

Tubercultura de precisió: ús de receptors GNSS per a la geolocalització de tòfones en plantacions amb tòfona negra (*Tuber melanosporum* Vittad.).

Jose Manuel Plata^{1,3}, Dalmau Albó¹, Daniel Oliach², Àlex Escolà^{1,3}

1 Departament de Ciència i Enginyeria Forestal i Agrícola, Universitat de Lleida, 25198, Lleida, Espanya

2 Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya (CTFC), Ctra. de Sant Llorenç de Morunys, 25280, Solsona, Espanya

3 Fundació Centre de Recerca en Agrotecnologia (Agrotecnio), 25198, Lleida, Espanya

La georeferenciació en el món de l'Agricultura de Precisió (AP) i la silvicultura Els sistemes satel·litaris de navegació global (SSNG o GNSS, de l'anglès *Global Navigation Satellite Systems*), especialment quan incorporen correccions RTK (*Real Time Kinematic*), permeten posicionar punts sobre el terreny amb una precisió centimètrica (Hofmann-Wellenhof et al., 2020). Aquesta exactitud és fonamental per a la delimitació de parcel·les, la localització individualitzada d'arbres, la cartografia de detall i el seguiment evolutiu de les explotacions sota un marc espacial definit. En l'àmbit de l'Agricultura de Precisió (AP), aquest posicionament permet optimitzar les tasques de camp, minimitzar errors operatius i prendre decisions basades en dades geoespacionals rigoroses. En la gestió forestal, els GNSS són una eina clau per inventariar peus, delimitar unitats d'actuació i georeferenciar parcel·les d'assaig amb exactitud (Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020).

La tubercultura representa un escenari on convergeixen dinàmiques Les plantacions amb tòfona negra (*Tuber melanosporum* Vittad.) són un cas particular, ja que combinen elements agrícoles com la instal·lació de sistemes de reg i la mecanització pròpies de cultius agrícoles, amb l'ús d'espècies forestals del gènere *Quercus* i *Corylus*, entre d'altres. La productivitat d'aquests sistemes agroforestals està subjecta a factors edafoclimàtics com la precipitació i la temperatura estivals, així com la humitat, la textura i la temperatura del sòl, a més de l'estat fisiològic de la planta hosta (Büntgen et al., 2019; Alonso Ponce et al., 2014). La seva naturalesa hipogea (és a dir, completa el seu cicle sota terra) dificulta el seguiment dels carpòfors al llarg del seu creixement i maduració, i en limita l'obtenció sistemàtica de dades. El procés de collita també es troba condicionat per aquest fet i depèn, en gran mesura, de la qualitat i experiència del gos tofonaire, així com de la bona praxi del buscador que el condueix. Històricament, aquesta metodologia ha dificultat la traçabilitat de cada peça fent que, sovint, es perdi la informació sobre l'arbre o el punt exacte d'on s'ha extret. Aquesta carència de dades espacionals precises limita la capacitat del productor d'analitzar la productivitat real de la seva plantació i de comparar el rendiment entre campanyes o sectors d'una mateixa parcel·la.

Objectius de l'estudi

El present article planteja l'ús dels sistemes GNSS-RTK com a eina per geolocalitzar els arbres i les tòfones d'una plantació tofonera amb exactitud centimètrica i crear una base de dades espacial que faciliti l'anàlisi de patrons productius a nivell de parcel·la. Aquesta informació, combinada amb les variables ambientals convenientes, pot convertir-se en una referència per optimitzar la gestió de les explotacions tofoneres. L'objectiu d'aquest document divulgatiu és presentar una metodologia de georeferenciació aplicable a la tubercultura i validar-ne el seu ús, tot mostrant les principals dades que es poden extreure i les possibilitats que ofereix.

Metodologia de geolocalització de l'arbrat i registre de la producció

L'estudi s'ha desenvolupat en una plantació d'alzines carrasques (*Quercus ilex* subsp. *ballota* (Desf.) Samp.) inoculades amb tòfona negra (*T. melanosporum*) en fase de plena producció (~ 10 anys). L'objecte de l'estudi ha estat definir la posició relativa de 5 arbres productors consecutius en la parcel·la i geolocalitzar totes les tòfones produïdes al llarg de la campanya 2025-26.

Pel posicionament de l'arbrat s'ha emprat la mitjana de tres punts mesurats al voltant del tronc. Procedint d'aquesta manera, i garantint l'equidistància dels 3 punts vers l'arbre, el centre de l'individu quedava registrat independentment del gruix del tronc o de les irregularitats de la base (**Figura 1**). Per fer aquesta tasca, s'ha utilitzat un receptor GNSS multiconstel·lació amb correcció RTK en línia de la xarxa CatNet de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC). Aquest sistema ha permès compensar les possibles pèrdues de qualitat de les coordenades sota la capçada i assegurar una exactitud centimètrica en la posició dels arbres.



Figura 1. Utilització d'un receptor GNSS-RTK per al posicionament d'arbres al camp (esquerra) i mapa amb el resultat de fer la mitjana de tres punts al voltant del tronc per obtenir la posició exacta de l'arbre (dreta).

La georeferenciació de la collita a camp s'ha dut a terme amb una periodicitat setmanal. En cada visita s'ha comptat amb el suport d'un tofonaire expert i del mateix gos ensinistrat. Per garantir la precisió de la informació, el procés de registre s'ha sistematitzat en tres fases:

1. **Marcatge *in situ***: en el moment en què el gos localitzava una tòfona, el punt exacte d'extracció s'identificava amb una estaca senyalitzada mitjançant un codi únic i inequívoc. Aquest pas ha estat crucial per mantenir la traçabilitat de cada peça.
2. **Georeferenciació**: un cop finalitzada o durant la jornada de cerca, es procedia a enregistrar la posició exacta de cada estaca amb el receptor GNSS-RTK (**Figura 2**).
3. **Integració i processament**: a cada punt georeferenciat s'hi ha vinculat tota la informació recollida sobre el terreny. En el cas d'aquest estudi s'ha considerat el pes de la tòfona en brut (sense rentar).



Figura 2. Truficultor i el seu gos extraient una tòfona (esquerra) i investigador georeferenciant la posició d'una tòfona posteriorment a la seva extracció (dreta).

Integració en un Sistema d'Informació Geogràfica (SIG) i anàlisi del rendiment

Tota la informació recollida s'ha traslladat a un Sistema d'Informació Geogràfica (SIG) des d'on s'ha realitzat la seva anàlisi (**Figura 3**). Aquest tractament permet extreure dades clau a dues escales: (i) arbre i (ii) explotació. A nivell d'arbre es pot fer el seguiment de la producció individual i calcular valors mitjans, màxims i mínims. Cal destacar que a partir de les variables físiques registrades es pot determinar el rendiment econòmic real

de cada exemplar. Un cop feta aquesta diagnosi individual és possible saltar al segon nivell d'anàlisi, que implica avaluar el rendiment global de l'explotació.

En moltes ocasions, l'AP evidencia que cap cultiu produeix de forma homogènia, fins i tot dins una mateixa parcel·la. Aquesta variabilitat pot venir donada per l'heterogeneïtat del terreny, de l'entorn o per la pròpia naturalesa de cada individu, entre d'altres. El cas de la tubercultura no és una excepció, i no és d'estranyar, ja que cada arbre hoste prové d'una gla diferent. A més, en la inoculació dels lots intervenen múltiples carpòfors, fet que pot contribuir a incrementar aquesta variabilitat. La georeferenciació de la producció obre les portes a poder identificar seccions de la finca amb produccions anòmales, investigar-ne les causes i aplicar-hi les corresponents correccions mitjançant una gestió adient. Així mateix, el monitoratge temporal de la producció permet avaluar si els tractaments aplicats estan sent efectius o si cal ajustar el maneig en el procés.

En l'exemple proposat, s'observa una elevada variabilitat espacial entre els cinc individus consecutius, malgrat tots ells han rebut un maneig uniforme. Mentre que els dos arbres del sector est presenten una alta productivitat (nº tòfones = 18 unitats i producció = 700 g), els tres de l'oest queden per sota de les 10 tòfones i els 400 g. La detecció d'aquesta gran heterogeneïtat en la producció amb tan poca distància subratlla la importància de recol·lectar dades i ubicar-les en l'espai per entendre la complexitat del cultiu.

Distància i orientació: variables clau en la producció

Més enllà de l'anàlisi quantitativa basada en el rendiment per arbre, l'estudi detallat de la distribució espacial de les tòfones respecte l'arbre hoste (p.ex., posició i orientació) aporta dades d'alt valor agronòmic. Determinar aquesta posició relativa de la tòfona, complementant-la amb mesures *in situ*, pot revelar quins factors edàfics i climàtics a microescala (com la temperatura del sòl, o el contingut d'humitat) afavoreixen o limiten la producció. Aquest coneixement permet dissenyar una gestió dirigida a potenciar el rendiment des de l'arbre fins a escala de parcel·la. A nivell pràctic, les principals tasques de gestió associades a les plantacions amb tòfona negra es poden beneficiar d'aquest coneixement. Entre d'altres aplicacions, pot ser usat per definir la intensitat i la forma de la poda, especialment en aquells casos en què es detectin biaixos productius potencialment associats a l'orientació de la parcel·la. Addicionalment, pot servir per delimitar l'àrea d'influència radicular que s'ha de protegir de les tasques mecàniques durant l'etapa de creixement, o ajustar la localització de les esmenes i els regs. A més, la comprensió d'aquesta arquitectura espacial facilita la transició cap a una tubercultura de precisió on les intervencions deixen de ser uniformes per adaptar-se a la realitat productiva de cada peu.

En el cas concret de l'arbre més productiu de l'exemple presentat a la **Figura 3**, s'observa que la distància de totes les tòfones respecte al tronc és inferior als 2 metres, amb una concentració del 50 % dels exemplars a la franja d'entre 1 m i 1,5 m (**Figura 4**).

Flux de treball per a la georeferenciació i posterior presentació de resultats d'arbres tofoners

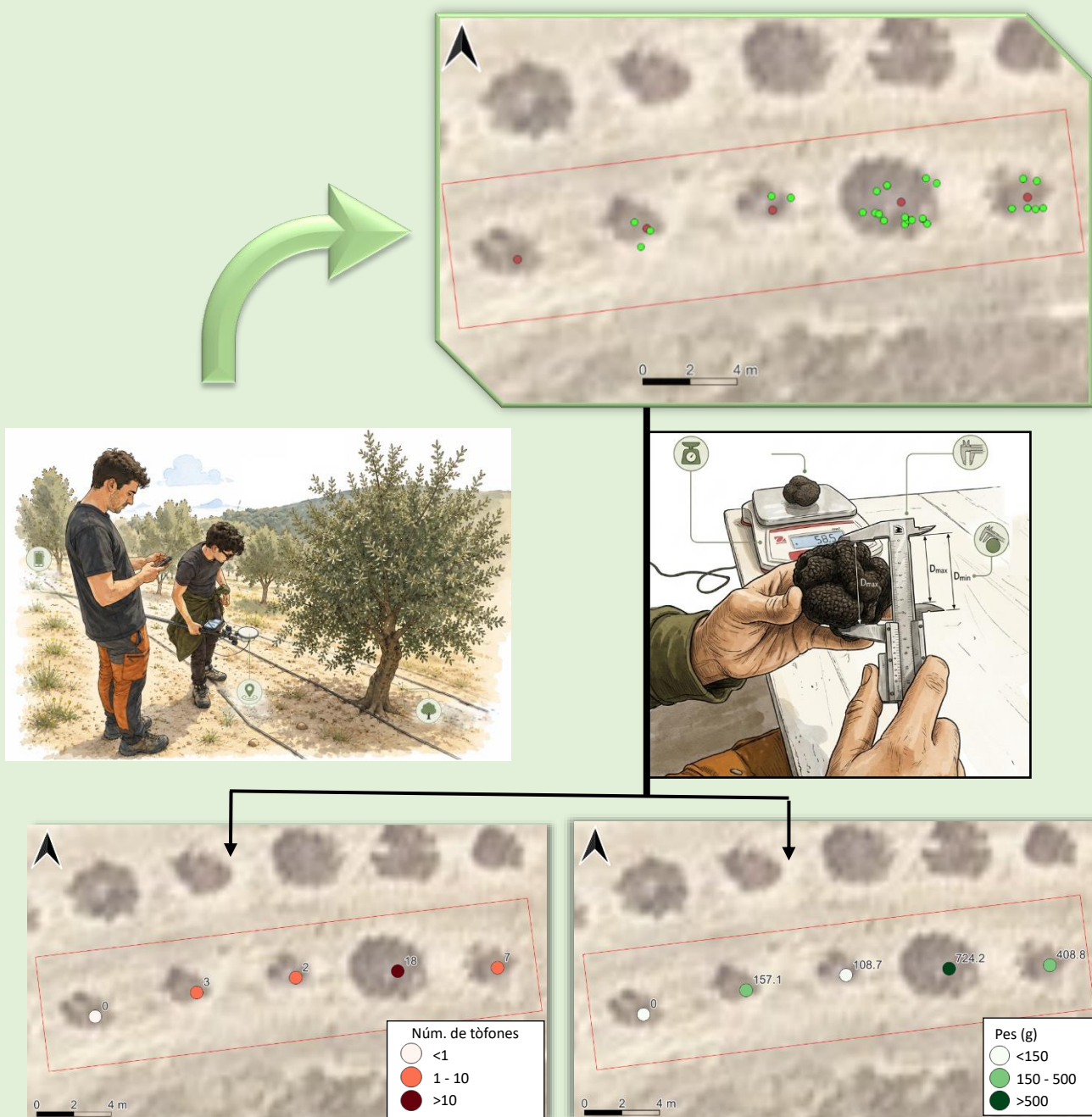


Figura 3. Esquema del flux de treball per a l'adquisició de dades i el seu posterior mapatge. S'hi pot observar com, després de la recollida i de la geolocalització de les tòfones, aquestes es pesen i es mesuren per tal d'elaborar una base de dades amb tota la informació recopilada. Als mapes inferiors es mostra la producció corresponent a cinc arbres, expressada tant en nombre de tòfones (esquerra) com en pes (dreta).

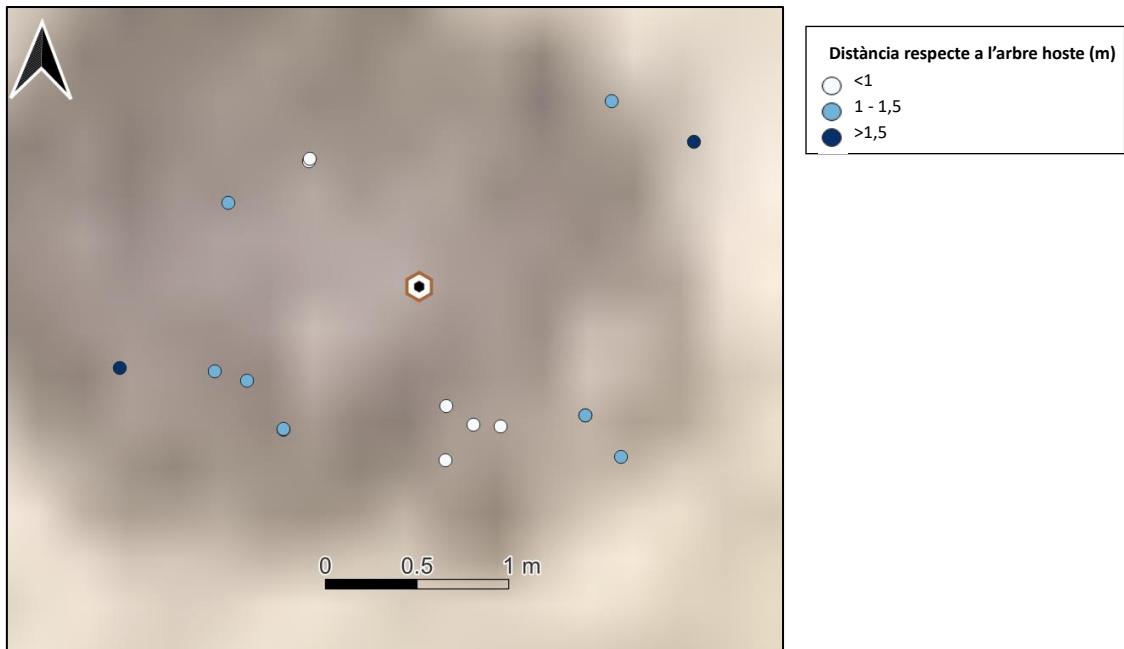


Figura 3. Mapa on es representa la distància de les tòfones respecte a l'arbre hoste, identificat amb un hexàgon.

Pel que fa a l'orientació (**Figura 5**), tot i presentar una variabilitat notable, destaca una menor producció a la secció nord. Si bé es tracta d'un arbre concret, pel que no es pot generalitzar al global de la plantació, aquest fet indica que la producció no es homogènia al voltant de l'hoste, fet que podria estar associat a la variabilitat dels factors edafoclimàtics a microescala.

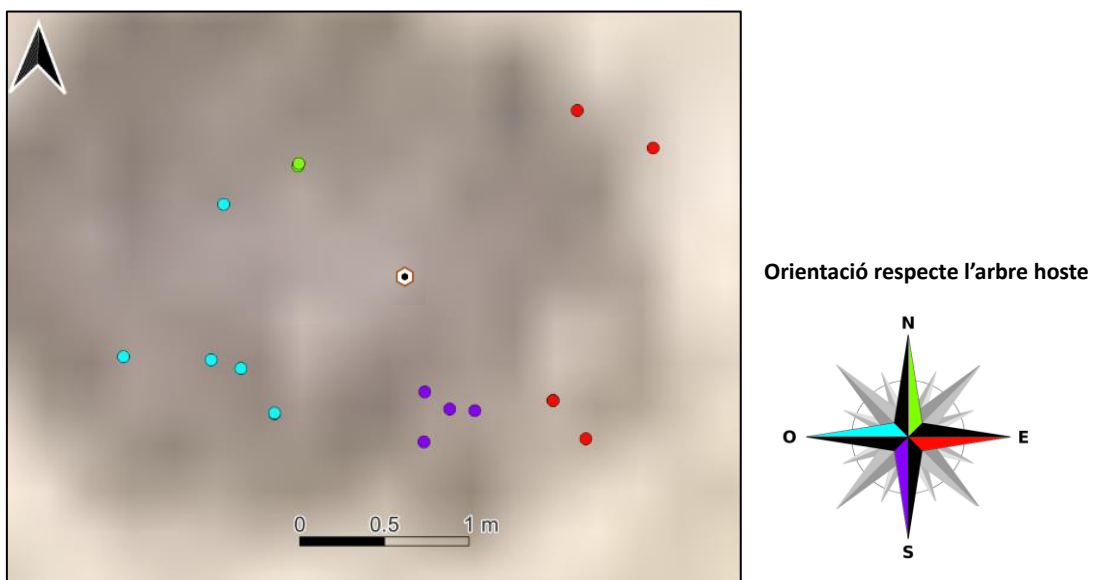


Figura 4. Mapa amb la orientació de les tòfones respecte l'arbre hoste, identificat amb un hexàgon. Els colors es corresponen amb els punts cardinals.

Conclusions

L'ús de tecnologies de posicionament global (GNSS) es consolida com una eina fonamental per la georeferenciació acurada de cada captura. Aquesta tecnologia no només permet cartografiar amb exactitud la distribució espacial de la producció, sinó que facilita el seguiment evolutiu de la plantació a llarg termini i l'optimització de les tasques de maneig localitzat.

És recomanable complementar el recompte numèric de tòfones amb l'obtenció de variables com el pes. L'anàlisi conjunta d'indicadors de qualitat comercial aporta un valor afegit clau per comprendre quins factors biòtics o ambientals influeixen en el correcte desenvolupament del carpòfor i intentar replicar-los a nivell de parcel·la.

Els resultats confirmen una heterogeneïtat en la producció de tòfones, tant entre arbres d'una mateixa parcel·la com al voltant de cada arbre hoste. Aquesta variabilitat posa de manifest la complexitat de les interaccions sòl-planta-fong i justifica la implementació d'estratègies de gestió diferenciades, típiques a l'Agricultura de Precisió (AP).

Agraïments

Aquest article divulgatiu s'emmarca en la col·laboració entre Agrotecnio i el CTFC a través del grup de Recerca en Agròtica i Agricultura i Ramaderia de Precisió (GRAP) i el grup de Micologia i Tubercultura, respectivament, en el marc del projecte DIPROTES. Activitat cofinançada per la UE a través de la intervenció 7201 del Pla estratègic de la PAC 2023-2027.

Referències

- Alonso Ponce, R., Ágreda, T., Águeda, B., Aldea, J., Martínez-Peña, F., & Modrego, M. P. (2014). **Soil physical properties influence “black truffle” fructification in plantations.** *Mycorrhiza*, 24(S1), 55–64. <https://doi.org/10.1007/s00572-014-0558-7>
- Büntgen, U., Oliach, D., Martínez-Peña, F., Latorre, J., Egli, S., & Krusic, P. J. (2019). **Black truffle winter production depends on Mediterranean summer precipitation.** *Environmental Research Letters*, 14(7). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab1880>
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2020). **GNSS—Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and More.** En *Handbook of Global Navigation Satellite Systems* (pp. 35–64). Springer International Publishing.
- Saiz-Rubio, V., & Rovira-Más, F. (2020). **From top-down to bottom-up: A standard framework for precision agriculture based on remote sensing and unmanned ground vehicles.** *Computers and Electronics in Agriculture*, 158, 213–225.

Zhang, L., & Wang, J. (2026). **Evaluation of RTK-GNSS positioning performance in challenging environments for autonomous agricultural vehicles.** *Measurement*, 230, 114512.