

3.5. Nitrificació-desnitrificació

El tractament de nitrificació-desnitrificació (NDN) es basa en un **procés biològic** que té com a objectiu **l'eliminació del nitrogen de la fracció líquida del purí**, present majoritàriament en forma de nitrogen amoniacal (NH_4^+), transformant-lo a nitrogen molecular (N_2), un gas innocu i inert que constitueix gairebé el 80% de l'atmosfera. Així doncs, previ a aquest tractament, cal dur a terme una separació sòlid-líquid del purí. És la única tecnologia de tractament que permet eliminar efectivament el nitrogen amoniacal, però això comporta de fet la pèrdua d'un recurs amb valor com a fertilitzant. És per aquest motiu que la [Decisió d'Execució \(UE\) 2017/302 de la Comissió Europea](#), que va entrar en vigor el 21/02/2017, sobre les millors tècniques disponibles (MTD) per al tractament de les dejeccions a escala d'explotació ramadera estableix que el tractament per NDN no és aplicable a les naus/explotacions noves, i només és permesa en explotacions existents.



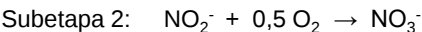
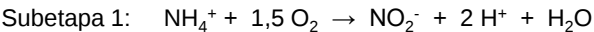
3.5.1. Fonament científic-tècnic

El tractament per NDN consta d'una primera fase aeròbia (que requereix oxigen) coneguda com a nitrificació, on el nitrogen amoniacal és oxidat a nitrit (NO₂⁻) i posteriorment a nitrat (NO₃⁻), i d'una segona fase anòxica (en absència d'oxigen i presència de nitrat) o desnitrificació en què es requereix presència de matèria orgànica i on el nitrat es transforma a nitrogen molecular. Durant la nitrificació, l'oxidació de l'amoni a nitrat és duta a terme pels bacteris nitrificants que utilitzen el carboni inorgànic per créixer (microorganismes autòtrofs), essent el nitrit un intermedi d'aquesta reacció. Durant la desnitrificació, en canvi, el nitrat acumulat en la fase anterior és reduït a nitrogen molecular pels bacteris desnitrificants gràcies a la presència de carboni orgànic, normalment expressat en termes de demanda química d'oxigen (DQO), disponible per al seu creixement (microorganismes heteròtrofs). A la Taula 3.5.1 es resumeixen les reaccions bioquímiques implicades en el procés de NDN.

Existeixen multitud de sistemes que permeten dur a terme el procés de NDN en funció de si els microorganismes (biomassa) dins del reactor estan suspesos en el líquid o bé adherits sobre algun tipus de suport, i de si el reactor s'alimenta en continu o bé per cicles, tal com es resumeix en la Figura 3.5.1. En la seva configuració més habitual en l'àmbit ramader, el procés de NDN es realitza en un sol reactor operat de forma discontinua, amb fases de càrrega i descàrrega, i seqüencial, en què s'alternen cicles d'aeració i d'anòxia per afavorir els processos de nitrificació i desnitrificació, respectivament. En aquests sistemes, coneguts com a **reactor discontinu seqüencial** (en anglès SBR), la biomassa es manté suspesa durant les fases d'aeració i d'anòxia per tal d'afavorir la reacció biològica. Periòdicament, es deixa sedimentar la biomassa dins del propi reactor per tal de permetre la descàrrega del líquid tractat.

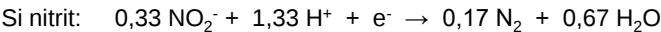
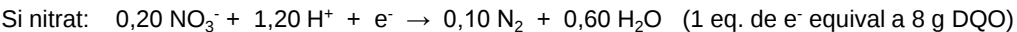
Taula 3.5.1. Reaccions bioquímiques del procés de NDN.

NITRIFICACIÓ



Durant la nitrificació, per cada gram de N en format de NH₄⁺ oxidat a NO₃⁻ es consumeixen 4,6 g de O₂ i 7,1 g d'alcalinitat (CaCO₃). En particular, durant la subetapa 1 es consumeix el 75% del O₂ i el 100% de l'alcalinitat.

DESNITRIFICACIÓ



Durant la desnitrificació, per cada gram de N en format de NO₃⁻ reduït a N₂ es consumeixen 2,9 g de DQO si no es té en compte la formació dels fangs biològics (~5-6 g DQO en cas de considerar-la) i es produeixen 4,3 g d'alcalinitat (CaCO₃). Si es considera la reducció de l'intermedi NO₂⁻ a N₂, els requeriments en DQO són aproximadament un 40% inferiors.

Sistemes de NDN	Biomassa suspesa (fangs activats)	Continus	CSTR (+)
			Flux en pistó (-)
	Biomassa fixada (-)	Discontinus	SBR (+++)

Figura 3.5.1. Classificació dels sistemes de nitrificació-desnitrificació i nivell d'implementació en el marc agrari: alt (+++), mitjà (++), baix (+), no utilitzat (-). Tipus de reactor: reactor de mescla completa (CSTR) i reactor discontinu seqüencial (SBR).

3.5.2. Implementació a la granja

El tractament per NDN **s'aplica únicament a les fraccions líquides dels purins**, i per això cal implementar un sistema de separació sòlid-líquid previ (vegeu l'apartat 3.1). Aquest pretractament ajuda a reduir els requeriments d'oxigen, i per tant els costos associats al consum d'electricitat, i a evitar possibles problemes durant el tractament degut a l'elevada producció de fangs biològics, sedimentació o obstrucció d'equips. D'un sistema NDN se n'obtenen dues sortides: **l'efluent líquid tractat** i el **fang biològic**. D'altra banda, el tractament s'acostuma a implementar sota diferents configuracions: principalment amb un sol tanc i una dimensió temporal, alternant agitació, aeració i sedimentació, o bé utilitzant diversos tancs específics i una dimensió espacial, mitjançant reactors en seqüència amb i sense aeració (Figura 3.5.2).



Figura 3.5.2. Imatge superior: Planta de nitrificació-desnitrificació mitjançant aeració intermitent en un únic reactor (SBR), que consta d'un dipòsit de recepció dels purins (A), un separador sòlid-líquid de cargol-premsa (B), una zona d'emmagatzematge de la fracció sòlida (C) i de la fracció líquida (D), un reactor de nitrificació-desnitrificació (E), i la bassa d'emmagatzematge de l'aigua tractada (F). Imatge inferior: Reactors òxic i anòxic separats pel tractament en continu de la fracció líquida dels purins.

Cal tenir en compte que un emmagatzemament perllongat de les dejeccions abans del tractament, o bé alguns pretractaments inclosa la separació sòlid-líquid o la digestió anaeròbia poden afectar negativament la disponibilitat de carboni orgànic durant la desnitrificació. Per altra banda, per causa de la dependència del procés d'unes poblacions microbianes molt específiques, la temperatura ambiental afecta significativament l'eficiència de tractament (la temperatura òptima dins el reactor és d'uns 35°C). La degradació heteròtrofa de carboni orgànic comporta la generació de calor, però les condicions de camp solen comportar temperatures d'operació més baixes, que fins i tot poden arribar a inhibir el procés durant l'hivern.

Taula 3.5.2. Elements bàsics d'una planta de nitrificació-desnitrificació de la fracció líquida dels purins a una explotació ramadera.

Infraestructures

- Reactors biològics: Un o diversos reactors, en funció de si el sistema és seqüencial o continu, correctament dimensionats d'acord amb el cabal de la fracció líquida a tractar, la concentració de nitrogen total i els temps de retenció hidràulic i cel·lular necessaris (entre 10 i 20 dies), correctament impermeabilitzats i si pot ser aïllats tèrmicament.

Equips

- Sistema d'aeració: Per al subministrament d'oxigen al reactor durant la fase de nitrificació, dimensionat segons les característiques de la fracció líquida a tractar i les característiques del reactor.
- Sistema d'agitació: Per garantir la suspensió de la biomassa durant les fases anòxiques de desnitrificació.

Elements de control

- Sensors: Mesuradors de l'oxigen dissolt i del potencial redox, per garantir una correcta aeració i anòxia durant els processos de nitrificació i desnitrificació, així com del pH i la temperatura per tal que es mantinguin dins dels rangs òptims del procés.

Additius i altres materials

- Additius: Correctors de pH, fonts carbonatades, floculants, antiespumants, etc. Habitualment, però, aquests materials són poc utilitzats a escala d'explotació ramadera.
-



3.5.3. Eficiència del tractament

Sota condicions d'operació adients, el rendiment global d'eliminació de nitrogen està al voltant del 50-70%. La resta del nitrogen és separat amb la fracció sòlida durant el pretractament, assimilat pel fang biològic, o bé romandrà en el líquid efluent o serà emès a l'atmosfera en forma d'amoniac (NH_3) o òxid de dinitrogen (N_2O). Si el rendiment s'avalua sobre la fase líquida tractada, aleshores aquesta pot arribar a ser superior al 90%. No obstant això, l'eficiència del procés dependrà en gran mesura de les condicions d'operació aplicades. L'eficiència d'eliminació de nitrogen reconeguda com a tecnologia consolidada dins el marc català és del 60%.





3.5.4. Ús agronòmic dels productes obtinguts

L'objectiu de la tecnologia de tractament per NDN és convertir el nitrogen amoniacal a nitrogen molecular (Taula 3.5.1), un gas inert que conforma gairebé el 80% de l'aire atmosfèric que respirem. Aquest procés és l'invers del que es coneix com a la reacció de Haber-Bosch, en què el nitrogen molecular atmosfèric es fa reaccionar amb l'hidrogen a partir d'un procés de reforming amb gas natural a alta pressió i temperatura, per produir amoníac a nivell industrial com a base dels fertilitzants inorgànics. Aquest procés té un cost energètic força important, que suposa del 3 al 5% del consum de gas natural a escala global. És per aquest motiu que les polítiques de la Unió Europea volen incentivar la recuperació del nitrogen de les dejeccions, més que no pas la seva eliminació. Tal com s'ha dit anteriorment, l'aplicació del procés de NDN per al tractament de les dejeccions és una tecnologia vàlida només per a les explotacions ramaderes ja existents. Per altra banda, per cada metre cúbic de fracció líquida tractada, es generen uns 5-10 kg en pes sec de fangs biològics. En aquest cas, estaríem parlant d'un fertilitzant de Tipus 2 (relació C/N baixa), que pot ser aplicat directament al conreu o tractat mitjançant el compostatge o l'asseccament solar.

Per a l'aplicació directa de l'efluent del tractament per NDN com a fertilitzant s'ha de tenir en compte la baixa concentració de nitrogen respecte de fòsfor i potassi. Segons quina sigui la intensitat de nitrificació i/o el procés de separació dels fangs del reactor, la relació P/N o K/N pot variar sensiblement. En els sistemes de NDN més intensius, la relació P/N i K/N pot prendre valors típics de 3 i 10, respectivament. En altres paraules, per cada quilogram de nitrogen, també s'apliquen 3 kg de fòsfor (P_2O_5) i 10 kg de potassi (K_2O). En canvi, en sistemes menys intensius, la relació P/N i K/N no és tan gran, al voltant d'1 per la relació P/N i de 3 per la relació K/N. Per tant, per a una fertilització més acurada, el nutrient limitant a l'hora d'ajustar la dosi ja no és el nitrogen sinó que serà el fòsfor o el potassi.

3.5.5. Control de les emissions

Cal tenir en compte que durant el procés de NDN es produeixen **òxids de nitrogen**, principalment òxid de dinitrogen, com a productes intermediaris de les reaccions bioquímiques esmentades a la Taula 3.5.1. Aquests compostos s'emeten a l'atmosfera quan les condicions d'operació no són les òptimes i tenen un elevat impacte com a gas d'efecte hivernacle. Si l'aeració no és prou eficient, també es poden produir emissions de metà, un altre gas d'efecte hivernacle. En cas contrari, si l'aeració és excessiva, s'afavoreix la volatilització d'amoníac. Factors com ara l'aeració durant la nitrificació, que pot contribuir a desplaçar el pH dins el reactor fora del rang habitual i afavorir l'acumulació de compostos nitrogenats parcialment oxidats, o bé la disponibilitat de matèria orgànica fàcilment biodegradable per a desnitrificar, poden afectar aquestes emissions no desitjades. Així mateix, factors ambientals com la temperatura o el vent també són importants. En els reactors seqüencials amb aeració intermitent, l'emissió acostuma a assolir un pic en aquells moments en què es reprèn l'aeració després d'un període anòxic.



3.5.6. Costos d'inversió i operació

La inversió inicial per a la construcció de la planta representa una part força important dels costos del tractament de les dejeccions mitjançant el procés de NDN. D'acord amb les dades recents d'un proveïdor de la tecnologia dels reactors discontinus seqüencials (SBR), aquestes despeses oscil·len entre els 283.250 € per a una capacitat de tractament d'un màxim de 15 m³/d, fins a 412.000 € per al tractament de 50 m³/d. A aquestes quantitats totals caldrà afegir-hi, en cas que sigui necessari, els costos associats a l'obra civil (preparació del terreny, construcció de basses i reactors) que es preveuen entre 65.000 € i 150.000 €. Pel que fa als costos de funcionament, la principal despesa dels sistemes de NDN està relacionada amb les necessitats energètiques per a l'aeració (aportació d'oxigen) durant la fase de nitrificació, que poden arribar al 75% del total de la demanda elèctrica del sistema de tractament. Les necessitats elèctriques lligades a l'aeració depenen de la composició de les dejeccions (4,6 kg O₂/kg N-NH₄⁺), l'eficiència en la transferència d'oxigen a la fase líquida de l'equip d'aeració (valors típics d'1,5-2,5 kg O₂/kWh) i les condicions d'operació emprades. Altres elements mecànics que també contribueixen al consum elèctric són el sistema previ de separació sòlid-líquid, les bombes d'impulsió de líquids o els agitadors. Globalment, el consum elèctric associat als sistemes de tractament NDN se situa entre 10 i 25 kWh/m³. El cost final del tractament dependrà, en bona mesura, del preu de l'energia elèctrica. A l'exemple de la Taula 3.5.3 es presenta una estimació dels costos d'una planta de NDN per a una granja de porcs d'engreix de dimensió mitjana típica.



Taula 3.5.3. Exemple d'aplicació de la nitrificació-desnitrificació (NDN) per tractar els purins d'una granja de porcs d'engreix.

Dimensionament

- La granja en qüestió té 4.000 places (exemple A de la Taula 3.1), i cada any genera 3.000 m³ de purins que contenen un 7,82% de matèria seca i 6,28 kg de nitrogen total per cada m³.
- La planta inclourà un pretractament de separació sòlid-líquid mitjançant un sistema de cargol-premsa que, gràcies a la utilització de floculants, tindrà una eficiència de separació dels sòlids i del nitrogen del 15% i 20%, respectivament (Taula 3.1.3).
- La tecnologia de NDN a implantar es fonamenta en únic reactor biològic operat en discontinu de forma seqüencial (SBR), dimensionat per un temps de retenció d'uns 20 dies. Considerant una generació diària de 6,58 m³ de purins, el volum del reactor haurà de ser de com a mínim 140 m³.
- El sistema inclourà un sistema per purgar els fangs del reactor que tindrà un eficiència de separació pel nitrogen del 30% respecte la sortida del reactor
- També cal incloure les basses de recepció de la fracció líquida separada, l'emmagatzematge l'efluent tractat, així com dels fangs generats.

Costos d'instal·lació

- El costos de construcció de l'obra civil, que inclou el reactor biològic, les basses per recollir la fracció líquida separada i l'efluent líquid tractat, i el sòcol per acumular la fracció sòlida, s'estimen en 50.000 €, amb una vida útil de 20 anys.
- La maquinària i les instal·lacions (separador sòlid-líquid, agitadors, bombes, sistemes de control, etc.) tenen un cost de 170.000 €, que inclou també el manteniment, amb una vida útil de 10 anys.

Costos de consumibles

- Es consumeixen 0,2 kg d'un producte polielectròlit concentrat per cada m³ de purí tractat que té un cost de 3,25 €/kg (0,65 € per m³ de purí), fet pel qual la despesa anual del consum de floculants serà de 1.950 €.
- El consum elèctric de la planta de tractament és de 15 kWh/m³. Si prenem com a referència el cost mitjà durant el 2018 del kWh (0,1246 €), això representa una despesa anual de 5.607€.

Beneficis de la venda

- Es considera que la fracció sòlida resultant de la separació sòlid-líquid i els fangs actius purgats del reactor són cedits a una planta de compostatge, que a canvi les ve a recollir sense cost.

Cost unitari del tractament

- El cost anual equivalent de la instal·lació sencera, calculat amb una taxa d'interès del 3%, serà de 10,28 € per cada tona de purins tractats. Pel que fa al nitrogen gestionat, això és el recuperat amb la fracció sòlida i fangs (30%) i l'eliminat de la fracció líquida restant (eficiència del 60%), el cost de tractament serà de 2,11€ per cada quilo de nitrogen.



Taula resum del balanç econòmic

Concepte	Costos (€)		Ingrés (€)
	Total	CAE ^a	
Obra civil	50.000	3.361	
Maquinària	170.000	19.929	
Funcionament		7.557	
Costos totals	220.000	30.847	
Venda de la fracció sòlida/fangs			0
Balanç anual (€/any)		30.847	
Cost unitari de tractament (€/t)		10,28	
Cost del nitrogen eliminat (€/kg N)		3,41	
Cost del nitrogen eliminat i separat (€/kg N)		2,11	
Cost del fòsfor separat (70%) (€/kg P)		8,39	

^a Cost anual equivalent.