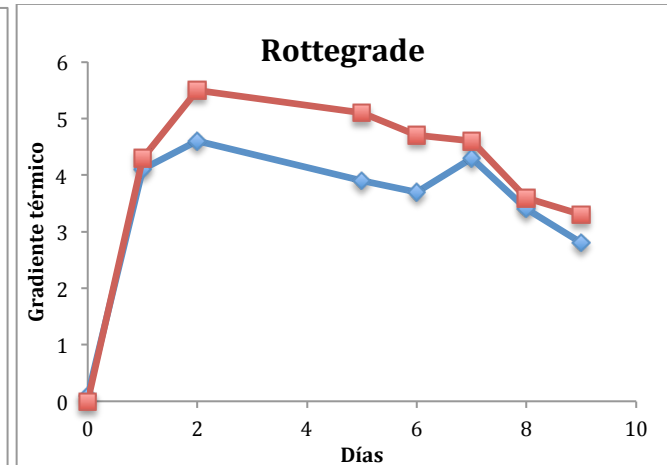


Figura 34.

Dispersión utilizada 4,61 gSV/L
 Consumo de osíxeno acumulado 7,11 mgO₂/gSV

Gradiente térmico máximo 5,5

3.4.8 Mostra L4(Compost maduro procedente de Lousame)

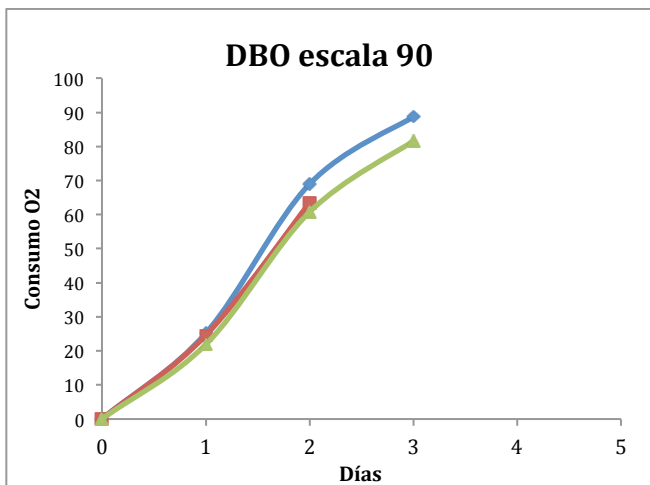


Figura 35.

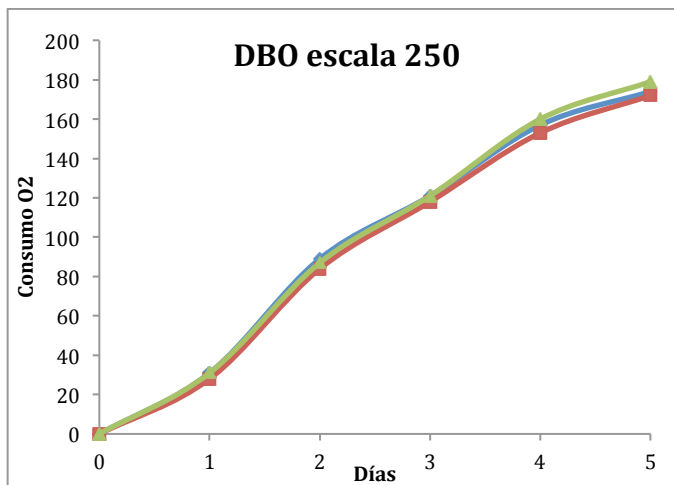


Figura 36.

Dispersión utilizada 4,86gSV/L
 Osíxeno acumulado

Dispersión utilizada 4,86 gSV/L
 Osíxeno acumulado 35,95 mgO₂/gSV

A primeira serie de datos (Figura 35) saíuse do rango da escala do medidor, polo que os valores obtidos non son válidos, ao non alcanzar a DBO5. De todas maneiras, ao termos a outra escala dentro de rango podemos continuar con só eses valores sen problema.

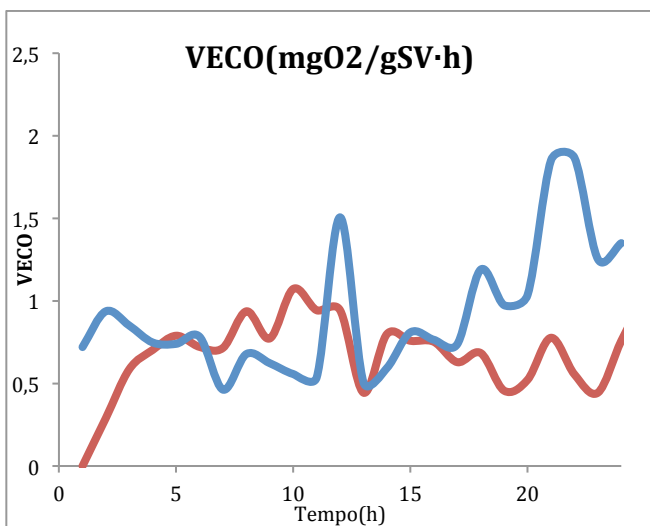


Figura 37.

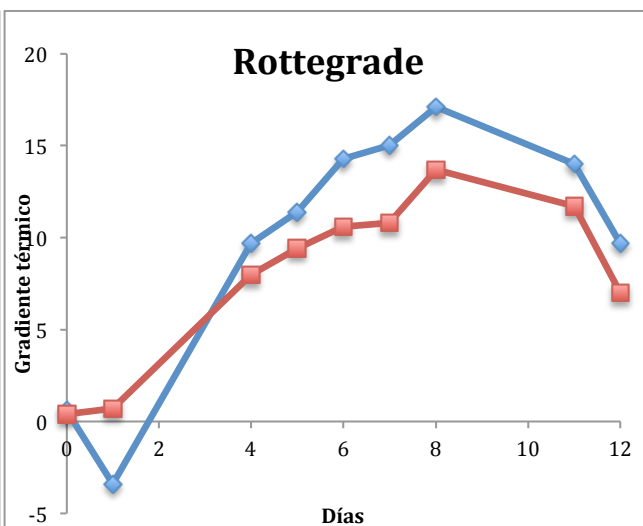


Figura 38.

Dispersión utilizada 4,86 gSV/L
 Consumo de osíxeno acumulado 14,15 mgO₂/gSV

Gradiente térmico máximo 17,1

- **(VECO)** En algún dos casos en que non temos o gráfico por duplicado debese a imposibilidade de facer un duplicado. Isto puido ser por falta de materia prima, é dicir, acabar a mostra de compost e non poder facer máis dispersión, ou ben por pasar

demasiado tempo entre unha medida e outra, co cal o compost non estaría no mesmo estado de maduración, e teríamos así valores moi diferentes.

3.5 REPRODUCIBILIDADE DO ENSAIO DE DBO

Mentres realizabamos os estudos das DBO, comprobamos con estes datos a fiabilidade e reproducibilidade do método. Como realizabamos os ensaios por triplicado para cada unha das mostras, veuse que en todo momento a varianza entre os distintos valores obtidos era baixa. Vimos ademais que das 16 probas realizadas, todas por triplicado, 48 medicións en total, só nunha delas (Mostra C4, figura 19) tivemos que descartar un dato por desviarse demasiado dos outros dous da mesma serie.. Tamén comprobamos se os valores que proporcionaban as diferentes escalas eran comparables, para isto o que fixemos foi representar os datos obtidos nunha escala fronte a outra para cada un dos datos, obtendo un valor de axuste moi próximo a 1 (Figura 39).

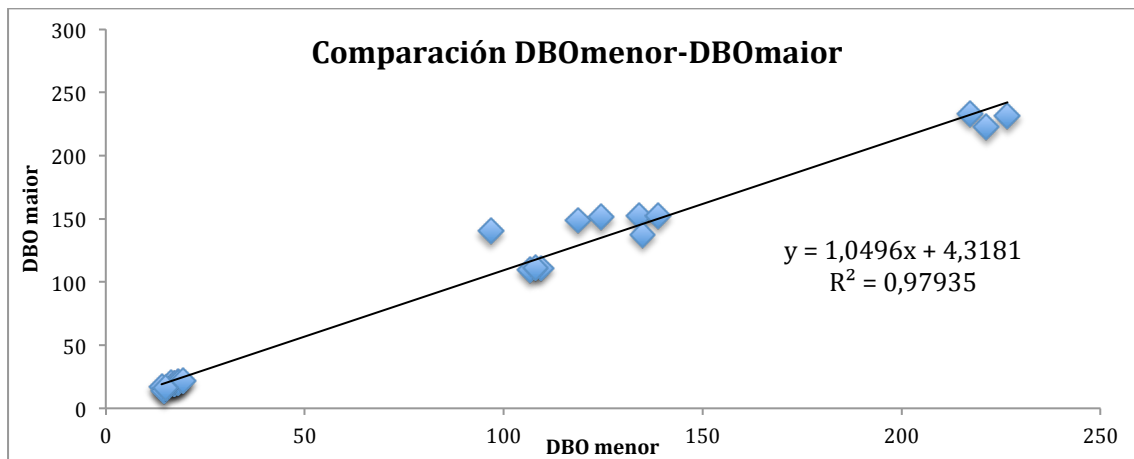


Figura 39: Comparación da DBO maior coa DBO menor, ambos en mgO₂/gSV.

De esta maneira sabemos que os valores das dúas escalas son comparables entre eles, e que podemos usar indistintamente un ou outro xa que non se atopan diferencias entre o uso dunha ou outra escala. No noso caso para a comprobación da relación entre a DEA20h e a DBO5 usamos unha media de ambas escalas, pero tamén sería válido este mesmo procedemento con só unha delas.

Realizamos un análise similar para os datos obtidos mediante a respirometría e o Rottegrade, por iso fixemos duplicados en todos os casos. En ningunha das dúas probas vimos indicios para pensar que o método usado non fose fiable ou reproducibile.

3.6 CORRELACIÓN ENTRE OS DIFERENTES MÉTODOS

Os datos numéricos obtidos para cada unha das probas preséntanse na Táboa 5. Como se explica anteriormente, os ensaios de DBO fixéronse en dúas escalas diferentes para asegurarnos de obter sempre como mínimo unha serie de valores válidos. Estas escalas diferéncianse no valor máximo de consumo de osíxeno que poden rexistrar, sendo na Táboa 5 a *Escala menor* a que pode indicar un consumo de osíxeno máis baixo, e a *Escala maior* a que pode acadar o consumo acumulado máis alto.

Táboa 5. Resultados obtidos para as mostras de compost.

Mostra	DEA20h (mgO ₂ /gSV)	VECOM (mgO ₂ /gSV)	DBO 5 días (mgO ₂ /gSV)		DBO5días/DEA20h		Gradiente térmico
			Escala menor	Escala maior			
C1	4,705	0.356	16,89	19,66	3,590	4,179	3,13
C2	8,975	0.6495	18,625	21	2,075	2,340	14,5
C3	54.675	4.15	107.94	110.59	1.974	2.023	41,2
C4	50.08	4.152	113.3	146.88*	2.26	2.93	46,15
L1	64,02	16.075	135,84	147,31	2,122	2,301	54,55
L2	108,76	13.38	221,63	229,23	2,038	2,108	46,6
L3	7,115	0.659	14,57	15,54	2,048	2,184	4,7
L4	14,155	1.295		35,95	-	2,540	15,4

O dato da DBO de C4 marcado (*) é o que máis se desvía da tendencia que seguen o resto, pero revisando o procedemento experimental non hai nada que nos faga indicar que se produciron erros, de maneira que conservaremos ese dato e usáremolo para o tratamento de datos.

3.6.1 DEA20h FRONTE A DBO

Se representamos graficamente o consumo de osíxeno acumulado 20 horas obtido mediante a respirometría (DEA20h) fronte a media do consumo de osíxeno acumulado 5 días obtido coa DBO obteremos o seguinte gráfico (Figura 40).

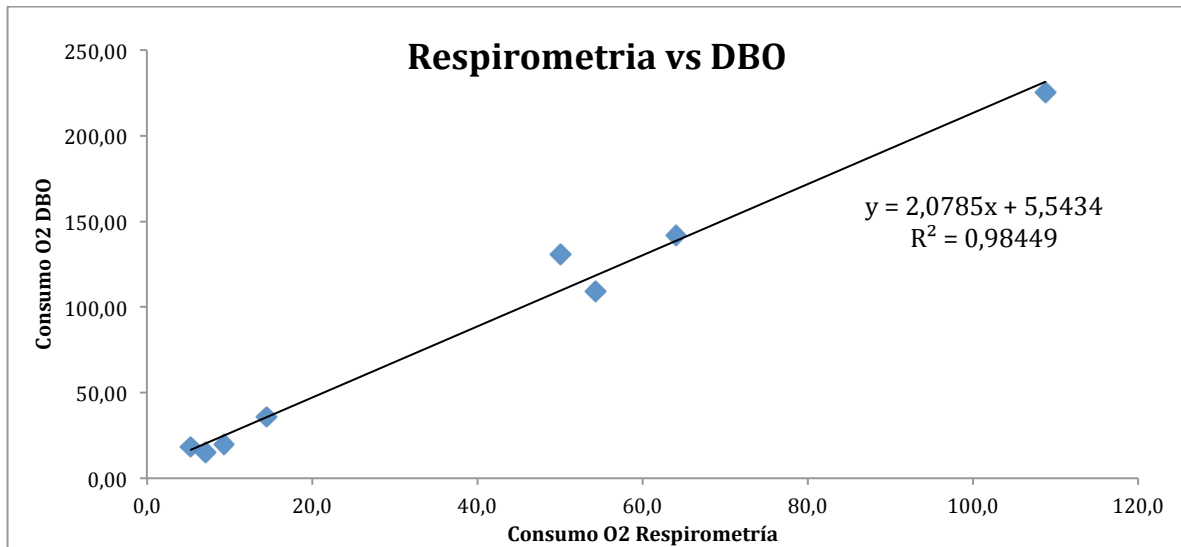


Figura 40. Relación do consumo de O₂ obtido mediante DEA20h e DBO5d.

Vemos que temos un axuste bastante bo, cunha pendente próxima a 2, isto quere dicir que os valores de DBO5 (consumo acumulado a 5 días) obtidos para cada mostra de compost dan un resultado que é o dobre do consumo acumulado de osíxeno en 20h obtido mediante a proba de respirometría para unha mesma mostra.

Agruparemos agora algunha das mostras en función a dous factores, tendo en conta o lugar de procedencia e polo seu grado de maduración, para así poder apreciar de maneira máis clara as posibles diferenzas entre eles, e poder observar como inflúe a procedencia do material e o grao de maduración na correlación entre os métodos.

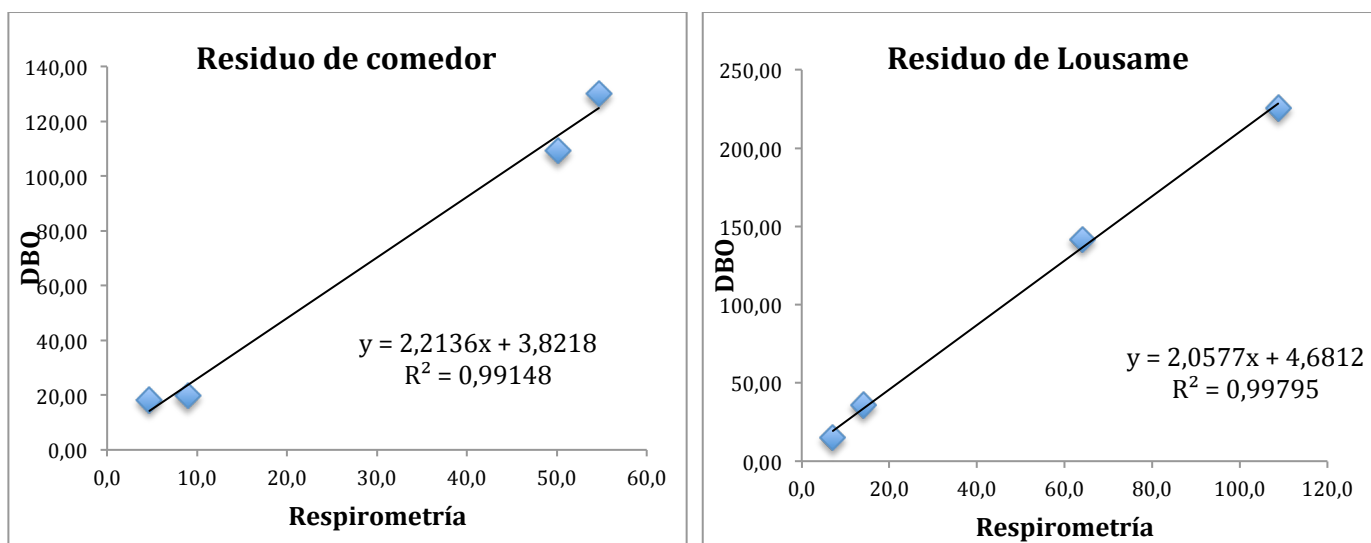


Figura 41. Relación entre DEA20h e DBO5d separados en función da súa procedencia.

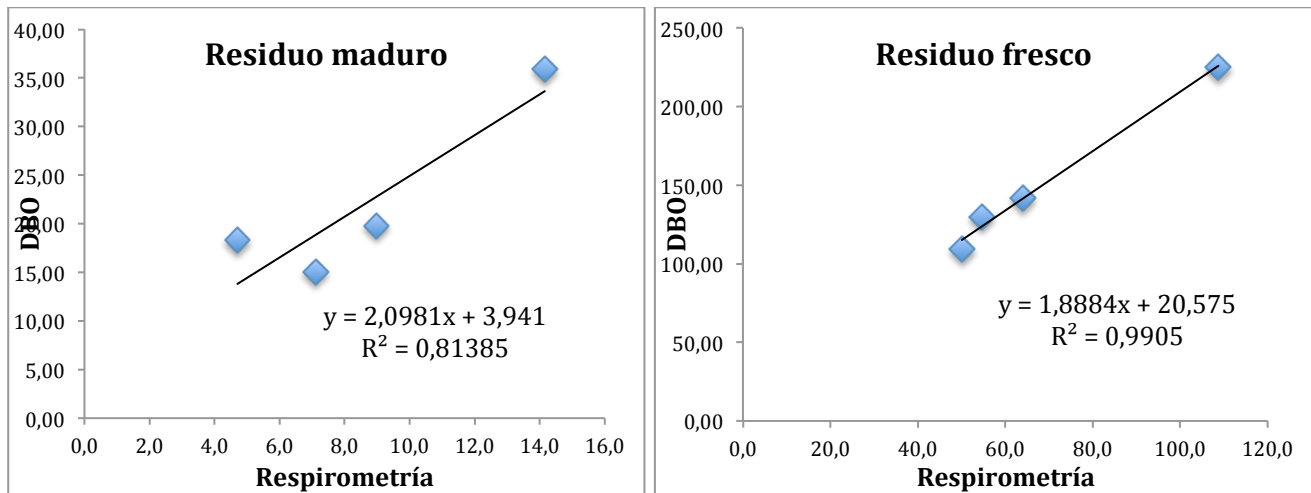
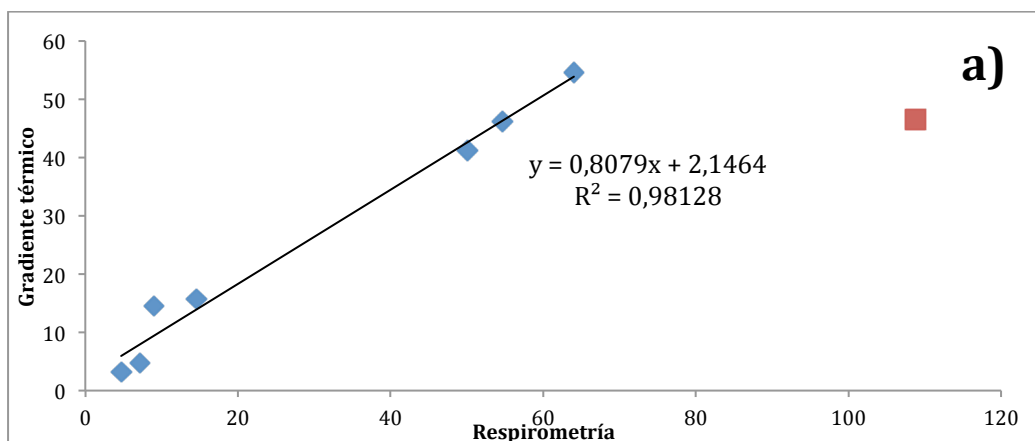


Figura 42. Relación entre DEA20h e DBO5d separados en función da súa estabilidade.

Observamos por tanto que todos os gráficos mostran unha correlación similar e unha linealidade bastante boa, salvo o gráfico de residuo maduro (Figura 42), no que temos un dato (C1) que claramente se desvía. Porén, tamén podemos observar que, de descartarmos este dato, a pendente da correlación aumentaría, diferenciándose aínda máis da obtida para o compost fresco. Neste sentido, se ben a correlación global é boa, os resultados parecen suxerir que o cociente DBO5/VC020h diminúe ao aumentar a biodegradabilidade da mostra. Tamén vemos que o residuo de Lousame e o residuo de comedor (Figura 41) mostran un axuste moi similar, por o que pódese pensar que o lugar de procedencia da mostra non afecta de maneira clara a correlación entre os diferentes métodos.

3.6.2 ROTTEGRADE FRONTE RESPIROMETRÍA E DBO

Para comparar agora os métodos respirométricos cos obtidos por Rottegrade (variación de temperatura) representaremos os valores do máximo do gradiente de temperatura acadada por cada mostra fronte ao consumo de osíxeno acumulado 20h, medido mediante respirometría (Figura 43a) e fronte o consumo de osíxeno acumulado 5 días, medido mediante DBO (Figura 43b).



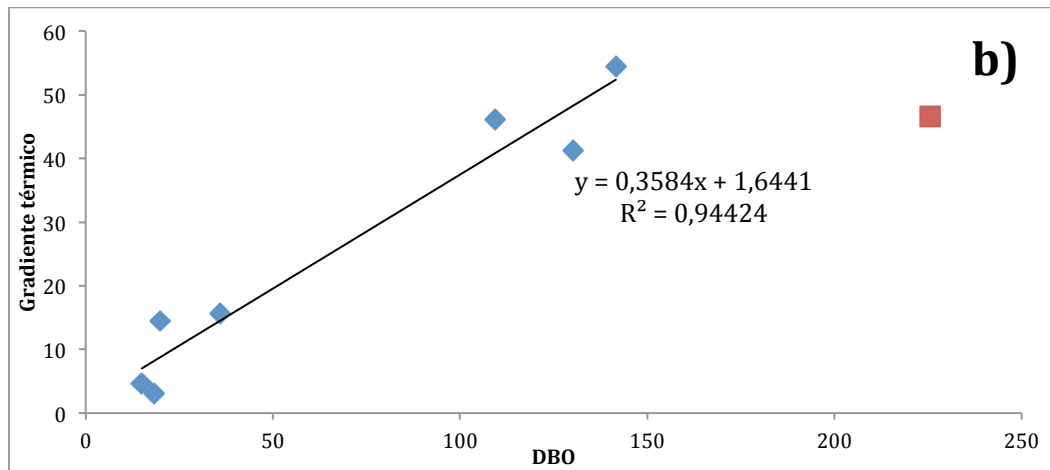


Figura 43a). Relación entre o gradiente de temperatura e o consumo de O_2 mediante DEA20h e b) Relación entre o gradiente térmico e o consumo de O_2 obtido mediante DBO5d.

Vemos que en ambos casos temos unha linealidade bastante boa sempre que descartemos un dato, o correspondente a mostra L2. Esta variación podemos explicala en función da composición da mostra, xa que se trata de FORU, mostra fresca sen estruturante, segundo o explicado no apartado 1, ao non presentar aireación, a degradación da materia orgánica será moito menos eficiente, e por tanto a temperatura acadada pola mostra será inferior a esperada. Outra posibilidade é que só poida existir linealidade até un valor máximo de DBO5 ou DEA020 correspondente a un gradiente de aproximadamente 50 °C, e que biodegradabilidades maiores dean a mesma clase Rottegrade, que de feito é xa a clase I ou máxima biodegradabilidade. Neste sentido, compre ter en conta que un gradiente de 50 °C, sobre unha temperatura ambiente (control) de 20 °C, corresponde a unha temperatura de compostaxe de 70°C, que está próxima ao nivel máximo de viabilidade do proceso.

3.6.3 VECOm FRONTE DBO

Compararemos agora os consumos máximos obtidos mediante respirometría coa DBO ou media de DBO correspondente. A representación gráfica do conxunto de datos presentase a continuación (Figura 44).

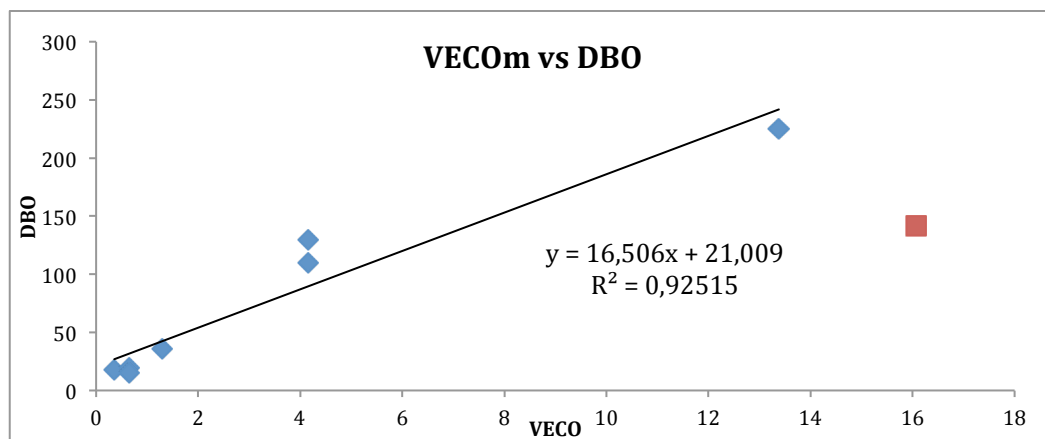


Figura 44. Relación entre a VECOm e a DBO5d.

Xa de primeiras vemos como un dos datos se desvía moito da linealidade que mostran os demais. Corresponde a mostra L1, que como se explica xa no apartado 3.4.5 tivo un comportamento estraño, é dicir, a mostra tardou moito en activarse e comezar a consumir osíxeno, pero despois o consumo total acumulado adaptouse perfectamente a linealidade esperada, de maneira que o máximo para que isto pasase tivo que ser moito mas alto do que se esperaría para este tipo de mostra. De todas maneiras, vemos como a correlación entre os diferentes métodos utilizados non é boa, presentando unha linealidade baixa entre eles, e facéndonos supoñer que a relación entre os métodos tampouco é boa.

3.6.4 VECOm fronte a DEA20h

Por último comprobaremos a relación entre dous datos obtidos realizando a mesma proba, a respirometría. No gráfico (Figura 45) enfrontaremos o consumo acumulado de osíxeno en 20 horas co consumo de osíxeno máximo.

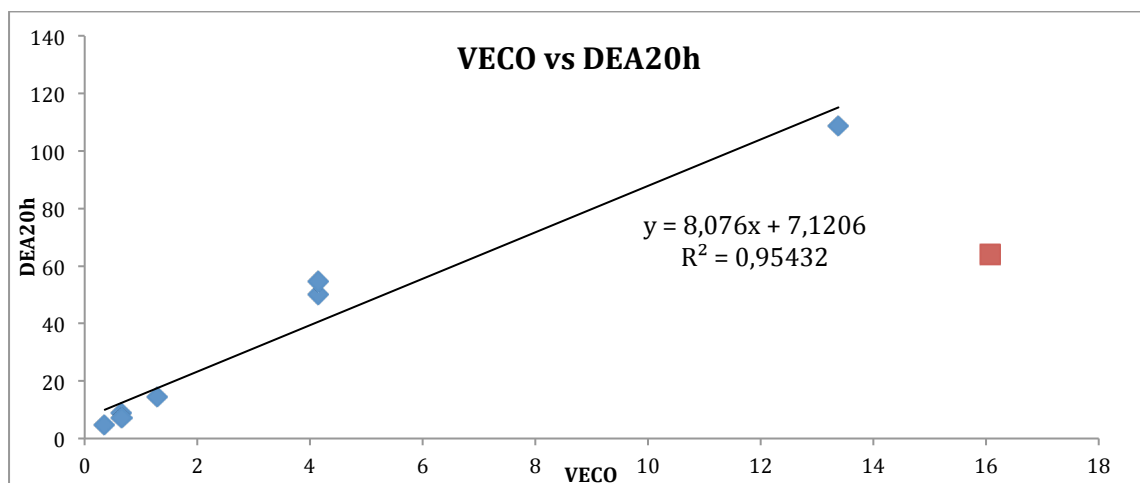


Figura 45. Comparación da VECO coa DEA20h.

Debemos descartar o dato L1 polo mesmo motivo que o explicado nos apartados anteriores. Vemos como aínda así o axuste que temos non é demasiado bo, pero podemos chegar a sacar unha relación lineal entre os datos.

4. Conclusións

En función das probas realizadas e tendo en conta os datos obtidos podemos concluír que existe unha clara relación entre todas elas, e dicir, que os métodos son comparables entre eles. Tamén observamos grandes diferencias a hora de tratar os datos, xa que para a proba da DBO e o Rottegrade, case non temos que tratar os datos, e a información que nos proporcionan os instrumentos de medida xa nos dan unha idea bastante clara de como van ser os resultados finais. Por outra banda, para a respirometría necesitamos un tratamento de datos moito máis elaborado, ademais de ser un método moito menos robusto e cunha elaboración moito máis complexa e unha probabilidade de erro maior.

Ao comparar os diferentes métodos de análise co método de referencia actual, a respirometría, puidemos comprobar que temos un mellor axuste con compost activos e que a relación entre a DBO e a respirometría é un chisco máis baixa para estas mostras que para as mostras estabilizadas. Esta diferenza non se produciu co Rottegrade, a relación entre mostras activas e mostras estabilizadas podemos considerala igual. Tamén comprobamos que o tipo de compost en función da súa procedencia non afecta a relación entre métodos, algo de grande interese, xa que de comprobarse con mostras doutras procedencias diferentes podería levar á considerar o método de DBO5 como universalmente válido.

En base a todo o exposto anteriormente, podemos afirmar que a determinación do grado de maduración dunha mostra de compost pode ser levada a cabo por calquera dos 3 procedementos explicados anteriormente, sendo estes os pros e contras de cada un deles.

- O método mas sinxelo será o de Rottegrade, pero pode presentar problemas como na mostra L1, na que por un problema no almacenamento da mostra, esta tardou moito tempo en comezar a coller temperatura, podendo iso inducirnos a erro, ademais é unha proba que necesita como mínimo de 9 días para obter resultados, polo que requirirá de bastante tempo pero pouca supervisión.
- O método máis rápido para obter resultados será o da respirometría, pero require unha elaboración complicada, un grado de supervisión alto e un equipamento máis caro. Ademais presenta bastantes problemas para obter un resultado válido se non se realiza con todo o coidado necesario.
- A DBO non é o método máis rápido nin o máis sinxelo, pero presenta unha elaboración bastante sinxela e ningún tipo de supervisión durante os 5 días que dura o procedemento. Por outra banda, os equipos de DBO5 utilízanse de forma rutineira na caracterización de auga residual e están altamente estandarizados e dispoñibles na maioría de laboratorios ambientais.

Por tanto, e pese a non ser de momento un método estándar para a súa aplicación á determinación da estabilidade de compost e residuos, podemos concluír que a técnica da DBO proporciona un resultado fiable para a caracterización do compost de residuos urbanos procedente tanto de compostadores domésticos como industriais.

4. Conclusiones

En función de las pruebas realizadas y teniendo en cuenta los datos obtenidos podemos concluir que existe una clara relación entre todas ellas, es decir, que los métodos son comparables entre ellos. También observamos grandes diferencias a la hora de tratar los datos, ya que para la prueba de la DBO y el Rottegrade, casi no tenemos que tratar los datos, y la información que nos proporcionan los instrumentos de medida ya nos dan una idea bastante clara de como van a ser los resultados finales. Por otro lado, para la respirometría necesitamos un tratamiento de datos mucho mas elaborado, ademas de ser un método menos robusto y con unha elaboración mucho mas compleja y una posibilidade de error mayor.

Al comparar los diferentes métodos de análisis con el método de referencia actual, la respirometría, pudimos comprobar que tenemos un mejor ajuste con compost activos y que la relación entre la DBO y la respirometría es un poco mas baja para estas muestras que para las muestras estabilizadas. Esta diferencia no se produjo con el Rottegrade, la relación entre las muestras activas y las muestras estabilizadas podemos considerarla igual. También comprobamos que el tipo de compost en función de su procedencia no afecta a la relación entre métodos, algo de gran interes, ya que de comprobarse con muestras de otras procedencias diferentes podría llevar a considerar el método de DBO5 como universalmente válido.

En base a todo lo expuesto anteriormente, podemos afirmar que la determinación del grado de maduración de una muestra de compost puede ser llevada a cabo por cualquiera de los 3 procedimientos explicados anteriormente, siendo estos los pros y los contras de cada uno de ellos.

- El método mas simple será el del Rottegrade, pero puede presentar problemas como en la muestra L1, en la que por un problema en el almacenamiento de la muestra, esta tardó mucho tiempo en comenzar a coger temperatura, pudiendo eso inducirnos a error, además es una prueba que necesita como mínimo de 9 días para obtener resultados, por lo que requerirá de bastante tiempo pero poca supervisión.
- El método mas rápido para obtener resultados será el de la respirometría, pero requiere una elaboración complicada, un grado de supervisión alto y un equipamiento mas caro. Además presenta bastantes problemas para obtener un resultado válido si no se realiza con todo el cuidado necesario.
- La DBO no es el método mas rápido ni el mas simple, pero presenta una elaboración bastante simple y ningún tipo de supervisión durante los 5 días que dura el procedimiento. Por otro lado, los equipos de DBO5 se utilizan de forma rutinaria en la caracterización de agua residual y están altamente estandarizados y disponibles en la mayoría de los laboratorios ambientales.

Por lo tanto, y pese a no ser de momento un método estandar para su aplicación a la determinación de la estabilidad de compost y residuos, podemos concluir que la técnica de la DBO proporciona un resultado fiable para la caracterización de compost y residuos urbanos procedentes tanto de compostadores domésticos como industriales

4. Conclusions

Based on the tests carried out and taking into account the data obtained, we can conclude that there is a clear relationship between all of them, that is, the methods are comparable. We also observe great differences when it comes to processing the data, since for the BOD and Rottegrade test we hardly have to deal with the data, and the information provided by the measuring devices gives us a clear idea of what the final results will be like. . On the other hand, for respirometry we need a much more elaborate data treatment, in addition to being a much less robust method, with a much more complex elaboration and a higher possibility of error.

When comparing the different methods with the current reference method, respirometry, we could verify that we have a better adjustment with active compost and that the relationship between BOD and respirometry is a bit lower for these samples than for stabilized samples. This difference did not occur with the Rottegrade, the relationship between active and stabilized samples can be considered equal. The type of compost based on its origin does not affect the relationship between methods, something of great interest, since if tested with samples from other sources could make consider the DBO5d as a universally valid method.

We can say that the determination of the degree of maturation of a compost sample can be carried out by any of the 3 methods explained above, these being the pros and cons of each of them.

- The simplest method will be the Rottegrade, but it can present problems as in the sample L1, in which due to a storage problem, it takes a long time to start to pick up temperature, which could lead to an error. It is also a test that requires time, since you need a minimum of 9 days to get results.
- The fastest method to obtain results will be the respirometry, but it requires a complicated elaboration, a high degree of supervision and a more expensive equipment. In addition, it presents enough problems to obtain a valid result if it is not carried out with all the necessary care.
- BOD is not the fastest or the simplest method, but it has a fairly easy preparation and no supervision during the 5 days of the test. On the other hand, BOD equipment is used routinely in the determination of wastewater quality and is highly standardized and available in any environmental laboratory

Therefore, despite not being a standard method for the application of the stabilization of compost and residues, we can conclude that the DBO technique provides a reliable result for the characterization of urban waste compost from both domestic and industrial composters.

5.Referencias

- Abad, M.; Nogueira, N.P.; Carrión, C., 2004. Los substratos en los cultivos sin suelo.
- Adani, F., Gigliotti, G., Valentini, F., Laiara, R., 2003. Respiration index determination: A comparative study of different methods.
- Manual de compostaje. Amigos de la Tierra. Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino, Madrid.
- Bunt, A.C., 1988. Media and mixes for container-grow plants. Ed. Unwin Hyman. London.
- Agnew, J.M., Leonard, J.J., 2003. The physical properties of compost. *Compost Sci.*
- Adhikari, B.K., Barrington, S., Martinez, J., King, S., 2008. Characterization of food waste and bulking agent for composting.
- Álvarez, J.A y Garabatos, M.D., 2011. A codigestion anaerobia como sistema de producción de enerxía a partir de residuos. Adegas-Cadernos.
- Kaiser, J., 1996. Modelling composting as a microbial ecosystem: a simulation approach. *Ecol. Modell.*
- Chang, J.I., Hsu, T.E., 2008. Effect of compositions on food waste composting. *Bioresour. Technol*
- O.G. Gael, I. Ruiz, M. Soto (2017). Integrating pretreatment and denitrification in constructed wetland systems. *Science of the Total Environment* 584-585: 1300-1309.
- Keener, H.M., Dick, W.A., Hoitink, H.A.J., 2000. Composting and beneficial utilization of composted by-product materials. In: Dick, W.A. (Ed.), *Land Application of Agricultural, Industrial, and Municipal By-Products*. Soil Science Society of America, Inc., Madison.
- Rasapoor, M., Nasrabadi, T., Kamali, M., Hoveidi, H., 2009. The effects of aeration rate on generated compost quality, using aerated static pile method. *Waste Manage.*
- Ansorena, M.J., 1994. *Sustratos, propiedades y caracterización*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Das, K., Keener, H.M., 1997. Moisture effect on compaction and permeability in composts. *J. Environ.*
- Zhu, N.M., 2006. Composting of high moisture content swine manure with corncob in a pilot-scale aerated static bin system. *Biores. Technol.*
- Del Val, A., 2011. "El problema de los residuos en la sociedad del bienestar" *El planeta tierra*. Biblioteca Ben rRosch. Vol. III
- Xunta, 2008. Plan de xestión de residuos urbanos de Galicia (PXRUG) 2007-2017. Conselleria de Medio Ambiente e Desenvolvemento Sostible, Santiago de Compostela.

Lasardi, K.E. e Steindford, E.I., 1998. A simple respirometric technique for assessing compost stability. *Water Res.*

Bidlingmaier, W., 1996. Oudor emissions from composting plants. En: de Bertoldi, M., Sequi, P., Lemmes, B. e Papi, T. (Eds.). *The Science of Composting*, vol I. Blackie Academic and Professional, London.

Ventajas del Compostaje (2015) Amigos de la Tierra. Disponible na web
https://www.tierra.org/wp-content/uploads/2016/01/Informe_compost_2015_.pdf

Miller, F.C., 1996. Compostin of municipal solid waste and its components in Palmisano A.C.; Barlaz, M. (Ed.) *Microbiology of Solid Waste*. CRS, USA.

Olo Alcasena, M.A., 2014. Evaluación de distintos compost (industrial y doméstico) como ingrediente de substrato y la acción de lavado sobre los mismos en pensamientos. Universidad Pública de Navarra.

Pérez, R. E Soto, M., 2003. Manual de compostaxe caseira. Pequeno manual.

Gajalakshmi, S., Abbasi, S.A., 2009. Solid waste management by composting: state of the art. *Crit. Rev. Environ. Sci Technol.*

Tiquia, S.M., 2010. Reduction of compost phytotoxicity during the process of decomposition. *Chemosphere.*

Vázquez, M.A., 2015. Compostaxe descentralizada de residuos orgánicos: do ámbito doméstico á granxa. Tese de doutoramento. UNIVERSIDADE DA CORUÑA.

